

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 11 (152)

ноябрь

2013

Редакционный совет:

АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
 БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
 ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
 КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.
 КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
 КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
 ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
 МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
 МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
 ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
 РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
 СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
 СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
 СИРОТКИН О. С., чл.-корр. РАН, проф.
 СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.
 СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
 СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
 ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
 ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
 ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
 ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
 ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
 ЮШЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
 АНТОНОВ Б. И.
 АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
 БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
 ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
 ВОСТРИКОВ А. С., д. т. н., проф.
 ГРАДЕЦКИЙ В. Г., л. т. н., проф.
 ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
 ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
 КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
 КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.
 КУЗЬМИН Н. Н., к. т. н., доц.
 ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
 ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
 ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
 ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.
 РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
 СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс., с. н. с.
 ТИМОФЕЕВ А. В., д. т. н., проф.
 ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
 ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
 ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
 ШАЛОБАЕВ Е. В., к. т. н., доц.
 ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Тарарыкин С. В., Аполонский В. В., Терехов А. И.** Исследование влияния структуры и параметров полиномиальных регуляторов "входа—выхода" на робастные свойства синтезируемых систем 2
- Чебурахин И. Ф.** О логическом управлении и обработке информации в дискретных технических системах на основе функциональных уравнений 9

УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

- Краснодубец Л. А.** Аналитическое конструирование законов траекторного управления транспортными средствами на воздушной подушке 17
- Брискин Е. С., Леонард А. В.** О безударном режиме движения шагающей машины со сдвоенным поворотным движителем 25

**ПЛАНИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ**

- Скобелев П. О., Симонова Е. В., Кожевников С. С., Майоров И. В., Феоктистов А. Л., Клейменова Е. М., Полончук Е. В.** Обзор систем адаптивного планирования производства 28
- Коростелев В. Ф.** Управление процессами обработки металлов и сплавов по заданной траектории в пространстве состояний. 37
- Дрозд О. В., Капулин Д. В.** Моделирование систем управления и диспетчеризации технологических процессов с использованием современных информационных технологий 41

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- Новоселов Б. В., Николаев В. Я.** Концепция разработки, построения и эффективного использования сервисных средств следящих приводов 47
- Епифанов О. К., Колпаков А. И.** Тенденции развития современных силовых электронных модулей для электроприводов малой мощности. 52

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ПРИКЛАДНЫХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

- Соловьев И. В.** Обнаружение и оценивание координат изображений звезд в датчиках астроориентации с помощью алгоритмов прогноза и фильтрации Калмана 59
- Набатчиков А. М., Бурлак Е. А.** Анализ характеристик деятельности человека-оператора в динамическом контуре слежения 63
- Девятисильный А. С., Числов К. А.** Нейросетевая коррекция безгироскопной инерциальной навигационной системы по спутниковой навигационной информации. 67
- Contents** 71

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

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

УДК 681.5.015.24

С. В. Тарарыкин, д-р техн. наук, проф.,
tsv@ispu.ru,

В. В. Аполонский, аспирант,
vlad-apolonskiy@yandex.ru,

А. И. Терехов, канд. техн. наук, доц.,
terehov@eims.ispu.ru,

Ивановский государственный энергетический
университет имени В. И. Ленина

Исследование влияния структуры и параметров полиномиальных регуляторов "входа—выхода" на робастные свойства синтезируемых систем¹

Исследуется влияние степени полинома знаменателя передаточной функции динамического регулятора "входа—выхода" на робастные свойства систем автоматического управления, синтезированных методом модального управления.

Рассматриваются особенности работы систем в так называемых "зонах риска", появляющихся при формировании отрицательных коэффициентов полиномов регулятора и определяющих его неминимально-фазовый характер. Анализируются возможности работы систем в этих условиях путем построения соответствующих областей робастной устойчивости при вариациях параметров объекта управления.

Ключевые слова: система автоматического управления, полиномиальный регулятор, зона робастности, нули и полюсы, области устойчивости, вариации параметров

Определение робастных свойств систем автоматического управления (САУ), т. е. их способностей сохранять показатели качества при вариациях внутренних параметров, является одним из актуальных и сложных вопросов автоматического управления.

Проведенные ранее исследования [1] позволили установить, что формирование неминимально-фазовых звеньев в составе полиномиальных регуляторов (ПР) "входа—выхода" при синтезе систем управления минимально-фазовыми объектами и появление отрицательных коэффициентов в полиномах их передаточных функций (ПФ) может приводить к существенному ухудшению робастных свойств синтезируемых САУ (рис. 1, а, б). Предложена методика определения соответствующих областей положительных (показаны штриховкой на

рис. 1, в, г) и областей отрицательных коэффициентов полиномов регулятора. Эти зоны образуются при вариациях темпа нарастания переходной характеристики САУ путем изменения среднегеометрического корня (СГК) характеристического полинома (ХП) заданного вида (Ньютона, Бесселя, Баттерворта и др.). Размеры и формы таких областей существенно зависят от исходного распределения нулей и полюсов, а также от структуры объекта управления (ОУ). При синтезе САУ в целях повышения параметрической грубости рекомендовано располагать их динамические характеристики в пределах областей положительных коэффициентов ПР (в "зонах робастности"), что наиболее просто реализуется соответствующим выбором значения СГК ХП.

Однако все исследования были выполнены в основном для минимизированных структур ПР дифференцирующего типа с нулевым порядком полинома числителя ПФ, т. е. при $\deg C(s) = 0$. Робастные свойства САУ с более сложными ПР при $\deg C(s) > 0$, обеспечивающими лучшую помехоустойчивость, всесторонне не анализировали.

Кроме того, детальные исследования работы САУ с ПР в так называемых "зонах риска" при наличии отрицательных коэффициентов полиномов регулятора не проводили. Полную оценку влияния вариаций всех параметров ОУ на динамические характеристики САУ с ПР и анализ возможностей их работы в этих условиях эксплуатации не выполняли.

Важно отметить, что указанные "зоны риска" обычно оказываются существенно шире соответствующих "зон робастности". Поэтому имеющиеся резервы обеспечения всего комплекса показателей качества САУ (быстродействие, точность, помехоустойчивость, энергозатраты, параметрическая грубость и др.) при выполнении жесткого требования положительности коэффициентов ПР могут оказаться в конкретных условиях недоиспользованными, а рекомендуемое для выхода из "зоны риска" увеличение СГК ХП может привести к необоснованному завышению быстродействия и энергетических затрат на управление синтезируемой САУ.

Все это делает актуальным более детальное исследование влияния структуры и параметров ПР, в том числе неминимально-фазовых, на робастные свойства синтезируемых САУ, включая изучение особенностей их функционирования в соответствующих "зонах риска".

Исследование строится по принципу нарастания степени сложности ОУ и ПР и сопровождается детализированными вычислительными экспериментами. В основе синтеза ПР используются методы теории модального управления. Результаты исследований

¹ Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ в области технических наук № НШ1559.2012.8

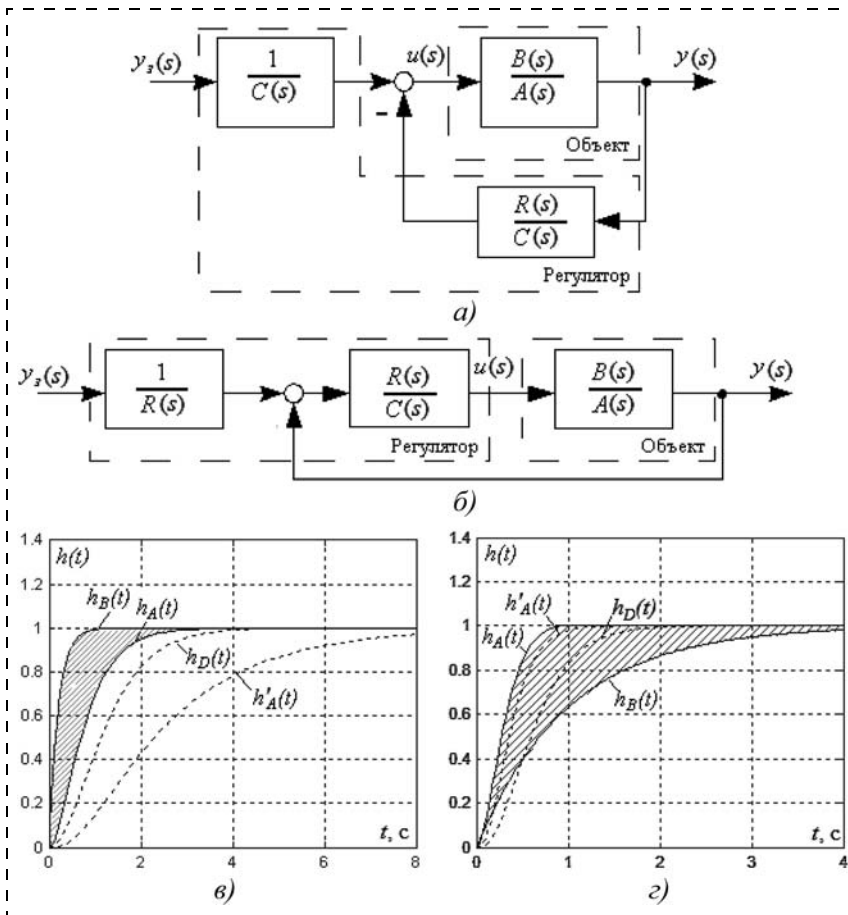


Рис. 1. Варианты структурной реализации САУ на базе ПР (а, б) и представление областей параметрической грубости (затрихованы) для ОУ с "быстрыми" (е) и "медленными" (з) нулями

сопоставляются с соответствующими данными, полученными ранее для САУ на базе минимизированных минимально-фазовых ПР с положительными коэффициентами полиномов [1, 2] и для САУ с безынерционными регуляторами состояния [3, 4].

1. Постановка задачи

Будем рассматривать варианты полиномиального модального управления линейными динамическими объектами различного порядка по эквивалентным структурным схемам, приведенным на рис. 1, а, б. Выбор конкретной структуры САУ определяется требованием обеспечения устойчивости внеконтурной части ПР с ПФ $1/R(s)$ или $1/C(s)$. При этом за основу построения системы принимается структурная схема с гурвицевым ХП внеконтурного префильтра.

Передаточная функция объекта управления имеет вид:

$$H_0(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = \frac{B(s)}{A(s)},$$

где s — комплексная переменная Лапласа; $A(s)$ и $B(s)$ — соответственно ХП и полином воздействия;

$n = \deg A(s)$, $m = \deg B(s)$ — степени полиномов $A(s)$, $B(s)$, причем $m \leq n$.

Ограничимся исследованием особенностей управления минимально-фазовыми объектами.

Полиномы передаточных функций регуляторов (рис. 1, а, б) могут быть представлены следующим образом:

$$R(s) = r_k s^k + \dots + r_1 s + r_0;$$

$$C(s) = s^l + c_{l-1} s^{l-1} + \dots + c_1 s + c_0,$$

где $k = \deg R(s)$, $l = \deg C(s)$ — степени полиномов $R(s)$ и $C(s)$.

Степени и параметры полиномов определяются формированием и решением соответствующего уравнения синтеза регулятора [5, 6]

$$A(s)C(s) + B(s)R(s) = D(s), \quad (1)$$

где желаемый ХП

$$D(s) = s^p + d_{p-1} s^{p-1} + \dots + d_1 s + d_0, \\ p = \deg D(s),$$

соответствует заданным требованиям к показателям качества САУ, причем

$$k = n - 1, p = n + l, \\ l \geq \begin{cases} m - 1 & \text{при } m > 0, \\ 0 & \text{при } m = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Исследуются структурные решения ПР, соответствующие значениям $l = 0, 1, \dots, (k + 1)$. Соблюдение требования "технической реализуемости" ПР при $l < k$ обеспечивается [7] переходом

от аналогового прототипа к цифровой форме регулятора методом численного интегрирования Эйлера.

Поставим задачу определения и сопоставления размеров областей устойчивости различных типов САУ на базе ПР разной степени сложности с положительными и отрицательными коэффициентами полиномов при вариациях внутренних параметров минимально-фазового ОУ.

Выполним анализ областей устойчивости САУ в "зонах риска" и попытаемся ответить на вопросы о возможности и целесообразности работы систем в этих условиях, а также выработать соответствующие рекомендации по обеспечению их успешного функционирования.

2. Особенности "вход-выходного" модального управления объектами второго порядка с переменными параметрами

Исследуем возможности модального управления объектом с передаточной функцией (ПФ) общего вида

$$H_0(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (3)$$

где a_0, a_1, b_0, b_1 — положительные коэффициенты, которые могут изменяться в процессе работы.

Согласно работам [1, 2] область робастного "вход-выходного" управления заданным объектом можно приближенно очертить (рис. 1, в, з), построив переходные характеристики $h_A(t)$, $h_B(t)$ приведенных динамических звеньев с соответствующими ПФ

$$H_A(s) = \frac{a_0}{A(s)}, H_B(s) = \frac{b_0}{B(s)}.$$

Оценивая время нарастания t_A , t_B указанных переходных характеристик, приходим к понятию "быстрых" и "медленных" нулей ОУ соответственно для $t_B < t_A$ и $t_B > t_A$, что подобно трактовкам этих определений, принятым в работе [8] для корневой области.

2.1. Влияние степени характеристического полинома модального регулятора на робастные свойства САУ

Рассмотрим несколько вариантов САУ с ПР, различающимися степенью полинома знаменателя $C(s)$. В качестве желаемого ХП системы примем полином Ньютона $D(s) = (s + \Omega_0)^p$, формирующий наиболее благоприятные переходные процессы САУ. Введем обозначения "ПР k/l " для представления структуры синтезируемого регулятора.

Выполним оценку влияния степени полинома $C(s)$ знаменателя ПР на размеры области робастной устойчивости САУ с тремя типами регуляторов: ПР 1/0, ПР 1/1 и ПР 1/2. На первом этапе исследований рассмотрим случай "быстрого" нуля ОУ (3), приняв для определенности следующие исходные значения параметров: $a_0 = 6$, $a_1 = 5$; $b_0 = 5$, $b_1 = 1$.

Взаимосвязь времени нарастания t_{Π} стандартной переходной характеристики САУ, имеющей биномиальный ХП, с величиной СГК Ω_0 может быть установлена по следующей эмпирической формуле [9]:

$$t_{\Pi} = \frac{p + 2\sqrt{p-1}}{\Omega_0},$$

которая позволяет отразить во временной области зону расположения переходных характеристик сис-

темы, получаемых при вариациях СГК Ω_0 в соответствующей корневой области.

В результате синтеза САУ с указанными типами ПР по уравнению (1) при $\Omega_0 = \text{var}$ получены и представлены в табл. 1 (в корневой и временной областях) точные оценки размеров их "зон робастности", соответствующих положительным значениям коэффициентов ПФ регуляторов.

Сравнение размеров соответствующих "зон робастности", представленных во временной области, наглядно показывают их расширение при повышении степени полинома $C(s)$ в условиях управления заданным ОУ. Особенно заметный положительный эффект наблюдается при переходе от нулевой к первой степени полинома $C(s)$. Следует указать, что при этом регулятор формирует не "чистые производные" выходного сигнала, а "производные с замедлением", что, кроме того, способствует повышению помехоустойчивости САУ.

Попытаемся дать объяснение полученным результатам и установить, носят ли они общий характер или наблюдаются только при управлении объектами с определенными сочетаниями параметров.

Синтезируем регулятор типа ПР 1/1 для значения СГК $\Omega_0 = 2 \text{ с}^{-1}$, соответствующего приближению к правой границе "зоны робастности", обусловленной переходной характеристикой $h_A(t)$ (рис. 1, в). Учитывая последовательное включение ПР и ОУ в контуре управления (рис. 1, а, б), отделим полученный полином $C(s)$ от регулятора и присоединим его сомножителем к ХП объекта. При этом образуется новый ХП $A'(s) = A(s)C(s)$, для которого $\text{deg}A'(s) = \text{deg}A(s) + \text{deg}C(s) = n + 1 = 3$.

Для видоизмененного таким образом ОУ правая граница "зоны робастности" перемещается дальше вправо, занимая положение переходной характеристики $h'_A(t)$ приведенного звена с ПФ $H'_A(s) = a'_0/A'(s)$, показанной штриховой линией на рис. 1, в.

Однако согласно (2) такая расширенная зона параметрической грубости САУ может быть достигнута только регулятором повышенной степени — ПР 2/0. В нашем случае (после отделения полинома $C(s)$) регулятор имеет более простой вид — ПР 1/0.

Таблица 1

Области параметрической грубости САУ с различными типами ПР

Структура регулятора	Передаточная функция регулятора: $H_A(s)$	Зона робастности САУ			
		ОУ с "быстрыми" нулями		ОУ с "медленными" нулями	
		в корневой области $\Omega_0, \text{с}^{-1}$	во временной области $t_{\Pi}, \text{с}$	в корневой области $\Omega_0, \text{с}^{-1}$	во временной области $t_{\Pi}, \text{с}$
ПР 1/0	$\frac{r_1 s + r_0}{c_0}$	(2,55; 7,45)	(1,56; 0,54)	(0,55; 5,81)	(7,27; 0,69)
ПР 1/1	$\frac{r_1 s + r_0}{s + c_0}$	(1,9; 9,91)	(3,07; 0,59)	(4,5; 7,45)	(1,30; 0,78)
ПР 1/2	$\frac{r_1 s + r_0}{s^2 + c_1 s + c_0}$	(2,53; 12,37)	(2,95; 0,6)	(5,74; 8,80)	(1,30; 0,85)

Результаты синтеза САУ при вариациях времени переходного процесса и степени полинома $C(s)$

Тип ОУ	Структура регулятора	Время переходного процесса $t_{п}$, с	СГК Ω_0 , c^{-1}	r_1	r_0	c_0
С "быстрыми" нулями	ПР 1/0	2,00	2,0	-0,50	-1,00	1,50
		2,00	2,9	0,26	0,76	3,49
	ПР 1/1	0,64	9,1	6,01	129,47	16,18
		0,40	14,6	-112,41	437,38	151,13
С "медленными" нулями	ПР 1/0	3,00	1,3	0,995	1,62	0,005
	ПР 1/1	3,00	1,9	-5,01	-25,82	1,04

Тем не менее, определенная близость свойств этих регуляторов в некотором диапазоне параметров позволяет расширить "зону робастности" САУ, как это показано штриховым графиком $h_D(t)$ на рис. 1, в, хотя и в меньших размерах, чем это фиксировалось переходной характеристикой $h'_A(t)$. При этом эффект расширения "зоны робастности" будет более выраженным именно после замены нулевой степени полинома $C(s)$ на любую ненулевую.

Из приведенного объяснения и его графической интерпретации на рис. 1, в следует, что расширение зоны параметрической грубости САУ за счет повышения степени полинома $C(s)$ может быть достигнуто при однотипных переходных характеристиках, т. е. близких видах распределения полюсов ОУ и синтезируемой САУ и, кроме того, — при управлении такими объектами, у которых нули оказываются "быстрее", чем полюсы.

При этом "зона робастности" САУ с ПР "входа—выхода", у которого $\deg C(s) > 0$, может оказаться шире соответствующей области параметрической грубости САУ на базе безынерционного регулятора состояния (РС) [2, 3].

В тех случаях, когда нули ОУ оказываются "медленнее", чем его полюсы, переходные характеристики $h_A(t)$ и $h_B(t)$ меняются местами (рис. 1, з), и перемещение характеристики $h_A(t)$ вправо приведет, напротив, к сужению "зоны робастности" САУ. Как показано в работе [2, с. 78—81], при этом может произойти также дополнительное сужение "зоны робастности" за счет смещения влево ее правой границы, обусловленное различием порядков полиномов $B(s)$, $A(s)$, $D(s)$ и видов распределения их корней. Это наглядно иллюстрируют данные табл. 1, полученные на втором этапе исследований при изучении особенностей управления ОУ (3) со следующими параметрами: $a_0 = 32$, $a_1 = 9,8$, $b_0 = 1$, $b_1 = 1$.

Как следствие, при близости видов распределения полюсов исходного ОУ и синтезируемой САУ в случае "медленных" нулей объекта с увеличением степени полинома $C(s)$ регулятора может произойти существенное ухудшение параметрической грубости замкнутой "по выходу" системы.

Результаты синтеза различных вариантов САУ с ПР 1/0 и ПР 1/1 для объектов с "быстрым" и "медленным" нулями соответственно при $t_{п} = 2$ с и $t_{п} = 3$ с приведены в табл. 2.

Результаты расчета переходных характеристик САУ, полученные для исходных параметров объектов (рис. 2, графики 1, 2), а также при уменьшении параметра a_1 и увеличении b_0 на 35 % в условиях использования регуляторов типа ПР 1/0 (рис. 2, графики 3) и ПР 1/1 (рис. 2, графики 4) для управ-

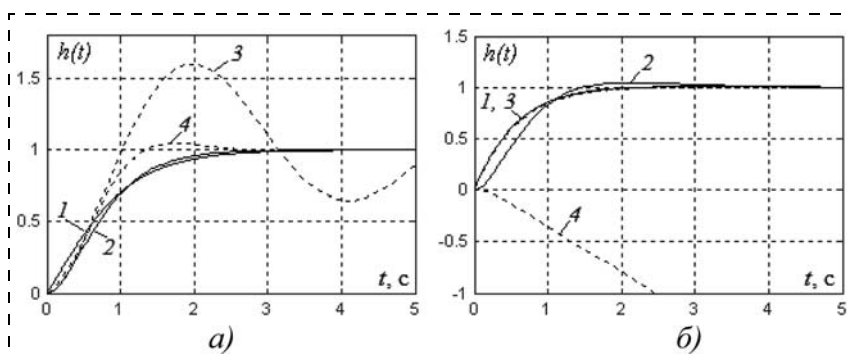


Рис. 2. Графики переходных процессов САУ с ПР для ОУ с "быстрыми" (а) и с "медленными" нулями (б)

ления ОУ с "быстрым" и "медленным" нулями наглядно иллюстрируют выявленные выше закономерности.

2.2. Особенности модального управления объектами в "зонах риска"

Для наглядного графического представления областей робастной устойчивости синтезируемых САУ будем, как предложено в работе [4], использовать сечения многомерных областей их состояний различными плоскостями, формируемыми попарными вариациями параметров ОУ относительно их исходных (номинальных) значений.

Сравнительный анализ таких сечений (рис. 3, а, б), построенных для САУ объектом с "быстрым" нулем на базе ПР 1/1 соответственно при $\Omega_0 = 9,1$ c^{-1} и $\Omega_0 = 14,6$ c^{-1} (табл. 2), показывает, что, аналогично САУ на базе безынерционных РС [4] с положительными обратными связями, даже небольшие вариации СГК Ω_0 могут приводить к скачкообразным изменениям свойств, обусловленным переходом системы из "зоны робастности" в "зону риска" и появлением отрицательных коэффициентов полиномов регулятора.

В то же время более детальное исследование сечений областей состояний САУ с отрицательными коэффициентами ПР позволяет выявить потенциальные возможности их устойчивой работы в достаточно широких пределах изменений отдельных параметров ОУ. Например, при $\Omega_0 = 14,6$ c^{-1} сис-

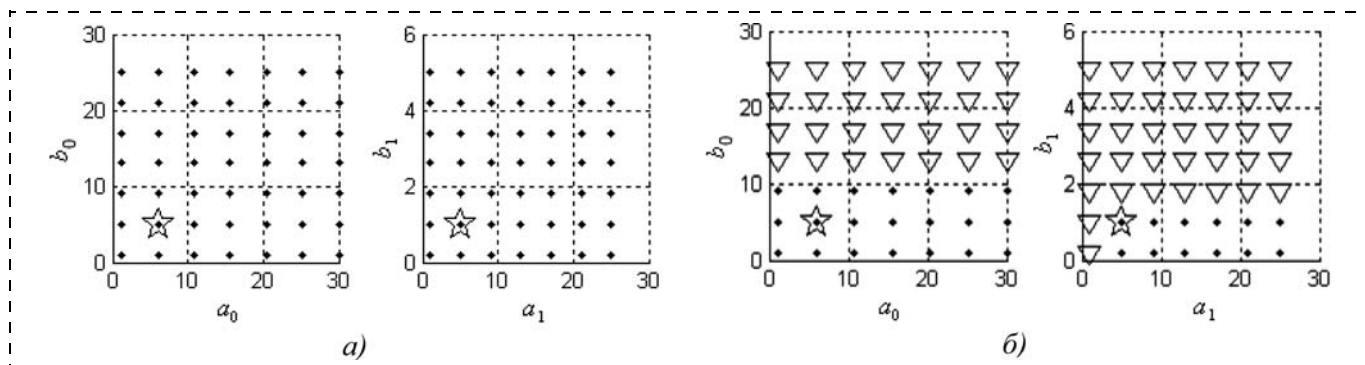


Рис. 3. Сечения многомерных областей состояния САУ с ПР 1/1 при $\Omega_0 = 9,1 \text{ с}^{-1}$ (а) и $\Omega_0 = 14,6 \text{ с}^{-1}$ (б)

тема не допускает значительных вариаций параметров b_0 и b_1 , однако сохраняет способность парировать достаточно большие изменения параметров a_0 и a_1 (рис. 3, б).

Аналогичные закономерности проявляются и для САУ объектом с "медленным" нулем, с той лишь разницей, что повышение степени полинома $C(s)$ является нерациональным, поскольку сужает область робастной устойчивости. При этом более целесообразным является использование нулевой степени полинома $C(s)$ с последующей цифровой реализацией ПР, например методом Эйлера [2, 7].

Для большей уверенности в каждом конкретном случае полученные теоретические результаты могут быть проверены и подтверждены численным моделированием соответствующих вариантов САУ.

Рассмотрим, как проявляются выявленные закономерности при управлении распространенными ОУ более сложной структуры и высокого порядка.

3. Модальное "вход-выходное" управление электромеханическими объектами

Исследуем особенности "вход-выходного" (полиномиального) управления типовым двухмассовым электромеханическим объектом (ЭМО1) с вязкоупругой кинематической передачей [10]. Его функциональная и структурная схемы приведены соответственно на рис. 4, а, б, где СП — безынерционный силовой преобразователь, ЭД — электродвигатель, РО — рабочий орган, КП — кинематическая передача, u , U — управляющее и выходное напряжение силового преобразователя; I — ток якорной цепи электродвигателя; M , M_y — электромагнитный момент и момент упругости; Ω_1 , Ω_2 — угловые скорости первой и второй масс; C — конструктивный параметр двигателя; T_a , R_a — постоянная времени и сопротивление якорной цепи; J_1 , J_2 — моменты инерции первой и второй масс; C_{12} — коэффициент жесткости; K_d , K_T — коэффициенты трения; $K_{сп}$ — коэффициент передачи силового преобразователя.

Исходные параметры ЭМО1 представлены в табл. 3. В данном случае наименее стабильными считаются параметры механической части C_{12} и J_2 .

Передаточная функция ЭМО1 от входа к выходу определяется выражением

$$H(s) = \frac{\Omega_2(s)}{u(s)} = \frac{1,32s + 7,92}{s^4 + 8,088s^3 + 19,62s^2 + 30,89s + 31,82}$$

При этом

$$H_A(s) = \frac{31,82}{s^4 + 8,088s^3 + 19,62s^2 + 30,89s + 31,82}, t_A = 6,65 \text{ с},$$

$$H_B(s) = \frac{7,92}{1,32s + 7,92}, t_B = 0,5 \text{ с} < t_A,$$

т. е. имеем случай "быстрого" нуля объекта.

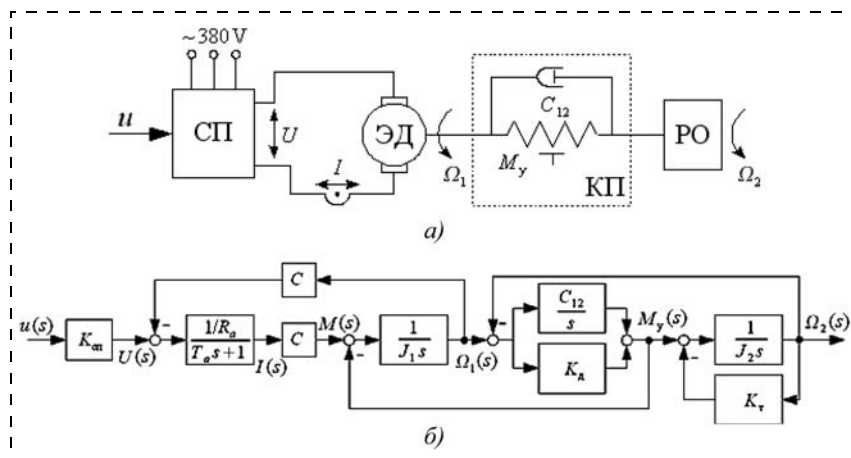


Рис. 4. Функциональная (а) и структурная (б) схемы двухмассового электромеханического объекта (ЭМО1)

Таблица 3

Исходные параметры двухмассового электромеханического объекта (ЭМО1)

$K_{\text{сп}}$	R_a , Ом	T_a , с	C , Бб	J_1 ,	J_2 ,	C_{12} , H · м	K_d ,	K_T ,
				кг · м ²			кг · м ² /с	
22	3,15	0,5	0,16	0,5	0,85	1,5	0,25	4,5

Таблица 4

Области параметрической грубости САУ с ЭМО1 и различными типами ПР

Тип ПР	Передаточная функция регулятора $H_r(s)$	Зона робастности	
		в корневой области Ω_0 , с ⁻¹	во временной области t_{Π} , с
ОУ с "быстрыми" нулями (ЭМО1)			
ПР3/0	$\frac{r_3 s^3 + r_2 s^2 + r_1 s + r_0}{c_0}$	(2,9; 9,1)	(2,57; 0,82)
ПР3/1	$\frac{r_3 s^3 + r_2 s^2 + r_1 s + r_0}{s + c_0}$	(2,4; 11,3)	(3,75; 0,80)
ПР3/2	$\frac{r_3 s^3 + r_2 s^2 + r_1 s + r_0}{s^2 + c_1 s + c_0}$	(3,3; 13,4)	(3,17; 0,78)
ПР3/3	$\frac{r_3 s^3 + r_2 s^2 + r_1 s + r_0}{s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0}$	(3,8; 15,6)	(3,13; 0,77)
ОУ с "медленными" нулями (ЭМО2)			
ПР2/0	$\frac{r_2 s^2 + r_1 s + r_0}{c_0}$	(0,7; 13,8)	(8,33; 0,43)
ПР2/1	$\frac{r_2 s^2 + r_1 s + r_0}{s + c_0}$	(10,9; 17,7)	(0,68; 0,43)
ПР2/2	$\frac{r_2 s^2 + r_1 s + r_0}{s^2 + c_1 s + c_0}$	(14,1; 20)	(0,64; 0,46)

ЭМО1 имеет один ноль $s_1 = -6$ и четыре полюса: $s_1 = -5,25$, $s_2 = -1,99$, $s_{3,4} = -0,42 \pm 1,69i$. Условия робастной устойчивости системы управления данным объектом с динамическим ПР при задании биномиального ХП Ньютона для различных вариантов полинома $C(s)$ представлены в табл. 4.

Полученные результаты наглядно иллюстрируют расширение временной "зоны робастности" для САУ с ПР 3/1.

В табл. 5 приведены результаты синтеза регуляторов типа ПР 3/0 и ПР 3/1 для управления ЭМО1

при $t_n = 3,7$ с, а на рис. 5, а представлены соответствующие переходные характеристики САУ для исходных параметров объекта (графики 1, 2) и при увеличении параметра C_{12} на 67 % (графики 3, 4). Результаты расчета подтверждают улучшение робастных свойств системы на базе регулятора, у которого $\deg C(s) = 1$.

Приведенные на рис. 6 области сечений пространства параметров САУ с ПР 3/1 для $\Omega_0 = 2,43 c^{-1}$ и $\Omega_0 = 2,25 c^{-1}$ (табл. 5) свидетельствуют о скачкообразном ухудшении робастных свойств САУ при появлении отрицательных коэффициентов полиномов регулятора, но, тем не менее, указывают на достаточно высокие потенциальные возможности работы системы в "зоне риска" при вариации параметров C_{12} и J_2 .

Рассмотрим второй тип электромеханического объекта управления (ЭМО2), функциональная и структурная схемы которого представлены на рис. 7, а, б, где СЭП — следящий электропривод с безынерционным силовым преобразователем и токовым контуром, ПП — преобразователь перемещения, U_ϕ — сигнал задания угла, ϕ_1 — угол положения вала, x_1, x_2 — линейные перемещения, β — коэффициент сопротивления демпфера, c_1, c_2 — жесткость пружин. Их значения указаны в табл. 6.

Постоянные времени T_1 и T_2 и коэффициент G_0 рассчитываются исходя из следующих соотношений:

$$T_1 = \frac{\beta}{c_1}; T_2 = \frac{c_1}{c_1 + c_2} T_1; G_0 = \frac{c_1}{c_1 + c_2}.$$

Для данного объекта имеем:

$$H(s) = \frac{X_2(s)}{U_\phi(s)} = \frac{s + 0,6667}{s^3 + 33,383s^2 + 466,15s + 2592,7};$$

$$H_A(s) = \frac{2592,7}{s^3 + 33,383s^2 + 466,15s + 2592,7};$$

$$H_B(s) = \frac{0,6667}{s + 0,6667},$$

Таблица 5

Результаты синтеза САУ при вариациях времени переходного процесса и степени полинома $C(s)$

Тип ОУ	Структура регулятора	Время переходного процесса t_n, c	СГК Ω_0, c^{-1}	r_3	r_2	r_1	r_0	c_0
С "быстрыми" нулями	ПР 3/0	3,7	2,02	-1,11	-2,32	-4,15	-7,79	2,46
	ПР 3/1	4,0	2,25	3,35	11,09	15,00	12,32	-1,26
	ПР 3/1	3,7	2,43	2,83	10,89	15,17	9,36	0,34
С "медленными" нулями	ПР 2/0	4,0	1,45	—	1,00	3,70	3,80	0,0002
	ПР 2/1	4,0	1,90	—	-26,6	-449,9	-2578,5	0,67

Таблица 6

Исходные параметры двухмассового электромеханического объекта (ЭМО2)

b_0	a_1	a_0	$K_{пп}$	$\beta, Н \cdot c/м$	$c_1, Н \cdot м$	$c_2, Н \cdot м$	T_1, c	T_2, c	G_0
1	20,6	202,8	1	3	2	36,36	1,5	0,078	0,052

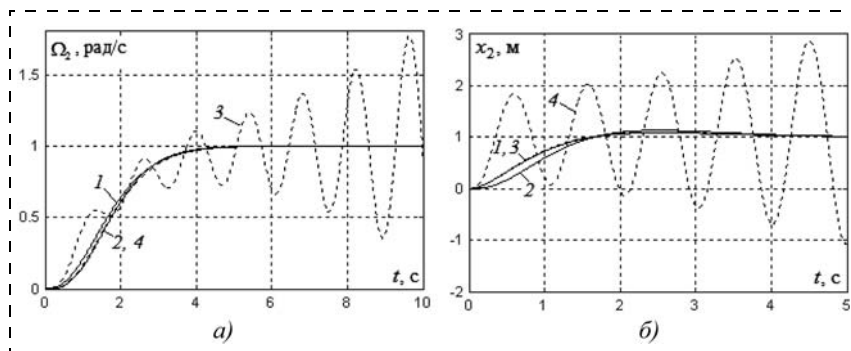


Рис. 5. Графики переходных процессов САУ с ПР для ОУ с "быстрыми" (а) и "медленными" нулями (б)

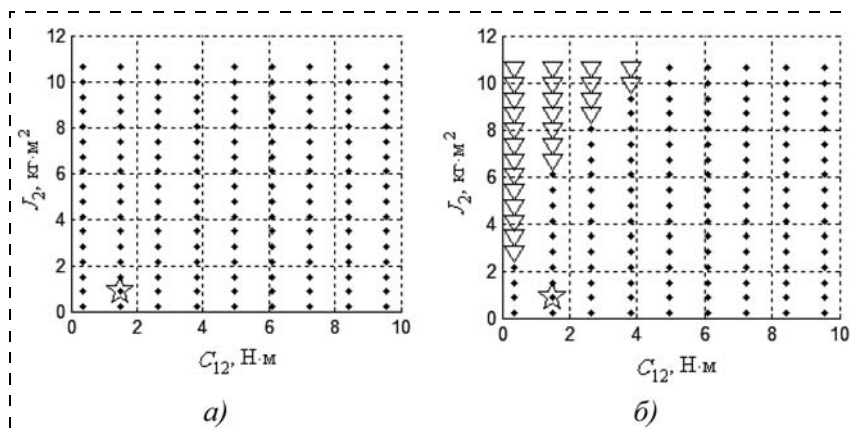


Рис. 6. Области сечений пространства параметров САУ с ПР 3/1 для $\Omega_0 = 2,43 \text{ c}^{-1}$ (а) и $\Omega_0 = 2,25 \text{ c}^{-1}$ (б)

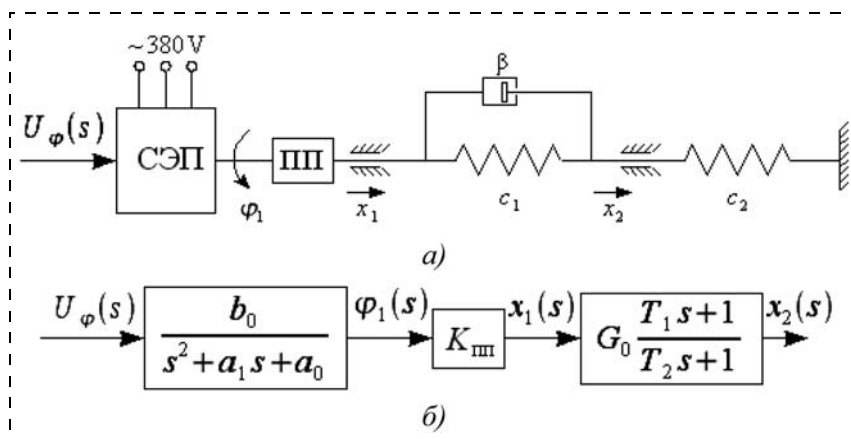


Рис. 7. Функциональная (а) и структурная (б) схемы двухмассового электромеханического объекта (ЭМО2)

$t_B = 4,5 \text{ c} > t_A = 0,34 \text{ c}$, что соответствует случаю "медленного" нуля $s_0 = -0,67$ по отношению к полюсам $s_1 = -12,79$, $s_{2,3} = -10,3 \pm 9,83i$.

Зоны робастной устойчивости и результаты синтеза САУ на базе ПР 2/0 и ПР 2/1 при управлении ЭМО2 с заданием желаемого ХП в форме Ньютона приведены в табл. 4, 5, а соответствующие переходные характеристики, полученные для исходных параметров объекта и при увеличении

параметра a_0 на 11 % представлены на рис. 5, б.

Они наглядно свидетельствуют о существенном сокращении зоны робастной устойчивости и ухудшении параметрической грубости САУ при повышении степени полинома $C(s)$, что подтверждает выявленные выше закономерности и указывает на целесообразность цифровой реализации регулятора типа ПР 2/0.

Заключение

Сопоставление областей робастной устойчивости САУ, построенных на базе ПР с различными степенями полинома знаменателя $C(s)$, позволяет сделать вывод о том, что выбор структуры регулятора должен основываться на предварительном анализе распределений нулей и полюсов управляемого объекта.

При наличии "быстрых" нулей ОУ рациональным структурным решением является выбор ПР с первой степенью полинома $C(s)$, что позволяет расширить область параметрической грубости САУ, повысить ее помехоустойчивость и не приводит к большим усложнениям в реализации регулятора.

Присутствие в объекте "медленных" нулей требует особого внимания проектировщика, поскольку применение ПР с ненулевой степенью полинома $C(s)$ может привести к значительному сокращению или полному устранению "зоны робастности", характеризующейся положительными значениями коэффициентов ПФ регулятора. При этом "вход-выходной" ПР становится неминимально-фазовым динамическим звеном, порождающим высокую параметрическую чувствительность САУ.

В тех случаях, когда степень полинома $R(s)$ оказывается выше, чем у полинома $C(s)$, проблема "технической реализуемости" ПР может решаться

путем цифровой реализации регулятора, например, методом численного интегрирования Эйлера.

Появление отрицательных коэффициентов ПР при синтезе систем управления минимально-фазовыми объектами с переменными параметрами должно рассматриваться как фактор риска, свидетельствующий о существенном снижении робастных свойств САУ и требующий более детального исследования возможностей ее работы в этих условиях. Эта ситуация в САУ с ПР "входа-выхода" оказыва-

ется аналогичной той, которая возникает при появлении положительных обратных связей в системах управления минимально-фазовыми объектами на базе безынерционных регуляторов состояния.

Построение сечений областей робастной устойчивости САУ при вариациях параметров ОУ позволяет наиболее наглядно представить границы их допустимых отклонений, в которых система сохраняет работоспособность. Это дает возможность выявления имеющихся резервов САУ при работе в так называемых "зонах риска", определения возможностей и целесообразности эксплуатации системы в этих условиях.

Список литературы

1. Тарарыкин С. В., Тютиков В. В. Робастное модальное управление динамическими системами // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. 2002. № 5.
2. Тютиков В. В., Тарарыкин С. В. Робастное модальное управление технологическими объектами. Иваново: Изд. ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина", 2006. 256 с.

3. Котов Д. Г., Тарарыкин С. В., Тютиков В. В. Синтез линейных регуляторов для управления состоянием технологических. Иваново: Изд. ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина", 2005. 172 с.
4. Тарарыкин С. В., Аполонский В. В., Терехов А. И. Исследование влияния положительных обратных связей на робастные свойства систем автоматического управления с регуляторами состояния // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2013. № 3. С. 9–15.
5. Волгин Л. Н. Оптимальное дискретное управление динамическими системами / Под ред. П. Д. Крутько. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 240 с.
6. Крутько П. Л. Полиномиальные уравнения и обратные задачи динамики управляемых систем // Изв. РАН. Техническая кибернетика. 1986. № 1. С. 125–133.
7. Тарарыкин С. В., Тютиков В. В. Системное проектирование линейных регуляторов состояния // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1995. № 4.
8. Гудвин Г. К., Гребен С. Ф., Сальгадо М. Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
9. Тарарыкин С. В., Тютиков В. В. Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами. Иваново: Изд. ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина", 2000. 212 с.
10. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд.-ние, 1992. 288 с.

УДК 519.7:681.31

И. Ф. Чебурахин, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
cybernetics@mati.ru,
"МАТИ—РГТУ им. К. Э. Циолковского", Москва

О логическом управлении и обработке информации в дискретных технических системах на основе функциональных уравнений

Разработаны методы реализации логических алгоритмов (булевых функций) на основе функциональных уравнений (структурно-функциональной параллельной декомпозиции), которые позволяют наряду с синтезом схемы получать соответствующие значения различных показателей сложности в разных базисах.

Ключевые слова: булевы функции, синтез формул и схем, декомпозиция, сложность, минимизация, функциональные уравнения

Введение

Современные достижения в области науки и техники основываются на использовании прямо или косвенно различных информационных систем (интеллектуальных, кибернетических, поисковых, аналитических, автоматизированных и др.).

В таких системах нуждается образование, здравоохранение, космос, экономика, энергетика, робототехника, транспорт, промышленность и др. Про эти системы можно сказать, что они характеризуются некоторыми общими проблемами. Центральное ме-

сто в них занимают устройства логического управления, использующие двоичные управляющие сигналы, и устройства обработки информации, входящие в состав специализированных и универсальных ЭВМ и продолжающие совершенствоваться [1–6].

Также следует отметить, что особенностью современного производства является большая дискретность. Технологические процессы разбиваются на последовательности простых операций, взаимодействующих между собой с помощью многочисленных датчиков, расположенных в устройствах и сигнализирующих об их состояниях, о фазе самого технологического процесса, например, о степени завершения обработки детали на станке, о выполнении операции роботом. Сигналы с датчиков поступают на вход системы управления, которая анализирует текущую ситуацию и вырабатывает адекватную реакцию, посылая на компоненты комплекса воздействия, непосредственно управляющие исполнительными механизмами (переключателями, клапанами, двигателями, насосами, электромоторами и т. д.). Как сигналы с датчиков, так и управляющие воздействия дискретны, а чаще всего двоичны (например, включено—выключено, да—нет), т. е. управление является логическим. Математические модели для таких систем управления формируются на основе аппарата булевых функций.

Итак, рассматривается проблема представления булевых функций f в классах формул F и схем S из функциональных элементов (ФЭ) в разных базисах [1–6], причем функции в основном характеризуются или канонической, или скобочной формой за-

дания, или вектором ее значений. Задача, в общем случае, имеет много решений, качество-сложность получаемых при этом формул и схем оценивается с помощью дискретных функционалов. Начальным показателем сложности является размерность булевой функции — число переменных. Ее обобщением считаем число символов переменных в формуле. Остальные рассматриваемые показатели качества (число подформул и глубина формулы; число ФЭ и глубина схемы) являются производными этого показателя в большей или меньшей степени. Повышение надежности схемы выполняется неявно (специальных методов повышения надежности здесь не рассматривается).

По практическим и экономическим соображениям показатели сложности-качества минимизируем. При представлении функции в классе формул F для минимизации показателей сложности используются эквивалентные преобразования, включая получение скобочных формул, в классе схем S для минимизации числа ФЭ дополнительно применяется ветвление некоторых их выходов [1–6]. В результате построенная функциональная схема подготовлена к физическому воплощению.

Большая трудоемкость получения минимального по какому-либо показателю решения, неизбежно использующего алгоритмы переборного характера, привела к отказу от стандартных подходов к постановке задачи и ее решению. В связи с этим изучаются различные подходы к разработке алгоритмов синтеза схем, заметно отличающихся по трудоемкости от переборных. Таким образом, создана теория локальных алгоритмов оптимизации, алгоритмов вычисления оценок, алгебраическая теория алгоритмов, и показано, что можно в явном виде строить экстремальные по качеству алгоритмы для решения очень широких классов плохо формализованных задач. Также разработан асимптотический метод и получена асимптотическая оценка числа элементов схемы, реализующей булеву функцию [1–6].

Несмотря на имеющиеся успехи в области синтеза формул и схем, в теории булевых функций нет полных ответов на следующие вопросы. Как влияет использование скобочных формул, математических моделей на улучшение качества проектируемых схем из ФЭ? Как ветвление выходов ФЭ позволяет минимизировать их число в схеме? Как зависит трудоемкость синтеза от результатов минимизации перечисленных выше показателей. В научной литературе приводятся и исследуются примеры, когда одна функция в некотором базисе имеет меньшие значения показателей сложности по сравнению с другим базисом, другая же функция — наоборот большие [1–14]. Для таких задач интересны ответы на вопросы: во сколько раз или как может измениться сложность функции при переходе из одного базиса в другой (и наоборот).

Эти вопросы приводят к так называемой "мягкой" постановке задачи: представление булевой функции в классе формул или схем из функциональных эле-

ментов в разных базисах. При этом необходимо получать и минимизировать различные показатели сложности.

Имеющихся ответов на все эти вопросы в известных публикациях недостаточно [1–14]. Тем не менее, поиск минимальных решений может быть успешным, если искать их на основе классификации множества булевых функций, совершенствования методов декомпозиции с привлечением понятия *строение-структура* [10–14]. Поэтому в качестве математических моделей для большей части рассматриваемых задач выбраны симметрические булевы функции и их представления в классе формул F и схем S из ФЭ. Отметим, что синтезируемые схемы применяются при проектировании различных дискретных логических устройств для вычислительной и управляющей техники [1–6, 9, 10].

Далее будем использовать обозначение $\lceil x \rceil$ для приближения чисел с избытком (наименьшее целое, не меньшее числа x); следующие логические операции обозначаются двумя способами: конъюнкция — как $\&$ или $\cdot$ (точка), но точкой иногда обозначается также арифметическое умножение; отрицание — как $\neg$ или надчеркивание над переменной, например, $\bar{x}$. В записи формул для простоты иногда внешние скобки опускаем.

Булевы функции, базисы, формулы и схемы, показатели сложности

Пусть $f(f^{(n)})$ или $f(X)$ — булева функция, зависящая от n переменных из множества $X = \{x_1, \dots, x_n\}$. Функция $f^{(n)}$ часто задается формулой $F^{(n)}$, обозначение которой иногда совпадает с обозначением функции.

Под базисом, в общем случае, понимаем произвольную конечную функционально полную систему булевых функций $G = \{g_i \mid i = 1, 2, \dots, k\}$. В теоретических исследованиях и приложениях часто рассматривают базисы $G_1 = \{\&, \vee, \neg\}$ и $G_3 = \{\&, \oplus, 0, 1\}$ для всех булевых функций (для подмножеств из множества всех двоичных булевых функций P_2) и $G_2 = \{\&, \vee\}$ — для монотонных функций.

При представлении булевой функции $f^{(n)}$ суперпозиционной формулой $F_{с.ф}^{(n)}$ над множеством функциональных символов применяются конструктивные операции из некоторого их множества W (перестановка элементарных конъюнкций-дизъюнкций в формуле, а в ней — переменных; замена подформулы новой переменной; вынесение общих множителей за скобки, обратные им операции и другие, а также эквивалентности) [1–6, 9]. Ниже они поясняются, поэтому обозначения последовательности проводимых операций опускаем. В качестве меры сложности-качества представления функции f формулой F или схемой S из ФЭ применяем соответствующие показатели (дискретные функционалы):

- $L_B(f, G)$ — число букв в формуле F , реализующей (задающей) функцию f , в классе формул в заданном базисе G ;

- $L_F(f, G)$ — число подформул в F ;
- $Dep_F(f, G)$ — глубина F ;
- $L_S(f, G)$ — число ФЭ (ЛЭ) в схеме S ;
- $Dep_S(f, G)$ — глубина S , определяемая как наибольшее число ФЭ в цепочке среди всех цепочек, соединяющих вход с выходом.

Уточнение постановки задачи

Итак, рассматривается в основном задача представления булевой функции $f^{(n)}$ (для подмножества из P_2) суперпозиционной формулой $F_{с.ф.}^{(n)}$ или схемой S из функциональных элементов в разных базах G . При этом необходимо не только получить вышеперечисленные показатели сложности, но и минимизировать их.

Между собой эти показатели имеют сложные связи. Один из главных показателей — L_B , он минимизируется за счет привлечения аппарата булевой алгебры и расширения класса моделей (скобочных формул) при реализации булевых функций. При этом, в первую очередь, исключаются фиктивные переменные, не влияющие на значения функции. Уменьшение показателя L_B влечет уменьшение L_S . Это все приводит к увеличению надежности системы. Заметим, что от показателя L_B разным образом зависят остальные из перечисленных выше показателей. При многокритериальной минимизации показателей качества синтеза минимизация одного показателя качества может приводить к уменьшению или к возрастанию другого показателя. Например, минимизация L_B в классе скобочных формул приводит к минимизации L_F и может приводить к уменьшению, или оставлять без изменения, или увеличивать глубину суперпозиционной формулы $F_{с.ф.}^{(n)}$ (схемы S). В таких случаях при синтезе необходимо устанавливать приоритетность показателей.

При синтезе схем посредством минимизации показателя L_S наряду с отмеченным преобразованием формул к скобочному виду используется ветвление выходов ФЭ, входящих в схему S [9–14], причем оно может быть (повторяемость переменных в формуле позволяет применять ветвление), но может и отсутствовать. Интуитивно, в общем случае, понятно, что чем меньше различаются значения показателей L_B и n (сложности формулы по числу букв и размерности функции), тем меньше возможностей для применения ветвления, и наоборот, чем больше различаются значения показателей L_B и n , тем больше возможностей для применения ветвления. Итак, ветвление — важное средство для минимизации показателей сложности синтезируемых схем, связанное с повторяемостью переменных в формуле (с показателем L_B). Однако уменьшение показателя L_S таким способом может приводить к увеличению глубины Dep_S схемы S . Если требуется минимизировать глубину Dep_F схемы S , то следует применять структурно-функцио-

нальную параллельную декомпозицию (СФПД) и $Dep_S = Dep_F$ [9–14].

Сравнение дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ), полиномов Жегалкина и других формул на основе их строения (вектора рангов элементарных конъюнкций) применяется также при сравнении простых функций по их строению. Например, отношение *проще* в одном классе простых функций ($g_{\&}^{(2)} < g_{\&}^{(3)}$ — отношение *строгого предшествования*).

Декомпозиция и синтез логических моделей на основе функциональных уравнений

Для оптимизации синтеза необходимо иметь больше фактов из теории булевых функций и использовать их в алгоритмах синтеза. Их удобно получать с помощью функциональных уравнений (ФУ) [10–13].

Определение 1. Пусть X — множество булевых переменных, $g^{(2)}$ — двухместная булева функция, задающая начальный член $f^{(2)}$ последовательности изучаемого класса функций $f^{(n)}(X)$, $n \geq 2$ и $h^{(2)}$ — функция рекурсии, входящие в базис G или представляемые через базисные функции. Тогда рекуррентное соотношение, получаемое на основе операции суперпозиции,

$$f^{(n_1 + n_2)}(X) = h(f^{(n_1)}(X_1), f^{(n_2)}(X_2)), \quad (1)$$

где $X_1 \cup X_2 = X$, $X_1 \cap X_2 = \emptyset$, $n_1, n_2 \in N$, $n = n_1 + n_2$, назовем основным функциональным уравнением (ФУ), несмотря на частный характер местности функций $g^{(2)}$ и $h^{(2)}$. Данное определение ФУ отлично от определения, данного в работах [7, 8].

Соотношение (1) применяется к аргументам функции h и т. д., позволяя получить суперпозиционную формулу $F_{с.ф.}^{(n)}$, реализующую функцию $f^{(n)}$. Таким образом, ФУ представляет собой конструктивный метод построения булевых функций определенного класса на основе заданных с использованием соответствующего рекуррентного соотношения, а также разбиения данной функции в определенную композицию базовых функций.

При $n_1 = n - 1$, $n_2 = 1$ получаем ФУ типа 1:

$$f^{(n)} = h(f^{(n-1)}, x_n); \quad (2)$$

для симметрических функций при $n = 2^s$, $s = 1, 2, \dots$, $n_1 = n_2 = n/2$ получаем ФУ типа 2:

$$f^{(n)}(X) = h(f^{(n/2)}(X_1), f^{(n/2)}(X_2)), \quad (3)$$

т. е. конечное n -множество аргументов разбивается пополам.

При $n_1 = n - 2$, $n_2 = 2$ это будет ФУ типа 3:

$$f^{(n)} = h^{(3)}(f^{(n-2)}, x_{n-1}, x_n), \quad (4)$$

где $h^{(3)}$ — трехместная булева функция.

В общем случае ФУ (1) для заданного $n \geq 2$ и функций g и h применяется как уравнение относительно искомой функции $f^{(n)}$, и ставится задача

либо ее нахождения в определенном базисе (с показателями качества), либо декомпозиции заданной функции $f^{(n)}$. Поэтому решение указанных задач следует сводить к получению таких рекуррентных соотношений.

Метод ФУ применим для получения классов как симметрических, так и несимметрических (частично симметрических) булевых функций с использованием различных базисов. ФУ для данных функций $g^{(2)}$ и $h^{(2)}$ в зависимости от базиса G допускают различные преобразования, характеризующиеся своими показателями качества, например, преобразование (2) в $f^{(n)} = h(x_n, f^{(n-1)})$ для симметрической функции h сохраняет ее, а для несимметрической функции это, в общем случае, новая функция).

На основе ФУ типа 1 рассмотрим примеры получения функций, симметрических по отдельным совокупностям переменных [10–14].

Пример 1. Для $f^{(2)} = g^{(2)}(x_1, x_2) = x_1 \rightarrow x_2$, $h^{(2)} = t_1 \cdot t_2$ и $n = 5$ за четыре итерации получаем симметрическую функцию $f^{(5)} = (((x_1 \rightarrow x_2) \cdot x_3) \cdot x_4) \cdot x_5$ относительно переменных x_3, x_4, x_5 .

Пример 2. Для $f^{(2)} = g^{(2)}(x_1, x_2) = x_1 \cdot x_2$, $h^{(2)} = t_1 \rightarrow t_2$ и $n = 5$ аналогично получаем симметрическую функцию $f^{(5)} = (((x_1 \cdot x_2) \rightarrow x_3) \rightarrow x_4) \rightarrow x_5$ относительно переменных x_1 и x_2 .

Пример 3. Для $f^{(3)} = g^{(3)}(x_1, x_2, x_3) = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3$, $h^{(2)} = t_1 \cdot t_2$ и $n = 5$ за три итерации получаем симметрическую функцию $f^{(5)} = ((x_1 \oplus x_2 \oplus x_3) \cdot x_4) \cdot x_5$ относительно переменных x_1, x_2, x_3 и x_4, x_5 .

Некоторые методы синтеза устройств логического управления и обработки информации

Методы синтеза дискретных устройств логического управления и обработки информации позволяют конструировать их достаточно эффективными относительно различных показателей сложности и/или минимизировать при этом требуемые вычислительные ресурсы. Отметим следующие методы синтеза формул и схем (краткая их функциональная характеристика дана в работах [10–14]).

- ♦ **Синтез схемы S на основе C -метода.** Данный (упрощенный, "скорый") метод позволяет вывести оценки показателей сложности L_B , L_F и L_S полинома Жегалкина $F^{(n)} = K_1 \oplus \dots \oplus K_m$ на основе его строения $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_m)$. Метод дает грубые оценки, но они получаются просто, быстро, с минимальной трудоемкостью. Например, вначале реализовывать все ЭК полинома Жегалкина, а затем — одну полученную элементарную дизъюнкцию (получается все в классах простых БФ: "&" и "⊕").
- ♦ **Синтез схемы S на основе метода суперпозиции.** Формула $F_{с.ф}^{(n)}$ получается в базисе Жегалкина с помощью СФПД и заносится в специальную таблицу. По полученной таблице каждая базисная функция заменяется на соответствующий ФЭ с сохранением связей.

- ♦ **Синтез схемы S на основе метода структуризации.** В полиноме Жегалкина $F^{(n)}$ выделяется однородная структура на основе повторяющегося фрагмента, начальная и завершающая такие структуры, а также определяются показатели сложности L_F (и L_S) всех трех структур. Их сумма позволяет априори находить и минимизировать показатели сложности L_F (и L_S) представления БФ $f^{(n)}$ в классах формул $F^{(n)}$ и схем S .
- ♦ **Синтез схемы S на основе метода ветвления.** Данный метод предполагает для каждого равных подформул, находимых с помощью специальной таблицы, реализацию одной из них на соответствующем ФЭ и подсоединения его выхода к определенным входам адекватных схем. Для получения такой возможности над формулой выполняются требуемые эквивалентные преобразования.

Об аналитических методах получения оценок сложности

Оценки сложности представления БФ из простых классов. Функции из классов "&", "v", "⊕" или "~" обладают одинаковыми алгебраическими свойствами. Поэтому структура, полученная для одной из них, будет иметь место для каждой из них. При представлении функции $f^{(n)}$ (при конечном $n \geq 2$) формулой над $\{g^{(m)}\}$ при конечном $m \geq 2$ на основе СФПД получаем минимальное значение показателя сложности L_F представления в классах формул и логических схем без ветвления [10]:

$$L_F^{\min}(F^{(n)}, g^{(m)}) = L_S^{\min}(F^{(n)}, g^{(m)}) = \lceil (n-1)/(m-1) \rceil.$$

Оценки сложности представления симметрических БФ в базисе G_3 . Для класса симметрических БФ в базисе G_3 получаем элементарные симметрические полиномы (ЭСП) Жегалкина $F_i^{(n)}$, где n — конечное число переменных, нижний индекс i — степень полинома, $i = \overline{1, n}$.

Так, для полиномов $F_1^{(n)}$ (класс функций "⊕") и $F_n^{(n)}$ (класс "&") показатели сложности L_F их минимального представления изучены ранее в классе формул:

$$L_F^{\min}(F_1^{(n)}, G_3) = L_F^{\min}(F_n^{(n)}, G_3) = n-1. \quad (5)$$

Для полиномов $F_i^{(n)}$ степени $i = 2$ или 3 верхние оценки следующие:

$$\begin{aligned} L_F^{\min}(F_2^{(n)}, G_3) &= (n^2 + n - 4)/2; \\ L_F^{\min}(F_3^{(n)}, G_3) &= (n^3 - n - 12)/6. \end{aligned} \quad (6)$$

Эти же верхние оценки соответствуют схемам S (без ветвления)

$$\begin{aligned} L_S^{\min}(F_2^{(n)}, G_3) &= (n^2 + n - 4)/2; \\ L_S^{\min}(F_3^{(n)}, G_3) &= (n^3 - n - 12)/6. \end{aligned} \quad (7)$$

На основе анализа оценок (5)–(7) сложности L_S представления произвольного ЭСП Жегалкина (в классе схем с ветвлением) получим их обобщение по двум показателям — по числу переменных n и степени i полинома Жегалкина, т. е. оценку (8), вычисляемую за чуть больше 10 арифметических операций [12–14]:

$$L_S(F_i^{(n)}, G_3) = (n-1) + (i-1)(2n-4) - (2i^2 - 6i + 4), i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Аналогичный подход к синтезу логических схем имеет место также при реализации монотонных БФ в базисе G_2 .

Об аналитическом методе определения верхних оценок сложности БФ в классе формул

Применим метод ФУ для реализации БФ $f^{(n)}$ в базисе G_3 формулой $F_{с.ф}^{(n)}$ и получения при этом верхней оценки сложности L_F . Случай, когда функция $f^{(n)}$ — константа (0 или 1), тривиален и его ниже не рассматриваем.

Пусть произвольная БФ $f^{(n)}$ задается полиномом Жегалкина $F^{(n)} = K_1 \oplus \dots \oplus K_i \oplus \dots \oplus K_m$, $i = \overline{1, m}$, где K_i — монотонная элементарная конъюнкция (ЭК) ранга r_i , причем $r_1 \geq \dots \geq r_i \geq \dots \geq r_m$, $i = \overline{1, m}$. Такой полином Жегалкина называется каноническим, его ЭК расположены в соответствии с порядком " $\geq$ ", определенным для их рангов. Вектор $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_i, \dots, r_m)$ задает строение полинома Жегалкина $F^{(n)}$. При этом определяем еще вектор $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_j, \dots, p_n)$ повторяемости переменных из множества X в формуле $F^{(n)}$, т. е. переменная x_j , $j = \overline{1, n}$, повторяется в формуле $F^{(n)}$ число p_j раз.

Для полинома Жегалкина определяем $p_j = \max(p_1, \dots, p_j, \dots, p_n)$. Тогда ФУ (4) приводится к виду

$$F^{(n)} = ((x_j \cdot F_0^{(n-1)}) \oplus F_1^{(n-1)}), \quad (9)$$

где нижние индексы 0 и 1 — номера соответствующих остаточных функций, задаваемых полиномами Жегалкина $F_0^{(n-1)}$ и $F_1^{(n-1)}$ и рассматриваемых на одном множестве $X' = X \setminus \{x_j\}$. Будем иногда записывать эти полиномы соответственно как $F^{(n-1),0}$ и $F^{(n-1),1}$.

Применяя к $F^{(n-1),0}$ и $F^{(n-1),1}$ ФУ (9) и т. д., получим $F_{с.ф}^{(n)}$. Каждое применение ФУ (4) порождает не более двух базисных функций из G_3 и не более двух остаточных функций $F^{(n-1),0}$ и $F^{(n-1),1}$. Используя последовательно ФУ (4) и суммируя значения сложности L_F , выводим верхнюю оценку показателя сложности L_F для общего случая:

$$\begin{aligned} L_F(F^{(n)}, G_3) &= L_F(F^{(n-1),0}) + L_F(F^{(n-1),1}) + 2 = \\ &= (L_F(F^{(n-2),00}) + L_F(F^{(n-2),01}) + 2) + \\ &+ (L_F(F^{(n-2),10}) + L_F(F^{(n-2),11}) + 2) + 2 = \dots = \\ &= \Sigma_{[*]} L_F(F^{(n-j), [j]}) + 2(2^j - 1), \end{aligned}$$

где результат содержит сумму числа и сложности выражения, которое предстоит вычислить; j — число применения ФУ (4), полных и неполных шагов декомпозиции ($j = \overline{1, n}$); $[j]$ — последовательность символов 0 или 1, длиной j ; $[*]$ — суммирование сложностей, выполняемое для шага j , по всем остаточным функциям, число которых после шага может удваиваться. Отсюда находим оценку

$$L_F(F^{(n)}, G_3) \leq \Sigma_{[*]} L_F(F^{(n-j), [j]}) + 2(2^j - 1). \quad (10)$$

Заметим, что рекуррентное соотношение (9) применяется для получения формулы $F_{с.ф}^{(n)}$, а (10) — для вывода соответствующей оценки сложности $L_F(F_{с.ф}^{(n)}, G_3)$.

Преобразуя эквивалентно булеву формулу $F^{(2)}$ в базисе G_3 , всегда можно найти $L_F(F^{(2)}, G_3) \leq 3$. Если j (число шагов декомпозиции) выбрать равным $n-2$ ($j = n-2$), то из (10) для общего случая определяем явно верхнюю оценку сложности:

$$\begin{aligned} L_F(F^{(n)}, G_3) &= L_F(F^{(n-1),0}) + L_F(F^{(n-1),1}) + 2 = \\ &= L_F(F^{(n-2),00}) + L_F(F^{(n-2),01}) + L_F(F^{(n-2),10}) + \\ &+ L_F(F^{(n-2),11}) + 6 = \dots = L_F(F^{(2),0\dots00}) + \\ &+ L_F(F^{(2),0\dots01}) + L_F(F^{(2),0\dots10}) + \dots + \\ &+ L_F(F^{(2),1\dots11}) + 2(2^{n-2} - 1) \leq 3 \cdot 2^{n-2} + \\ &+ 2 \cdot (2^{n-2} - 1) = 5 \cdot 2^{n-2} - 2 = (5/4) \cdot 2^n - 2. \end{aligned}$$

Итак, при реализации произвольной БФ $f^{(n)} \in P_2^{(n)}$ в базисе G_3 уточнена верхняя оценка (10) показателя сложности L_F следующим образом:

$$L_F(F_{с.ф}^{(n)}, G_3) \leq (5/4) \cdot 2^n - 2. \quad (11)$$

Можно убедиться в том, что оценка (11) грубая, но для разных классов БФ порядок расхождения значений сложности меняется. Поэтому представляет интерес также разработка различных вычислительных методов (см. ниже) решения задачи.

Эту оценку (11) сложности L_F представления произвольной БФ $f^{(n)}$ в базисе $G_3 = \{\&, \oplus, 0, 1\}$ уточним для отдельных классов функций из P_2 (простые случаи опускаем).

Пусть функция $f^{(n)}$ задается полиномом $F^{(2)} = x_1 x_2 \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus 1$. Преобразуем его эквивалентным способом к виду $F^{(2)} = (x_1 \oplus 1)(x_2 \oplus 1)$, значение показателя сложности которого минимально $L_F^{\min}(F^{(2)}, G_3) = 3$.

Индукцией доказываем (для конечного натурального n выделяем класс)

$$\begin{aligned} F^{(n)} &= x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n \oplus x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_{n-1} \oplus x_2 \cdot \dots \cdot x_n \oplus \\ &\oplus \dots \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_n \oplus 1 = \\ &= (x_1 \oplus 1)(x_2 \oplus 1) \dots (x_{n-1} \oplus 1)(x_n \oplus 1) \end{aligned} \quad (12)$$

и

$$L_F^{\min}(F^{(n)}, G_3) = 2n - 1. \quad (13)$$

Если БФ $f^{(n)}$ задается полиномом

$$F^{(n)} = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n \oplus x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_{n-1} \oplus \dots \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_n,$$

то также получаем ее задание следующей эквивалентной формулой (доказывается по индукции):

$$F^{(n)} = (x_1 \oplus 1)(x_2 \oplus 1) \dots (x_{n-1} \oplus 1)(x_n \oplus 1) \oplus 1 \quad (14)$$

и

$$L_F^{\min}(F^{(n)}, G_3) = 2n. \quad (15)$$

Преобразуем полином $F^{(n)}$ (14) в базисе $G_1 = \{\&, \vee, \cdot\}$. Применяя правило де Моргана, получаем $F^{(n)} = x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n$ и

$$L_F^{\min}(F^{(n)}, G_1) = n - 1. \quad (16)$$

БФ, базисы и оценки сложности отношения. Сравнивая оценки (15) и (16) сложности представления функции $f^{(n)}$ в классе формул, получаем

$$\begin{aligned} L_F^{\min}(F^{(n)}, G_1) / L_F^{\min}(F^{(n)}, G_3) = \\ = (n - 1) / (2n) = 1/2 - 1/(2n). \end{aligned} \quad (17)$$

Отсюда следует, что функции $f^{(n)}$ одного класса (подмножества P_2), задаваемые полиномами Жегалкина типа (12), при представлении в базисах G_1 и G_3 имеют один порядок роста.

Примем следующие оценки:

$$L_{\min} = L_F^{\min}(F^{(n)}, G_3) = 2n - 1,$$

$$L_{\text{асим}} = L_F^{\text{асим}}(F^{(n)}, G_3) = 2^n / n,$$

$$L_{\text{верх}} = L_F^{\text{верх}}(F^{(n)}, G_3) = (5/4) \cdot 2^n - 2$$

сложности L_F представления функции $f^{(n)}$, получаемых разными способами, для их сравнения вычислительным методом: при $2 < n < 7$ оценка $L_{\text{асим}}$ занижена относительно $L_{\min}$ ($L_{\min} > L_{\text{асим}}$), но при $n > 6$ оценка $L_{\text{асим}}$ завышена относительно $L_{\min}$ ($L_{\min} < L_{\text{асим}}$).

Структурно-функциональная декомпозиция БФ (разложение $f^{(n)}$ по переменным в базисе G_3)

Сначала приведем результаты исследования показателя сложности L_F представления БФ в классе формул, а затем приведем результаты исследования показателя сложности относительно показателя L_B . Для этого разбиваем эффективным способом полином Жегалкина $F^{(n)}$ на два полинома меньшей сложности, затем каждый из них разбиваем опять на два и т. д. Получаемое в результате бинарное дерево полинома Жегалкина будет учитывать сложные особенности условия задачи. На некотором шаге вычисления по определенной цепочке могут заканчиваться, а по другим — продолжаться. Это придает возможному алгоритму свойство приспособляемости к исходным данным задачи.

Считаем, что условия предыдущего раздела выполняются. Опишем в общем виде методику построения

специальных форм на основе полинома Жегалкина с применением метода ФУ, а также получения верхней оценки показателя сложности $L_B(F^{(n)}, G_3)$.

Применяя на каждом шаге к полиному $F^{(n)}$ рекуррентное соотношение (9), используя $p_{j1} = \max(p_1, \dots, p_j, \dots, p_n)$, получаем представление БФ $f^{(n)}$ в виде

$$\begin{aligned} F^{(n)} &= K_1 \oplus \dots \oplus K_i \oplus \dots \oplus K_m = \\ &= ((x_{j1} \cdot F_0^{(n-1)}) \oplus F_1^{(n-1)}) = \\ &= (x_{j1} \cdot F_0^{(n-1)}) \oplus x_{j2} \cdot F_{10}^{(n-2)} \oplus x_{j3} \cdot F_{110}^{(n-3)} \oplus \\ &\oplus F_{111}^{(n-3)} \oplus \dots \oplus c, \quad c \in \{0, 1\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Назовем (18) разложением БФ $f^{(n)}$ по "активным" переменным в формуле $F^{(n)}$ (часто повторяющимся), причем некоторые такие переменные могут входить в другие остаточные функции.

Замечание. Как было сказано выше, получение (18) по алгоритму на основе (9) представляет собой некоторое бинарное дерево. Меняя алгоритмы, будем получать разные формулы (18) и соответствующие им деревья. Таким образом, математический аппарат теории графов здесь может быть применен для построения минимального дерева по интересующему показателю сложности.

В формуле (18) для $F^{(n)}$ первые два выражения эквивалентны (здесь $F^{(n)}$ — обозначение полинома); если их (исходный полином и скобочную формулу) сравнивать по числу букв, то они находятся в отношении " $\geq$ ". Эффективность преобразования полинома Жегалкина $F^{(n)}$ в этой итерации характеризуется следующим выражением:

$$L_B(F^{(n)}) - p_{j1} + 1, \text{ где } L_B(F^{(n)}) = \sum_{i=1}^m r_i.$$

При изучении различных разложений (18) полинома Жегалкина $F^{(n)}$ по переменным из X удобно рассматривать их в виде

$$\begin{aligned} F^{(n)} &= x_{j1} \cdot F_1 \oplus x_{j2} \cdot F_2 \oplus \dots \oplus x_{jt} \cdot F_t \oplus c, \\ c &\in \{0, 1\}, \end{aligned} \quad (19)$$

где полиномы F_j , начиная с F_2 , могут разным образом зависеть от переменных из множества $X \setminus \{x_{j1}\}$.

Также при изучении различных декомпозиций полинома Жегалкина $F^{(n)}$ (18) полезно представлять их по шагам: первый шаг по переменной x_j , второй шаг по переменной x_t , а именно

$$\begin{aligned} F^{(n)} &= K_1 \oplus \dots \oplus K_i \oplus \dots \oplus K_m = \\ &= x_j \cdot F_0^{(n-1)} \oplus F_1^{(n-1)} = \\ &= x_j \cdot F_0^{(n-1)} \oplus x_t \cdot F_{10}^{(n-2)} \oplus F_{11}^{(n-2)}. \end{aligned} \quad (20)$$

Введем оператор L_B (сохраняя то же обозначение для показателя сложности), возможны и другие операторы (например, L_F или L_S , имеющие свои функциональные особенности) для чтения рекуррентных соотношений типа (9), как в математической логике. Тогда получаем функциональ-

ное уравнение показателя сложности (ФУ_{ПС}) L_B , для которого выводим ряд оценок:

$$\begin{aligned} L_B(F^{(n)}) &> L_B((x_j \cdot F_0^{(n-1)}) \oplus F_1^{(n-1)}) = \\ &= L_B(x_j \cdot F_0^{(n-1)}) \oplus L_B(F_1^{(n-1)}) = \\ &= L_B(F_0^{(n-1)}) + L_B(F_1^{(n-1)}) + 1 = \\ &= L_B(F_0^{(n-1)} \oplus F_1^{(n-1)}) + 1 = L_B(F^{(n-1)}) + 1. \end{aligned} \quad (21)$$

Заметим, что выполняются равенства

$$\begin{aligned} L_B(F^{(n-1)}) &= L_B(F_0^{(n-1)}) + L_B(F_1^{(n-1)}) = \\ &= L_B(F_0^{(n-1)} \oplus F_1^{(n-1)}), \end{aligned}$$

но формулы $F^{(n-1)}$ и $F_0^{(n-1)} \oplus F_1^{(n-1)}$, в общем случае, не эквивалентны. Также выполняется неравенство

$$L_B(F^{(n)}) \geq L_B(F^{(n-1)}).$$

При этом соответствующий полином применяется для синтеза суперпозиционной формулы $F_{с.ф}^{(n)}$ и получения верхней оценки сложности L_B , эффективно уменьшая вычислительную сложность.

Имеются разные варианты разложения БФ $f^{(n)}$ по переменным (на основе полинома Жегалкина $F^{(n)}$ и задаваемых ими же) и получаем различные бинарные деревья для остаточных функций, начиная с исходного полинома Жегалкина:

$$F^{(n)}, F_0^{(n-1)}, F_{00}^{(n-2)}, \dots; F^{(n)}, F_1^{(n-1)}, F_{11}^{(n-2)} \dots$$

и другие связанные иерархии остаточных функций.

О вычислительных методах получения верхних оценок сложности БФ

Для полинома Жегалкина $F^{(n)}$ составляется таблица (другая модель полинома) следующим образом: если переменная x_j , $j = \overline{1, n}$, входит в ЭК K_i , $i = \overline{1, m}$, то в ячейку таблицы в i -й строке и в j -м столбце проставляется 1, иначе — 0 (т. е. $x_{i,j} = 1$, иначе — 0). Подсчитываются числовые характеристики полинома: векторы рангов $\mathbf{r}$ и повторяемости $\mathbf{p}$ переменных, а также исходная сложность $L_B(F^{(n)})$ полинома. Условное представление полинома Жегалкина $F^{(n)}$ с помощью таблицы помогает проведению конструктивных преобразований, при необходимости параллельно дублируемых аналитически.

$\begin{smallmatrix} x \\ K \end{smallmatrix}$	x_1	...	x_j	...	x_n	$\mathbf{r}$
K_1	...	...	...	...	...	r_1
...	...	...	...	...	...	...
K_i	...	...	$x_{i,j} = 1$	...	...	r_i
...	...	...	...	...	...	...
K_m	...	...	...	...	...	r_m
$\mathbf{p}$	p_1	...	p_j	...	p_n	$L_B = L$

Алгоритм

N — число циклов; $L_B = L$ — текущая сложность полинома по числу букв.

Шаг 1. Для заданного полинома Жегалкина $F^{(n)}$ заполнить таблицу. Присвоить $N := 0$.

Шаг 2. Подсчитать: векторы рангов $\mathbf{r}$ и повторяемости $\mathbf{p}$ переменных:

$$L_B(F^{(n)}) := \sum_{i=1}^m r_i.$$

Шаг 3. По таблице определить $p_j = \max(p_1, \dots, p_j, \dots, p_n)$, $j = \overline{1, n}$, и выбрать x_j , вычислить $N := N + 1$; $L := L - p_j + 1$.

Шаг 4. Из полинома Жегалкина $F^{(n)}$ сформировать на основе таблицы полиномы $F_0^{(n-1)}$ и $F_1^{(n-1)}$ (описывается одна итерация):

- ♦ остаточные функции в (9) не содержат переменную x_j , но в требуемую суперпозиционную формулу $F_{с.ф}^{(n)}$ она включается одним из множителей;
- ♦ выбираем число $p_j \in K_i$, содержащих переменную x_j ; их ранги r_i уменьшаем на единицу; перемещаем эти строки в верхнюю часть таблицы так, чтобы сохранить порядок " $\geq$ " для рангов r_i ; получаем полином $F_0^{(n-1)}$;
- ♦ ЭК K_i , не содержащие переменную x_j , располагаем в нижних строках таблицы, сохраняя для рангов $r_i \in K_i$ порядок " $\geq$ "; получаем полином $F_1^{(n-1)}$.

Таким образом, этой части алгоритма ближе, больше соответствует модель (18). Теперь с учетом принципа "для каждой остаточной функции выбирается своя максимально повторяющаяся переменная" более формально и короче опишем действия, повышающие эффективность метода, которые адекватны первым шагам алгоритма на основе моделей (19) или (20).

Описание действий:

1) для заданного полинома Жегалкина $F^{(n)}$ сформировать таблицу;

2) подсчитать: векторы рангов $\mathbf{r}$ и повторяемости $\mathbf{p}$ переменных;

$$3) \text{ вычислить } L_B(F^{(n)}) := \sum_{i=1}^m r_i;$$

4) определить $p_j = \max(p_1, \dots, p_j, \dots, p_n)$, $j = \overline{1, n}$ и соответствующую переменную x_j ;

5) на основе (p_j, x_j) и таблицы сформировать полиномы $F_0^{(n-1)}$ и $F_1^{(n-1)}$ соответственно с числовыми характеристиками, а именно:

$F_0^{(n-1)}$ — определить $\mathbf{r}$ и $\mathbf{p}$, учитывая j и x_j ;

$F_1^{(n-1)}$ — соответственно определить $\mathbf{r}'$ и $\mathbf{p}'$;

6) определить $p_t = \max(p_1, \dots, p_t, \dots, p_{n-1})$, $t = \overline{1, n-1}$;

7) получить рекуррентное соотношение

$$F^{(n)} = x_j \cdot F_0^{(n-1)} \oplus x_t \cdot F_{10}^{(n-2)} \oplus c, c \in \{0, 1\},$$

и соответствующее уменьшенное значение показателя сложности

$$L := L - p_j - p_t + 2.$$

В результате получаем рекуррентные соотношения типа (9). Выбираем следующую остаточную функцию, аналогично выполняем действия и т. д., пока в таблице не останутся два символа переменных, с которыми завершится построение формулы $F_{с.ф}^{(n)}$, иначе перейти к шагу 4. При этом, если в формуле выходим на базисные функции (" x_1 & x_2 " или " $x_1 \oplus x_2$ ") или большей местности таких функций, то для повышения практической значимости алгоритма применить параллельную декомпозицию.

Таким образом, получено рекуррентное соотношение (9), для которого вычислительным методом получено значение показателя сложности $L_B = L$. Конец работы алгоритма.

Таким образом, на основе алгоритма конструктивно получаем последовательность полиномов Жегалкина $F^{(n)}$, сложность L_B которых не возрастает:

$$L_B(F^{(n)}, G_3) > L_B(F^{(n-1)}, G_3) \geq L_B(F^{(n-2)}, G_3) \geq \dots \geq L_B(F^{(2)}, G_3),$$

а также суперпозиционную формулу $F_{с.ф}^{(n)}$ для построения схемы S с ее оценкой сложности $L_S = L_B - 1$.

Теперь применяем метод синтеза схемы S на основе суперпозиционной формулы $F_{с.ф}^{(n)}$, получаемой в базисе Жегалкина с помощью структурно-функциональной (параллельной) декомпозиции. По формуле $F_{с.ф}^{(n)}$ каждая базисная функция заменяется на соответствующий ФЭ с сохранением связей, при этом создается требуемая схема S с оценкой сложности L_S .

Представление БФ из отдельных подмножеств P_2 в классах формул и схем на основе структурно-функциональной декомпозиции

При использовании агентных технологий в беспроводных компьютерных сетях для решения задач дискретного логического управления сложными техническими системами (коллективом объектов) алгоритм управления, в общем случае, представляется в виде системы БФ. Агенты выполняют разные функции, в том числе это и программы, вычисляющие произвольные булевы формулы в базисе Жегалкина. При этом для определенного класса алгоритмов логического управления имеется функционально полная система соответствующих программ (агентов).

Для закона управления есть полная система программ (агентов), вычисляющих соответствующие формулы $F^{(n)}$. С сервера поступают начальные данные на управляющий компьютер, они обрабатываются непрямыми методами, позволяющими локально для исходных данных минимизировать число вычислительных операций, и результат от всех

агентов поступает на сервер для принятия решения по управлению. Сервер подсоединен к базовой магистральной сети. Из всего разнообразия типов сетей в настоящее время большее признание получил стандарт Radio Ethernet, утвержден IEEE 802.11.

Непрямые методы понимаем как эффективную обработку данных: вычисления выполняются не по формуле (полиному Жегалкина, ДНФ и др.), а по другой модели — информационной логико-математической, основанной на строении формулы (для подмножеств из P_2). Каждой ситуации соответствует определенный набор значений переменных. При аппаратной реализации логических алгоритмов применяют распараллеливание их на внутрикристальном уровне.

Заключение

Разработанные методы реализации булевых функций (логических алгоритмов) на основе функциональных уравнений (структурно-функциональной параллельной декомпозиции) позволяют наряду с синтезом схемы получать соответствующие значения различных показателей сложности в разных базисах, в том числе в базисе Жегалкина. Применяются для разработки эффективных устройств управления и обработки информации.

Список литературы

1. Журавлев Ю. И. Теоретико-множественные методы в алгебре логики // Проблемы кибернетики. 1962. № 8.
2. Журавлев Ю. И. Алгоритм построения минимальных дизъюнктивных нормальных форм для функций алгебры логики // Дискретная математика и математические вопросы кибернетики. М.: Наука, 1974.
3. Лупанов О. Б. О сложности реализации функций алгебры логики формулами // Проблемы кибернетики. 1960. Вып. 3.
4. Яблонский С. В. Об алгоритмических трудностях синтеза минимальных контактных схем // Проблемы кибернетики, № 2. М.: Физматлит, 1959.
5. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. М.: Наука, 1986.
6. Гаврилов Г. П., Сапоженко А. А. Сборник задач по дискретной математике. М.: Наука, 1977.
7. Успенский В. А. Лекции о вычислимых функциях. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. 492 с.
8. Мальцев А. И. Алгоритмы и рекурсивные функции. М.: Наука, 1965. 391 с.
9. Закревский А. Д. Параллельные алгоритмы логического управления. М.: Эдиториал УРСС, 2012.
10. Чебурахин И. Ф. Синтез дискретных управляющих систем и математическое моделирование: алгоритмы, программы. М.: Физматлит, 2004.
11. Чебурахин И. Ф. Математические модели для интеллектуализации синтеза дискретных логических управляющих устройств на основе цифровых интегральных схем // Изв. РАН. ТиСУ. 2008. № 1. С. 68–77.
12. Чебурахин И. Ф. О минимизации сложности представления булевых функций из некоторых классов // Сб. материалов X Междунар. конф. "Интеллектуальные системы и компьютерные науки" / Под общ. ред. В. А. Садовниченко, В. Б. Кудрявцева, А. В. Михалева. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 311–314.
13. Чебурахин И. Ф. Алгоритмизация представления булевых функций формулами и схемами минимальной сложности в базисе Жегалкина // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 12. С. 7–14.
14. Чебурахин И. Ф., Цурков В. И. Синтез дискретных логических устройств обработки информации на основе теории агентов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 3. С. 27–34.

УДК 62-50

Л. А. Краснодарец, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
Севастопольский национальный
технический университет, Украина
lakrasno@gmail.com

Аналитическое конструирование законов траекторного управления транспортными средствами на воздушной подушке

Рассматривается применение новой технологии аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением для конструирования закона траекторного управления нелинейным объектом с тремя степенями свободы на примере транспортного средства на воздушной подушке. Задача траекторного управления сводится к трем обратным задачам динамики, которые решаются путем локальной оптимизации по энергетическим критериям, содержащим отклонения управляемых процессов от эталонных. Найденные решения представляются в виде законов адаптивного управления с обратными связями.

Ключевые слова: траектория, энергетический критерий, локальная оптимизация, закон адаптивного управления, обратная связь, регулятор, анализ, синтез, моделирование

Введение

Проблеме управления движением транспортных средств, следующих назначенной траектории, посвящено множество публикаций, обзор которых приводится в работе [1]. При этом задача следования траектории (trajectory-tracking) тесно связана с разработкой законов управления, в соответствии с которыми транспортное средство четко следовало бы по назначенной параметрической траектории (геометрической траектории с ассоциируемым временным законом). Сложность решения данной задачи во многом зависит от конфигурации транспортного средства как объекта управления. Для неполноприводных (underactuated) транспортных средств, т. е. для объектов, у которых число входов управления меньше числа независимых обобщенных координат, следование назначенной траектории продолжает оставаться активной темой исследований. Типичными примерами таких систем являются воздушные и морские суда, а также транспортные средства на воздушной подушке (ТСВП). Классический подход к решению задачи следования траектории для подобных систем использует локальную линеаризацию и рассредоточение координат,

чтобы выделить необходимое число степеней свободы как число доступных входов управления. Альтернативные подходы основываются на линеаризации динамического отклонения транспортного средства, что приводит к стационарной линейной системе (метод сбалансированной траектории). Основным ограничением при этом является гарантия устойчивости только в соседних выбранных точках управления. Известны подходы к решению задачи следования назначенной траектории [2], предусматривающие конструирование законов управления, которые заставляют автономные транспортные средства следовать заранее установленным траекториям в фазовом пространстве координат. Однако такой путь решения обсуждаемой задачи имеет существенный недостаток — кинематика и динамика транспортного средства обычно представлены нелинейными дифференциальными уравнениями с большим числом переменных, что усложняет вычисление траектории.

В работе П. Д. Крутько [3] предложен альтернативный методам пространства состояний подход, идея которого основана просто на следовании назначенной траектории. Цель управления движением по программной траектории естественным путем приводит к постановке и решению обратных задач динамики — вычислению управляющих сил и моментов, входящих в уравнения движения и ведущих центр масс объекта управления вдоль назначенной траектории, заданной параметрическими уравнениями.

В данной работе ставится и решается задача конструирования законов управления, обеспечивающих движение ТСВП по назначенной траектории, на основе использования концепций обратных задач динамики в сочетании с локальной оптимизацией в окрестности назначенных траекторий движения.

Модель ТСВП как объекта управления

В качестве объекта управления будем рассматривать малоразмерную физическую модель ТСВП [1], которое приводится в движение двумя воздушными движителями — мощными канализированными вентиляторами (левым и правым), расположенными симметрично относительно продольной оси. Этим обеспечивается не только поступательное, но и вращательное движение, которое при отсутствии аэроулей возникает в результате момента, формируемого за счет разности тяг воздушных движителей.

Пусть x и y — координаты центра масс ТСВП в прямоугольной системе координат OXY , а угол θ

характеризует положение его продольной оси. В таком случае уравнения движения записываются в виде

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -d_v\dot{x} + f_x; \\ m\ddot{y} = -d_v\dot{y} + f_y; \\ J\ddot{\theta} = -d_\omega\dot{\theta} + M \end{cases} \quad (1)$$

с начальными условиями

$$t = 0, x = x_0, y = y_0, \dot{x} = 0, \dot{y} = 0, \theta = \theta_0, \dot{\theta} = 0,$$

где m и J — масса и момент инерции ТСВП; d_v и d_ω — коэффициенты вязкого трения соответственно при поступательном и вращательном движении; θ — угол на плоскости OXY между продольной осью ТСВП и осью OX ; f_x и f_y — управляющие функции (силы), обеспечивающие поступательное движение объекта управления:

$$f_x = (F_L + F_R)\cos\theta, f_y = (F_L + F_R)\sin\theta;$$

M — управляющая функция (момент), обеспечивающая вращательное движение объекта управления:

$$M = l(F_R - F_L);$$

F_L и F_R — силы тяги соответственно левого и правого воздушных движителей, имеющих ограничение $F_{\max}$; l — плечо момента сил F_L и F_R относительно геометрического центра и центра масс, которые по предположению совпадают.

Параметры модели ТСВП приведены в работе [1] и имеют следующие значения:

$$m = 5,5 \text{ кг}; J = 0,047 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; d_v = 5,5 \text{ кг/с}; \\ d_\omega = 0,41 \text{ кг} \cdot \text{м/с}; l = 0,123 \text{ м}; F_{\max} = 5,1 \text{ Н}.$$

Конструирование закона траекторного управления

Конструирование закона управления выполним в два этапа. На первом этапе задачу следования назначенной траектории сформулируем следующим образом. Пусть движение центра масс ТСВП под действием управляющих сил f_x и f_y описывается первыми двумя дифференциальными уравнениями с соответствующими начальными условиями системы (1), которые приведем к виду

$$\begin{cases} \ddot{x} + a_1\dot{x} = b_0f_x; \\ \ddot{y} + a_1\dot{y} = b_0f_y, \end{cases} \quad (2)$$

где $a_1 = \frac{d_v}{m}$; $b_0 = \frac{1}{m}$, а траектория назначенного движения задана в виде параметрических уравнений

$$x(t) = \varphi_x(t), y(t) = \varphi_y(t), \quad (3)$$

где $\varphi_x(t)$ и $\varphi_y(t)$ — гладкие функции, имеющие ограниченные производные $\dot{\varphi}_x(t)$, $\ddot{\varphi}_x(t)$ и $\dot{\varphi}_y(t)$, $\ddot{\varphi}_y(t)$ соответственно.

Требуется найти управляющие функции в форме обратных связей $f_x(t, x, \dot{x})$ и $f_y(t, y, \dot{y})$, обеспечивающие перемещение центра масс ТСВП вдоль назначенной траектории (3). Потребуем также при этом, чтобы возможные отклонения положения центра масс от назначенной траектории

$$\delta_x(t) = \varphi_x(t) - x(t), \delta_y(t) = \varphi_y(t) - y(t) \quad (4)$$

были исчезающими функциями и подчинялись в процессе управляемого движения соответственно следующим дифференциальным уравнениям:

$$\begin{aligned} \ddot{\delta}_x + h_1\dot{\delta}_x + h_0\delta_x &= 0, \quad \ddot{\delta}_y + h_1\dot{\delta}_y + h_0\delta_y = 0, \\ h_0, h_1 &> 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где коэффициенты h_0 и h_1 следует выбирать такими, чтобы длительность затухания процессов $\delta_x(t) \rightarrow 0$ и $\delta_y \rightarrow 0$ в идентичных по предположению каналах управления по координатам x и y в замкнутой системе, полученной из (2),

$$\begin{cases} \ddot{x} + a_1\dot{x} = b_0f_x(t, x, \dot{x}); \\ \ddot{y} + a_1\dot{y} = b_0f_y(t, y, \dot{y}) \end{cases} \quad (6)$$

была приемлемой, а характер затухания соответствовал аperiodическому. При этом в качестве меры динамического отклонения текущей траектории центра масс ТСВП от назначенной траектории примем критериальные функции, характеризующие нормированную по массе энергию ускорения [4], в виде

$$g_x(f_x) = \frac{1}{2} [\ddot{x}^* - \ddot{x}(f_x)]^2, g_y(f_y) = \frac{1}{2} [\ddot{y}^* - \ddot{y}(f_y)]^2, \quad (7)$$

где $\ddot{x}^*$ и $\ddot{y}^*$ — требуемые ускорения, обеспечивающие движение центра масс вдоль назначенной траектории; $\ddot{x}(f_x)$ и $\ddot{y}(f_y)$ — ускорения центра масс ТСВП, вызываемые управляющими функциями.

Таким образом, решение поставленной задачи — нахождение управляющих функций (проекции силы, приложенной к центру масс) $f_x(t)$ и $f_y(t)$ — следует выполнять исходя из требования, чтобы на траекториях управляемого движения значения критериальных функций (7) в каждый момент времени принадлежали малой окрестности их минимума.

Решение этой обратной задачи динамики выполним путем минимизации (7) методом простого градиента, что позволяет получить аналитическое выражение искомого закона управления в дифференциальной форме для двух идентичных каналов в виде следующих уравнений:

$$\frac{df_x(t)}{dt} = -\lambda \frac{\partial g_x(f_x)}{\partial f_x}, \quad \frac{df_y(t)}{dt} = -\lambda \frac{\partial g_y(f_y)}{\partial f_y}, \quad (8)$$

где λ — параметр, характеризующий скорость приближения управляющих функций $f_x(t)$ и $f_y(t)$ к их оптимальным значениям $f_{x_{opt}}$ и $f_{y_{opt}}$, соответственно.

Преобразуем уравнение (8), вычислив производные для критериальных функций (7) с учетом (2). Имеем

$$\frac{\partial g_x(f_x)}{\partial f_x} = -b_0(\ddot{x}^* - \ddot{x}), \quad \frac{\partial g_y(f_y)}{\partial f_y} = -b_0(\ddot{y}^* - \ddot{y})$$

и

$$\frac{df_x(t)}{dt} = k(\ddot{x}^* - \ddot{x}), \quad \frac{df_y(t)}{dt} = k(\ddot{y}^* - \ddot{y}), \quad k = \lambda b_0. \quad (9)$$

Далее из уравнений (5) определим ускорения $\ddot{x}^*$ и $\ddot{y}^*$, при которых движение центра масс ТСВП теоретически точно следует заданной траектории. С учетом (4) имеем

$$\begin{aligned} \ddot{x}^* &= \ddot{\phi}_x + h_1[\dot{\phi}_x - \dot{x}] + h_0[\phi_x - x]; \\ \ddot{y}^* &= \ddot{\phi}_y + h_1[\dot{\phi}_y - \dot{y}] + h_0[\phi_y - y]. \end{aligned} \quad (10)$$

Подстановка полученных результатов (10) в (9) позволяет найти дифференциальную форму законов управления для двух каналов в виде уравнений

$$\begin{cases} \frac{df_x}{dt} = k[h_0(\phi_x - x) + h_1(\dot{\phi}_x - \dot{x}) + \ddot{\phi}_x - \ddot{x}]; \\ \frac{df_y}{dt} = k[h_0(\phi_y - y) + h_1(\dot{\phi}_y - \dot{y}) + \ddot{\phi}_y - \ddot{y}], \end{cases} \quad (11)$$

$$k = \lambda b_0.$$

Выполняя интегрирование левой и правой частей уравнений (11) при нулевых начальных условиях, можно найти искомые законы управления для двух каналов в виде

$$\begin{cases} f_x(t) = k[h_1(\phi_x - x) + h_0 \int_0^t (\phi_x - x) d\tau + (\dot{\phi}_x - \dot{x})]; \\ f_y(t) = k[h_1(\phi_y - y) + h_0 \int_0^t (\phi_y - y) d\tau + (\dot{\phi}_y - \dot{y})]. \end{cases} \quad (12)$$

Как следует из уравнения (12), для формирования управляющих функций $f_x(t)$ и $f_y(t)$ необходима информация о выходах $x, \dot{x}$ и $y, \dot{y}$, которая может поставляться с помощью отрицательной обратной связи от навигационной системы, а также информация о требуемой траектории движения $\phi_x(t), \dot{\phi}_x(t)$ и $\phi_y(t), \dot{\phi}_y(t)$, которая может быть сформирована в специальном устройстве — генераторе траектории.

По соотношениям (12), определяющим искомые управляющие функции, можно построить структурную схему регулятора, реализующего сконструированный закон управления по двум степеням свободы ТСВП при его поступательном движении на плоской поверхности. На рис. 1 приведена структурная схема такого регулятора для одного из двух идентичных каналов управления.

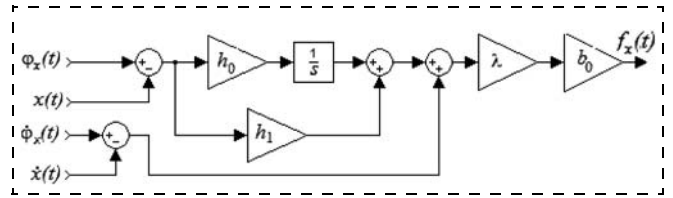


Рис. 1. Структурная схема регулятора, формирующего управляющую функцию $f_x(t)$ для одного канала управления при поступательном движении

Найденные управляющие функции (12) нельзя использовать непосредственно для управления ТСВП, так как нет соответствующих регулирующих органов. В рассматриваемой модели управляющие воздействия представлены суммарной силой тяги $F_s(t)$ и моментом вращения $M(t)$, который изменяет угол $\theta(t)$, характеризующий угловое положение ТСВП на координатной плоскости OXY . Таким образом, для эффективного управления движением ТСВП вдоль требуемой траектории необходимо выполнить преобразование управляющих функций $f_x(t)$ и $f_y(t)$ в управляющие воздействия $F_s(t)$ и $M(t)$, создаваемые парой воздушных двигателей, развивающих силы тяги F_L и F_R (левого и правого) соответственно. Решение этой задачи выполняется на втором этапе конструирования закона траекторного управления ТСВП как объекта с тремя степенями свободы.

Управляющее воздействие $F_s(t)$ — модуль суммарного вектора силы тяги, которая направлена вдоль продольной оси, — можно определить соотношением

$$F_s(t) = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}.$$

Для нахождения управляющего воздействия $M(t)$ — момента вращения, обеспечивающего поворот продольной оси ТСВП на угол $\theta(t)$, — по известным управляющим функциям $f_x(t)$ и $f_y(t)$ следует принять во внимание, что функция $\theta(t)$ входит в третье уравнение системы (1) и связана с управляющими силами соотношением

$$\theta(t) = \arctg \frac{f_y(t)}{f_x(t)}. \quad (13)$$

Таким образом, необходимо найти закон управления угловым положением ТСВП (закон авторулевого), который по заданному углу $\bar{\theta} = \text{const}$ формировал бы управляющую функцию в виде момента вращения $M(t)$, обеспечивающую поворот ТСВП на угол $\theta(t) = \bar{\theta}$ и его последующую угловую стабилизацию. В этом случае искомый закон управления угловым движением ТСВП при следовании вдоль требуемой траектории найдем как решение обратной задачи динамики [4].

Пусть угловое движение объекта управления описывается третьим уравнением системы (1), которое представим в виде

$$\ddot{\theta} = -p_1 \dot{\theta} + q_0 M(t), \quad (14)$$

где

$$p_1 = \frac{d_\omega}{J}, \quad q_0 = \frac{1}{J}.$$

Поставим задачу найти управляющую функцию в форме обратных связей $M(t, \theta, \dot{\theta})$, которая обеспечит перевод ТСВП из начального состояния $t=0$, $\theta(0) = \theta_0$, $\dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0$ в новое стационарное состояние равновесия $t > 0$, $\theta = \bar{\theta}$, $\dot{\theta} = 0$. При этом потребуем, чтобы процессы $\theta(t) \rightarrow \bar{\theta}$ и $\dot{\theta}(t) \rightarrow 0$ в замкнутой системе, которая следует из (14),

$$\ddot{\theta} + p_1 \dot{\theta} = q_0 M(t, \theta, \dot{\theta}) \quad (15)$$

проходили в малой окрестности эталонных процессов $\theta^*(t) \rightarrow \bar{\theta}$, $\dot{\theta}^*(t) \rightarrow 0$, которые определяются дифференциальным уравнением

$$\ddot{\theta}^* + \beta_1 \dot{\theta}^* + \beta_0 \theta^* = \beta_0 \bar{\theta}, \quad (16)$$

описывающим эталонную модель при соответствующих начальных условиях. В уравнении (16) коэффициенты (параметры эталонной модели) $\beta_0, \beta_1 = \text{const} > 0$ подлежат выбору в соответствии с требованиями к динамике авторулевого и всей системы траекторного управления в целом.

Степень приближения процессов в авторулевом и в эталонной модели будем оценивать значением критериальной функции:

$$g_M(M) = \frac{1}{2} [\ddot{\theta}^* - \ddot{\theta}(M)]^2, \quad (17)$$

где $\ddot{\theta}^*$ — ускорение, обеспечивающее требуемое угловое движение ТСВП; $\ddot{\theta}(M)$ — угловое ускорение ТСВП, вызываемое управляющим моментом.

Для нахождения искомой управляющей функции $M(t)$, обеспечивающей минимум (17), воспользуемся уравнением простого градиента

$$\frac{dM(t)}{dt} = -\lambda_M \frac{\partial g_M(M)}{\partial M}, \quad (18)$$

которое после вычисления частной производной с учетом (17) и (16) приводится к уравнению, определяющему дифференциальный закон управления в виде

$$\frac{dM(t)}{dt} = \lambda_M q_0 [\beta_0 (\bar{\theta} - \theta^*) - \beta_1 \dot{\theta}^* - \ddot{\theta}], \quad (19)$$

где β_0 и β_1 — параметры эталонной модели, определяющие желаемую динамику углового движения ТСВП; q_0 — параметр (коэффициент передачи) объекта управления; λ_M — постоянная градиентного метода оптимизации; $\bar{\theta}$ — требуемый угол

ориентации ТСВП, который вычисляется по формуле (13); θ^* — сигнал выхода эталонной модели; $\dot{\theta}$ — производная выходного сигнала системы (15).

Полагая в (19) $\theta^* = \theta$, что соответствует замене сигнала эталонной модели соответствующим сигналом обратной связи от гироскопической измерительной системы, и интегрируя обе части (19), приведем искомый закон управления угловым движением ТСВП к следующему окончательному виду:

$$M(t) = k_M \left[\int_0^t \beta_0 (\bar{\theta} - \theta) dt - \beta_1 \theta - \dot{\theta} \right], \quad k_M = \lambda_M q_0. \quad (20)$$

Структурная схема регулятора (авторулевого), обеспечивающего угловое движение ТСВП при траекторном управлении, следует из соотношения (20) и представлена на рис. 2.

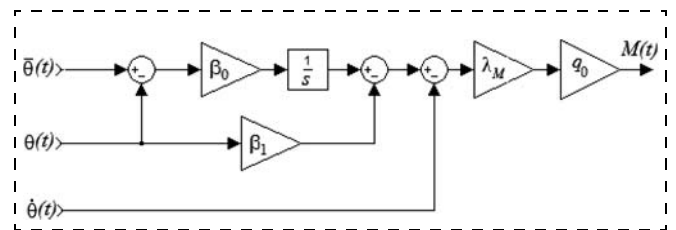


Рис. 2. Структурная схема регулятора углового движения ТСВП (авторулевого)

Найденные управляющие воздействия F_s и M позволяют вычислять силы тяги воздушных двигателей, обеспечивающих следование ТСВП назначенной траектории, по формулам

$$F_L = \frac{1}{2} \left(F_s - \frac{M}{l} + F_0 \right), \quad F_R = \frac{1}{2} \left(F_s + \frac{M}{l} + F_0 \right), \quad (21)$$

где F_0 — постоянная составляющая суммарной силы тяги вентиляторных двигателей, l — плечо момента сил тяги (расстояние между продольными осями вентиляторов и ТСВП).

Таким образом, сконструированные законы траекторного управления могут быть реализованы с помощью трех регуляторов, управляющих продольным и вращательным движением ТСВП, а также генератора траектории. При этом управление продольным движением осуществляется двумя идентичными регуляторами, входящими в блок траекторного управления, который формирует управляющие сигналы f_x и f_y , обеспечивающие перемещение центра масс ТСВП на плоскости по координатам x и y в соответствии с данными генератора траектории, а управление угловым движением ТСВП осуществляется с помощью авторулевого. Генератор траектории предназначен для формирования сигналов, соответствующих функциям $\varphi_x(t)$, $\dot{\varphi}_x(t)$ и $\varphi_y(t)$, $\dot{\varphi}_y(t)$, которые определяют назначенную траекторию движения.

Исследование поведения замкнутой системы управления с линейной моделью ТСВП при неограниченном росте усиления в каналах управления

Как следует из полученных результатов, замкнутая система траекторного управления состоит из трех (по числу степеней свободы) независимых каналов управления с соответствующими коэффициентами усиления. Принимая каналы управления по координатам $x(t)$ и $y(t)$ идентичными, исследуем асимптотические свойства поступательного движения ТСВП под воздействием управляющих сил f_x и f_y при неограниченном росте усиления в соответствующих каналах.

Рассмотрим первое уравнение в системе (6), соответствующей замкнутой системе. Продифференцируем обе его части по времени при нулевых начальных условиях и в полученный результат подставим первое уравнение системы (11). Имеем

$$\ddot{x} + a_1 \dot{x} = b_0 k [h_0(\varphi_x - x) + h_1(\dot{\varphi}_x - \dot{x}) + \ddot{\varphi}_x - \ddot{x}], \quad (22)$$

где $k = \lambda b_0$ — коэффициент усиления, включающий параметр объекта управления $b_0 = \text{const}$ и параметр λ , характеризующий скорость движения управляющих функций f_x и f_y к их оптимальным значениям f_{x_opt} и f_{y_opt} соответственно. Подлежащий расчету параметр λ не может быть величиной бесконечного порядка, так как в реальной динамической системе невозможно достичь мгновенно оптимальных значений управляющих функций, определяемых дифференциальными уравнениями (11). По этой причине для асимптотического анализа введем в структуру регулятора дополнительно усилительный элемент k_x следующим образом:

$$k k_x = \lambda b_0 k_x. \quad (23)$$

Очевидно, что при $k_x = 1$ свойства уравнения (22) не изменятся. Перепишем уравнение (22) с учетом (23) и найдем предел при $k_x \rightarrow \infty$, $b_0 = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$:

$$\lim_{k_x \rightarrow \infty} \frac{1}{k_x} \ddot{x} + \lim_{k_x \rightarrow \infty} \frac{a_1}{k_x} \dot{x} = b_0 [h_0(\varphi_x - x) + h_1(\dot{\varphi}_x - \dot{x}) + \ddot{\varphi}_x - \ddot{x}]. \quad (24)$$

Из (24) с учетом (5), а также вследствие идентичности каналов управления следует, что при $k_x \rightarrow \infty$ и $k_y \rightarrow \infty$ траектория движения центра масс ТСВП и ее производные совпадают с назначенной траекторией и ее производными соответственно.

Аналогичным путем можно исследовать асимптотические свойства канала управления угловой координатой $\theta(t)$. Рассмотрим уравнение (14) и, продифференцировав обе части по времени, подставим в его правую часть закона управления (19) с учетом замены $\theta^* = \theta$. Получим

$$\ddot{\theta} + p_1 \dot{\theta} = q_0 k_M [\beta_0(\bar{\theta} - \theta) - \beta_1 \dot{\theta} - \ddot{\theta}], \quad (25)$$

где $k_M = \lambda_M q_0$ — коэффициент усиления, включающий параметр объекта управления $q_0 = \text{const}$ и параметр $\lambda_M = \text{const}$, характеризующий скорость движения управляющей функции $M(t)$ к ее оптимальному значению M_{opt} ; β_0 и β_1 — параметры эталонной модели (16). Вводя дополнительный коэффициент усиления k_θ таким образом, что $k_M k_\theta = \lambda_M q_0 k_\theta$, преобразуем уравнения (25) и найдем для него предел при $k_\theta \rightarrow \infty$:

$$\lim_{k_\theta \rightarrow \infty} \frac{1}{k_\theta} \ddot{\theta} + \lim_{k_\theta \rightarrow \infty} \frac{p_1}{k_\theta} \dot{\theta} = q_0 [\beta_0(\bar{\theta} - \theta) - \beta_1 \dot{\theta} - \ddot{\theta}],$$

откуда следует

$$\beta_0(\bar{\theta} - \theta) - \beta_1 \dot{\theta} - \ddot{\theta} = 0 \text{ или } \ddot{\theta} + \beta_1 \dot{\theta} + \beta_0 \theta = \beta_0 \bar{\theta}.$$

Последний результат означает, что неограниченный рост усиления в канале управления угловым движением приводит к вырождению уравнения замкнутой системы (15) в уравнение эталонной модели (16).

Исследование процессов адаптации

Процессы адаптации связаны с вычислением управляющих функций с помощью дифференциальных уравнений (11) и (19), в которые входят параметры λ и λ_M , подлежащие определению. Исследуем влияние параметра λ на динамические свойства управляемого поступательного движения ТСВП на примере канала управления координатой $x(t)$. Отметим, что по построению дифференциальный закон управления (первое уравнение в системе (11)) при заданных начальных условиях описывает траекторию движения управляющей функции f_x к ее оптимальному значению f_{x_opt} . Введем в рассмотрение функцию

$$\tilde{f}_x(t) = f_x(t) - f_{x_opt}, \text{ где } f_{x_opt} = \text{const}, \quad (26)$$

характеризующую текущее (относительно начального состояния) отклонение управляющей функции от ее оптимального значения, которое в соответствии с уравнениями (7) и (9) можно найти из условия минимума критериальной функции $g_x(f_x)$ как решение уравнения

$$\frac{\partial g_\theta(f_x)}{\partial f_x} = -b_0 [\ddot{x}^* - \ddot{x}(f_{x_opt})] = 0. \quad (27)$$

Действительно, из уравнения (27) следует, что

$$\ddot{x}^* = \ddot{x}(f_{x_opt}). \quad (28)$$

Вместе с тем, в соответствии с системой (1) выражение для оптимального управления определяется соотношением

$$f_{x_opt} = m \ddot{x}(f_{x_opt}) + d_v \dot{x}, \quad (29)$$

которое с учетом соотношения (28) преобразуется к виду

$$f_{x_opt} = m\ddot{x}^* + d_v\dot{x}. \quad (30)$$

Принимая во внимание уравнения (1) и (30), перепишем уравнение (26) следующим образом:

$$\begin{aligned} \ddot{f}_x &= f_x(t) - f_{x_opt} = \\ &= m\ddot{x} + d_v\dot{x} - m\ddot{x}^* - \mu\dot{x} = -m(\ddot{x}^* - \ddot{x}). \end{aligned} \quad (31)$$

Далее, дифференцируя обе части (26) и подставляя полученный результат вместе с равенством (31) в первое уравнение (9), получим однородное дифференциальное уравнение для отклонения $\tilde{f}_x$ в виде

$$\frac{d\tilde{f}_x}{dt} + \lambda b_0^2 \tilde{f}_x = 0; \quad \tilde{f}_x(t_0) = \tilde{f}_x^0; \quad t \in [t_0, t_f]. \quad (32)$$

Из решения уравнения (32) с указанными начальными условиями, которое имеет вид

$$\tilde{f}_x = \tilde{f}_x^0 \exp(-\lambda b_0^2 t), \quad t \in [t_0, t_f], \quad (33)$$

следует, что при $t \rightarrow \infty$ отклонение управляющей функции f_x от ее оптимального значения f_{x_opt} асимптотически (по экспоненте) стремится к нулю, причем скорость этого стремления пропорциональна величине

$$|\lambda b_0^2| = \frac{1}{\tau_{pa}}, \quad (34)$$

где τ_{pa} — постоянная времени переходного процесса, характеризующего движение управляющей функции от ее начального состояния к оптимальному значению. Если задать желаемое время t_{pa} этого переходного процесса, которое можно назвать временем адаптации, то значение постоянной времени адаптации определится соотношением $\tau_{pa} \approx \frac{t_{pa}}{7}$.

Учитывая последний результат и соотношение (34), выражение для параметра λ можно записать в виде

$$\lambda = \frac{7}{b_0^2 t_{pa}}. \quad (35)$$

Выражение для параметра λ_M находится аналогичным образом:

$$\lambda_M = \frac{7}{q_0^2 t_{pa_M}}, \quad (36)$$

где $t_{pa_M} = 7\tau_{pa_M}$ — желаемое время адаптации для канала управления угловым движением; τ_{pa_M} — постоянная времени устройства адаптации.

Синтез параметров регуляторов

В роли параметров регуляторов выступают коэффициенты моделей эталонных процессов (h_0, h_1 —

для поступательного движения и β_0, β_1 — для вращательного движения), параметры λ и λ_M , а также коэффициенты усиления k_x, k_y и k_θ .

Параметры эталонных моделей могут быть найдены методом моделирования [5] уравнений (5) и (16). При этом в роли критериев выбора можно использовать заданные показатели качества переходных процессов в соответствующих каналах управления. Если задать постоянную времени τ_{pp} , характеризующую желаемую динамику поступательного движения управляемого ТСВП при идентичности каналов управления по координатам $x(t)$ и $y(t)$, и $\tau_{p\theta}$ — постоянную времени управляемого вращательного движения, то искомые параметры эталонных моделей, обеспечивающих перерегулирование в каналах управления не более 5 %, можно приближенно вычислить по следующим формулам:

$$\begin{aligned} h_0 &= \frac{1}{\tau_{pp}^2}; \quad h_1 = 2\zeta \frac{1}{\tau_{pp}}; \\ \beta_0 &= \frac{1}{\tau_{p\theta}^2}; \quad \beta_1 = 2\zeta \frac{1}{\tau_{p\theta}}; \quad \zeta \geq \frac{\sqrt{2}}{2}. \end{aligned} \quad (37)$$

Параметры λ и λ_M можно вычислять по формулам (35) и (36) соответственно. При этом постоянные времени процессов адаптации следует выбирать из условий

$$\tau_{pa} < \tau_{pp} \text{ и } \tau_{pa_M} < \tau_{p\theta}. \quad (38)$$

Коэффициенты усиления k_x, k_y и k_θ принимаются равными единице и на этапе моделирования синтезированной системы уточняются.

Моделирование

Для расчета параметров регулятора разработана специальная программа, предназначенная для исполнения в среде MATLAB. В качестве входных параметров этой программы (исходных для расчета данных) помимо параметров объекта b_0, q_0 и начального состояния системы задавали следующие значения желаемых времен переходных процессов в каналах управления и в соответствующих устройствах адаптации:

$$t_{pp} = 7 \text{ с}; \quad t_{p\theta} = 0,7 \text{ с}; \quad t_{pa} = 3,5 \text{ с}; \quad t_{pa_M} = 0,35 \text{ с}.$$

При этом принимали во внимание, что быстроедействие процессов в канале углового движения существенно выше, чем в каналах управления продольным движением ТСВП, что следует из анализа уравнений (1). Время адаптации для всех каналов выбрано вдвое меньше длительности соответствующих переходных процессов управления, что соответствует условиям (38).

Декременты затухания эталонных процессов во всех каналах приняты одинаковыми $\zeta = 0,9$.

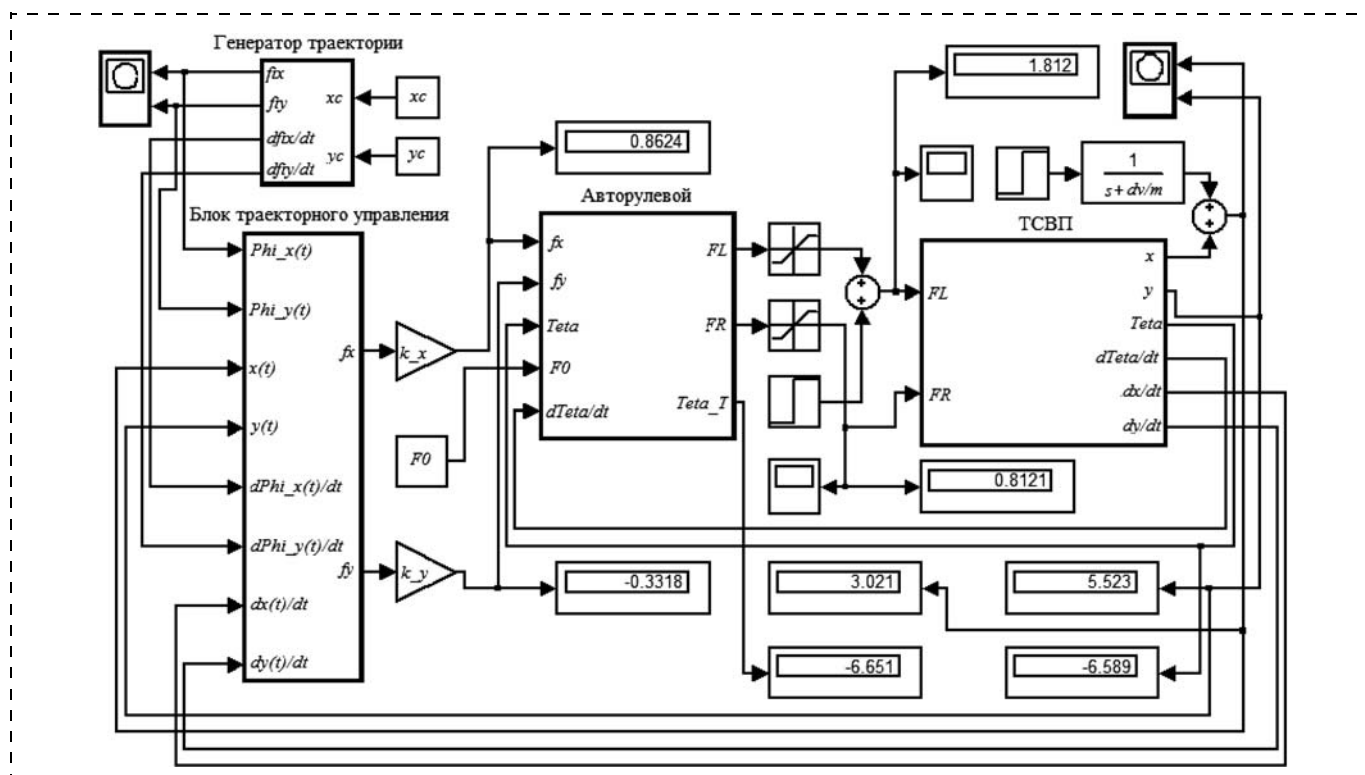


Рис. 3. Схема моделирования адаптивной системы траекторного управления ТСВП

В результате по формулам (35), (36) и (37) вычислены искомые параметры регулятора

$$h_0 = 1, h_1 = 1,8, \beta_0 = 76,1, \\ \beta_1 = 15,7, \lambda = 60,5, \lambda_M = 0,04.$$

Коэффициенты усиления в соответствующих каналах регулятора получили следующие значения:

$$k = \lambda b_0 k_x = 11; k_M = \lambda_M q_0 k_0 = 0,82; \\ k_x = 1; k_y = 1; k_0 = 1.$$

Моделировали движение ТСВП по назначенной траектории в виде окружности. При этом траектория требуемого движения на плоской поверхности задавали по аналогии с работой [1] параметрическими уравнениями

$$\begin{cases} x(t) = r \sin \omega t + x_c; \\ y(t) = r \cos \omega t + y_c \end{cases} \quad (39)$$

с коэффициентами

$$r = 1,5 \text{ м}, \omega = 0,3 \text{ рад/с}, \\ x_c = 3 \text{ м}, y_c = 4 \text{ м}$$

и начальными условиями

$$t_0 = 0 \text{ с}; x_0 = 3 \text{ м}; y_0 = 5,5 \text{ м}; \\ \theta_0 = 0 \text{ рад}; F_0 = 0,5 \text{ Н.} \quad (40)$$

На рис. 3 приведена схема моделирования системы траекторного управления ТСВП в среде SIMULINK, на которой учтены ограничения дви-

жителей. При вычислениях по формуле (13) использован алгоритм, предложенный в работе [6].

На рис. 4 приведены графики процессов, характеризующих силы тяги левого $F_L(t)$ и правого $F_R(t)$ вентиляторных двигателей. На рис. 5 изображены траектории выведения ТСВП из начального состояния (40) в режим установившегося движения по назначенной окружности (39) с радиусом r и с заданной угловой скоростью ω . При этом в момент времени $t = 5$ с вдоль продольной оси левого вентилятора приложено скачкообразное возмущение в виде дополнительной силы тяги $\Delta F_L = 1,2$ Н, которая вызвала дисбаланс в системе двигателей, а в момент времени $t = 10$ с приложено еще координатное возмущение вдоль оси OX .

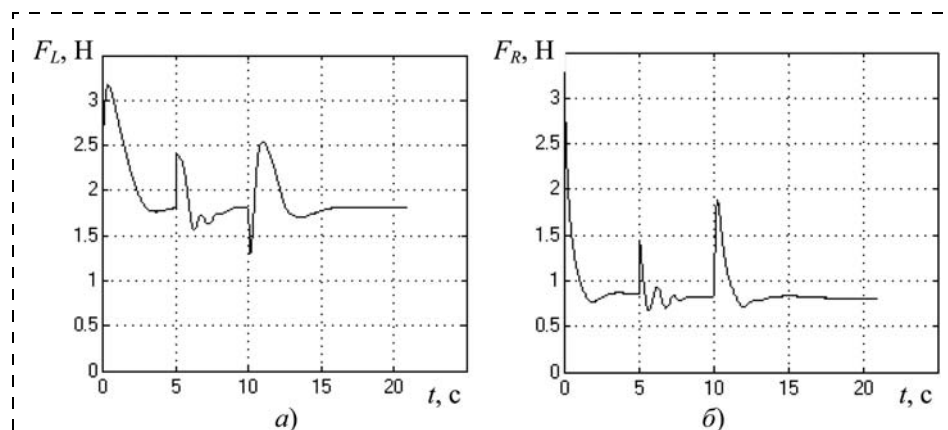


Рис. 4. Графики сил тяги как функций времени левого (а) и правого (б) вентиляторных двигателей

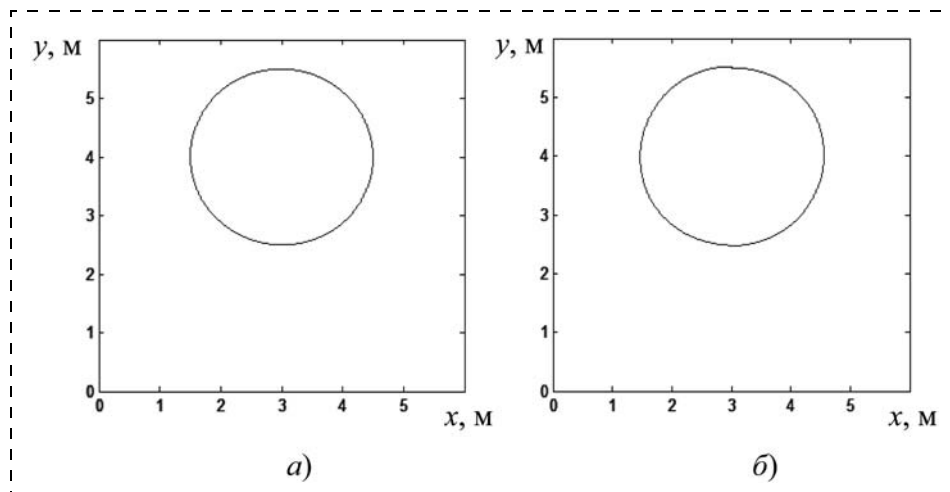


Рис. 5. Назначенная траектория (а), формируемая генератором траектории, и фактическая траектория (б), которую описывает центр масс ТСВП

Как следует из рис. 4, действия возмущений вызвали активную и целенаправленную работу вентиляторных движителей и никак не отразились на форме пройденной траектории, которая полностью совпала с назначенной, сформированной генератором траектории.

Следует отметить, что результаты моделирования, приведенные на рис. 4 и 5, получены при использовании параметров настройки регуляторов, рассчитанных автоматически программой синтеза. Дополнительное моделирование показало целесообразность увеличения усиления в канале авторулевого до $k_\theta = 10$. Значения остальных параметров сохранены на уровне расчетных.

Заключение

Применение новых технологий аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением [4] для решения задач траекторного управления ТСВП позволяет на формальной основе путем минимизации локальных энергетических критериев находить уравнения для законов управления, порождающие структуры регуляторов, синтез параметров которых сводится к простым процедурам расчета коэффициентов моделей эталонных процессов, обладающих желаемыми динамическими свойствами. Показано, что эти свойства приобретает замкнутая система управления с ростом коэффициента усиления в прямой цепи, и в пределе, при его неограниченном возрастании, динамика системы управления полностью определяется эталонным процессом. На практике, как следует из приведенного примера, хорошие результаты могут быть получены и при небольших значениях усиления в каналах управления ($k = \lambda b_0 k_x = 11$ и $k_M = \lambda_M q_0 k_\theta = 8,2$), что обусловлено обоснованным выбором параметров λ и λ_M . Это обстоятельство позволяет эффективно управлять нелинейными объектами, имеющими ограничения в силовых

установках. При этом важно отметить, что для синтеза системы траекторного управления ТСВП можно не выполнять процедуру линеаризации модели объекта управления. Если имеется возможность экспериментального определения параметров b_0 и q_0 , то для синтеза параметров регуляторов модель объекта управления не нужна. Она потребуется лишь на этапе моделирования при исследовании свойств спроектированной системы.

Поскольку динамика замкнутой системы управления определяется эталонными процессами, то для синтеза параметров регуляторов не обяза-

тельно иметь информацию о динамических свойствах (постоянных времени) объекта управления, а достаточно знание лишь его коэффициентов усиления (b_0 и q_0), которые используются для расчета необходимых коэффициентов усиления в соответствующих каналах управления и могут быть найдены экспериментально. Однако при выборе желаемых времен переходных процессов в каналах управления информация о постоянных времени объекта может быть полезной. Это продемонстрировано в приведенном примере.

В соответствии с применяемой технологией аналитического проектирования по построению получается адаптивный закон управления с неявной эталонной моделью, что обеспечивает малую чувствительность проектируемой системы к параметрическим и координатным возмущениям.

Дальнейшие исследования связаны с разработкой технологии конструирования алгоритмического обеспечения для адаптивных цифровых регуляторов.

Список литературы

1. Aguiar A. P., Hespanha J. P. Trajectory-Tracking and Path-Following of Underactuated Autonomous Vehicles with Parametric Modeling Uncertainty // IEEE Transactions on Automatic Control. 2007. V. 52, N 8. P. 1362–1379.
2. Pettersen K., Nijmeijer H. Underactuated ship tracking control: theory and experiments // Int. Journ. of Control. 2001. N 74(14). P. 1435–1446.
3. Крутько П. Д. Алгоритмы терминального управления линейными динамическими системами // Известия РАН. ТиСУР. 1998. № 6. С. 33–45.
4. Крутько П. Д. Новые технологии аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением // Управление, автоматизация и окружающая среда: Материалы международ. науч.-техн. конф., г. Севастополь. 2008. С. 4–24.
5. Краснотубец Л. А. Терминальное управление в морских наблюдательных системах с подвижными платформами сбора данных // Известия РАН. ТиСУР. 2008. № 2. С. 141–153.
6. Батенко А. П. Системы терминального управления. М.: Радио и связь, 1984.

Е. С. Брискин, д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой,

А. В. Леонард, аспирант, мл. науч. сотр.,

Alex-Leonard@yandex.ru,

Волгоградский государственный
технический университет

О безударном режиме движения шагающей машины со сдвоенным поворотным двигателем*

Рассматривается плоское движение шагающей машины со сдвоенным поворотным двигателем. Предложен метод управления, обеспечивающий безударное движение шагающей машины. Проводится численное моделирование кинематики движения машины при произвольном и разработанном методе управления.

Ключевые слова: шагающий сдвоенный поворотный двигатель, шагающая машина, моделирование движения, безударный поворот

Введение. Известны шагающие машины со сдвоенными механизмами шагания и общим приводом поворота (рис. 1, см. вторую сторону обложки) [1–4].

Отличительным свойством таких машин является появление ударных нагрузок в горизонтальной плоскости на привод поворота при маневрировании, обусловленных конструктивными особенностями шагающих двигателей: один общий привод поворота — на пару сдвоенных механизмов шагания [5–7].

Для изучения особенностей кинематики движения [8–12] рассматривается машина, состоящая из одного двигателя (пары сдвоенных цикловых шагающих механизмов). Двигатель соединен посредством привода поворота с поддерживающей рамой, оснащенной колесами (рис. 1). Кинематическая схема машины представлена на рис. 2 (см. вторую сторону обложки).

Постановка задачи. Ставится задача определения законов управления

$$\dot{\psi} = \dot{\psi}(t), \quad \dot{\rho} = \dot{\rho}(t),$$

где ψ — угол между осями x_1 и x_2 ; ρ — расстояние между точками $C_{1(2)}$ и $E_{1(2)}$ ($\rho = \rho_{1(2)}$), при задании движения корпуса в форме

$$\begin{cases} V_M = V_M(t); \\ \Omega = \Omega(t), \end{cases} \quad (1)$$

(здесь V_M — скорость точки M корпуса машины; Ω — угловая скорость поворота корпуса), а также разработки методов управления, минимизирующих ударные нагрузки на привод поворота машины.

*Работа поддержана РФФИ (проект № 11-08-00955, 12-08-31375, 12-01-31398).

Математическая модель. Известно, что при плоском движении твердого тела (см. рис. 2) справедливо равенство

$$\mathbf{V}_D = \mathbf{V}_M + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}, \quad (2)$$

где $\mathbf{V}_D$ — вектор линейной скорости точки D ; $\mathbf{V}_M$ — вектор линейной скорости точки M ; $\boldsymbol{\Omega}$ — вектор абсолютной угловой скорости корпуса $\mathcal{Z}$ (относительно неподвижной системы координат xGy); $\mathbf{R}$ — вектор, направленный от точки M к точке D .

Записав уравнение (2) в проекциях на оси системы координат x_1My_1 , жестко связанной с корпусом машины, получаем

$$\begin{cases} V_{Dx_1} = V_M; \\ V_{Dy_1} = \Omega R; \\ \Omega = \dot{\theta}, \end{cases} \quad (3)$$

где θ — угол между осями x и x_1 .

Вместе с тем, для механизмов (см. рис. 2) $I(2)$ во время нахождения в фазе взаимодействия с грунтом справедливо следующее векторное соотношение:

$$\mathbf{V}_D = \dot{\rho} + \dot{\phi} \times (\rho + \mathbf{h}) = \dot{\rho} + (\boldsymbol{\Omega} + \dot{\psi}) \times (\rho + \mathbf{h}), \quad (4)$$

где ρ — вектор, задающий положение точки $E_{1(2)}$ относительно точки $C_{1(2)}$; ϕ — угол между осями x и x_2 ; $\mathbf{h}$ — вектор, задающий положение точки D относительно точки $E_{1(2)}$; $\dot{\phi}$ — вектор абсолютной угловой скорости двигателя относительно неподвижной точки C_1 в системе координат xGy :

$$\dot{\phi} = \boldsymbol{\Omega} + \dot{\psi};$$

$\dot{\psi}$ — вектор угловой скорости двигателя относительно корпуса (подвижной системы координат x_1My_1).

Проектирование уравнений (4) на подвижные оси координат x_1, y_1 , связанные с корпусом шагающей машины (с учетом равенств (3)), позволяет получить дифференциальные уравнения, описывающие ее плоское движение:

$$\begin{cases} \dot{\rho} = \frac{(\rho \cos \psi \mp h \sin \psi) V_M + (\rho \sin \psi \pm h \cos \psi) \Omega R}{\rho}; \\ \dot{\psi} = -\Omega + \frac{\Omega R \cos \psi - V_M \sin \psi}{\rho}. \end{cases} \quad (5)$$

Верхние знаки в скобках первого равенства связаны с первым механизмом, нижние — со вторым (см. рис. 2).

Результаты расчета. В соответствии с уравнениями (5) проведен расчет законов управления $\dot{\psi} = \dot{\psi}(t)$, $\dot{\rho} = \dot{\rho}(t)$ и траектории характерных точек для следующего режима движения шагающей машины: $V_M = 0,05$ м/с; $\Omega = 0,02$ рад/с (рис. 3–5, см. вторую сторону обложки) с параметрами $h = 0,2$ м; $R = 1$ м; $\rho_{\min} = 0,2$ м; $\rho_{\max} = 0,6$ м. На приведенных

графиках чередование темных и светлых участков отражает попеременную работу шагающих механизмов 1 и 2 в фазе опоры (см. рис. 2); t_i — моменты времени смены механизмов шагания, взаимодействующих с грунтом.

Анализ результатов показывает, что линейные скорости забегающего и отстающего механизмов шагания $\dot{\rho}$ различны и непостоянны. Разрывы функций $\dot{\rho} = \dot{\rho}(t)$ не являются причиной ударных нагрузок в горизонтальной плоскости на приводы курсового движения, так как они относятся к механизмам шагания различных бортов. В процессе переноса механизма шагания, который в работе не рассматривается, управление приводами должно обеспечивать плавное сопряжение участков нижней кривой (скорости отстающего борта) и участков верхней кривой (забегающего борта). Что касается угловой скорости привода поворота, то здесь реализуется ударный режим, который является недостатком рассматриваемого способа поворота.

Безударный поворот. Для обеспечения безударного поворота при смене механизма шагания (согласно второму уравнению (5)) следует положить

$$\Omega R \cos \psi - V_M \sin \psi|_{\rho = \rho_{\max}} = 0. \quad (6)$$

В этом случае $\dot{\psi}$ не будет зависеть от ρ , а движитель совершает мгновенно поступательное движение:

$$\dot{\phi} = \Omega + \dot{\psi} = 0. \quad (7)$$

Тогда в момент переступания линейная скорость забегающего и отстающего механизмов шагания должны быть равны между собой:

$$\dot{\rho}_1 = \dot{\rho}_2. \quad (8)$$

Реализовать выполнение условий (7), (8) можно различными способами. С точки зрения управления, один из самых простых способов может основываться на условии постоянства скорости $\dot{\rho}$ забегающего и отстающего механизмов шагания в период нахождения в фазе опоры. Тогда время нахождения механизма шагания в опорной фазе определяется по формуле

$$\tau = (\rho_{\max} - \rho_{\min}) / \dot{\rho}. \quad (9)$$

Закон изменения $\dot{\phi}$, удовлетворяющий условию (7), может принимать различные формы, например $\dot{\phi} = 0,02 - 0,02 \cos(0,785t)$.

Но для обеспечения минимума инерционных нагрузок, обусловленных работой поворотного привода, принимается закон вида

$$\dot{\phi} = \begin{cases} \varepsilon t, & 0 \leq t \leq \tau/2; \\ \omega(t = \tau/2) - \varepsilon(t - \tau/2), & \tau/2 \leq t \leq \tau, \end{cases} \quad (10)$$

где ε — угловое ускорение привода поворота.

Алгоритм определения кинематических параметров, характеризующих движение машины в соответствии с (10), состоит в выполнении следующей последовательности действий:

1) определение (задание) начальных значений ϕ_0 , ψ_0 , θ_0 и углового ускорения ε ;

2) задание $\dot{\rho}(t) = \text{const}$;

3) определение временной константы τ (см. (9));

4) определение вектора V_D (см. (4));

5) определение Ω , V_M и $\dot{\psi}$ (см. (3)) путем проецирования на подвижные оси координат x_1 , y_1 вектора V_D ;

6) расчет следующих значений:

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \dot{\phi} \Delta t, \theta_{i+1} = \theta_i + \Omega \Delta t, \psi_{i+1} = \psi_i + \dot{\psi} \Delta t.$$

Цикл повторяется с четвертого пункта.

Для режима движения шагающей машины

$$\dot{\phi} = \begin{cases} 0,025t, & 0 \leq t \leq \tau/2; \\ \omega(t = \tau/2) - 0,025(t - \tau/2), & \tau/2 \leq t \leq \tau, \end{cases} \text{ (рад/с);}$$

$$\dot{\rho} = 0,05 \text{ (м/с),}$$

и при тех же параметрах машины на рис. 6 (см. третью сторону обложки) представлена зависимость угловой скорости движителя относительно корпуса машины от времени, на рис. 7 (см. третью сторону обложки) — зависимость модуля скорости точки M , а на рис. 8 (см. третью сторону обложки) изображена кривая изменения абсолютной угловой скорости корпуса.

Траектории характерных точек шагающей машины представлены на рис. 9 (см. третью сторону обложки).

Анализ траекторий движения характерных точек (рис. 9, 10 (см. третью сторону обложки)) показал, что реализация безударного поворота приводит к искажению траекторий характерных точек корпуса по сравнению с поворотом (1) (см. рис. 3). Траектории характерных точек изменяются. Время движения машины и пройденный путь увеличиваются.

Заключение. Таким образом, управление в соответствии с программным движением (1) приводит к появлению ударных нагрузок в горизонтальной плоскости на поворотный привод движителя. Получены условия безударного режима движения машины (7), (8). При выполнении условий безударного режима движения шагающей машины траектории характерных точек становятся зависимыми от законов $\dot{\rho}(t)$, $\dot{\phi}(t)$ (рис. 10). Вид выражений $\dot{\rho}(t)$, $\dot{\phi}(t)$, удовлетворяющих условиям безударности, может меняться в соответствии с вводимым критерием оптимальности.

Список литературы

1. Брискин Е. С., Чернышев В. В., Жога В. В., Малолетов А. В. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2011. № 9. С. 27—31.
2. Пат. 2063353 РФ, МПК В 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е. С., Русаковский А. Е., Арзамасков А. М., Чернышев В. В.
3. Брискин Е. С., Чернышев В. В., Жога В. В., Малолетов А. В., Шаронов Н. Г., Фролова Н. Е. Концепция проектирования шагающих машин // Наука — производству. 2005. № 1. С. 33.
4. Брискин Е. С., Чернышев В. В., Фролова Н. Е. О позиционной зависимости тягово-сцепных свойств шагающих машин с цикловыми движителями // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2009. № 6. С. 21—25.

5. **Брискин Е. С., Жога В. В., Малолетов А. В.** Об управлении движением шагающей машины с двигателем минимальной мощности // Известия РАН. Механика твердого тела. 2009. № 6. С. 21—30.

6. **Пат. 2063354 РФ**, МПК В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е. С., Русаковский А. Е., Арзамасков А. М., Чернышев В. В.

7. **Пат. 223957 РФ**, МПК В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е. С., Чернышев В. В., Тельдеков А. В. 2003.

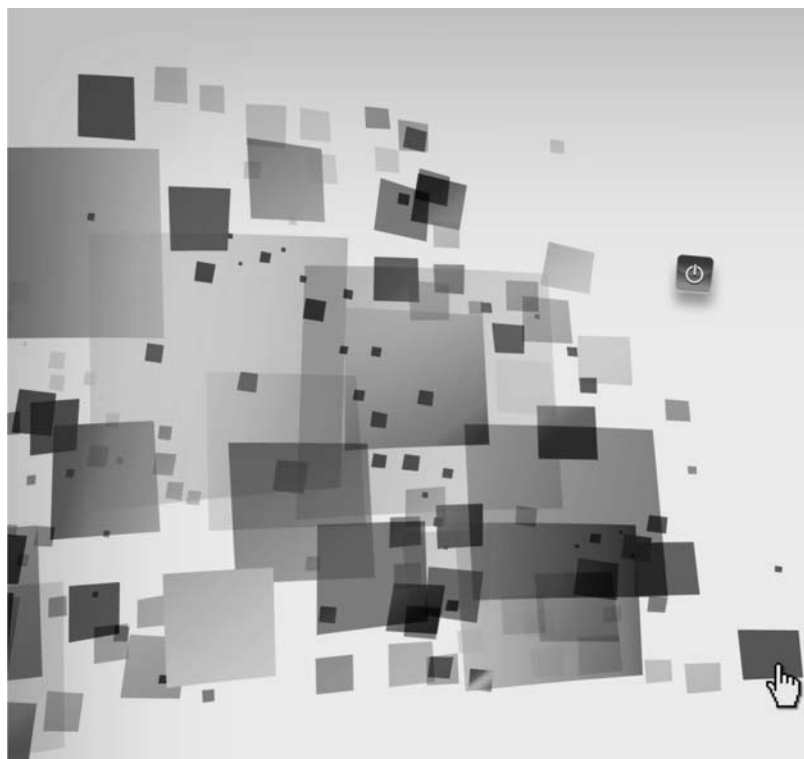
8. **Брискин Е. С., Леонард А. В., Малолетов А. В.** Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки // Теория механизмов и машин. 2011. № 1(17). Т. 9. С. 14—24.

9. **Пат. 2422317 РФ**, МПК В 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / Леонард А. В., Брискин Е. С. 2011.

10. **Цикловый** шагающий механизм с направляющей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 10. С. 18—22.

11. **Калинин Я. В.** Оценка энергетической эффективности шагающих машин с цикловыми движителями // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. 2009. № 12. С. 40—44.

12. **Брискин Е. С., Шаронов Н. Г.** Управление движением группы шагающих машин при перемещении моногруза // Искусственный интеллект. 2007. № 4. С. 408.



15-17
АПРЕЛЯ | 2014

МЕСТО
ПРОИЗВЕДЕНИЯ
МОСКВА
КРОКУС ЭКСПО
ПАВИЛЬОН 1, ЗАЛЫ 1, 2, 3

Е • X • P • O
ELECTRONICA

17-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И КОМПЛЕКТУЮЩИХ

12-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

4-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
СВЕТОДИОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МАТЕРИАЛОВ,
ЧИПОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Организаторы:

primexpo

ITE GROUP PLC

ufi

т. (812) 380 6003/07/00, ф. (812) 380 6001

electron@primexpo.ru

Условия участия
в выставке на сайте

www.expoelectronica.ru

УДК 658.56

П. О. Скобелев, д-р техн. наук, Ген. директор,
skobelev@smartsolutions-123.ru,

Е. В. Симонова, канд. техн. наук, вед. аналитик,
simonova@smartsolutions-123.ru,

С. С. Кожевников, директор аналитического центра,
koz@smartsolutions-123.ru,

И. В. Майоров, вед. аналитик,
mayorov@smartsolutions-123.ru,
НПК "Разумные решения",

А. Л. Феоктистов, зам. Генерального конструктора по информационным технологиям,
Alexander.Feoktistov@rsce.ru,

Е. М. Клейменова, руководитель
Научно-технического центра

"Корпоративные информационные технологии",
elena.kleimenova@rsce.ru,

Е. В. Полончук, начальник отдела
Научно-технического центра

"Корпоративные информационные технологии",
Evgeny.Polonchuk@rsce.ru,
ОАО "ПКК "Энергия"

Обзор систем адаптивного планирования производства

Выполнен обзор мировых разработок в области систем адаптивного планирования производственных процессов промышленных предприятий. Обосновываются преимущества мультиагентной технологии и планирования и оптимизации ресурсов.

Ключевые слова: мультиагентная система, адаптивное планирование, производственный процесс

Введение

Несмотря на значительный прогресс в развитии теории оптимизации и создание крупномасштабных систем планирования ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning (ERP-систем)), возможности предприятий по развитию адаптивной системы планирования остаются очень ограниченными [1].

На практике многие классические методы планирования и оптимизации ресурсов, разработанные в соответствии с предположением о том, что входные заказы и ресурсы для их выполнения известны заранее и не меняются в процессе планирования и выполнения плана, имеют ряд существенных ограничений:

- не учитывают сложность современных производственных предприятий, работающих с тысячами заказов и ресурсов, и не отражают интересы многих участников, вовлеченных в процесс производства;
- не предоставляют возможности для адаптивного планирования в реальном времени, что требует динамического разрешения конфликта в зависимости от ситуации при планировании с поддержкой взаимозависимости между всеми заказами и операциями;
- принимают все заказы и ресурсы идентичными, но на практике все они имеют свои собственные, индивидуальные критерии, предпочтения и ограничения, которые к тому же могут меняться в ходе работы;
- не предоставляют инструменты формализации и накопления знаний, специфичных для каждого предприятия;
- не позволяют оператору легко и в интерактивной форме объяснять и настраивать процесс планирования, а также интерактивно дорабатывать результаты планирования и т. д.

Поэтому разработка адаптивных систем планирования и моделирования технологических процессов промышленных предприятий является в настоящее время одним из приоритетных направлений.

1. Мировые разработки в области систем адаптивного планирования

В настоящее время разработки систем планирования и управления производственным процессом промышленных предприятий являются ведущей тенденцией в мире.

1.1. Автоматизированная система производственного планирования ORTEMS

Автоматизированная система производственного планирования ORTEMS (разработка компании Ortems S.A.S., Франция, официальный партнер компании Ortems S.A.S., отвечающий за локализацию и внедрение системы Ortems на предприятиях России, стран СНГ и Балтии — компания "АНД Преджект") дает возможность осуществлять стратегическое планирование производства с использованием ключевых показателей эффективности (Key Performance Indicators (KPI)) и оперативное управление на основе детальных данных о технологическом процессе. Ее возможности позволяют учитывать сотни единиц оборудования и операций в технологических маршрутах, проводить быстрые расчеты планов с учетом многообразных факторов

оптимизации и вносить в планы оперативные изменения [2].

Модуль программы планирования производства ORTEMS "Production Scheduler" предлагает для решения задачи планирования ресурсов производственного предприятия оптимальное решение — учет всех особенностей производственной среды, возможность составлять реалистичные расписания, видеть детальную картину производства в реальном времени и управлять им, добиваясь решения следующих поставленных задач производственной оптимизации:

1) оптимизация производственного расписания с учетом промышленных ограничений;

2) визуализация хода производственного процесса;

3) внесение интерактивных изменений и производственное перепланирование. ORTEMS позволяет заранее оценить влияние различных отклонений — выход из строя оборудования, задержки с поставкой сырья, отсутствие оператора на рабочем месте, изменение требований заказчика — на производственный план, а затем оперативно корректировать производственное расписание:

- перенести операции с одной машины на другую;
- приостановить выполнение операции;
- сбалансировать загрузку оборудования на участке;
- сместить выполнение операции во времени;
- скорректировать календарь работы оборудования или оператора;
- смоделировать поломки оборудования;
- оценить потребность в персонале;
- оценить потребность в комплектующих;
- оценить соответствие запланированного выпуска продукции уровням страховых запасов;

4) синхронизированное оперативно-производственное планирование ресурсов.

Задача оперативного планирования неразрывно связана с составлением производственного расписания, которое учитывает основные технологические ограничения и одновременно позволяет визуализировать ход производственного процесса.

Качество производственного расписания во многом зависит от степени детализации производственной модели. ORTEMS позволяет описать большинство процессов "как есть" в реальной жизни. Графики работы оборудования, операционная производительность линий, характер взаимосвязи между операциями, времена технологических переходов, приоритеты выбора оборудования при планировании, наличие операторов требуемой квалификации и графики их работы — это лишь некоторые примеры ограничений, которые ORTEMS учитывает при планировании.

Работа по формированию сбалансированного плана производства начинается с описания технологии производственного процесса в виде информационной модели. Эта модель представляет собой описание производственного процесса и включает описание технологических линий, операций мар-

шрутов, рецептов и спецификаций изготовления продукции, а также многие другие параметры.

Весь производственный процесс представлен графически — в виде диаграммы Гантта. На диаграмме пользователь системы — планировщик — видит производственное расписание как набор операций, расположенных в двумерном пространстве: оборудование и время. При этом гарантировано соблюдение правил технологических процессов — объекты диаграммы точно соответствуют всем нормативам, которые занесены в систему.

Типичный рабочий день планировщика, использующего систему ORTEMS, разбит на две части: до обеда и после обеда. До обеда — подготовка данных для планирования (планирование на ближайшие 3...14 дней — для предприятий с коротким циклом производства); после обеда — подготовка сменных заданий с учетом факта выполнения за предыдущие сутки. Таким образом, в системе ORTEMS реализован пакетный режим планирования, реакция на непредвиденные события осуществляется не в реальном времени, а путем перерасчета всего производственного плана после ввода соответствующей информации в систему.

1.2. Пакет SAP Business Suite

Пакет решений SAP Business Suite (Systems, Applications, and Products in Data Processing) (разработка компании SAP AG, Германия) предназначен для повышения эффективности процессов управления финансами, персоналом и бизнес-операциями. Интегрированные решения, включенные в пакет SAP Business Suite, позволяют предприятиям оптимизировать и реализовывать стратегии развития бизнеса и информационные технологии [3]. Пакет SAP Business Suite дает организациям возможность выполнять ключевые бизнес-процессы, ориентированные на конкретную отрасль, с помощью модульных решений, совместимых с другими программными продуктами SAP и решениями других разработчиков. Организации и отделы, независимо от отраслевой принадлежности, могут развертывать бизнес-приложения поэтапно, следуя собственным графикам, руководствуясь конкретными потребностями бизнеса и не прибегая к дорогостоящим обновлениям. Бизнес-решения компании SAP обеспечивают расширенные возможности обзора и анализа всех аспектов работы предприятия, повышение операционной эффективности и более гибкое реагирование на изменения в бизнесе. Решения SAP Business Suite основываются на открытой сервисно-ориентированной архитектуре (SOA) и работают на базе технологической платформы SAP NetWeave.

Одним из решений, предлагаемых компанией SAP, является компонент Production Planning (PP)/Detailed Scheduling (DS) (Планирование производства/Точное календарное планирование), который предоставляет специалистам по планированию на-

бор усовершенствованных инструментов и методов, обеспечивающих создание и оптимизацию календарных планов производства.

В состав Production Planning/Detailed Scheduling (PP/DS) входят как простые в использовании функции для работы с графическими планировочными таблицами, так и мощные средства для оптимизации на основе заданных ограничений. Таким образом, специалисты получают в свое распоряжение широкий набор возможностей по планированию (составление планов с участием одного или нескольких производственных предприятий, одновременная проверка наличия мощностей и материала, функции для постановки различных экспериментов, динамические ведомости разметки потребностей и т. д.).

С помощью динамических ведомостей разметки потребностей и операции распространения изменений на несколько уровней модели специалист-планировщик может внести изменения в график производства и сразу же увидеть, как это воздействие скажется на других процессах. Кроме того, окончательное распределение ресурсов и построение последовательности действий может быть выполнено либо вручную, либо с применением мощных оптимизирующих алгоритмов, что обеспечивает создание наиболее выгодного в данных условиях плана.

Перепланирование в реальном времени как реакция системы на непредвиденные события в пакете SAP Business Suite не выполняется. План строится на основе алгоритмов оптимизации и генетических алгоритмов, что затрудняет его использование в распределенных системах.

1.3. Пакет Infor SyteLine Suite

Infor SyteLine Suite — линейка продуктов компании Infor (США) [4]. Infor SyteLine Suite, в числе прочих, содержит систему синхронного планирования и оптимизации Infor SyteLine APS (Advanced Planning & Scheduling) — синхронное планирование и оптимизация — современное решение для планирования и составления производственных графиков. Система позволяет выполнять заказы клиентов точно в срок, обеспечивая при этом синхронизацию управления материальными потоками и снижение накладных расходов.

Система дает возможность определить реальные сроки выполнения заказа уже в момент его приема, а затем контролировать соблюдение этих сроков. Заказ клиента оказывается в центре всей системы бизнес-планирования, происходит синхронизация всех операций в соответствии с материалами и производственными мощностями, необходимыми для выполнения заказа точно в обещанный срок. Для оптимизации производственного графика применяется принцип "Точно-Во-Время" (Just-In-Time (JIT)).

Система APS расширяет возможности ERP-системы в области планирования путем тесной интеграции всех ключевых факторов — материалов,

производственных мощностей и производственных графиков — в мощный инструмент оперативного планирования в реальном времени.

Кроме того, Infor SyteLine APS дает возможность моделировать результаты управленческих решений, например, по изменению расположения рабочих центров или установки нового оборудования. Используя текущую конфигурацию оборудования, можно добавить оборудование или изменить технологические маршруты и получить информацию о том, какие изменения эти принесет в ближайшие шесть месяцев.

Система Infor SyteLine Suite решает задачи стратегического и оперативного управления предприятием, согласованного планирования и составления производственных графиков в реальном времени, однако не выполняет перепланирование производственных графиков при наступлении непредвиденных событий и настройку параметров ресурсов через учет различных стратегий и критериев, предпочтений и ограничений каждого участника планирования.

1.4. Планировщик JDA Software

Компания JDA Software Group, Inc (США) [5] — мировой лидер на рынке систем управления цепочками поставок и систем бизнес-прогнозирования. Планировщик JDA Factory Planner разработан для поддержки интеллектуальных решений в области производственного планирования. Решение помогает разработать календарный план как для одного предприятия, так и для нескольких интегрированных цехов различных предприятий. Планирование может проводиться "назад" — от требуемой даты, и "вперед" — от текущей даты, учитывая различные ограничения, такие как производительность, снабжение сырьем, предельная дата поставки. Планировщик позволяет менеджерам смещать фокус в сложных планах с одних участков на другие, более важные в данном плане. Применение JDA Factory Planner позволяет точно учитывать предельные сроки выхода продукции, уменьшать времена простоев оборудования и повышать прибыль.

Ключевые возможности:

- планирование с одновременным учетом всех имеющихся ограничений;
- управление приоритетностью исполнения заказов;
- оперативное изменение ряда исходных данных для перерасчета плана ("Что — если?");
- визуализация возникшего дисбаланса Спрос — Предложение после расчета плана;
- использование математического аппарата, адаптированного для нахождения глобального оптимального решения задачи оптимизации;
- отчеты по ключевым показателям эффективности;
- синхронизация планирования и выполнения.

Таким образом, JDA Factory Planner использует адаптированные классические алгоритмы оптимизации.

1.5. Exact Holding

Компания Exact Holding (Дания) [6] специализируется на ERP-решениях для малых, средних и больших предприятий. ERP-система Exact JobBOSS предназначена для средних и больших производственных компаний в сегментах дискретного производства, таких как машиностроение, аэрокосмическая промышленность, автотранспорт, электроника. Система позволяет повысить уровень организации производственных процессов от простого "заказ—выполнение" до полного управления цехами в трех направлениях: производство, финансы и распределение.

В производственном компоненте учитываются:

- спецификации производственных материалов;
- управление людскими ресурсами;
- учет производственных затрат;
- составление производственных календарных планов;
- планирование потребления расходных материалов;
- полный внутрицеховой контроль за производством. Планировщик Exact JobBOSS позволяет:
- гибко планировать работы по времени поступления, предельным срокам выполнения, глобально перепланировать весь список работ;
- контролировать загрузку производственных мощностей;
- получать отчеты о прохождении всех этапов работ, выявлять задержки и опоздания;
- автоматически планировать внешние требования на материалы и компоненты по технологическим требованиям;
- перепланировать "узкие места";
- создавать расписания, основываясь на наличии компонентов;
- использовать моделирование "Что — если?" для анализа нагрузки рабочих центров и влияния поставок.

1.6. Планировщики компании QuintiQ

Линейка продуктов компании QuintiQ (Нидерланды) включает систему расширенного планирования и составления расписаний Advanced Planning & Scheduling, а также систему производственного планирования Production Planning and Scheduling.

Основные преимущества Advanced Planning & Scheduling — Системы расширенного планирования и составления расписаний [7]:

- стратегическое, тактическое и оперативное планирование, соответствующее конкретным потребностям компании;
- полная видимость операций контроля и управления, а также ключевых показателей эффективности;
- непрерывная, в режиме реального времени, оптимизация планов в динамичной среде;

- управление событиями, повторная оптимизация планов и поддержка принятия решений в режиме реального времени;
- повышение качества обслуживания и удовлетворенности клиентов, сокращение производственного цикла;
- снижение эксплуатационных, транспортных расходов, а также расходов на инвентаризацию и обслуживание;
- максимальное использование ресурсов и производительности;
- повышение конкурентоспособности за счет дифференцированного предоставления услуг и более точного соблюдения времени выполнения операций.

Production Planning and Scheduling — Система производственного планирования [8] выполняет эффективное планирование производства. Планировщики QuintiQ помогают избежать наиболее распространенных проблем, таких как высокий уровень запасов, несоблюдение времени доставки клиенту, низкая доходность, неэффективное использование производственных мощностей. Решения QuintiQ для всех уровней планирования помогают оптимизировать весь цикл планирования производственных процессов, в том числе:

- мульти-сценарный планировщик QuintiQ Macro Planner предназначен для достижения общей прозрачности бизнеса и создания оптимальных средне- и долгосрочных планов производства при стратегическом планировании производства;
- планировщик QuintiQ Company Planner выполняет тактическое планирование производства и предназначен для управления в режиме реального времени взаимодействием между продажами, планированием и производством, и поддержкой реалистичных сроков поставки;
- оперативный планировщик производства QuintiQ Scheduler генерирует оптимизированный график производства.

Комплексное решение QuintiQ по планированию производства включает:

1. Планирование загрузки производственных мощностей.

Реализует адаптивный план использования производственных мощностей в ответ на все изменения в процессе производства и окружающей среде и решает, таким образом, многомерную задачу планирования. Пользователь может принимать обоснованные и точные решения о том, как использовать свои ресурсы наиболее эффективным и выгодным способом.

2. Управление материальными потоками.

Обеспечивает полную прозрачность, необходимую для оптимального заказа, распределения и пополнения материалов. Позволяет снизить уровень запасов за счет эффективного использования материалов и более точно соблюдать сроки поставок клиентам.

3. Планирование в реальном времени.

QuintiQ Production Scheduler позволяет создавать производственные графики, которые определяют оптимальную последовательность работ на ресурсах в конкретные сроки, что дает возможность определить потенциальные узкие места, реагировать в режиме реального времени на непредвиденные сбои в производстве, оптимизировать использование ресурсов и повысить производительность.

QuintiQ Production Scheduler дает возможность создавать наиболее эффективные производственные графики — дней, часов и даже секунд — до начала работ. Построение оптимального графика для каждого из ресурсов в реальном времени является сложной задачей даже тогда, когда вся информация доступна. Но почти в каждой производственной среде планирование динамично, так как достаточно часто происходят непредвиденные события, такие как срочные заказы, неисправности оборудования, задержки доставки материалов. Реакция на такие непредвиденные события в режиме реального времени имеет важное значение для минимизации их влияния на производственный план. Расширенный автоматизированный планировщик реального времени обеспечивает полную видимость производственного плана в любой момент времени и позволяет для каждого ресурса динамично принимать решение о том, какие действия надо выполнить и какие ресурсы использовать. Можно легко определить "узкие места", оценить влияние непредвиденных событий в режиме реального времени и уверенно справиться с ними, оптимизировать использование ресурсов, перепланировать, когда это требуется, и повысить общую производительность всего производства.

К недостаткам решений QuintiQ эксперты относят:

- некоторое отставание в части переноса решений в "облачные" технологии, мобильные устройства и интеграции в решения сторонних компаний;
- недостаточно развиты инструменты прогноза и их детализация.

1.7. Планировщики корпорации "Информационные технологии"

Корпорация "Информационные технологии" (Россия) [9] — ведущий разработчик программного обеспечения для автоматизации распределенных компаний, крупных и средних промышленных предприятий, предприятий финансового сектора, услуг, холдинговых структур.

Флагманский продукт — система IT-Enterprise — аккумулирует опыт успешных внедрений на предприятиях различного профиля. Функциональная полнота системы, гибкость настройки и адаптации позволяют получить индивидуальное решение для каждого предприятия, в максимальной степени учитывающее особенности его организации и деятельности.

IT-Enterprise — полнофункциональная ERP-, MRPII-, MES-, APS-, EAM-, SCM-, CRM-система, охватывающая все стороны деятельности пред-

приятия, а также обеспечивающая эффективное управление группой предприятий.

В связи с тем, что универсальные алгоритмы математической оптимизации являются неполиномиально разрешимыми (так называемыми NP-трудными с вычислительной точки зрения), математической основой календарного планирования в системе IT-Предприятие является комбинированное использование различных эвристических и оптимальных алгоритмов теории расписаний — специального раздела математической оптимизации.

В системе IT-Предприятие используются следующие алгоритмы и методы планирования:

- модель планирования по неограниченной загрузке — назначение на оборудование выполняется без анализа текущей загрузки оборудования;
- модели планирования по ограниченной загрузке — назначение на оборудование выполняется без перегрузки оборудования в каждый календарный интервал.

Варианты моделей планирования по ограниченной загрузке:

- ♦ планирование "вперед" от текущей смены только невыполненных технологических операций;
- ♦ планирование "назад" от даты исполнения заказа от последней операции до первых технологических операций;
- ♦ первоочередное планирование "узкого места" (наиболее загруженных рабочих центров) и планирование "назад" и "вперед" от "узкого места";
- ♦ модель "сглаживания" перегрузок оборудования с назначением работ на альтернативное оборудование;
- ♦ планирование от текущего наличия материалов и полуфабрикатов;
- ♦ планирование с учетом графика поступления материалов на предприятие;
- ♦ "ручное" (диалоговое) назначение заказа на оборудование, в том числе выбор предпочтительного с точки зрения плановика варианта техпроцесса;
- ♦ приоритетные очереди заданий:
 - по приоритетам заказов/клиентов;
 - по критическому отношению, срокам отгрузки, срокам приемки, остаточному времени выполнения, минимизации штрафов за просрочку, приоритетам изделий;
 - по приоритетам оборудования исходя из
 - ✓ максимизации оборудования,
 - ✓ минимизации переналадок;
 - по приоритетам выбора рабочих центров: минимальное количество оборудования, минимальное время окончания выполнения операций, минимальное время начала выполнения операции, только основное оборудование;
- ♦ планирование в решениях системы IT-Предприятие проводится в различных временных горизонтах — от смены до нескольких месяцев.

Таким образом, проведенный анализ мировых разработок в области планирования и управления предприятиями показал, что в большинстве адап-

тивных систем планирования не реализована возможность реакции на непредвиденные события и перепланирования производственной программы в реальном времени. Известные в настоящее время программные системы для управления производственными процессами на предприятиях таких известных компаний, как Infor, SAP, BAAN, i2, Manugistics, i-Log, 1C, Галактика и другие класса ERP, не позволяют осуществлять управление подобными распределенными сетевыми структурами в реальном времени, поскольку, как правило, работают в пакетном режиме.

2. Разработка адаптивных систем планирования на основе мультиагентных технологий

2.1. Актуальность разработки

Актуальность и значимость решаемой проблемы обусловлена тем, что многие крупные государственные корпорации в настоящее время активно ищут новые подходы к управлению, повышающие качество и эффективность деятельности, дающие возможность быстрого запуска и обновления инновационной продукции, имеющие большую оперативность и гибкость и т. д.

В результате, ранее закрытая, жестко иерархическая, монолитная структура любого завода, как правило, потребляющая при этом большие ресурсы, чтобы быть хотя бы "на плаву", постепенно становится более открытой, гибкой и эффективной. Более компетентные и умелые цеха выживают и становятся более самостоятельными и конкурентными сначала на внутреннем рынке предприятия, а потом — и на внешнем, а отстающие и дублирующие друг друга — постепенно отмирают или далее точно реформируются в инновационные, высокоэффективные и т. д.

Только за счет повышения согласованности, эффективности и гибкости возможно сохранение конкурентоспособности, что делает разработку адаптивных систем планирования и управления производством весьма актуальной и значимой. Однако данный подход существенно меняет требования к программным системам, используемым для управления ресурсами предприятий, которые должны поддерживать такую сетевую структуру, обеспечивать процесс формирования и согласования планов в реальном времени и т. д. При этом отсутствие возможности принятия решений "по ситуации" в реальном времени, когда качество управленческого воздействия зависит от самого момента времени, приводит к потере момента времени, "затоварке", простоя или дефициту ресурсов.

В связи с этим создание новых интеллектуальных систем для перехода к реальному времени при производстве и сбыте продукции машиностроительных предприятий, позволяющих работать в условиях неопределенности и высокой динамики изменений, когда ни число заказов, ни число ресурсов

Примеры промышленных применений мультиагентных систем в области машиностроения

Назначение/заказчик	Разработчик	Область применения	Внедрение
Production 2000+	Daimler Chrysler, Schneider	Manufacturing control	Industry
Car body painting	Daimler-Benz	Manufacturing control	Industry, prototype
BHP Billiton	Rockwell	Process control	Industry
Chilled Water System	Rockwell	Distributed control	Industry, prototype
Cambridge packing cell	U. Cambridge	Manufacturing control	Lab test bed
FABMAS	Technical University of Ilmenau	Manufacturing control	Industry
PS-Bikes	Universita de Genova	Manufacturing control	Industry, prototype
Axion-Holding	Smart Solutions, Knowledge Genesis Group	Manufacturing scheduling	Industry
Shop Modelarna Liaz	Certicon, Gerstner Laboratory	Production planning	Industry
SkodaAuto	Gedas, Certicon, Gerstner Laboratory	Production planning	Industry
Agent Steel System	Saarstahl AG, DFKI GmbH	Production planning	Industry
SDM Laboratory	Yokogawa	Machinery control	Lab test bed
NovaFlex	Uninova	Manufacturing control	Lab test bed
ADACOR	Polytechnic Institute of Braganca	Manufacturing control	Lab test bed
ABAS	Tampere University of Technology, Schneider Electric	Manufacturing control	Lab test bed
OntoReA	TU Wien, Rockwell Automation, COPA-DATA	Manufacturing control	Lab test bed

заранее не известно, позволит заместить устаревшие в этом отношении компоненты таких традиционных ERP-систем, как уже упомянутые выше SAP, Manugistics, i2, i-Log и других, ориентированные на классические "пакетные" формы работы.

В мире известен ряд проектов первых промышленных мультиагентных систем, реализованных для машиностроительных предприятий (см. таблицу) [10].

2.2. Мультиагентный планировщик завода "Шкода"

В рамках европейского проекта ExPlanTech (IST-1999-20171) была разработана мультиагентная система (MAC) планирования массовых производств [11, 12], успешно внедренная на заводах "Шкода" по сборке автомобильных двигателей (Чехия).

Представленная мультиагентная система является открытой и может быть адаптирована к широкому диапазону производственных процессов.

МАС состоит из следующих типов агентов:

- *Агенты планирования.* Они связаны с конфигурацией и составом продукции и создают производственные планы для отдельных заказов путем декомпозиции задач. Однако они могут использовать частичные планы, поступившие от внешних планирующих движков, применяющих линейное программирование, теорию ограничений или генетические алгоритмы.
- *Управляющие агенты.* Они занимаются разрешением конфликтов планирования и реконфигурацией планов.
- *Агенты ресурсов.* Агенты ресурсов первого типа отвечают за целостность системы и интеграцию с другими компонентами. Агенты ресурсов второго типа представляют конкретные устройства или рабочие центры.
- *Метаагент.* Метаагент отвечает за реконфигурацию планировщика и за отражение реальной ситуации цеха в создаваемом плане. Он также анализирует поведение отдельных агентов и вводит необходимые улучшения.

Планирование проводится на короткие (день) и длинные горизонты (полгода) на основании различных критериев, например, критериев минимизации затрат на хранение, уменьшения ручных работ, своевременной поставки продукции.

В системе предусмотрено динамическое перепланирование в режиме реального времени. В целом, система планирования достаточно быстродействующая: план на 28 дней из 50 продуктов и трех машин строится за 1 с.

Система внедрена на трех связанных линиях (ZK, RUMPH, ZP4), двух операционных складах и складе готовой продукции. Завод ежедневно производит до 2000 частей двигателей (66 % всего объема продаж). Двигатели собираются как из произведенных на предприятии узлов, так и из частей, закупаемых у внешних поставщиков.

Применение МАС-технологий в планировании работ по сборке двигателей показало высокую скорость и гибкость системы и эффективность получающихся планов.

2.3. Мультиагентные производственные планировщики НПК "Разумные решения"

Распределенная система управления предприятием, создаваемая из интеллектуальных систем управления типовыми цехами крупного машиностроительного предприятия (заготовительный, сборочный и др.) на основе мультиагентных технологий [13], обеспечивает возможность адаптивного построения и корректировки планов по событиям, поступающим в реальном времени, например, от пользователей или из существующих систем управления предприятиями, с датчиков линий автома-

тического производства, планшетов мастеров или сенсорных экранов рабочих, что может сразу вызывать перераспределение и пересогласование ресурсов в реальном времени. Переход к принятию решений в реальном времени обеспечивает повышение эффективности использования ресурсов предприятий путем сокращения и устранения их простоев или дефицита, в частности, дорогостоящих станков с ЧПУ или остродефицитных кадров высококвалифицированных рабочих.

Согласованность решений интеллектуальных систем управления цехами при этом обеспечивается за счет реализации адаптивной p2p-сети указанных систем, от англ. "peer-to-peer", означающего взаимодействие между этими системами по принципу "равный с равным" и "каждый с каждым", в отличие от принятых доминирующих отношений "ведущий—ведомый" в каскадной (водопадной) модели бизнес-процессов управления предприятиями. Такой подход обеспечивает высокую оперативность, гибкость и адаптивность, производительность, масштабируемость, живучесть и надежность работы создаваемых интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий национального масштаба нового поколения, выгодно отличающихся от традиционных "пакетных" громоздких, централизованных, монолитных и последовательных систем.

На этой основе в короткие сроки была разработана интеллектуальная система управления инструментальным цехом машиностроительного предприятия для ОАО "Аксин-холдинг (Ижевский мотозавод)", обеспечивающим выпуск широкой номенклатуры инструментальных изделий как в интересах предприятия, одного из крупнейших в России по выпуску электронной продукции, так и в интересах других предприятий аэрокосмической отрасли.

В настоящее время на основе этих разработок заключены договора доработки и поставки интеллектуальных систем управления цехами машиностроительных предприятий с ОАО "АвиаАгрегат", выпускающим шасси для самолетов, и ОАО "Кузнецов", производящим авиационные и ракетные двигатели.

Подробное описание мультиагентных производственных планировщиков НПК "Разумные решения" приведено в работах [14—17].

2.4. Преимущества мультиагентной технологии

Важнейшим достоинством мультиагентной технологии в планировании и оптимизации ресурсов является возможность адаптивного построения и исполнения планов, когда план не строится всякий раз заново при возникновении новых событий, как это делается в классических методах оптимизации, а только адаптивно корректируется по мере появления событий в реальном времени, при необходимости (и при наличии ресурса времени) реализуя сколь угодно длинную цепочку изменений. Такая

автоматическая адаптация планов, причем часто в ходе их исполнения, осуществляется непрерывно путем выявления конфликтов в расписаниях, проведения переговоров и достижения компромиссов между агентами заказов и ресурсов, что и позволяет системе работать в реальном времени.

Функциональные возможности базовой интеллектуальной системы должны обеспечивать поддержку полного цикла управления ресурсами, приущего автономным организмам, включая:

- реакцию на динамически возникающие события, например, проявление нового заказа, ограниченность ресурса и т. п.;
- оперативное планирование и оптимизацию использования производственных ресурсов в условиях неопределенности и изменяющейся среды окружения;
- согласование изменяющихся задач с исполнителями в реальном режиме времени;
- мониторинг, отметки выполнения и контроль исполнения задач, учитываемые при планировании будущей деятельности;
- выявление расхождения между планом и фактом выполнения задач и инициацию перепланирования;
- визуализацию результатов планирования и хода выполнения планов в формах, наглядных и удобных для пользователей;
- построение отчетов для рассмотрения и утверждения руководством;
- обеспечение защиты информации, учитывая роли пользователей.

По мере ввода новых заказов или задач или возникновения непредвиденных событий в МАС динамически, в реальном времени, формируется и адаптивно модифицируется самоорганизующийся план работы цеха предприятия, а также рассчитываются заданные показатели деятельности.

Особенностью мультиагентного адаптивного метода распределения, планирования и оптимизации производственных ресурсов является построение и исполнение планов в реальном времени на основе концепции "живого расписания", когда планирование никогда не останавливается, а план лишь уточняется и корректируется, оптимизируется и дополняется по мере появления новых событий в скользящем режиме с формированием прогнозных показателей выполнения планов цехов на базе фактически выполненных работ или проактивно, когда у системы есть время улучшить результаты, например, до выдачи очередной работы сменного задания. Переход от статичных планов, построенных на период времени вперед, к динамичным, меняющимся непрерывно по событиям, является принципиальным, помогая предприятиям делать шаг к управлению в реальном времени, когда от самого момента времени зависит качество и эффективность работы, "затоварка" или дефицит по позициям и т. д.

При этом план лишь адаптивно корректируется и оптимизируется по мере появления событий в реальном времени, без его останова и полного пересмотра, причем динамическая оптимизация может охватывать сколь угодно длинную цепочку изменений, если есть ресурс времени. Такая автоматизированная адаптация планов "на лету", причем даже в ходе их исполнения, осуществляется непрерывно путем выявления конфликтов в доступных ресурсах, проведения переговоров и достижения компромиссов в формируемой сети агентов потребностей и возможностей предприятия.

Алгоритмы планирования, применяемые в МАС адаптивного планирования, обеспечивают управляемую скорость поиска и расчета допустимого решения, что может осуществляться за счет использования саморегулирующихся механизмов виртуального рынка, например, за счет использования изменяющихся виртуальных налогов, замедляющих или ускоряющих взаимодействие агентов.

Данный подход позволяет пользователю управлять вычислениями на виртуальном рынке системы, когда в зависимости от ситуации агентам становится выгодной или, наоборот, невыгодной активность по улучшению получаемых результатов в требуемом направлении.

Для описания различных технологических процессов, видов изделий, станков, рабочих специальностей и других особенностей цехов машиностроительных предприятий с помощью классов понятий и отношений разрабатывается онтология машиностроения.

На основе базовой интеллектуальной МАС могут быть построены специализированные интеллектуальные системы управления цехами, в том числе через настройку с помощью конструктора онтологий машиностроения. При этом каждая система управления цехом будет использовать технологии формализованного представления и обработки знаний на основе онтологий (семантических сетей) для описания структуры изделия, технологических процессов, особенностей рабочих и станков, а также иных обычно плохо определенных и не формализованных экспертных сведений, важных для планирования работы предприятий.

Заключение

При использовании мультиагентных технологий и онтологий для планирования и управления производством достигаются следующие преимущества:

- решается сложная задача автоматизации производственного планирования, контроля и прогнозирования работы ресурсов в реальном времени (в настоящее время на рынке имеются лишь пакетные планировщики);
- повышается эффективность работы предприятия на 5...15 %;
- обеспечивается быстрая оперативная реакция на непредвиденные события в реальном времени;

- деятельность становится более продуктивной: работы планируются и реализуются на основе детального расчета, анализа и сопоставления вариантов и более актуальных и достоверных данных;
- план работы является гибким и открытым к любым непредвиденным изменениям "на лету", учитывающим индивидуальные особенности заказов и ресурсов;
- план гораздо лучше отражает реальность, поскольку корректируется в ходе постоянной отметки выполнения работ по факту;
- обеспечивается полная прозрачность работы по всей цепочке связанных между собой операций бизнес-процесса;
- сокращается трудоемкость планирования, контроля и прогнозирования результата работы предприятия;
- повышается дисциплина и ответственность за результат исполнителей;
- уменьшается человеческий фактор (ошибки, искажение данных и т. д.).

Авторы выражают благодарность Министерству науки и образования РФ, поддержавшему разработки по созданию системы планирования, прогнозирования и моделирования производства по государственному контракту Минобрнауки РФ № ГК 14.514.11.4005.

Список литературы

1. **ERP** в машиностроении / TAdviser — портал выбора технологий и поставщиков. 2012. URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/ERP-системы в машиностроении](http://www.tadviser.ru/index.php/ERP-системы%20в%20машиностроении).
2. **ORTEMS** — Optimization & Real Time Manufacturing Synchronization [Электронный ресурс] / ORTEMS. 2012. URL: <http://www.ortems.ru>.
3. **SAP Business Suite** / SAP. 2012. URL: <http://www.sap.com/cis/solutions/business-suite/index.epx>.
4. **Infor Enterprise Software Solutions for CRM, ERP, SCM, EAM & More** / Infor. 2012. URL: <http://www.infor.com>.
5. **Supply Chain Management and Software** — JDA Software: The Supply Chain Company / JDA Software. 2012. URL: <http://www.jda.com/>.
6. **FMI: Home Page** / Forrest Machining, Inc. 2012. URL: <http://www.forrestmachining.com/>.

7. **QuintiQ Advanced Planning and Scheduling** / QuintiQ. 2012. URL: <http://www.quintiq.com/solutions/advanced-planning-and-scheduling.aspx>.

8. **QuintiQ Production Planning and Scheduling** / QuintiQ. 2012. URL: <http://www.quintiq.com/solutions/production-planning-and-scheduling.aspx>.

9. **Автоматизация предприятия**, комплексная информационная система управления бизнесом. Корпорация Информационные Технологии IT Enterprise / Корпорация "Информационные технологии" — 2012. URL: www.it-enterprise.ru.

10. **Paulo Leitao, Pavel Vrba**. Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents // Proc. of 5th International Conf. on Holonic and Multi-Agent systems in Manufacturing, France, Toulouse, 2011. Springer, Berlin. P. 15—28.

11. **Michal Pechoucek**. Industrial deployment of multi-agent technologies: review and selected case studies / Michal Pechoucek, Vladimír Marík // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. 2008. N 3. P. 397—431.

12. **Pechoucek M., Rehak M., Charvat P., Vleck T., Kolar M.** Agent-Based Approach to Mass-Oriented Production Planning: Case Study // Journal IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews archive. 2007. № 3. P. 386—395.

13. **Андреев М. В., Бабанин И. О., Вылегжанин А. С., Иващенко А. В., Кольбова Э. В., Скобелев П. О.** Мультиагентная система управления инструментальным цехом // Тр. XIII междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара: СНЦ РАН. 2011. С. 451—459.

14. **Tyrin I., Vylegzhanin A., Andreev M., Kolbova E., Skobelev P., Tsarev A., Shepilov Ya.** Multi-Agent System "Smart Factory" for Real-time Workshop Management: Results of Design & Implementation for Izhevsk Axion-Holding Factory // Proc. of 17th IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA'2012). Krakow, Poland. 2012.

15. **Goryachev A., Kpzhnikov S., Kolbova E., Kuznetsov O., Simonova E., Skobelev P., Tsarev A., Shepilov Ya.** "Smart Factory": Intelligent System for Workshop Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling in Real Time // Proc. of the 2012 International Conference on Manufacturing (Manufacturing 2012), November 14—15, 2012. Macau, China. Advanced Materials Research. V. 630(2013). P. 508—513, Trans Tech Publications, Switzerland.

16. **Тюрин И. Ю., Вылегжанин А. С., Кольбова Э. В., Скобелев П. О., Шепилов Я. Ю.** Опыт разработки и внедрения мультиагентной системы для оперативного управления инструментальным цехом ОАО "Ижевский мотозавод — Аксион Холдинг" // Мехатроника, автоматизация, управление, 2012. № 11. С. 15—19.

17. **Shpilevoy V., Shishov A., Skobelev P., Kolbova E., Kazanskaia D., Shepilov Ya., Tsarev A.** Multi-agent system "Smart Factory" for real-time workshop management in aircraft jet engines production // Proc. of the 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'13), May 22—24, 2013, São Paulo, Brazil. 2013. P. 65—70.

ИНФОРМАЦИЯ



XVI КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ»

11—14 марта 2014 г.,

Санкт-Петербург, Россия

Тематика конференции

- Гироскопические системы;
- Интегрированные и спутниковые системы навигации;
- Теория и системы управления;
- Обработка информации в навигационных системах;
- Электронные и электромеханические устройства систем навигации и управления;
- Чувствительные элементы систем навигации и управления;
- Интеллектуальные системы навигации и управления;
- Информационные технологии на предприятиях навигационного приборостроения;
- Микромеханические датчики, системы и технологии;
- Прикладные задачи навигации и управления движением;
- Образовательные технологии.

Подробную информацию о конференции см. сайте:

<http://www.elektropribor.spb.ru/kmu2014/>



В. Ф. Коростелев, д-р техн. наук, проф.,
Засл. деятель науки РФ, зав. кафедрой,
giess300@mail.ru,

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых

Управление процессами обработки металлов и сплавов по заданной траектории в пространстве состояний

Представлено решение задачи управления процессом литья с наложением давления. Установлено, что давление, создаваемое в жидком металле, изменяет условия и механизм последующей кристаллизации. На основании результатов dilatометрических и калориметрических исследований высказано предположение об образовании ассоциативных комплексов атомов, которые изменяют значения термодинамических функций и при определенном сочетании параметров "температура—давление—время" могут способствовать аморфизации, минуя процесс кристаллизации. Показано, что интеллектуальное управление по заданной траектории в пространстве названных параметров гарантирует производство продукции с требуемым сочетанием свойств.

Ключевые слова: вектор, пространство состояний, уровень энергии, кластеры, жидкость—кристаллы—аморфизация, обратная задача динамики, интеллектуальное управление формированием свойств

Введение

Обработка металлопродукции в целях достижения тех или иных потребительских свойств неизбежно связаны с переводом металла в новое состояние. Так, для повышения твердости, например, стали 45 ее необходимо нагреть до определенной температуры, перевести в аустенитное состояние, а затем, варьируя скорость охлаждения, зафиксировать при цеховой температуре состояние, в котором сочетание прочностных, пластических свойств и твердости будет зависеть от скорости охлаждения.

С точки зрения теории автоматического управления обрабатываемый металл представляет собой объект, структура и свойства которого зависят не только от параметров состояния, но и от траектории движения в пространстве состояний.

Термодинамика фазовых превращений

В качестве параметра, характеризующего состояние объекта управления (ОУ), может быть принят уровень энергии металла как системы атомов Q :

$$Q = F(T, p, K, \tau, \dots), \quad (1)$$

где T — температура, p — давление, K — концентрация компонентов сплава, τ — время. Если рассматривать сплав определенного состава, то пространство возможных его состояний можно пред-

ставить графически (рис. 1). Предполагается, что функция $T = f(\tau)$ может быть рассчитана или построена по экспериментальным данным. Это контролируемая функция. Закон наложения давления $p = k(\tau)$ выступает и как контролируемая, и как управляемая функция.

Идея управления по заданной траектории состоит в том, что вначале задают некую траекторию, например 1 или 2, а далее, снимая координаты кривой $T = f(\tau)$, проецируют траектории на плоскость " p — τ ". В результате устанавливают закон, по которому следует накладывать давление, чтобы осуществить управление по требуемой траектории.

Процесс литья с наложением давления и перспективы его освоения в промышленности освещены в монографии [1], в работе [2] впервые заявлено о процессе опрессовки жидкого металла в температурном интервале, исключающем начало кристаллизации.

Во время наложения давления проявляется свойство сжимаемости расплава, что по физической сущности аналогично уменьшению межатомных расстояний при охлаждении. Увеличение скорости охлаждения оказывает влияние на изменение механических свойств [3].

Для анализа относительной стабильности жидкого, аморфного и кристаллического состояний можно воспользоваться уравнением для энергии плавления Гиббса как функции температуры:

$$\Delta G = \Delta H + \int_T^{T_m} \Delta C dT - T(\Delta S) + \int_T^{T_m} \Delta C \frac{dT}{T}. \quad (2)$$

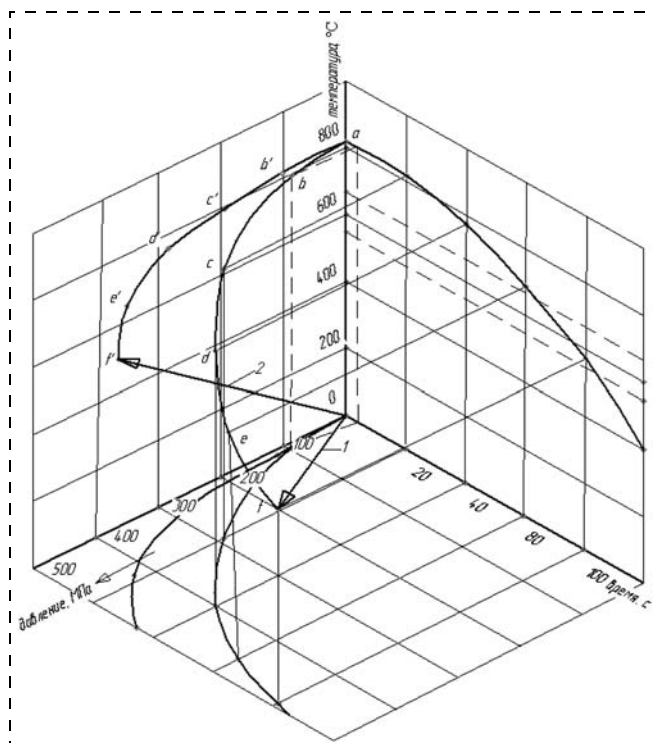


Рис. 1. Трехмерное пространство состояний: a-b-c-d-e-f и a'-b'-c'-d'-e'-f'-траектории (1 и 2 соответственно) движения вектора $\vec{Q}$

Здесь ΔS и ΔH — изменения энтропии и энтальпии плавления при температуре T соответственно; $\Delta C = C_{\text{ж}} - C_{\text{ТВ}}$ — разность теплоемкостей жидкости и равновесных кристаллов [4]; T_m — температура, при которой жидкий металл переходит в аморфное состояние.

В процессе сближения под влиянием давления атомы металла могут образовывать ассоциативные группы — кластеры, в результате чего появляется избыточная энергия Гиббса образования ассоциированного раствора. Предполагается, что каждый атом может быть подвержен двум типам химического взаимодействия с окружающими атомами: локализованному металлическому и направленному ковалентному, а также включать терм, обусловленный ионной компонентой химической связи. Протекание процессов ассоциации приводит к возрастанию теплоемкости жидкости и увеличению разности между теплоемкостями жидкости и кристалла. Эта разность обусловлена уменьшением энтропии при ассоциации.

Образование ассоциатов сопровождается увеличением вязкости жидкости. В свою очередь, вязкость жидкости определяет кинетические закономерности кристаллизации, так как связана с кооперативным изменением структуры при массопереносе, т. е. с конфигурационной энтропией.

Конфигурационная энтропия может быть представлена как разность между теплоемкостями жидкости и кристаллов ΔC .

Каждый из вышеуказанных термов химической связи между компонентами сплава влияет на ключевые термодинамические и кинетические характеристики, предопределяющие переход в кристаллическое или аморфное состояние.

Энтропийный терм процессов ассоциации в решающей степени контролирует динамику изменения параметров химического ближнего порядка в жидкости при вариации давления и температуры. Этот терм определяет значения динамических вкладов в термодинамические (конфигурационная энтропия и теплоемкость) и кинетические свойства жидкости (вязкость, энергия активации вязкого течения и кристаллизации, скорость кристаллизации), которые влияют на ее переход в аморфное состояние, минуя кристаллизацию.

Зависимость свойств металлопродукции от режимов наложения давления

В результате наложения давления на жидкий металл происходит связывание компонентов сплава в ассоциативные комплексы (АК) вследствие возрастания интенсивности ковалентного взаимодействия. Это приводит к замедлению диффузии и торможению процессов образования равновесных фаз. В то же время образование АК создает упорядоченное состояние в жидкой фазе, которое обладает меньшим запасом энергии Гиббса по отношению к кристаллу. В условиях медленного наложения

давления вероятность образования АК существенно снижается, соответственно снижается и влияние давления на подготовку и протекание фазовых превращений. Напротив, повышение скорости наложения давления, как следует из проведенного анализа, создает условия, при которых энтропия опрессованного расплава будет уменьшаться значительно быстрее, чем энтропия кристаллов. По достижении определенного сжатия кристаллов, а в условиях охлаждения без давления — по достижении температуры, которая в формуле (2) обозначена T_m , жидкий металл переходит в аморфное состояние, при этом энтропия этого состояния будет несколько выше энтропии кристаллов.

Следовательно, изменение закона наложения давления предоставляет качественно новые и, что особенно важно подчеркнуть, технологически реализуемые возможности управления фазовыми превращениями в широком интервале температур и при этом позволяет варьировать сценарии возможных фазовых превращений от равновесной кристаллизации до частичной или полной аморфизации.

Переход от равновесной кристаллизации к аморфизации влечет изменение физико-химических и механических свойств металлопродукции, а управление по заданной траектории в пространстве переменных состояний гарантирует формирование конечной структуры с вполне определенным сочетанием упругих, прочностных, пластических свойств, твердости, износостойкости, термической стабильности и т. д.

Изучение межатомных и атомно-электронных взаимодействий

Управление кристаллизацией металлов и сплавов путем изменения закона наложения давления представляет собой закономерный этап в развитии автоматизации, на котором востребованы инновационные подходы и решения, основанные на изучении свойств ОУ, построенные на выявленных закономерностях и новых знаниях.

Управление процессами обработки по заданным траекториям позволяет накапливать важную информацию для построения интеллектуальных моделей сплавов и технологических процессов их обработки, как это показано в работе [5]. Определенный интерес представляют нейросетевые модели, с помощью которых можно определить весовые коэффициенты входных переменных. Если речь идет о содержании достаточно большого числа легирующих элементов в составе сплава, то значения коэффициентов можно интерпретировать как степень влияния каждого компонента в отдельности или их сочетаний на то или иное свойство на выходе ОУ. Взаимодействие и взаимное влияние компонентов в этом случае можно рассматривать через призму изменения параметров кристаллической решетки, перекрытия электронных орбит, образования квазикристаллических фаз и т. д. Полученная

информация необходима для целенаправленного формирования структуры и свойств металлопродукции с новым сочетанием свойств, для освоения производства многофункциональных материалов.

Постановка и решение задачи управления

Как показано выше, если зависимость $T = f(\tau)$ определена технологией производства, то координаты траектории в трехмерном пространстве (рис. 1) могут быть связаны непосредственно с функцией $p = k(\tau)$, поэтому и управление можно осуществлять по законам динамических систем, имея в виду, например, гидродинамическую систему, обеспечивающую движение рабочих органов и создание определенного давления.

Изменяя закон наложения давления, можно сформировать аморфную структуру (рис. 2, а), квазикристаллическую (рис. 2, б) или равновесную (рис. 2, в). Здесь рассматриваются характерные зависимости. Верхний уровень давления принимается по технологическим соображениям, что же касается отработки закона $p = k(\tau)$, то качество управления здесь определяет сочетание свойств конечной продукции, поэтому критериями являются точность и устойчивость управления.

Модель управляемого процесса может быть построена на фазовых координатах.

В каждый фиксированный момент времени наблюдения $\tau = \tau'$ на интервале $Z\{\tau, \tau_0 \leq \tau \leq \tau_1\}$, $\tau' \in Z$, траектория в пространстве переменных T, p, τ может быть представлена конечным множеством действительных чисел $x_1(\tau')$, $x_2(\tau')$, ..., $x_n(\tau')$, которые рассматриваются как компоненты вектора

$$Q = (x_1(\tau'), x_2(\tau'), \dots, x_n(\tau')). \quad (3)$$

Эволюция состояния рассматриваемой системы может быть представлена дифференциальным уравнением вида

$$dx/d\tau = l(x, y, \tau). \quad (4)$$

Здесь y может рассматриваться как вектор управления.

В начальный момент

$$x(0) = x_0, \dot{x}(0) = \dot{x}_0, \dots, x^{(n-1)}(0) = x_0^{(n-1)}. \quad (5)$$

Принимается, что собственное движение системы асимптотически устойчиво. Тогда при $\tau \rightarrow \infty$ система стремится к положению равновесия:

$$x(\tau) = 0, x^{(s)}(\tau) = 0, s = 1, 2, \dots, n-1. \quad (6)$$

Динамическая система с заданной структурой имеет некоторые варьируемые и некоторые постоянные параметры.

Требуется найти такие значения варьируемых параметров (ВП), при которых реализуется минимум какой-либо интегральной квадратичной оцен-

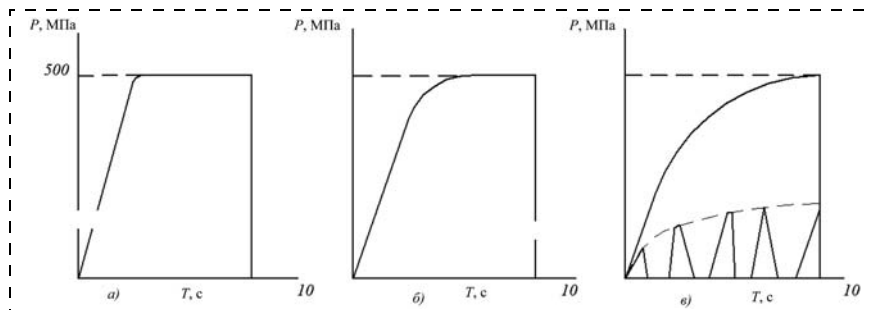


Рис. 2. Возможные варианты переходных процессов:

а — жесткий линейный; б — жесткий экспоненциальный; в — плавный экспоненциальный или с частотной модуляцией

ки J . Это задача параметрической оптимизации динамической системы (ЗПОДС).

В работе [6] показано, что экстремаль $x(\tau)$ интеграла J_n при граничных условиях (5), (6) является решением однородного дифференциального уравнения, порядок которого равен порядку оптимизируемой системы, а ЗПОДС можно рассматривать как обратную задачу динамики управляемой системы (ОЗДС). Решение ОЗДС состоит в том, чтобы для заданной динамической системы найти такие значения ВП, при которых движение системы происходит по траектории, предписанной дифференциальным уравнением типа (4).

Определение параметров динамической системы

Применительно к конкретному объекту, в качестве которого рассматривается процесс опрессовки жидкого металла на гидравлическом прессе, задача управления может быть сведена к поиску одного или нескольких информативных параметров, путем изменения которых можно было бы моделировать движение по заданной траектории.

Управление осуществляется следующим образом. На основании анализа информации, содержащейся в базе данных, составляется задание на разработку траектории, предположительно обеспечивающей достижение требуемого сочетания свойств.

Для этого предварительно выполняют эксперименты и устанавливают распределение температурных полей в конкретной заготовке. В системе координат $T-p-\tau$ в плоскости $T-\tau$ строят соответствующие зависимости. После определения координат траектории, как показано выше, методом проекций определяют закон наложения давления $p = k(\tau)$. Данные вводят в управляющую программу, так что на выходе компьютерной системы управления для выбранных моментов времени в СУ подаются требуемые значения давления, которые сравниваются с фактическими значениями, поступающими из БКД (рис. 3).

Сигнал рассогласования подается в мехатронный модуль, включающий Др, ИП, ШД, ВГКР.

Гидросистема представлена основным насосом ГП1 и резервным ГП2. Дроссели, поддерживающие уровень давления 10 МПа, на схеме не приведены.

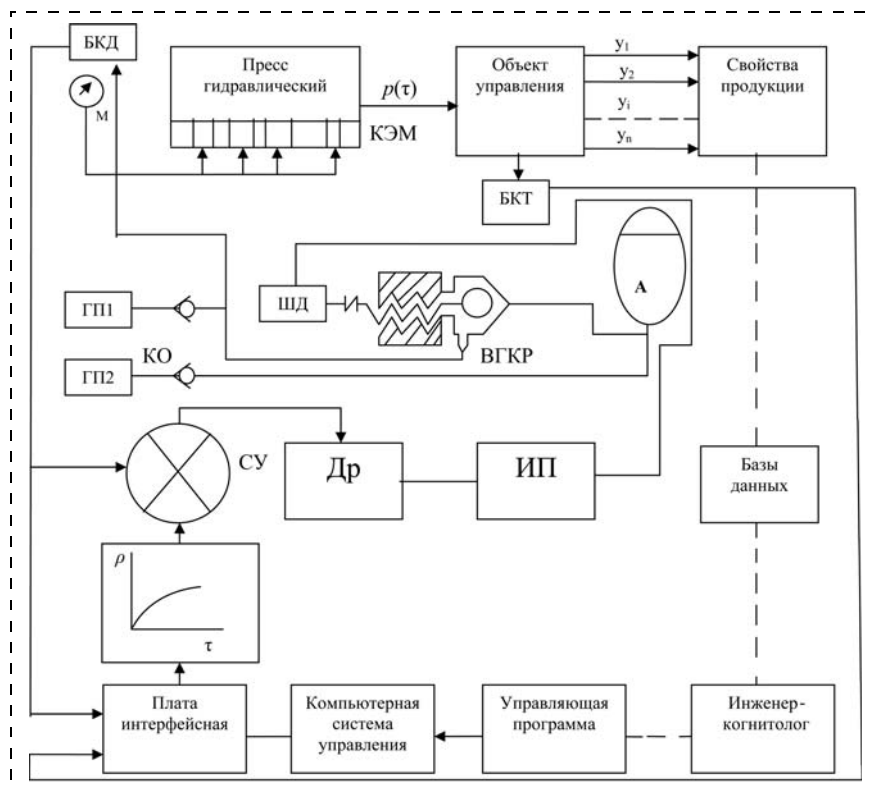


Рис. 3. Структурная схема системы управления:

А — аккумулятор; БКД — блок контроля давления; БКТ — блок контроля температуры; Др — драйвер; ВГКР — винт-гайка-корпус-регулятор; ГП — гидропривод; ИП — источник питания; КЭМ — клапан электромагнитный; КО — клапан обратный; М — манометр; СУ — сравнивающее устройство; ШД — шаговый двигатель

Резервный насос работает на аккумуляторе А, расход рабочей жидкости из которого контролируется зазором в регуляторе; зазор устанавливается включением ШД.

Резервный насос и аккумулятор необходимы для улучшения динамических характеристик гидропривода. Основной насос обеспечивает работу, когда кристаллизация проходит в условиях, близких к равновесным. По мере увеличения скорости наложения давления, т. е. когда фактическое значение давления оказывается ниже предусмотренного по программе, сигнал рассогласования усиливается и включает в работу мехатронный модуль, который в следящем режиме за счет изменения зазора в регуляторе обеспечивает требуемый закон $p = k(\tau)$. Допустимое запаздывание зависит от массы металла, его состава и других факторов. На данном этапе исследований время переходного процесса составляет 0,2...0,3 с.

Состояние разработки

В настоящее время завершена обработка экспериментальных данных. На опытных образцах из алюминиевых сплавов Д1, Д16, В95 и др. установлены зависимости упругих, прочностных, пластических свойств и твердости от величины и скорости наложения давления. Диапазон накладываемого давления 0...500 МПа, скорость 0...100 МПа/с.

Имеется технологическая оснастка для изготовления цилиндрических заготовок диаметром до 80 мм, высотой до 200 мм.

Выводы

1. Использование давления как фактора внешнего динамического воздействия на формирование свойств массовой металлопродукции ни в отечественной, ни в зарубежной промышленности до настоящего времени не получило распространения. Инновационный потенциал управления в пространстве переменных состояний состоит в создании в жидком металле ассоциативных групп атомов. Изменение dilatометрических и калориметрических свойств под влиянием давления, установленное в работе [7], показывает, что программное наложение давления может быть использовано как инструмент для управления изменением значений термодинамических функций и создания металлопродукции с наперед заданным сочетанием физико-химических и механических свойств.

2. Задача управления состоит в определении параметров настройки динамической системы, при которых движение в пространстве переменных состояний происходит по траектории, предписанной однородным дифференциальным уравнением, порядок которого равен порядку оптимизируемого процесса.

3. Компьютерное управление и регистрация функций $T = f(\tau)$ и $p = k(\tau)$ могут быть использованы для определения числовых параметров гидравлической системы и открывают новые возможности для планирования экспериментов, для разработки нечетких и нейросетевых моделей объектов управления.

Список литературы

1. Коростелев В. Ф. Теория, технология и автоматизация литья с наложением давления. М.: Новые технологии, 2004. 224 с.
2. Коростелев В. Ф. Технология и управление формированием нанокристаллического строения изделий из прецизионных сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10(87). С. 14—17.
3. Качак В. В., Коростелев В. Ф., Хромова Л. П. Нанотехнологии и упрочнение сплавов. М.: Новые технологии. 240 с.
4. Новиков И. И. Термодинамика: Учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1984. 592 с.
5. Большаков А. Е. Разработка нейросетевых моделей для исследования формирования свойств сплавов // Материалы мультikonференции МКПУ-2013.
6. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М.: Машиностроение, 2004. 576 с.
7. Коростелев В. Ф., Хромова Л. П. Исследование межомных взаимодействий с использованием данных об изменении физико-механических свойств сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 2. С. 8—13.

О. В. Дрозд, студент,
olvidrozd@mail.com,

Д. В. Капулин, канд. техн. наук, доц.,
kapulin@gmail.com,

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Моделирование систем управления и диспетчеризации технологических процессов с использованием современных информационных технологий

Рассмотрен процесс проектирования системы управления однобарабанным котельным агрегатом ТГМ-96Б с применением SCADA-системы Proficy iFIX. Описаны основные компоненты и принципы работы, представлена структура модели системы управления котельным агрегатом, приведены результаты моделирования. Подробно рассмотрен процесс разработки модели с использованием аппарата нечеткой логики и интеграция с iFIX-средствами пакета прикладных программ MATLAB.

Ключевые слова: котельный агрегат, имитационное моделирование, система диспетчеризации и управления, нечеткая логика

Введение

Известно значительное число технологических процессов, получение точных и однозначных формулировок законов управления для которых представляет трудноразрешимую проблему. При проектировании систем управления такими процессами незаменимым инструментом является аппарат нечеткой логики (НЛ) [1]. Среди основных промышленных применений аппарата НЛ следует отметить управление, диагностику неисправностей, распознавание образов, обработку изображений, анализ надежности. Разработку программируемых логических контроллеров с использованием НЛ осуществляют компании *Fuji* и *Fuzenba* [2, 3].

При проектировании автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) как с использованием аппарата классической теории управления, так и на базе аппарата нечеткой логики необходимо проводить ряд испытаний, направленных на отработку аварийных ситуаций, которые по требованиям безопасности затруднительно реализовать на реальном объекте. Для решения таких задач целесообразно разработать имитатор автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора, который по своим параметрам будет приближен к реальной АСУТП.

Постановка задачи

Основная задача состоит в том, чтобы разработать имитационную модель АСУТП с использованием аппарата нечеткой логики. Следует отметить

наличие различных подходов для решения подобных задач [4, 5]. Предлагаемый способ состоит в разработке модели системы управления средствами *MATLAB* и входящих в него подсистем *Simulink* и *Fuzzy Logic Toolbox*. Для организации диспетчеризации технологического процесса и разработки автоматизированного рабочего места оператора необходимо обеспечить связь разрабатываемой модели и SCADA-системы с помощью протокола *OPC*. Для оценки эффективности рассматриваемого подхода необходимо провести сравнение прямых показателей качества управления для пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора и регулятора на базе аппарата нечеткой логики.

Методика решения задачи

Рассмотрим процесс разработки имитационной модели технического объекта. Прикладные среды разработки предусматривают моделирование любого технического объекта, поведение которого можно описать посредством аппарата теории автоматического управления. В рассматриваемом случае в качестве объекта управления выбран котельный агрегат ТГМ-96Б — вертикально-водотрубный, однобарабанный, радиационного типа с естественной циркуляцией, П-образной компоновки [6]. Перечень измеряемых и контролируемых параметров составлен в соответствии с методическими указаниями по объемам технологических измерений ОАО "ФСК ЕЭС" [7]. Значения контролируемых параметров котельного агрегата взяты из работ [8, 9].

В соответствии с поставленными задачами к модели рассматриваемого объекта управления предъявляются следующие требования:

- 1) значительное число входных и выходных параметров, необходимое для реализации АРМ оператора достаточной степени сложности;
- 2) доступность структуры модели для ее изучения и модификации;
- 3) простота и очевидность структуры и функционирования модели для операторов, не являющихся специалистами в области теплотехники;
- 4) простота разработки и реализации при сохранении большого числа входных и выходных воздействий.

Приоритетным является первое требование, так как основной задачей является создание автоматизированного рабочего места, уровень сложности которого будет достаточно высок для подготовки операторов котельных агрегатов.

Известна математическая модель барабанного котельного агрегата, описывающая котел при докритических параметрах пара [10]. Такая линеаризованная модель позволяет получать значения следующих параметров: расход питательной воды; количество пара в единицу времени; расход воды, пара, пароводяной смеси на различных участках циркуляционного контура котла; давление в различных участках пароводяного тракта. Указанная

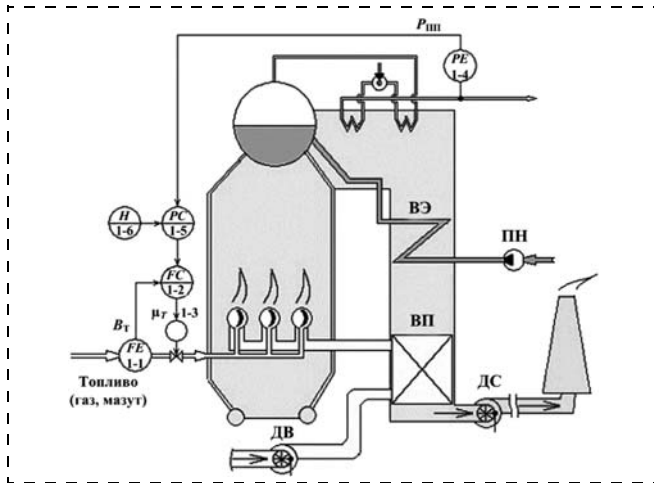


Рис. 1. Функциональная схема управляющего контура регулирования тепловой нагрузки барабанного котла

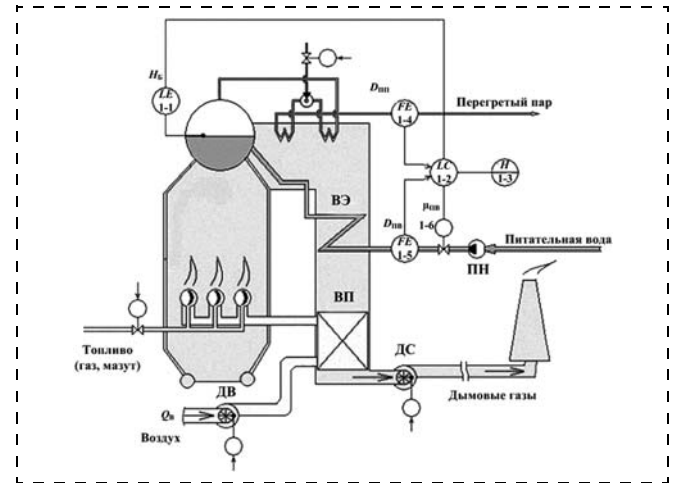


Рис. 2. Функциональная схема управляющего контура регулирования питания барабанного котла

модель может использоваться при исследовании различных режимов работы агрегата, но для создания требуемой имитационной модели и проведения испытаний отдельных контуров управления она не подходит, так как не удовлетворяет поставленным требованиям (прежде всего, пунктам 2—4).

Рассмотрим процесс разработки модели системы управления котельным агрегатом, удовлетворяющей установленным требованиям. Из множества контуров управления парового котла смоделированы основные: контур регулирования тепловой нагрузки (рис. 1) и контур регулирования питания (рис. 2).

На рис. 1 приняты следующие обозначения: $P_{шт}$ — давление перегретого пара; ПН — питательный насос; ВЭ — водяной экономайзер; ДС — дымосос; ВП — воздухоподогреватель; ДВ — дутьевой вентилятор; B_T — расход топлива; FE 1-1 — прибор для измерения расхода топлива; FC 1-2 — управляющий прибор (по расходу топлива); PE 1-4 — прибор для измерения давления перегретого пара; 1-3 — исполнительный механизм (регулятор подачи топлива); PC 1-5 — управляющий прибор (по давлению перегретого пара); H 1-6 — средство ручного ввода параметров.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: $D_{шт}$ — расход перегретого пара; $D_{пв}$ — расход питательной воды; ПН — питательный насос; ВЭ — водяной экономайзер; ВП — воздухоподогреватель; ДС — дымосос; ДВ — дутьевой вентилятор; H_6 — уровень в барабане котла; LE 1-1 — прибор для измерения уровня воды в барабане котла; LC 1-2 — управляющий прибор (по уровню воды); H 1-3 — средство ручного ввода параметров; FE 1-4 — прибор для измерения расхода перегретого пара; FE 1-5 — прибор для измерения расхода питательной воды; 1-6 — исполнительный механизм (регулятор подачи питательной воды).

В качестве входного параметра контура регулирования тепловой нагрузки принято давление перегретого пара, выходным параметром является

положение регулирующего органа подачи жидкого топлива. Для контура регулирования питания входным параметром является расход перегретого пара, выходным — положение регулирующего органа подачи питательной воды.

Рассмотрим модель системы управления с использованием в качестве управляющего устройства ПИД регулятора. Для такого регулятора входным сигналом является разность между текущим значением контролируемого параметра и значением, установленным оператором. Выходной сигнал представляет собой управляющее воздействие на регулируемый клапан подачи питательной воды (топлива). ПИД регулятор формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трех слагаемых, первое из которых пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе — интеграл сигнала рассогласования, третье — производная сигнала рассогласования. Выходной сигнал регулятора u определяется тремя слагаемыми [11]:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (1)$$

где K_p , K_i , K_d — коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора, соответственно; $e = x_0 - x$ — невязка, или отклонение величины x от заданного значения x_0 .

Значения параметров ПИД регулятора для рассматриваемой модели системы управления следующие: $K_p = 1,093$; $K_i = 0,86$; $K_d = 0,209$. Функциональная схема разработанной имитационной модели системы управления котельным агрегатом представлена на рис. 3, где приняты следующие обозначения: 1.1 — положение регулирующего клапана (РК) подачи жидкого топлива; 1.2 — положение встроенной задвижки подачи жидкого топлива; 1.3 — температура мазута в каждом мазутопроводе; 1.4 —

давление мазута в каждом мазутопроводе; 2.1 — положение направляющего аппарата дымовой заслонки; 2.2 — температура газов перед экономайзером; 2.3 — температура газов перед воздухоподогревателем; 3.1 — положение направляющего аппарата дутьевого вентилятора; 3.2 — температура воздуха перед дутьевым вентилятором; 3.3 — давление за дутьевым вентилятором; 4.1 — информационный сигнал с РК линии впрыска собственного конденсата; 4.2 — информационный сигнал с РК линии непрерывной продувки; 4.3 — информационный сигнал с РК линии подачи питательной воды; 4.4 — температура питательной воды; 4.5 — температура свежего пара; 4.6 — давление перегретого пара; 4.7 — температура перегретого пара; 5.1 — требуемое давление пара; 5.2 — требуемая температура пара.

Имитационная модель котлоагрегата состоит из следующих подсистем:

- тракт подачи жидкого топлива;
- водопаровой тракт;
- воздушный тракт;
- тракт дымовых газов;
- управляющая подсистема.

Рассмотрим структуру типового элемента подсистемы модели котельного агрегата (рис. 4). Элемент "Усилитель" задает коэффициент k зависимости выходных величин от входных, в данном случае — зависимость расхода воды на непрерывную продувку (0...55 т/ч) от степени открытия регулировочного клапана на линии непрерывной продувки (0...100 условных единиц) и зависимость расхода собственного конденсата на впрыски (0...55 т/ч) от степени открытия регулировочного клапана на линии впрыска собственного конденсата (0...100 условных единиц). Элемент "Блок передаточной функции" предназначен для имитации переходных процессов при изменении входных величин. Блок "Фиксатор положения задвижки" позволяет реализовать выдачу выходных параметров только при открытой встроенной задвижке в соответствующем тракте. Блок "ОРС (запись)" обеспечивает запись выходного параметра в соответствующий тег ОРС-сервера. Блок "Индикация параметра" предназначен для вывода текущего значения выходного параметра и необходим на этапе отладки и тестирования системы.

Расчет коэффициентов зависимости выходных величин от входных проводится согласно следующим формулам (пример для расхода воды на непрерывную продувку барабана котельного агрегата и на сброс конденсата):



Рис. 3. Функциональная схема имитационной модели котельного агрегата ТГМ-96Б (нотация IDEF0)

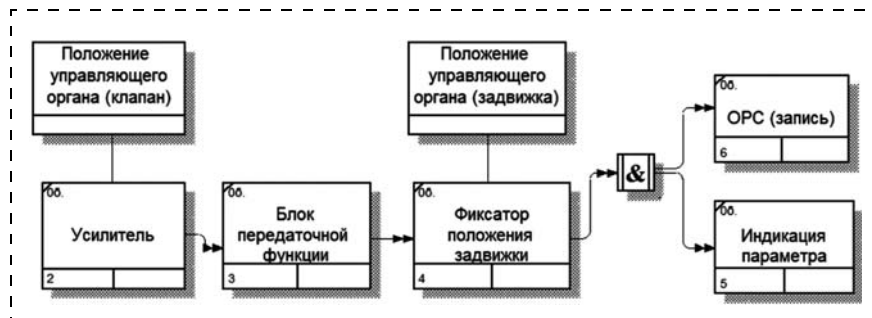


Рис. 4. Структура типового элемента имитационной модели (нотация IDEF3)

- расход на непрерывную продувку:

$$k_1 = \frac{-(y_1 - y_2) - (x_1 y_2 - x_2 y_1)}{x_2 - x_1} = \frac{-(0 - 55) - (0 \cdot 55 - 100 \cdot 0)}{100 - 0} = \frac{55}{100} = 0,55, \quad (2)$$

где x_1, x_2 — соответственно минимальное и максимальное значения степени открытия управляющего органа (задвижки или клапана); y_1, y_2 — соответственно минимальное и максимальное значения параметра, для вычисления которого ведется определение коэффициента;

- расход на собственный конденсат:

$$k_2 = \frac{-(y_1 - y_2) - (x_1 y_2 - x_2 y_1)}{x_2 - x_1} = \frac{-(0 - 55) - (0 \cdot 55 - 100 \cdot 0)}{100 - 0} = \frac{55}{100} = 0,55. \quad (3)$$

В качестве средства взаимодействия имитационной модели со SCADA-системой используется протокол ОРС. Интерфейс автоматизированного рабочего места оператора представлен на рис. 5.

Рассмотрим модель системы управления котельным агрегатом с использованием в качестве управляющего устройства ПИД подобного регулятора на базе аппарата нечеткой логики. В качестве системы нечеткого вывода принята система типа Мам-

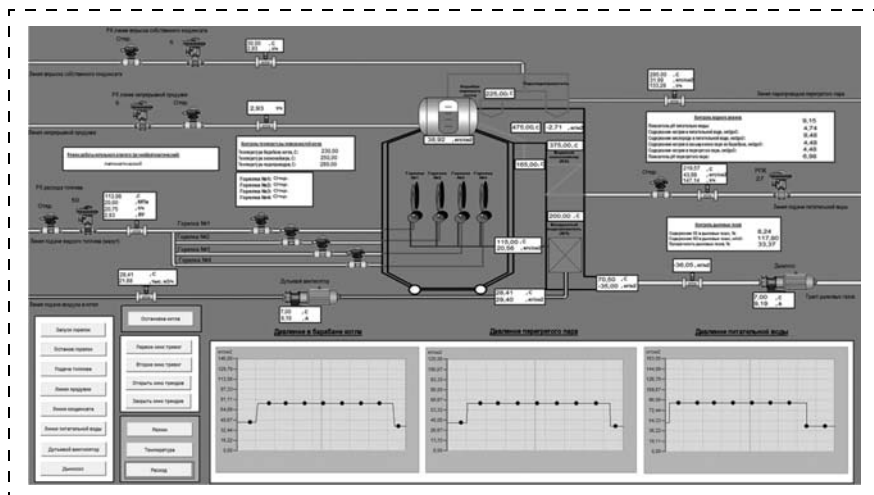


Рис. 5. Интерфейс рабочего места оператора

дани. Данный алгоритм обладает следующими отличительными чертами [1]:

- формирование базы правил системы нечеткого вывода осуществляется в виде упорядоченного согласованного списка нечетких продукционных правил в виде "if A then B", где антецеденты ядер правил нечеткой продукции построены с помощью логических связок "И", а консеквенты ядер правил нечеткой продукции простые;
- фаззификация входных переменных осуществляется описанным выше способом, так же, как и в общем случае построения системы нечеткого вывода;
- агрегирование подусловий правил нечеткой продукции осуществляется с помощью классической нечеткой логической операции "И" двух элементарных высказываний A, B : $T(A \cap B) = \min\{T(A); T(B)\}$;

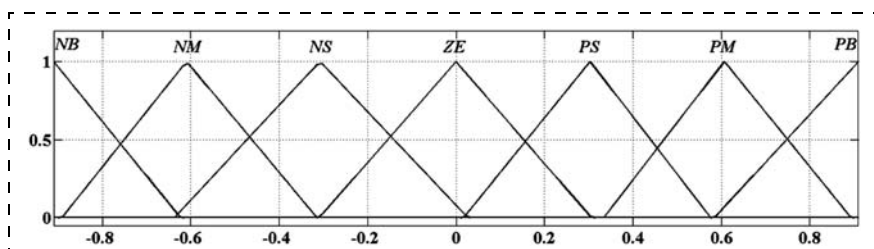


Рис. 6. Функции принадлежности входной переменной X_1 (треугольная функция принадлежности)

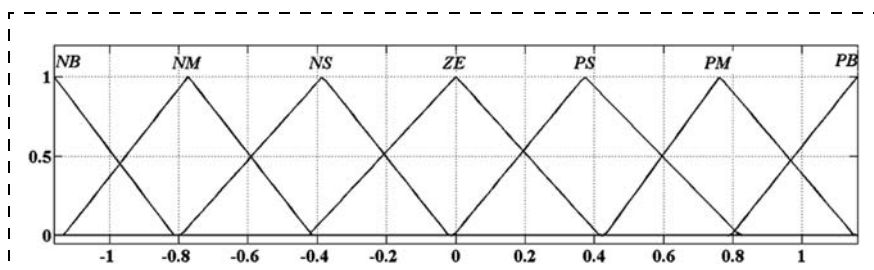


Рис. 7. Функции принадлежности входной переменной X_2 (треугольная функция принадлежности)

- активизация подзаключений правил нечеткой продукции осуществляется методом min-активизации $\mu(y) = \min\{c; \mu(x)\}$, где $\mu(x)$ и c — соответственно функции принадлежности термов лингвистических переменных и степени истинности нечетких высказываний, образующих соответствующие следствия (консеквенты) ядер нечетких продукционных правил;
- аккумуляция подзаключений правил нечеткой продукции проводится с помощью классического для нечеткой логики max-объединения функций принадлежности;
- дефаззификация проводится методом центра тяжести или центра площади.

Входные нормированные сигналы разрабатываемого нечеткого регулятора обозначим X_1, X_2, X_3 , нормированный выходной сигнал — $Y(\tau)$. Введем лингвистические переменные: X_1 — "Пропорциональная составляющая", X_2 — "Интегральная составляющая", X_3 — "Дифференциальная составляющая", Y — "Нормированный управляющий сигнал".

В области определения пропорциональной составляющей введем семь нечетких множеств, определяющих значения лингвистической переменной X_1 соответствующими функциями принадлежности: A_1 = "Отрицательное большое (NB)"; A_2 = "Отрицательное среднее (NM)"; A_3 = "Отрицательное малое (NS)"; A_4 = "Близко к нулю (ZE)"; A_5 = "Положительное малое (PS)"; A_6 = "Положительное среднее (PM)"; A_7 = "Положительное большое (PB)". Аналогичным образом определим функции принадлежности для значений лингвистической переменной X_2 .

Для входных переменных регулятора приняты симметричные диапазоны изменения, при этом

$$X_1 \in \left[-\frac{1}{K_p}; \frac{1}{K_p} \right],$$

$$X_2 \in \left[-\frac{1}{K_i}; \frac{1}{K_i} \right],$$

т. е. $X_1 \in [-0,915; 0,915]$

и $X_2 \in [-1,163; 1,163]$.

В качестве первоначального значения переменной выбран диапазон $X_3 \in [-1; 1]$. Более точная настройка дифференциальной составляющей осуществляется методом подбора. Уточненным значением является $X_3 \in [-0,16; 0,16]$.

Нечеткие множества значений выходной лингвистической переменной Y определены функциями принадлежности: B_1 = "Отрицательное

большое (*NB*"); B_2 = "Отрицательное среднее (*NM*)"; B_3 = "Отрицательное малое (*NS*)"; B_4 = "Отрицательное, близко к нулю (*N*)"; B_5 = "Близко к нулю (*ZE*)"; B_6 = "Положительное, близко к нулю (*P*)"; B_7 = "Положительное малое (*PS*)"; B_8 = "Положительное среднее (*PM*)"; B_9 = "Положительное большое (*PB*)".

Для выходной переменной принят диапазон изменения $y \in [-0; C]$, где верхняя граница C при единичном ступенчатом воздействии варьируется от 1,1 до 2, чтобы выходной сигнал регулятора смог компенсировать задаваемое возмущение. Графически функции принадлежности представлены на рис. 6–9.

Функционирование реализованного нечеткого регулятора обеспечивается применением базы правил, приведенной в табл. 1, 2 [12].

Каждое правило логически объясняет текущее состояние объекта управления и рекомендует соответствующее управляющее воздействие. При нечетком управлении база правил представляет собой лингвистическую модель процесса управления. Представленная база правил по стратегии и логике близка к ПИД регулятору.

Сравнительные временные диаграммы положения регулирующего органа подачи питательной воды при использовании ПИД регулятора и регулятора на базе аппарата нечеткой логики приведены на рис. 10.

Из анализа временных диаграмм видно, что модель системы управления с использованием нечеткого ПИД подобного регулятора по прямым показателям качества процесса управления значительно превосходит модель с использованием аналогового ПИД регулятора. В частности, снижается время регулирования и перерегулирования, увеличивается коэффициент затухания. Таким образом, применение регулятора с использованием аппарата нечеткой логики не только упрощает процесс проектирования, но и дает существенное улучшение прямых показателей регулирования по сравнению с использованием классического ПИД регулятора.

Закключение

Применение ПИД регуляторов при управлении нелинейными сложными системами, а также при недостаточном количестве информации об объекте управления нередко влечет за собой ухудшение показателей качества регулирования и даже потерю устойчивости. Характеристики устройств управле-

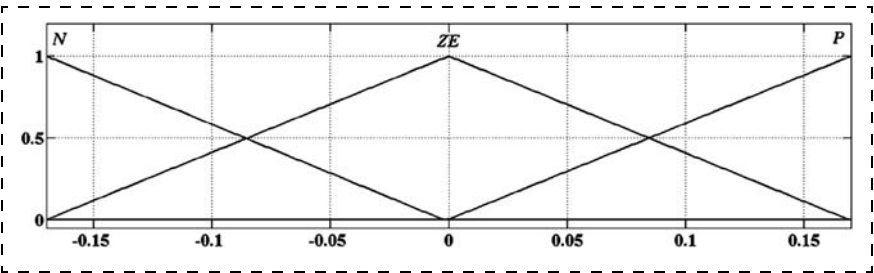


Рис. 8. Функции принадлежности входной переменной X_3 (треугольная функция принадлежности)

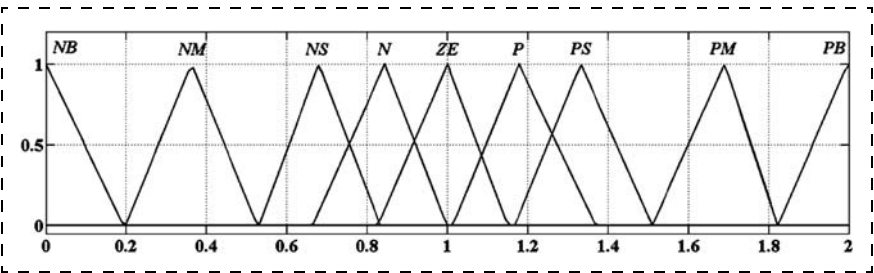


Рис. 9. Функции принадлежности входной переменной Y (треугольная функция принадлежности)

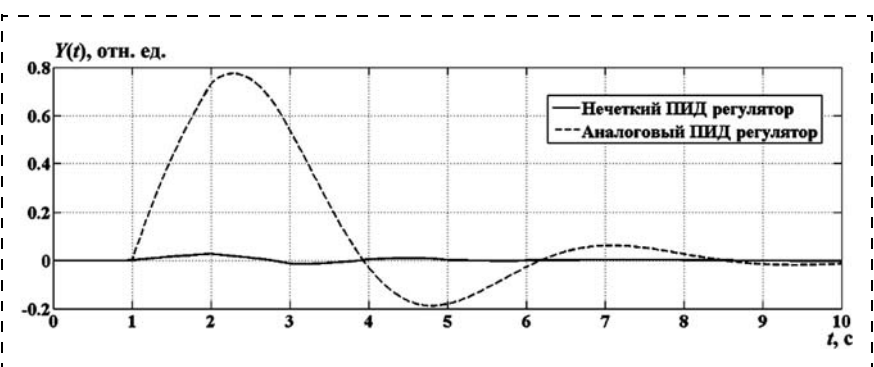


Рис. 10. Графики переходных процессов для модели с аналоговым ПИД регулятором и с ПИД регулятором на базе аппарата нечеткой логики

Таблица 1
Лингвистические правила пропорционально-интегральной части регулятора

Y		X_2						
		<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
X_1	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>
	<i>NM</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>
	<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
	<i>ZE</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
	<i>PS</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
	<i>PM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
	<i>PB</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>

Таблица 2
Лингвистические правила дифференциальной части регулятора

X_3	Y
<i>N</i>	<i>N</i>
<i>ZE</i>	<i>ZE</i>
<i>P</i>	<i>P</i>

ния в таком случае можно значительно улучшить с использованием аппарата нечеткой логики. Вместе с тем, основным недостатком нечетких регуляторов являются сложность настройки (составления базы правил) и отсутствие единого подхода к данному процессу. Тем не менее, проектирование АСУТП с использованием аппарата нечеткой логики является перспективным и развивающимся направлением, особенно в тех областях, где получение математической модели объекта управления затруднено.

Предлагаемый подход к разработке систем управления может быть использован для построения моделей сложных объектов, интерфейсов автоматизированных рабочих мест оператора, обеспечения связи между отдельными компонентами системы управления при изучении свойств систем управления, основанных на аппарате нечеткой логики. Подобные программные комплексы позволяют осуществлять подготовку операторского персонала в условиях, максимально приближенных к реальным, проводить моделирование и тестирование АСУТП с использованием аппарата нечеткой логики.

1. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы. М.: Мир, 1993. 368 с.
2. Fuji Electric Temperature Controllers, Inkjet Recorders. URL: <http://www.process-controls.com/Alpha/fuji.html> (дата обращения 02.06.2013).
3. Fuzzy Logic Temperature Controller Fuzenba FY-700. URL: http://www.process-controls.com/Access_Control_Sales/Konda_temperature_controllers3.htm (дата обращения 02.06.2013).
4. Макаренко В. М., Азябин С. В., Говердовский А. Д. Современные нейроконтроллеры: обзор решений и анализ возможностей для применения в интеллектуальных системах // Молодежный научно-технический вестник. 2012. № 10. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/482380.html> (дата обращения 14.02.2013).
5. Клепиков В. Б., Сергеев С. А., Махотило К. В., Обруч И. В. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами // Электротехника. 1999. № 5. С. 2—6.
6. Бойко Е. А., Охорзина Т. И. Котельные установки и парогенераторы: справ. пособ. Красноярск: КГТУ, 2003. 223 с.
7. СО 34.35.101-2003. Методические указания по объему технологических измерений, сигнализации, автоматического регулирования на тепловых электростанциях. Взамен РД 34.35.101-88; дата введ. 01.09.2004. М.: СПО ОРГРЭС, 2004.



С 16 по 19 июня 2014 г. в Москве состоится
**XII Всероссийское совещание
 по проблемам управления (ВСПУ XII),**

посвященное 75-летию Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН



Направления работы Совещания

I. Теория систем управления

- Анализ и синтез систем управления
- Оптимальное управление и распределенные системы
- Адаптивные и робастные системы управления
- Стохастические системы управления
- Идентификация систем
- Групповое управление
- Децентрализованное и кооперативное управление
- Гетерогенные модели управления
- Управление в условиях неполной информации и противодействия

II. Управление подвижными объектами и навигация

- Управление в авиации и космонавтике
- Управление морскими подвижными объектами
- Мехатроника, управление и обработка информации в робототехнических системах
- Управление автотранспортом и автотрафиком

III. Интеллектуальные системы управления

- Искусственный интеллект в управлении
- Обучение и самообучение интеллектуальных систем управления
- Иерархические модели управления сложными системами
- Стратегическое поведение, целеполагание, планирование действий и взаимодействий в управлении динамикой мультиагентных систем
- Технологии извлечения, представления и обработки знаний в управлении
- Когнитивные технологии в управлении

IV. Управление в промышленности, энергетике и на транспорте

V. Управление системами междисциплинарной природы

VI. Средства измерения, вычислений и контроля в управлении

VII. Системный анализ и принятие решений в задачах управления

VIII. Информационные технологии в управлении

IX. Проблемы образования в области управления

Подробная информация о Совещании находится на сайте

<http://vspu2014.ipu.ru>

УДК 62-5

Б. В. Новоселов, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
В. Я. Николаев, гл. конструктор направления,
signal@kovrov.ru,
ОАО "Всероссийский научно-исследовательский
институт "Сигнал"

Концепция разработки, построения и эффективного использования сервисных средств следящих приводов

Рассмотрена концепция разработки, построения и эффективного использования совокупности сервисных средств для следящих приводов, позволяющая создавать сервисные средства с такими потребительскими свойствами, которые дают возможность гарантированно обеспечивать оперативный контроль, техническое обслуживание, поиск неисправностей и ремонт следящих приводов и, тем самым, продлевать сроки их эксплуатации.

Ключевые слова: следящие приводы, сервисные средства, специальное технологическое оборудование, ремонтная документация, приборы контроля, стенды-нагрузчики

Постановка задачи

Одной из основных задач развития следящих приводов (СП) любого назначения является повышение эффективности их функционирования, эксплуатации и ремонта.

Сервисные средства (СС) являются одним из инструментов, без которого нельзя обеспечить высокое качество СП на всех этапах их жизненного цикла.

Однако необходимо помнить, что при разработке СС должны быть созданы такие их потребительские свойства, которые дали бы возможность гарантированно обеспечить оперативный контроль, техническое обслуживание, поиск неисправностей и ремонт СП и, тем самым, продлить сроки эксплуатации СП.

Следовательно, должен быть охвачен обслуживанием не только каждый прибор, блок, модуль, но и каждый элемент. Вместе с этим, стоимость создаваемого комплекса СС должна быть приемлемой и окупаемой, а это требует, чтобы уже на этапе разработки СП, когда рождается схема функционального деления его на отдельные приборы, узлы, модули, учитывался фактор оптимизации затрат на комплекс СС [1, 7, 8].

Концепция построения и эффективного использования СС

Исходя из изложенных выше требований к СС сформулируем пути построения и эффективного использования их на различных этапах жизненного цикла СП в виде структурной схемы (рис. 1) с краткими соответствующими пояснениями [1].

Этап разработки СП:

- создание функционально законченных блоков электрорадиоэлементов (блоков ЭРЭ), субблоков и приборов, входящих в состав СП;
- введение в состав СП элементов оперативного технического контроля, технологических цифровых каналов для возможности подключения к СП при контроле внешних средств или сборе телеметрической информации;
- введение в программное обеспечение СП дополнительных технологических протоколов сопряжения по штатному каналу связи (как один из режимов штатного СП — диагностика);

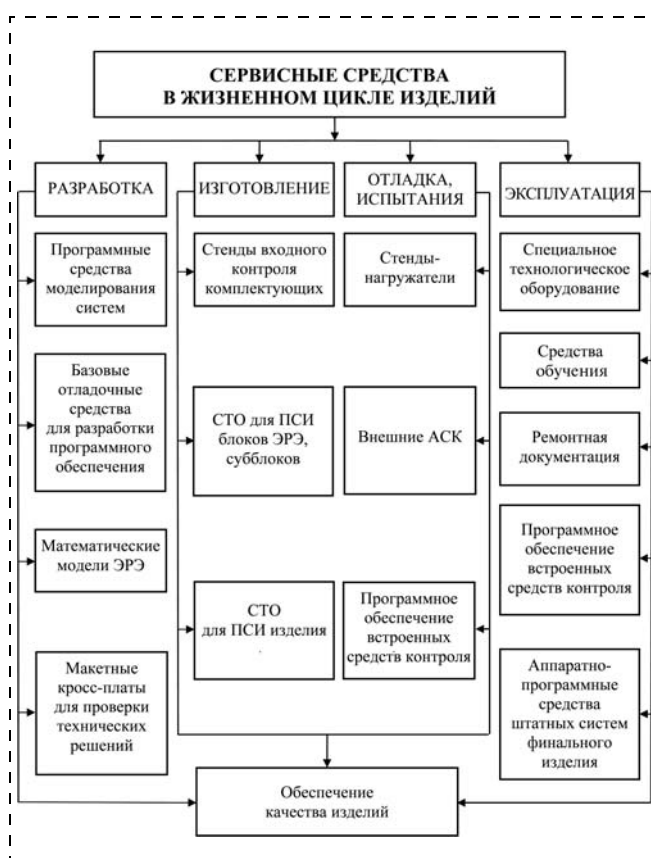


Рис. 1. Сервисные средства СП

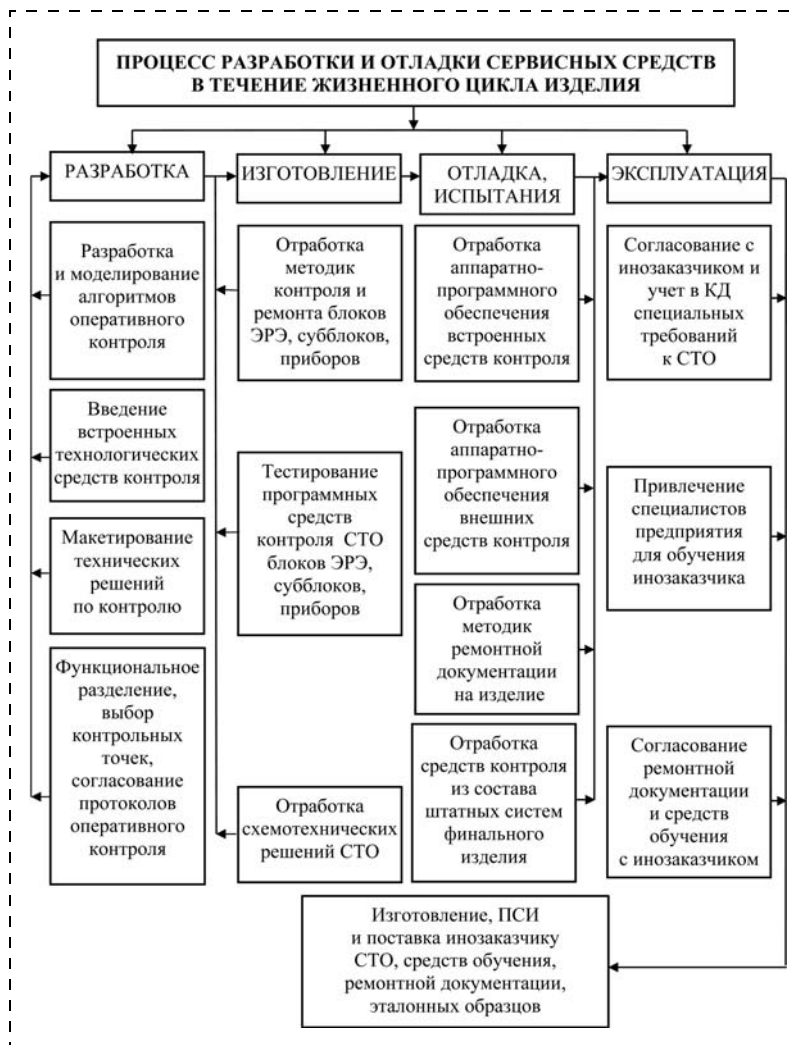


Рис. 2. Технология разработки сервисных средств

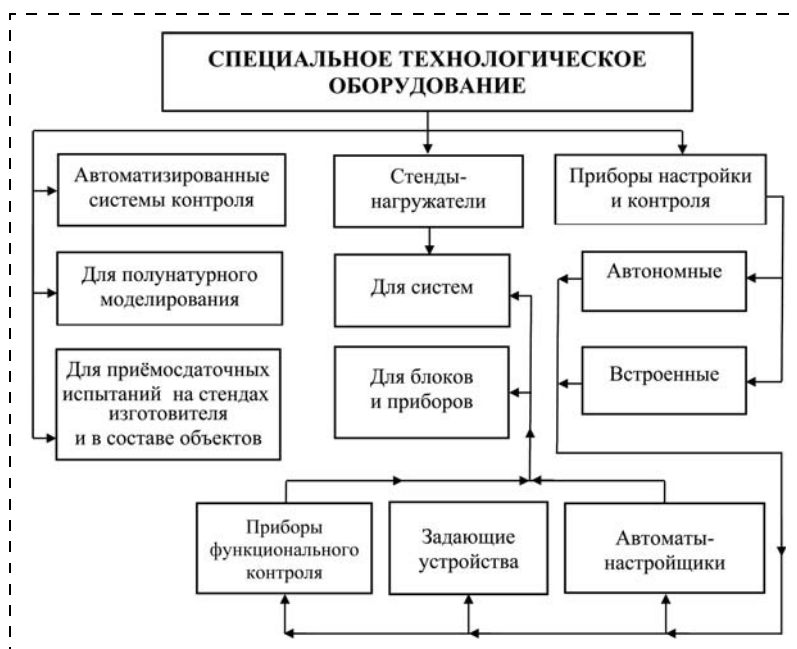


Рис. 3. Состав специального технологического оборудования

- введение в ключевые узлы СП встроенных датчиков;
- введение максимального числа уже отработанных схемно-конструкторских решений;
- проверка принимаемых технических решений моделированием либо их отработкой на специально изготавливаемых макетных платах.

В качестве основных СС на этапе разработки выступают (рис. 1): исследовательские автоматизированные системы контроля, программные средства моделирования систем, базовые отладочные средства для разработки программного обеспечения, макетные кросс-платы для отработки технических решений. Следует еще и еще раз отметить, что уже на этапе разработки схемы функционального деления изделия (СП) должен учитываться фактор оптимизации затрат на аппаратуру для ремонта, диагностики, контроля функционирования.

Этап изготовления:

- максимально полная отработка схемно-конструкторских решений, заложенных в СС;
- отработка программного обеспечения встроенных программно-аппаратных средств и внешних автоматизированных систем контроля;
- отработка методик проведения работ по поиску неисправностей блоков ЭРЭ, субблоков, в том числе с имитацией возможных аварийных ситуаций, предусмотренных в технических заданиях на контролируемое изделие;
- проведение испытаний СС с имитацией внешних возмущающих факторов и аппаратно-информационного сопряжения для контролируемых изделий.

Этап отладки и испытаний в составе финальных комплексов:

- отработка аппаратно-программного обеспечения встроенных и внешних средств контроля;
- отработка методик по применению ремонтной документации;
- отработка средств контроля из состава штатных систем финального комплекса, в который входят СП.

На этапе отладки и испытаний в составе комплексов основной упор делается на отладку автоматизированных средств контроля и диагностики СП.

На этапе эксплуатации: проведение технического обучения представителей заказчика. Для отработки сложных комплексных отказов предусматривается участие специалистов предприятия-изго-



Рис. 4. Состав средств по техническому обучению



Рис. 5. Требования к ремонтной документации

товителя СП и СС в обслуживании изделий. Для учета особенностей работ, проводимых на территории заказчика, с ним согласуются специальные требования к СС, а также состав и требования к ремонтной документации и средствам обучения.

В целом этот комплекс мероприятий обеспечивает высокое качество и потребительские свойства сервисных средств, применяемых на ремонтных базах и в сервисных центрах заказчика.

Разрабатываемые и используемые на каждом из этапов жизненного цикла изделия СС имеют свои характерные отличительные признаки. Однако следует обратить внимание на то, что заказчика, прежде всего, интересуют сервисные средства, которые применяются на этапе эксплуатации изделий (рис. 2): специальное технологическое оборудование (рис. 3), средства технического обучения (рис. 4), ремонтная документация (рис. 5).

Практическая реализация положений концепции

В табл. 1 представлены результаты практической реализации четырех проектов для заказчиков в области создания СС различных вариантов СП [1].

В связи с тем, что обслуживаемые изделия имеют большой приборный состав, к документации для ремонта и комплектам специального технологического оборудования (СТО) изначально предъявлялись требования по поддержанию высокого качества изделий после ремонта и обеспечению высокой технологичности ремонтных работ при минимальных затратах. Созданные комплекты СТО обеспечивают высокое качество ремонта, позволяют провести диагностику как изделия, так и его составных частей, обнаружить неисправный прибор и провести его качественное восстановление в условиях ремонтного предприятия. Как правило, в состав СТО включается автоматизированная система контроля (АСК) изделия и его составных частей и стенды-нагрузчики, имитирующие нагрузку СП, а при реализации приборов СТО и стендов соблюдается требование их максимальной унификации [3, 4, 6].

Дополнительные опции к выполненным проектам

В приведенных в табл. 1 данных не представлен объем разрабатываемых средств технического обучения, к которым относятся: рабочие инструкции по монтажу и настройке; курсы лекций по обучению; учебно-технические плакаты; руководства по эксплуатации изделий, в том числе электронные интерактивные; аппаратно-программные тренажеры.

Эти материалы разрабатываются дополнительно по требованиям и заданиям заказчика, хотя многие положения для такой разработки уже и содержатся в материалах ремонтной документации и СТО.

Даже в настоящее время, когда ЭВМ широко используются для анализа, синтеза, испытаний и контроля следящих приводов, в подавляющем числе случаев разработчики следящих приводов не избавлены от необходимости всесторонних экспериментальных исследований конструкторских и опытных

Таблица 1

Изделие	Тип приводов	Число приборов/электронных модулей	Число единиц специального технологического оборудования	Объем ремонтной документации, листов формата А4
ЭСР-121	Электрические с двигателями постоянного тока	25/36	84	3899
ЗУ86-Э ЗУ88-50-Э	Электрические с асинхронными двигателями	28/230 25/141	221	7800
СП-190Э	Электрогидравлические	21/37	34	7700

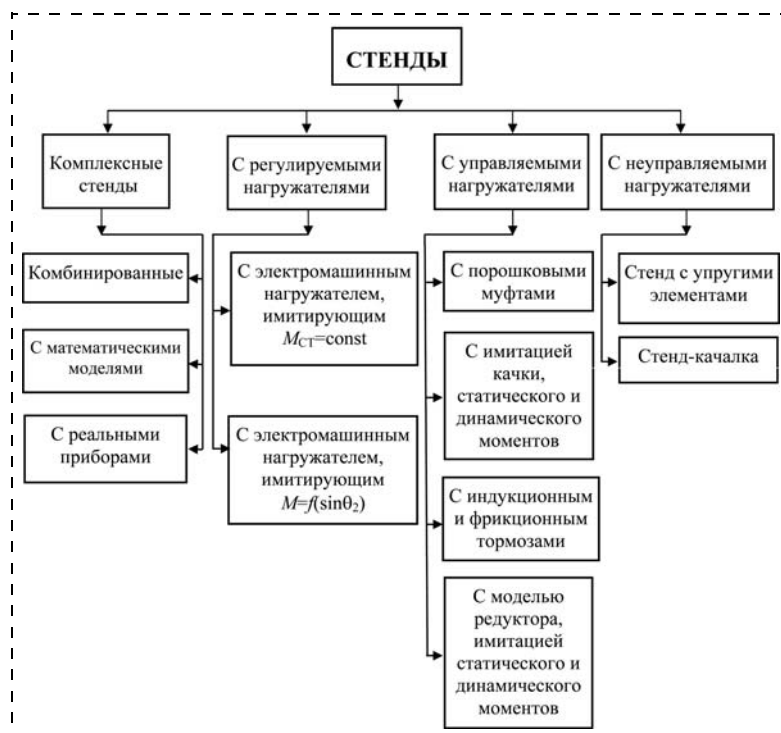


Рис. 6. Классификация стендов-нагрузителей

образцов с имитацией реальных условий работы, возмущений и воздействий, что приводит к необходимости создания на предприятиях-разработчиках и предприятиях-изготовителях индивидуальных, уникальных и громоздких стендов.

В ОАО "ВНИИ "Сигнал" за 60 лет его существования разработаны, изготовлены и прошли всестороннюю проверку свыше 60 таких стендов, классификация которых представлена на рис. 6 [3, 4, 6, 9].

Как правило, все стенды имитируют различные по характеру моментные нагрузки, в первую очередь: момент сил трения, зависящий от скорости движения объекта; позиционный момент, зависящий от угла поворота объекта; динамический момент, определяемый моментами инерции движущихся частей объекта и их ускорением.

Это же можно сказать и о необходимости создания специальных имитаторов входных воздействий, приборов контроля и настройки, которые в целом ряде случаев оказываются более эффективными по сравнению с использованием универсальных ЭВМ.

Данные о некоторых приборах контроля и настройки СП, созданных в ОАО "ВНИИ "Сигнал", а также их возможностях приведены в табл. 2.

Все указанные приборы являются малогабаритными и переносными; работают от бортовых источников питания контролируемых изделий, которые могут быть как в стационарном, так и в подвижном состоянии; обеспечивают контроль наиболее характерных и критичных параметров СП [6, 9].

Вопросы проектирования автоматов-настройщиков и приборов контроля достаточно подробно изложены в работе [5], поэтому здесь не рассматриваются.

Работы по созданию автоматизированных стендов для комплексных испытаний приводов на базе микроЭВМ проводятся по двум основным направлениям [7, 8]:

- создание исследовательских автоматизированных стендов, на которых разработчик привода может опробовать различные алгоритмы управления приводом, подобрать его корректирующие звенья, найти оптимальный закон управления и т. д.;
- создание автоматизированных систем для приемосдаточных испытаний (ПСИ) приводов, которые ориентированы на максимум автоматизации и минимум вмешательства оператора.

Созданные по первому направлению стенды предоставляют оператору широкие возможности по исследованию работы привода, в частности:

- формируют сигналы, имитирующие обмен информацией между приводом и внешними устройствами в соответствии с заданным протоколом;
- проводят оперативную диагностику состояния привода при отработке информационного обмена, обеспечивая оператору

визуальный контроль состояния сигналов готовности, включения, неисправности отдельных модулей в составе привода в режиме реального времени;

- обеспечивают формирование задающих воздействий различных типов с изменением параметров в широком диапазоне;
- формируют случайный сигнал ("белый шум");
- вычисляют компенсирующие сигналы по первой и второй производным от задающего воздействия и обеспечивают их фильтрацию;
- вычисляют сигнал рассогласования и интеграл от него;
- вычисляют сигнал обратной связи по скорости;
- вычисляют показатели качества привода и, по желанию оператора, отображают их на экране монитора, в том числе: перерегулирование — относительное и абсолютное, число полных колебаний, статическую ошибку, процентное содержание ошибок за определенный интервал времени, время переходного процесса;
- проводят регистрацию параметров привода и сохраняют их на жестком диске компьютера. Время регистрации и шаг квантования задаются оператором.

Передача сигналов задающих воздействий от стенда к приводу реализуется посредством необходимого числа цифроаналоговых преобразователей.

Такие стенды для разработчиков привода — это практически единственная возможность исследовать различные алгоритмы управления приводом, реализованные в цифровом виде, для того чтобы в дальнейшем заложить эти алгоритмы в штатную ЦВМ.

Наименование прибора контроля, задающего устройства, автомата-настройщика	Обозначение	Индекс контролируемого изделия	Контролируемые параметры			
			Работоспособность изделия	Точность	Показатели переходных процесса	Работоспособность приборов
Прибор контроля	ПБ5.176.012	2Э52 2Э52-1		Ошибки: статическая, скоростная, динамическая	Скорости наведения, демпфирование	Функционирование схемы готовности, контроль напряжений питания
Прибор контроля приводов	АЮИЖ.468012.011	П-800		То же	То же	То же
Прибор проверки точности	ПБ2.768.038	2Э62М 2Э36-1 2Э36-2		Средняя ошибка, процент времени стабилизированного положения		
Прибор проверки приводов	ПБ2.768.036	9С812 9С813 9С814		Динамическая ошибка при $\Theta_1(t) = \Theta_1 m \sin \omega t$	Скорости наведения	Определяет неисправности в системе, уровень срабатывания реле готовности
Прибор контрольный	АЮИЖ.468214.001	1Л32 9С839				Контролирует параметры усилителей мощности и блока управления
Имитатор ЦВМ	ПБ2.890.001	3У86 3У88 2Э29ВН 2Э29ГН	Формирует: задающие воздействия; компенсирующие сигналы; вычисление ошибки в виде кода или аналоговых величин			
Задающее устройство		Д219 ЭСП-227	Формирует задающее воздействие в аналоговом виде			
Автоматы-настройщики		ЭСП-"ЗИФ-121" ЭСП-121 ЭСП-121-М	Автоматы настройки всей системы			

В работах по второму направлению созданы автоматизированные системы для приемосдаточных испытаний приводов, которые обеспечивают максимум автоматизации и минимум вмешательства оператора. Примером могут служить системы для приемосдаточных испытаний изделий 3У86 и 3У88. Системы имеют два режима: контрольный и отладочный. В контрольном режиме система обеспечивает проверку привода на соответствие требованиям технических условий, выполняет печать протокола испытаний, делает вывод о соответствии показателей качества привода заданным в технических условиях. Действия оператора в этом случае сводятся к включению системы и подписанию протокола испытаний.

Отладочный режим служит для предварительной настройки привода.

Использование таких стендов позволяет:

- обеспечить унификацию аппаратной части при ПСИ приводов широкой номенклатуры;
- устранить необходимость разработки имитаторов ЦВМ;

- уменьшить число обслуживающего персонала при проведении приемосдаточных испытаний за счет максимальной автоматизации процесса;
- устранить субъективный фактор при оценке качества приводов.

Заключение

В работе рассмотрены подходы, предложенные в ОАО "ВНИИ "Сигнал", к построению и эффективному использованию сервисных средств для следящих приводов на различных этапах их создания и эксплуатации.

Под сервисными средствами понимаются:

- эксплуатационная и ремонтная документация для приводов и входящих в их состав приборов;
- стенды-нагрузатели для проведения испытаний приводов;
- автоматизированные системы для контроля, испытаний и сдачи приводов;
- приборы для контроля приводов при их эксплуатации в составе финальных изделий;

- специальное технологическое оборудование, необходимое для проведения ремонта;
- средства технического обучения сотрудников, проводящих ремонт.

В данной статье не рассмотрены подробно принципы реализации описанных выше приборов и систем.

Важно отметить, что комплексное использование сервисных средств позволяет не только обеспечивать высокое качество приводов и поддерживать его на всех этапах жизненного цикла, но и продлить сам срок жизненного цикла за счет:

- оптимизации настройки приводов;
- резкого сокращения времени испытания приводов;
- диагностики параметров приводов в процессе их работы;
- сокращения времени восстановления приборов из состава приводов при их выходе из строя.

Список литературы

1. **Николаев В. Я., Новоселов Б. В.** Сервисные средства систем наведения и стабилизации, поставляемых на экспорт в составе корабельных, сухопутных и авиационных комплексов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Исследование, проектирование, испытание и эксплуатация

информационно-измерительных устройств военной техники". Владимир, 6—8 сентября 2010 г. М.: Изд-во РАН, 2010. С. 21—30.

2. **Новоселов Б. В.** Разработки ВНИИ "Сигнал" в области следящих приводов // Аналитический обзор № 5565. М.: НТЦ "Информтехника", 1994. 104 с.

3. **Лукьянов Л. Е., Третьяков В. М.** Универсальный стенд для исследования и испытаний следящих приводов (Анализ существующих испытательных устройств, принципы и направления разработки универсального стенда) // Технический отчет. Ковров. 1980. 59 с.

4. **Новоселов Б. В.** Основные принципы построения систем исследования, испытаний и контроля следящих приводов // Сб. научных трудов Владимирского регионального отделения Академии инженерных наук, посвященный 10-летию создания АИН РФ. Владимир, 2001. С. 114—128.

5. **Автоматы-настройщики** следящих систем / Под ред. Б. В. Новоселова. М.: Энергия, 1975. 228 с.

6. **Новоселов Б. В., Бессонов А. Н., Черкасов А. Н.** Системы исследования, испытаний и контроля следящих приводов // Оборонная техника. 2006. № 8. С. 10—17.

7. **Бабкин А. В., Николаев В. Я.** Автоматизированные системы контроля высокоточных цифровых приводов наведения и стабилизации // "Исследование, проектирование, испытание и эксплуатация приборных устройств военной техники". Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Владимир, 28—30 мая 2008 г. М.: Из-во РАН, 2008. С. 26—30.

8. **Николаев В. Я., Смирнов А. Ю., Бабкин А. В., Крылов Д. Ю.** От шлейфового осциллографа до автоматизированных систем контроля // Оборонная техника. 2005. № 2—3. С. 75—82.

9. **Новоселов Б. В.** "Сигнал" начинался с приводов. 1954—2006 гг. // Ковров: Из-во "Знамя труда", 2006. 168 с.

УДК 621.382.3

О. К. Епифанов,

канд. техн. наук, нач. сектора,
office@eprib.ru,

А. И. Колпаков, науч. сотр.,
office@eprib.ru,

ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"

Тенденции развития современных силовых электронных модулей для электроприводов малой мощности

Рассматриваются вопросы повышения уровня надежности, миниатюризации и интеграции силовой секции электропривода, анализируются современные схемотехнические и технологические решения, приводятся описания и рассматриваются особенности построения силовых модулей высокой степени надежности и интеграции.

Ключевые слова: силовой модуль, надежность, инвертор, электропривод, термоциклирование, низкотемпературное спекание, прижимная технология

Введение

Силовая секция инвертора является неотъемлемой частью электропривода, во многом определяющей его эксплуатационные характеристики, надежность и габаритные размеры. В настоящее время

для построения инверторов для электроприводов малой мощности широко применяются схемотехнические решения на основе дискретных компонентов — транзисторов, драйверов затворов, интерфейсных элементов, модулей гальванической развязки и т. д., активное развитие которых началось в 90-х годах прошлого столетия [1].

Основной тенденцией в развитии современной силовой электроники является повышение степени интеграции и миниатюризации за счет внедрения новых технологий корпусирования, обеспечивающих как повышение плотности тока и стойкости к термоциклированию, так и расширение температурного диапазона и показателей надежности при их эксплуатации.

Повышение степени интеграции предусматривает переход от использования дискретных компонентов к применению интеллектуальных силовых модулей IPM (Intellectual Power Module), включающих в себя силовую секцию в определенной конфигурации, устройство управления и защиты. Для инверторов электроприводов такие модули выполняются в CIB-конфигурации (Converter-Inverter-Brake), т. е. содержат выпрямитель, трехфазный инвертор, тормозной каскад и снабжаются в ряде исполнений датчиками тока, напряжения и температуры, что позволяет осуществлять диагностику и управление режимами работы силового каскада в реальном масштабе времени. Отличительной осо-

бенностью современных IPM-модулей является реализация технологий прижимного контакта и низкотемпературного спекания, позволяющих исключить паяные соединения, которые становятся основной причиной отказов силовых модулей. Для электроприводов малой мощности наиболее эффективной является SKiN-технология монтажа компонентов схемы на гибкую печатную плату, печатные дорожки которой также выполняют функцию силовых терминалов [2].

Основные характеристики элементов силовой электроники

Одной из наиболее важных характеристик элементов силовой электроники в составе электропривода является их стойкость к термоциклированию. За время эксплуатации силовые ключи инвертора электропривода подвергаются воздействию нескольких тысяч термоциклов, градиент которых зависит от режимов работы и условий эксплуатации. Это связано как с построением электропривода, так и с циклограммами его временной работы в пусковом режиме и режиме торможения. Изменение температуры силовых ключей определяется как "пассивными" (внешними) термоциклическими воздействиями, создаваемыми окружающей средой, так и "активными" термоциклическими воздействиями, образуемыми за счет собственного тепловыделения в силовых ключах в процессе их работы. При этом "активные" термоциклы являются определяющими для оценки долговременной надежности и срока службы силовых ключей. Активному термомеханическому стрессу подвергаются в основном полупроводники и "интерфейсные" материалы: выводы кристаллов, электроизоляция, паяные соединения и т. д. Анализ типовых режимов работы электропривода показывает, что силовые элементы инвертора за время работы в течение 15 лет испытывают в среднем до 3,0 млн "активных" термоциклов.

Для оценки устойчивости элементов силовой электроники к воздействию перепадов температуры используются два метода испытаний [3]:

- "активное термоциклирование", при котором нагрев элемента происходит за счет его собственного тепловыделения в процессе коммутации тока, а снижение температуры обеспечивается системой охлаждения;
- "пассивное термоциклирование", при котором градиент температуры создается за счет попеременного помещения элемента в климатические камеры с высокой и низкой температурой.

Для сокращения времени испытаний используются ускоренные методы проверки при повышенном перепаде температуры ΔT , что вызывает активизацию механизмов отказа в силовых ключах. Анализ результатов испытаний и их статистическая обработка позволяют установить число термоциклов до отказа в зависимости от градиента и среднего значения температуры кристалла T_m , тем самым характеризуя параметры надежности силовых модулей.

Особенности конструктивно-технологического построения силовых модулей

Основными элементами конструкции стандартного силового модуля являются керамическая DBC-подложка (Direct Bonded Copper — керамическая подложка с медными шинами, нанесенными методом диффузионного напыления), на которой располагаются силовые кристаллы и медные токонесущие шины, а также медная базовая плата (рис. 1). Для подключения выводов кристаллов к керамической изолирующей подложке применяется ультразвуковая сварка или пайка.

Керамическая DBC-плата выполняет две основные функции: она осуществляет электрическую изоляцию токоведущих цепей модуля от базовой платы и передает на нее тепло, выделяемое кристаллами. Для производства DBC-керамики широко применяются оксид алюминия Al_2O_3 и нитрид алюминия AlN, отличающиеся высокой теплопро-

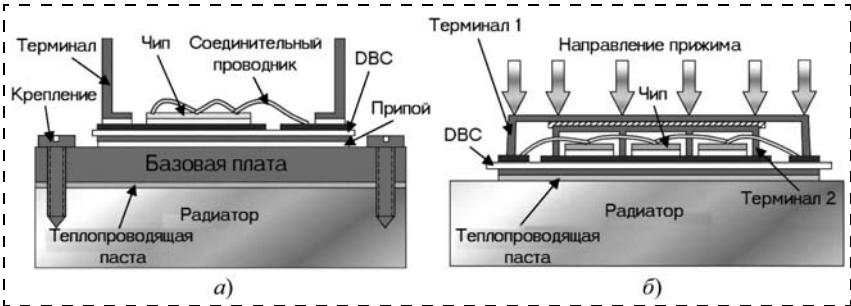


Рис. 1. Особенности конструкции силовых модулей с базовой платой (а) и без нее (б)

Таблица 1

Свойства материалов силового модуля IGBT

Элемент модуля	Материал	Толщина, мкм	Теплопроводность $\lambda_{20}^{\circ C}$, Вт/(м · °К)	Относительное смещение, $\alpha_{20}^{\circ C}$, $10^{-6}/^{\circ K}$
Выводы чипа Металлизация чипа	Алюминий	300 3	≈ 240	24
Кристалл	Кремний	300	80...150	3
Соединение чипа Соединение DCB	Припой (Sn/Pb)	50 100	≈ 35	≈ 25
Верхний слой DCB Нижний слой DCB Базовая плата	Медь	300 300 3000	390	16,8
DCB-керамика	Al_2O_3 AlN	700	≈ 35 140...170	≈ 7 ≈ 4

водностью, хорошими электроизоляционными свойствами и технологичностью.

В качестве материала выводов кристаллов используется чистый алюминий с небольшим добавлением титана и меди. Основные свойства материалов, входящих в состав силового модуля, приведены в табл. 1 [4].

Термомеханический стресс силовых модулей

Термомеханический стресс возникает при изменении температуры между двумя материалами с разным коэффициентом теплового расширения (КТР), имеющими жесткое соединение (пайка, сварка). В силовых модулях наиболее интенсивным воздействиям подвергаются паяное соединение медного основания и керамики, имеющее наибольшую площадь, и соединение чипов с керамикой. В обоих случаях нарушение работоспособности происходит вследствие термомеханического напряжения, вызванного различием КТР кремния, алюминия, меди и керамики. В условиях "быстрых" циклов при небольших перепадах температуры основной причиной выхода из строя является отслоение выводов чипов, после чего происходит разрушение соединительного слоя пайки. На рис. 2 показаны разрушенные связи эмиттера IGBT и фотография места отслоения проводника, сделанная электронным микроскопом (Scanning Electronic Microscope, SEM) [4]. Отрыв алюминиевых проводов приводит к нарушению равномерного распределения токов IGBT (вывод эмиттера подключается с помощью группы проводников, соединенных параллельно) и, соответственно, к локальному повышению температуры, ускоряющему разрушение оставшихся связей.

Еще одним проявлением термомеханического стресса является экструзия (плавление и выдавливание) зерен алюминия из зоны металлизации кристалла. Вследствие этого возрастает активное сопротивление области металлизации, что вызывает увеличение напряжения насыщения "коллектор—эмиттер". При этом возрастает рассеиваемая кристаллом мощность, что сопровождается дальнейшим повышением температуры и усилением термомеханического воздействия.

В двухслойной структуре, состоящей из кремния и алюминия, под воздействием термомеханического стресса основные пластические деформации происходят в слое алюминия благодаря его более низкому пределу текучести. Эквивалентная амплитуда деформации $\Delta\epsilon_{tot}$ зависит от градиента температуры ΔT и разницы коэффициентов теплового расширения $\Delta\alpha$ сопрягающихся материалов [5]:

$$\Delta\epsilon_{tot} = c\Delta T\Delta\alpha,$$
 (1)

где c — ограничивающий коэффициент, учитывающий, что механическое напряжение имеет место в двух плоскостях, $c = 1/(1 - \nu)$; ν — коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона), который для алюминия составляет 0,345 в области упругой деформации и 0,5 — в области пластической деформации.

Механическое напряжение σ , приведенное к 1 °K, определяется, согласно работе [5], следующим выражением:

$$\sigma/\Delta T = \Delta\alpha E\epsilon,$$
 (2)

где E — модуль Юнга.

При расчете механического напряжения алюминия по выражению (2) с учетом его свойств, приведенных в табл. 2, значение σ в области упругой деформации составит 2,3 МПа/°K.

Таким образом, пластическая деформация для чистого алюминиевого проводника, имеющего предел текучести σ_y , происходит уже при $\Delta T = 9$ °K. Следовательно, если градиент температуры термоцикла в алюминии равен 18 °K (т. е. $2\Delta T$ при циклическом достижении предела текучести), то происходит мгновенная пластическая деформация.

Для корреляции результатов тестов, полученных с применением быстрых циклов (0,75...9 с), с реальными эксплуатационными режимами (периодом до 60 с и выше) необходимо учесть разницу в механизмах их работы и оценить возможный уровень деформаций. Общий уровень механического напряжения, вызванного разными КТР, является величиной постоянной. Составляющей этой величины, зависящей от времени воздействия, является так называемая "деформация ползучести". Она снижает часть упругой деформации, вызывая механи-

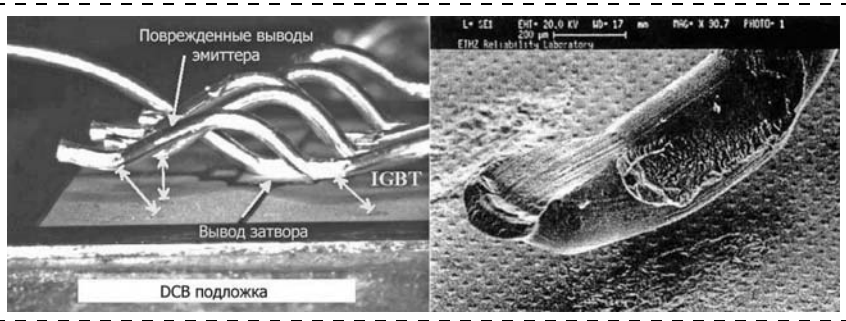


Рис. 2. Отслоение алюминиевых выводов кристаллов в результате воздействия термоциклов

Таблица 2
Свойства материалов контактной зоны выводов силовых кристаллов

Параметр, единица измерения	Al	Si
Коэффициент теплового расширения, 10 ⁻⁶ /°K	24	3
Модуль Юнга E, ГПа	72	130
Предел текучести σ_y , МПа (при $\epsilon_{pl} = 0,2$ %)	20	—
Коэффициент Пуассона ν	0,345	0,23

ческую релаксацию. Общая амплитуда деформации, с учетом выражения (1), описывается [5] как

$$\Delta \varepsilon_{tot} = \Delta \varepsilon_{pl} + \Delta \varepsilon_{el} = c \Delta \alpha \Delta T, \quad (3)$$

где ε_{pl} — пластическая деформация; $\Delta \varepsilon_{el}$ — деформация ползучести.

Учитывая выражение (3) и тот факт, что $\Delta \varepsilon_{el} = 2\sigma_y/E$, соотношение упругой и пластической деформации $\Delta \varepsilon_{el}/\Delta \varepsilon_{pl}$ можно выразить следующим образом [5]:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{el}}{\Delta \varepsilon_{pl}} = \frac{\Delta \varepsilon_{tot}}{\Delta \varepsilon_{pl}} - 1 = \frac{c \Delta T \Delta \alpha}{c \Delta T \Delta \alpha - \frac{2\sigma_y}{E}} - 1. \quad (4)$$

Расчет по выражению (4), проведенный с учетом свойств алюминия при градиенте температуры $\Delta T = 50^\circ\text{K}$ и значении $c = 2$ в области пластических деформаций, показывает, что значение искомого соотношения составляет около 30 %. Это примерно соответствует уровню деформации ползучести по отношению к пластической деформации. Неупругая деформация при этом составляет не более трети от $\Delta \varepsilon_{el}$. Таким образом, это смещение может добавить примерно 10 % к амплитуде неупругой деформации в случае длительной выдержки при предельных температурах цикла, обеспечивающей механическую релаксацию. Испытания на термоциклирование с использованием "быстрых" циклов инициируют аналогичные механизмы отказа и приводят примерно к таким же последствиям, как и тесты с длительными периодами воздействия. Однако для реальной оценки стойкости силовых модулей к термоциклированию проводят испытания минимум в двух режимах: с длительностью 30...60 с (надежность паяного соединения DСВ-керамики) и 1...10 с (надежность соединения чипов и их выводов).

Полученные результаты позволили получить математическую модель, описывающую связь числа термоциклов до отказа N_f с перепадом температуры ΔT_j и средней температурой кристалла $T_m = T_{j\min} + \Delta T_j/2$ [5], где $T_{j\min}$ — минимальная температура кристалла. Выявлено, что между показателем N_f и градиентом температуры существует степенная зависимость. Кроме того, кривые, отображающие эту зависимость при различных значениях T_m , расположены почти параллельно, что позволяет описать их в соответствии с законом Аррениуса. Комбинация этих двух математических приближений, согласно работе [5], позволяет определить N_f следующим образом:

$$N_f = A \Delta T_j^\alpha \exp\left(\frac{E_a}{k_b T_m}\right), \quad (5)$$

где $k_b = 8,314 \text{ Дж/К} \cdot \text{моль}$ — газовая постоянная; $A = 640$ — специфическая константа; $\alpha = -5 \text{ КТР}$; $E_a = 7,8 \cdot 10^4 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$ — энергия активации.

Указанная модель по выражению (5) считается достаточно достоверной в рамках проведенных экспериментов [5], т. е. при $30^\circ\text{K} < \Delta T < 80^\circ\text{K}$ и периоде цикла, не превышающем 10 с. Однако для

реальных режимов эксплуатации характерны медленные термоциклы, образуемые изменяемыми условиями нагрузки и внешней среды. В соответствии со статистикой отказов разрушение соединительного слоя керамической платы и медного основания является основной причиной выхода из строя модулей, работающих в различных электроприводах.

Прижимная технология в силовых модулях

Для исключения возможности описанных выше отказов силовых модулей компаниями ABB и SEMIKRON в начале 90-х годов прошлого века была разработана и внедрена прижимная технология их производства, при которой отпадает необходимость в базовой плате и ее паяном соединении. Еще одной альтернативой является применение матричных композитных материалов (AlSiC), обеспечивающих лучшее согласование КТР, однако композиты проводят тепло гораздо хуже меди. Тепло-вой контакт всех сопрягаемых слоев "безбазового" силового модуля, в первую очередь, DBC-платы и радиатора, достигается за счет прижима (см. рис. 1, б). Поскольку жесткая связь между слоями отсутствует, при возникновении линейных перемещений DBC-плата смещается по слою теплопроводящей пасты, не испытывая механических напряжений.

Испытания показали, что вероятность отказа прижимных модулей в 5...10 раз ниже, чем у компонентов стандартной конструкции в одинаковых температурных условиях. Этот факт иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 3, где эпюры показывают зависимость числа термоциклов до полного отказа модулей с медной базовой платой (стандартный модуль, испытания по программе LESIT [3]) и модулей прижимной конструкции (модуль SKiiP) от перепада температуры при испытаниях на термоциклирование. Из рис. 3 следует, что преимущество в надежности модулей без базовой платы проявляется значительно при более высоких перепадах температуры.

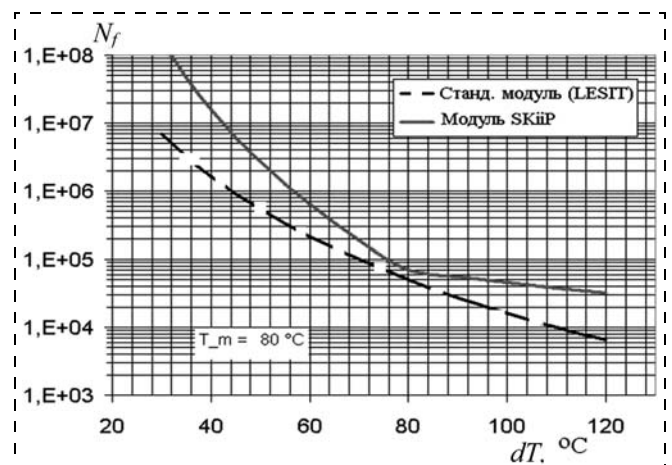


Рис. 3. Зависимость числа термоциклов N_f от градиента температуры для стандартного и прижимного модуля

Современные технологии силовой электроники

На рис. 4 представлены типы промышленных изолированных и неизолированных корпусов, предназначенных для установки силовых кристаллов различных типов в силовые модули. Основными технологиями, используемыми до настоящего времени при производстве силовых модулей, являются пайка (соединение чипов с изолирующей платой и платы с медным основанием, подключение силовых терминалов) и ультразвуковая сварка (подключение выводов чипов и другие электрические связи внутри модуля). Данные способы соединения позволяют получить хороший электрический и тепловой контакт и являются универсальными для большинства серийно выпускаемых модулей. Однако, как было показано выше, стандартные технологии не мо-

гут обеспечить высокую надежность электропривода, работающего в условиях переменных нагрузок.

Вопросу замены паяного соединения изолирующей подложки и базовой платы на прижимной контакт посвящен предыдущий раздел. Следующим по интенсивности отказов соединением является паяный слой между кремниевыми чипами и керамической DBC-платой. Решить данную проблему позволяет технология низкотемпературного диффузионного спекания (low temperature sintering technology) [2]. При использовании этого метода кремниевые чипы соединяются с подложкой посредством спекания под высоким давлением порошка из наночастиц серебра.

Дальнейшему повышению надежности и стойкости силовых ключей к воздействию термомеханических стрессов способствует использование пружинных терминалов для подключения

сигнальных цепей. Использование такого типа контактов многократно повышает стойкость соединения к вибрациям, ударам и воздействию агрессивных сред [7]. Применение пружин также упрощает подключение и замену платы управления, что позволяет ускорить и удешевить процесс сборки.

Интеллектуальные силовые модули высокой степени интеграции

Повышение энергетической загрузки и надежности, а также улучшение электромагнитной совместимости и тепловых характеристик при одновременном уменьшении габаритных размеров электропривода достигается за счет увеличения степени интеграции силовых модулей.

Современный интеллектуальный силовой модуль типа IPM содержит силовые каскады, плату управления, датчики, устройство защиты и мониторинга. В совокупности это позволяет существенно снизить массогабаритные характеристики (табл. 3). В сочетании с микроконтроллером силовой модуль IPM представляет собой практически готовый электропривод.

В маломощных силовых модулях, не подвергаемых воздействию циклических перепадов температуры, как правило, используются традиционные технологии. Применение технологии SKiN (сварка флип-чипов на гибкой плате) позволяет создавать сверхкомпактные интеллектуальные силовые модули (табл. 3), предназначенные для поверхностного монтажа.

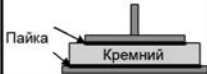
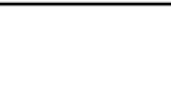
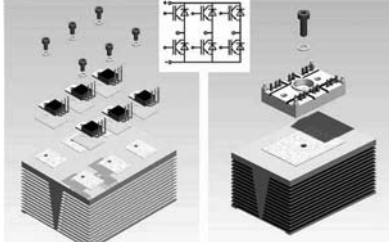
Тип силового ключа	Двусторонняя пайка чипов	Пайка чипов, ультразвуковая сварка выводов	Прижимное соединение чипов и выводов
			
Дискретные компоненты			
Изолированные модули			
IPM и системы			

Рис. 4. Типы корпусов и технологии сборки силовых полупроводниковых ключей

Таблица 3

Уменьшение габаритных размеров при использовании интегральных трехфазных модулей

Тип интегрального модуля	Описание	Уменьшение габаритных размеров
	Замена дискретных транзисторов на интегральный модуль (ИМ1)	1,5...2 раза
	Замена дискретных транзисторов со схемой управления на интегральный интеллектуальный модуль (ИИМ2)	2...3 раза

- В табл. 3 представлены:
- один интегральный модуль (ИМ1) вместо шести транзисторов, шести изолирующих подложек и шести крепежных винтов в обычном модуле, при этом отсутствует необходимость в промежуточных соединениях транзисторов, уменьшается паразитная индуктивность силовых цепей и уровень коммутационных перенапряжений, улучшаются тепловые характеристики;
 - один интеллектуальный интегральный модуль (ИИМ2) вместо шести транзисторов со схемой управления в плате модуля, при этом нет необходимости в промежуточных соединениях транзисторов, уменьшается паразитная индуктивность силовых цепей и уровень коммутационных перенапряжений, улучшаются тепловые характеристики, наличие интегрального драйвера позволяет минимизировать длину цепей управления затворами, соответственно, снизить их распределенную индуктивность, улучшить управляемость и повысить помехозащищенность.

Ощутимому прогрессу способствует развитие тонкопленочных технологий, получивших особенное распространение в последние годы. Эволюция IGBT происходит по спирали: самые первые кристаллы, появившиеся в 1978 г., делались по NPT-технологии, дальнейший этап был связан с PT IGBT-транзисторами, при производстве которых использовались двухслойные эпитаксиальные пленки. Следующий виток спирали соответствует переходу от NPT к LPT IGBT (Light-Punch-Through), являющейся дальнейшим развитием PT-структуры*. В то же время существующие технологии монтажа чипов и сборки модулей практически исчерпали свои возможности и стали препятствием на пути совершенствования тонкопленочной технологии. Это подтверждается тем фактом, что максимально допустимая длительность режима короткого замыкания для новейших Trench IGBT с толщиной кри-

*NPT, PT, LPT — виды технологий IGBT-транзисторов, их подробное описание выходит за рамки данной статьи.

сталла 70 мкм снижена с 10 до 6 мкс. Энергия, выделяемая при коммутации тока КЗ, не может быть запасена в тонком кристалле и быстро отведена из-за недостаточно низкого теплового сопротивления. Выходом является применение технологии низкотемпературного спекания серебряного порошка, позволяющей снизить тепловой импеданс перехода "кристалл—керамика", увеличить плотность тока и повысить стойкость к перегрузочным режимам.

Постоянное совершенствование технологий полупроводников делает возможным преодоление проблем, связанных с ужесточением тепловых режимов. Уже в 2005 г. были разработаны конструкции чипов IGBT и диодов, рассчитанные на рабочую температуру до 175 °С. В настоящее время ведутся исследования, направленные на увеличение T_{vj} до 200 °С. Однако очевидно, что работа модулей при высоких температурах и больших плотностях тока, увеличивающих значение градиента термоциклов, неизбежно сказывается на показателях их надежности.

Надежность интегральных силовых модулей

Силовой инвертор электропривода подвергается воздействию наибольших тепловых нагрузок, именно поэтому этот узел во многом определяет надежность всей системы. Одним из основных параметров, характеризующих надежность работы силовых модулей, является интенсивность (или частота) отказов λ .

Окончание срока службы изделия характеризуется возрастающей частотой отказов. Для модулей MOSFET/IGBT это сопровождается лавинообразным ростом теплового сопротивления кристаллов, разрывом электрических связей, потерей управляемости. Ускоренные испытания силовых ключей позволяют получить данные, с помощью которых можно достаточно точно рассчитать показатели надежности, определить механизмы отказа, предсказать, как будет вести себя изделие при различных условиях эксплуатации.

Таблица 4

Значение интенсивности отказов для интегральных силовых модулей

Конструкция инвертора	Число кристаллов в модуле					Интенсивность отказов
	IGBT		Диод		Общее число чипов	FIT · 10 ⁻⁹ 1/ч
	Число ключей	Число чипов на один ключ	Число ключей	Число чипов на один ключ		
2 параллельных полумоста	4	5	4	2	28	66
	4	7	4	2	36	85
	4	10	4	3	52	123
3 параллельных полумоста	6	5	6	2	42	99
	6	7	6	2	54	128
	6	10	6	3	78	185
4 параллельных полумоста	8	5	8	2	56	133
	8	7	8	2	72	170
	8	10	8	3	104	246

Основными показателями надежности силовых модулей (по европейским нормативам) являются FIT (Failure In Time) — интенсивность отказов и MTBF (Mean Time Between Failure) — средняя наработка на отказ [8]. Параметр FIT характеризует число неисправностей в час, наблюдаемых при определенных условиях эксплуатации некоторого числа модулей в течение определенного времени:

$$FIT = \lambda = n_f / (Nt), \quad (6)$$

где n_f — число обнаруженных отказов; N — число испытываемых модулей; t — время испытаний.

Число отказов в течение года экспоненциально зависит от температуры (закон Аррениуса). При увеличении рабочей температуры на 20 °C значение MTBF уменьшается вдвое.

Основным типом испытаний, позволяющим оценить надежность модуля в условиях реальных нагрузок, является термоциклирование. Срок службы силовых модулей является функцией средней температуры кристалла T_m и градиента температуры ΔT_j . Число циклов до отказа N_f связано со средней температурой кристалла $T_m = T_{jmin} + \Delta T_j / 2$ в соответствии с формулой (5), которая позволяет получить хорошую аппроксимацию результатов тестов с помощью метода наименьших квадратов по трем параметрам: константы A , показателя степени α и энергии активации E_a [9].

В табл. 4 приведены значения показателя FIT для интегральных силовых модулей в зависимости от числа и типа кристаллов [8, 9].

Заключение

Наиболее динамично развивающимися отраслями силовой преобразовательной техники являются промышленный электропривод, транспортная электроника и возобновляемая энергетика. Именно эти области отличаются самыми сложными условиями эксплуатации, требующими от производителей элементной базы разработки и внедрения новых технологий. Основные вопросы связаны с необходимостью увеличения плотности тока и рабочей температуры при сокращении габаритных размеров преобразователей. Для их решения необходимо повышать эффективность отвода тепла от кристаллов и модулей, применять материалы, отличающиеся повышенной стойкостью к воздействию термоциклов.

Развитие технологий производства IGBT позволило в течение нескольких последних лет увеличить плотность тока кристаллов почти в 1,5 раза. Новые чипы отличаются пониженным уровнем статических и динамических потерь, более высокой надежностью и, как правило, меньшей стоимостью. Совершенствование полупроводников, уменьшение уровня потерь и повышение рабочей температуры в сочетании с прогрессивными методами сборки и корпусирования позволяет создавать силовые ключи, отвечающие самым жестким требованиям.

С развитием технологий силовой электроники использование дискретных ключей становится все

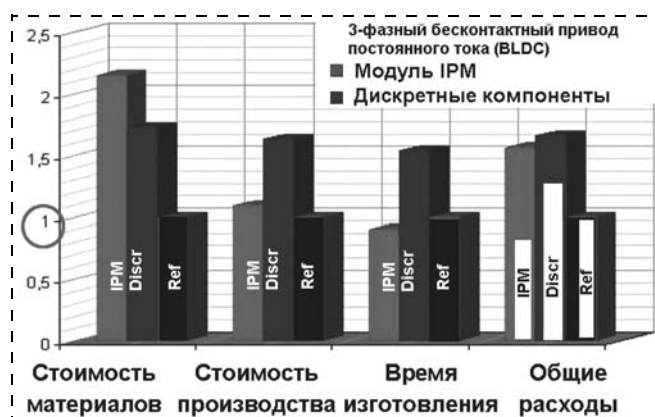


Рис. 5. Удельная стоимость электропривода BLDC при объеме производства более 1000 шт. в год. Светлые области — удельный показатель FIT. За точку отсчета (Ref) взяты показатели однофазного инвертора

менее востребованным как с технической, так и с экономической точки зрения. Повышение степени интеграции является основной тенденцией современной электроники независимо от применения. При разработке преобразовательных устройств для электроприводов различного назначения все более востребованными являются интеллектуальные силовые модули, отличающиеся высокой функциональной насыщенностью, компактностью и надежностью.

Вышеизложенное подтверждается данными, приведенными на рис. 5, и как показывают исследования, проводимые независимой организацией IMS Research [9, 10], применение интегральных модулей не только позволяет снизить габаритные размеры и улучшить технические характеристики электроприводов в целом, но и повысить их надежность и экономические показатели.

Список литературы

1. Schütze T., Berg H., Hierholzer M. Further Improvements in the Reliability of IGBT Modules // Proc. IEEE Industry Applications Conference IAS 33 (1998). P. 1022—1025.
2. Jurgen Steger. With Sinter-technology Forward to Higher Reliability of Power Modules // Power Electronics Europe. Issue — 2/2012. P. 28—31.
3. Held M., Jacob P., Nicoletti G., Seacco P., Poech M. H. Fast Power Cycling Test for IGBT Modules in Traction Application // Proc. Power Electronics and Drive Systems. 1997. P. 425—430.
4. Wintrich A., Nikolai U., Turski W. Application Manual Power Semiconductor // Semikron International GmbH. 2011. P. 92—98.
5. Poech M. H., Eisele R. A modeling approach to assess the creep behaviour of large-area solder joints // Microelectronic Reliability 40 — 2000. P. 1653—1658.
6. Scheuermann U., Herr E. A Novel Power Module Design and Technology for Improved Power Cycling Capability // Microelectronic Reliability 41. 2001. N 9—10. P. 1713—1718.
7. Колпаков А. И. Надежность паяных контактов в условиях промышленных сред // Силовая Электроника. 2006. № 4. С. 10—16.
8. Uwe Scheuermann, Uta Hecht. Power Cycling Lifetime of Advanced Power Modules for Different Temperature Swings // Proc. of PCIM. Nuremberg, 2002. P. 59—64.
9. Wu W., Held M., Jakob P., Scacco P. Investigation on the Long Term Reliability of Power IGBT Modules // Proc. ISPSD 95. 1995. P. 338—443.
10. URL: <http://imsresearch.com> (дата обращения 28.02.2013).

УДК 520.6.07

И. В. Соловьев, нач. отдела,

i.solovieff@yandex.ru,

ФГУП Московское

опытно-конструкторское бюро "Марс"

Обнаружение и оценивание координат изображений звезд в датчиках астроориентации с помощью алгоритмов прогноза и фильтрации Калмана

Представлен новый метод обнаружения изображений звезд и определения координат их энергетических центров на фоне шумов фотоприемника и внешних засветок. Для решения задачи обнаружения изображений звезд на фоне помех предлагается использовать алгоритм прогноза на основе априорной информации координат областей фотоприемника, содержащих изображения звезд. Для уточнения координат энергетических центров предложен фильтр Калмана, осуществляющий динамическую фильтрацию координат изображений звезд в последовательных кадрах. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод позволяет существенно повысить точность оценок направлений на звезды астродатчиком даже при больших (порядка угловой минуты) ошибках измерений.

Ключевые слова: системы астроориентации, астродатчики, фильтр Калмана

Введение

Для высокоточной оценки ориентации космических аппаратов (КА) часто используются астродатчики (АД), обеспечивающие оценку направлений на звезды с точностью порядка нескольких угловых секунд. Распознавание обнаруженных звезд с помощью бортового звездного каталога позволяет определить ориентацию приборной системы координат астродатчика (ПСК) относительно инерциальной системы координат (ИСК).

Обозначим $\mathbf{b}$ и $\mathbf{r}$ единичные векторы, задающие направления на звезду, соответственно, в ПСК и ИСК, и пусть $\mathbf{A}$ — матрица поворота, переводящего ИСК в ПСК. Матрица $\mathbf{A}$ называется *матрицей ориентации*, или *матрицей направляющих косинусов*. В результате распознавания обнаруженных звезд получается некоторый набор пар векторов $(\mathbf{b}_i, \mathbf{r}_i)$, $i = 1, \dots, n$, по которому можно получить оценку матрицы $\mathbf{A}$ с помощью эффективных современных алгоритмов [1].

ИСК-векторы $\mathbf{r}$ определяются координатами звезд в каталоге (прямое восхождение α , склонение δ); они известны с высокой точностью:

$$\mathbf{r} = (\cos\alpha\cos\delta, \sin\alpha\cos\delta, \sin\delta)^T.$$

Объектив АД проектирует ИСК-векторы $\mathbf{r}$ на поверхность фотоприемника (ФП) — как правило, матрицы ПЗС или КМОП. Будем считать, что начало координат ПСК находится в точке пересечения оптической оси объектива с плоскостью ФП, ось z ПСК направлена вдоль оптической оси, оси x , y параллельны краям ФП. Пусть (x, y) — координаты проекций ИСК-векторов $\mathbf{r}$ на плоскость (x, y) . Тогда

$$\mathbf{b} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ f \end{pmatrix},$$

где f — фокусное расстояние объектива АД.

Связь между векторами $\mathbf{b}$ и $\mathbf{r}$ дается матрицей ориентации $\mathbf{A}$:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{r}.$$

Обозначим (x^*, y^*) измеренные значения координат проекций (x, y) , т. е. их оценки, полученные с помощью алгоритмов центрирования, определяющих энергетические центры изображений звезд. Измерения (x^*, y^*) в общем случае содержат систематические $(\Delta x, \Delta y)$ и случайные $(\delta x, \delta y)$ ошибки:

$$x^* = x + \Delta x + \delta x;$$

$$y^* = y + \Delta y + \delta y.$$

Систематические ошибки $(\Delta x, \Delta y)$ определяются в основном погрешностями установки ФП относительно фокальной плоскости и дисторсией объектива, могут быть оценены путем калибровки АД и затем учтены. В дальнейшем будем предполагать, что измеряемые координаты (x^*, y^*) соответствующим образом скорректированы.

Для достижения субпиксельной точности оценок координат проекций преднамеренно осуществляется расфокусировка оптической системы, так что изображения звезд занимают области ("окна") размером несколько пикселей (например, 3×3 , 5×5). Для оценки координат проекций часто используется алгоритм определения координат энергетических центров изображений как "центров масс" сигналов пикселей окна [2]. Используются также и иные алгоритмы центрирования, позволяющие в ряде случаев добиться точности оценок порядка десятой доли пиксела [3].

Критическими факторами для алгоритмов центрирования являются уровень шумов ФП и уровень посторонних засветок. При высоком уровне шумов и/или посторонних засветок снижается отношение сигнал/шум (или сигнал/фон), затрудняется обнаружение изображений звезд, снижается точность центрирования. Наибольшие затруднения вызывают следующие эффекты:

- возникновение точечных шумовых "всплесков" сигнала или точечных засветок, которые воспринимаются алгоритмами обработки информации как ложные "звезды" и затрудняют работу алгоритма распознавания;
- уменьшение размеров изображений звезд, вплоть до размеров одного пиксела, что делает невозможным достижение субпиксельной точности центрирования.

Целью настоящей работы является разработка методов, позволяющих ослабить влияние обоих негативных факторов.

Эффективным методом борьбы с ложными "звездами" является введение в программно-алгоритмическое обеспечение АД режима прогноза "окон", в котором на основе имеющейся на борту априорной информации об ориентации и угловой скорости грубо прогнозируется положение "окон" в следующем кадре, что позволяет обнаруживать изображения звезд среди точечных помех. Подобный алгоритм первоначально был предложен для сокращения времени считывания информации ФП и реализован в звездном датчике StarNav II для КА GIFTS EO-3 [4]. Мы показываем, что этот режим может также использоваться для эффективной фильтрации точечных помех, и предлагаем новую реализацию алгоритма.

Прогноз координат энергетических центров можно также использовать для построения фильтра Калмана, обеспечивающего уточнение оценок координат проекций в условиях, когда шумы и засветки приводят к большим ошибкам алгоритма центрирования, а также в тех случаях, когда изображение звезды занимает лишь один пиксел, и алгоритм центрирования бесполезен.

При относительно небольших угловых скоростях ПСК и относительно высокой частоте измерений изображение одной и той же звезды попадает в поле зрения АД во многих (порядка нескольких десятков или сотен) последовательных кадрах, формируя на плоскости ФП траекторию движения изображения. Например, при угловой скорости порядка $200''/\text{с}$, типичной для низкоорбитального аппарата, угловом поле зрения АД 8° и частоте измерений 1 Гц изображение одной и той же звезды попадает в $8 \cdot 3600/200 = 144$ последовательных кадров. Для аппарата, находящегося на геостационарной орбите, типичная угловая скорость составляет $15''/\text{с}$. При тех же значениях поля зрения АД и частоты измерений изображение звезды попадает в 1920 кадров. Такой характер движения изображения звезды позволяет использовать для последовательного уточнения координат проекций алгоритм динамической фильтрации измерений с помощью фильтра Калмана.

Прогноз координат "окон"

Как правило, АД функционирует в двух основных режимах. В режиме начальной ориентации априорная информация об ориентации КА относительно ИСК

отсутствует. Алгоритмы АД выполняют автономное распознавание звезд и оценку ориентации ПСК.

В режиме текущей ориентации имеется априорная информация об ориентации и угловой скорости ПСК, поставляемая либо алгоритмами обработки информации АД, либо другими приборами. Например, для оценки вектора угловой скорости используются, как правило, высокоточные гироскопические измерители. Таким образом, исходными данными для предлагаемых алгоритмов являются:

- $\mathbf{A}(t)$ — матрица априорной ориентации ПСК относительно ИСК в текущий момент времени t ;
- $\boldsymbol{\omega}(t)$ — вектор угловой скорости ПСК относительно ИСК, заданный в ПСК.

Алгоритм прогноза "окон" включает в себя следующие основные этапы:

1. Прогноз матрицы ориентации на момент $t + \Delta t$ с использованием информации об угловой скорости:

$$\dot{\mathbf{A}}(t) = \frac{d\mathbf{A}(t)}{dt} = [\boldsymbol{\omega}]\mathbf{A}(t),$$

откуда при достаточно малых угловых скоростях можно получить:

$$\mathbf{A}(t + \Delta t) \approx (\mathbf{I} + [\boldsymbol{\omega}]\Delta t)\mathbf{A}(t), \quad (1)$$

где $[\boldsymbol{\omega}] = \begin{pmatrix} 0 & \omega_3 & -\omega_2 \\ -\omega_3 & 0 & \omega_1 \\ \omega_2 & -\omega_1 & 0 \end{pmatrix}$; $\mathbf{I}$ — единичная матрица.

2. Выбор из каталога звезд, изображения которых попадают на ФП:

а) вычисление прогнозируемых координат проекций

$$x_j^{(p)} = -f \frac{b_{j1}}{b_{j3}}, \quad y_j^{(p)} = -f \frac{b_{j2}}{b_{j3}}, \quad (2)$$

$$\mathbf{b}_j = \mathbf{A}(t + \Delta t)\mathbf{r}_j,$$

где $\mathbf{b}_j$ — ПСК-векторы; $\mathbf{r}_j, j = 1, \dots, N$ — ИСК-векторы звезд каталога; N — число звезд в каталоге.

б) проверка условия попадания проекции на ФП:

$$-L_x/2 \leq x_j^{(p)} \leq L_x/2; \quad (3)$$

$$-L_y/2 \leq y_j^{(p)} \leq L_y/2; \quad (4)$$

L_x, L_y — размеры ФП по осям x, y ;

в) при выполнении условий (3), (4) координаты $(x_j^{(p)}, y_j^{(p)})$ становятся центрами "окон", в которых алгоритмы центрирования проводят обработку изображения и оценку координат проекций звезд.

Уравнения фильтра Калмана

Будем рассматривать изображение звезды на ФП как динамическую систему, характеризующуюся вектором состояния

$$\mathbf{X}(t) = (x(t), y(t))^T$$

с ковариационной матрицей

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \langle (x^{(F)} - x)^2 \rangle & \langle (x^{(F)} - x)(y^{(F)} - y) \rangle \\ \langle (x^{(F)} - x)(y^{(F)} - y) \rangle & \langle (y^{(F)} - y)^2 \rangle \end{pmatrix},$$

где $(x^{(F)}, y^{(F)})$ — оценки величин (x, y) , $\langle \dots \rangle$ — символ математического ожидания.

Прежде всего, необходимо построить уравнение динамики системы в виде

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{N}_x,$$

где $\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k-1}$ — векторы состояния системы в моменты времени, соответственно, t_k и t_{k-1} ; $\Phi_{k-1} \equiv \Phi(t_k, t_{k-1})$ — переходная матрица системы; $\mathbf{N}_x$ — белый гауссовский шум с ковариационной матрицей $\mathbf{Q}$.

Из уравнений (1), (2) при достаточно малых угловых скоростях получаем

$$\begin{aligned} x(t + \Delta t) &= -f \frac{b_1(t + \Delta t)}{b_3(t + \Delta t)} \approx -f \frac{b_1(t) + \dot{b}_1(t)\Delta t}{b_3(t) + \dot{b}_3(t)\Delta t}; \\ y(t + \Delta t) &= -f \frac{b_2(t + \Delta t)}{b_3(t + \Delta t)} \approx -f \frac{b_2(t) + \dot{b}_2(t)\Delta t}{b_3(t) + \dot{b}_3(t)\Delta t}, \end{aligned}$$

где $\dot{b}_{1,2,3}(t) = d\dot{b}_{1,2,3}(t)/dt$ — производные по времени компонент вектора $\mathbf{b}$. При $b_{1,2,3} \neq 0$

$$\begin{aligned} x(t + \Delta t) &\approx -f \frac{b_1 \left(1 + \frac{\dot{b}_1}{b_1} \Delta t \right)}{b_3 \left(1 + \frac{\dot{b}_3}{b_3} \Delta t \right)} \approx \\ &\approx -f \frac{b_1}{b_3} \left[1 + \left(\frac{\dot{b}_1}{b_1} - \frac{\dot{b}_3}{b_3} \right) \Delta t \right] \equiv \Phi_x(\Delta t) x(t); \\ y(t + \Delta t) &\approx -f \frac{b_2 \left(1 + \frac{\dot{b}_2}{b_2} \Delta t \right)}{b_3 \left(1 + \frac{\dot{b}_3}{b_3} \Delta t \right)} \approx \\ &\approx -f \frac{b_2}{b_3} \left[1 + \left(\frac{\dot{b}_2}{b_2} - \frac{\dot{b}_3}{b_3} \right) \Delta t \right] \equiv \Phi_y(\Delta t) y(t); \\ \Phi_x(\Delta t) &= 1 + \left(\frac{\dot{b}_1}{b_1} - \frac{\dot{b}_3}{b_3} \right) \Delta t; \\ \Phi_y(\Delta t) &= 1 + \left(\frac{\dot{b}_2}{b_2} - \frac{\dot{b}_3}{b_3} \right) \Delta t. \end{aligned}$$

Таким образом, модель движения имеет вид

$$\mathbf{X}(t + \Delta t) = \Phi(\Delta t) \mathbf{X}(t) + \mathbf{N}_x,$$

где

$$\Phi(t) = \begin{pmatrix} \Phi_x(\Delta t) & 0 \\ 0 & \Phi_y(\Delta t) \end{pmatrix},$$

а модель измерений — вид

$$\mathbf{Z}(t + \Delta t) = \mathbf{I}_2 \times 2 \mathbf{X}(t + \Delta t) + \mathbf{N}_z,$$

где $\mathbf{Z} = (x^*, y^*)^T$, $\mathbf{N}_z$ — шум измерений с ковариационной матрицей $\mathbf{R}$.

Таким образом, уравнения фильтра Калмана при стандартных обозначениях (величины с индексами $k/k - 1$ представляют собой априорные оценки, с индексами $k/k, k - 1/k - 1$ — апостериорные) можно записать в следующем виде:

• этап прогноза

$$\mathbf{X}_{k/k-1} = \Phi_{k-1} \mathbf{X}_{k-1/k-1},$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k/k-1} &= \Phi_{k-1} \mathbf{P}_{k-1/k-1} \Phi_{k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} = \\ &= \begin{pmatrix} P_{11} \Phi_x^2 & P_{12} \Phi_x \Phi_y \\ P_{21} \Phi_x \Phi_y & P_{22} \Phi_y^2 \end{pmatrix} + \mathbf{Q}_{k-1}; \end{aligned}$$

• этап коррекции

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} (\mathbf{P}_{k/k-1} + \mathbf{R}_k)^{-1},$$

$$\mathbf{X}_{k/k} = \mathbf{X}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{X}_{k/k-1}) = (x_k^{(F)}, y_k^{(F)})^T,$$

$$\mathbf{P}_{k/k} = (\mathbf{I}_2 \times 2 - \mathbf{K}_k) \mathbf{P}_{k/k-1}.$$

Ковариационные матрицы шумов модели движения $\mathbf{Q}$ и модели измерений $\mathbf{R}$ можно задать в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \begin{pmatrix} \langle (x^{(p)} - x)^2 \rangle & \langle (x^{(p)} - x)(y^{(p)} - y) \rangle \\ \langle (x^{(p)} - x)(y^{(p)} - y) \rangle & \langle (y^{(p)} - y)^2 \rangle \end{pmatrix} \approx \\ &\approx k_Q \begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \end{pmatrix}; \\ \mathbf{R} &= \begin{pmatrix} \langle (x^* - x)^2 \rangle & \langle (x^* - x)(y^* - y) \rangle \\ \langle (x^* - x)(y^* - y) \rangle & \langle (y^* - y)^2 \rangle \end{pmatrix} \approx \\ &\approx k_R \begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

где σ — стандартная ошибка АД; k_Q, k_R — некоторые константы.

В качестве начальных значений вектора состояния можно выбрать результаты измерений (x_0^*, y_0^*) , полученные в момент времени $t = 0$:

$$\mathbf{X}_{0/0} = (x_0^*, y_0^*)^T;$$

начальные значения ковариационной матрицы:

$$\mathbf{P}_{0/0} = k_Q \sigma^2 \mathbf{I}_2 \times 2.$$

Результаты моделирования и тестирования алгоритмов

На рис. 1 и 2 представлены результаты моделирования работы алгоритмов для аппарата, находящегося на геостационарной орбите и совершающего равномерное вращение с угловой скоростью $15''/\text{с}$. Предполагается, что АД проводит измерения координат звезд каждые 2 с, стандартная ошибка измерений равна $1'$ ($60''$) по каждой из осей x, y : $\sigma_x = \sigma_y = \sigma = 60''$.

На рис. 1 на плоскости ФП для сорока последовательных моментов времени изображены координаты истинной проекции звезды, измеренные координаты центра изображения и координаты проекций, оцененные с помощью предложенного фильтра Калмана при значениях параметров $k_Q = 0,1$; $k_R = 1$ (для наглядности выбраны разные масштабы по осям x, y). Несмотря на существенный разброс измерений относительно "истинной" траектории проекции, оценки фильтра достаточно быстро сходятся к ней.

На рис. 2 представлена динамика во времени ошибок измерений ε^* , ошибок фильтра $\varepsilon^{(F)}$ и ожидаемых ошибок фильтра $\varepsilon^{(P)}$:

$$\varepsilon_k^* = \sqrt{(x_k^* - x_k)^2 + (y_k^* - y_k)^2} / f;$$

$$\varepsilon_k^{(F)} = \sqrt{(x_k^{(F)} - x_k)^2 + (y_k^{(F)} - y_k)^2} / f;$$

$$\varepsilon_k^{(P)} = \sqrt{P_{11,k} + P_{22,k}} / f.$$

Рис. 2 демонстрирует существенное повышение точности оценок, обеспечиваемое фильтром даже при весьма больших ошибках измерений, причем ковариационная матрица фильтра дает достаточно достоверную оценку достигнутой точности.

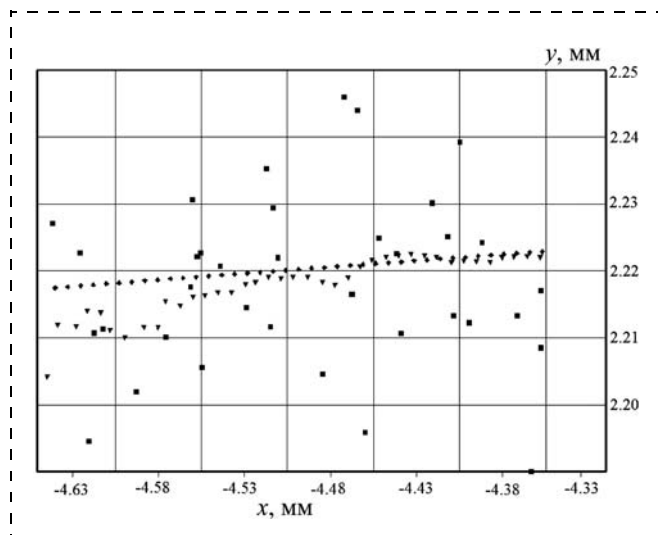


Рис. 1. Динамика изображений звезды в плоскости матрицы:
♦ — координаты проекций; ▼ — оценки фильтра; ■ — измерения

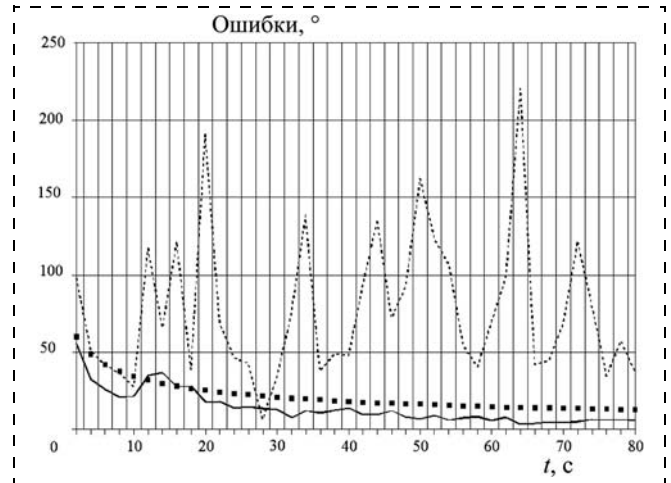


Рис. 2. Ошибки измерений и оценок координат центров:
----- — ошибки измерений (ε^*); — — ошибки фильтра ($\varepsilon^{(F)}$);
..... — ожидаемые ошибки ($\varepsilon^{(P)}$)

Средние значения ошибок по результатам сорока измерений равны:

$$\varepsilon^* = \langle \varepsilon_k^* \rangle = 77''^1, \quad \varepsilon^{(F)} = \langle \varepsilon_k^{(F)} \rangle = 14'',$$

$$\varepsilon^{(P)} = \langle \varepsilon_k^{(P)} \rangle = 22''.$$

Таким образом, предложенный фильтр Калмана в данном примере обеспечивает снижение ошибок измерений в среднем в 5,5 раз.

Заключение

Показано, что метод прогноза "окон" (областей ФП, в которых осуществляется поиск изображений звезд) на основе имеющейся на борту априорной информации об ориентации и угловой скорости КА, позволяет повысить эффективность обнаружения изображений звезд при высоком уровне шумов и внешних засветок.

Для повышения точности центрирования искаженных шумами и засветками изображений звезд предложен фильтр Калмана, осуществляющий последовательную обработку изображения звезды при его перемещении по поверхности ФП в последовательных кадрах. Результаты моделирования показывают, что разработанный фильтр позволяет существенно (в несколько раз) повысить точность центрирования при значительных (порядка $1'$) ошибках измерений.

Предложенные методы позволяют повысить точность и надежность систем астроориентации и могут быть использованы в их бортовом программно-алгоритмическом обеспечении.

¹При нормальном распределении случайных величин x, y с дисперсией σ^2 распределение случайной величины $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ подчиняется распределению Рэлея, математическое ожидание которого равно $(\pi/2)^{1/2} \sigma = 75''$.

Список литературы

1. Соловьев И. В. Алгоритм "ORIENT" оценки ориентации космического аппарата по астроизмерениям // Авиакосмическое приборостроение. № 12. 2012. С. 11—19.
2. Аванесов Г. А., Воронков С. В., Форш А. А., Куделин М. И. Звездные координаторы систем ориентации космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. 2003. Вып. 4.

3. Quine B. M., Tarasyuk V., Mebrahtu H., Hornsey R. Determining star-image location: A new sub-pixel interpolation technique to process image centroids // Computer Physics Communications. V. 177. 2007. P. 700—706.
4. Samaan M. A., Mortari D., Pollock T. C., Junkins J. L. Predictive Centroiding for Single and Multiple FOVs Star Trackers // AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. San Antonio, TX, January 2002.

УДК 681.5

А. М. Набатчиков, инженер,

Е. А. Бурлак, инженер,

ГосНИИ авиационных систем, г. Москва

nabat@gosniias.ru

Анализ характеристик деятельности человека-оператора в динамическом контуре слежения

Приведены основные сведения о функции когерентности. Рассмотрены аспекты реализации алгоритма расчета для дискретных сигналов. Показано практическое применение функции когерентности для исследования характеристик деятельности человека-оператора в системе слежения.

Ключевые слова: функция когерентности, цифровая обработка сигналов, частотный метод, оконная функция, нелинейность, человек-оператор

Введение

Когерентность — взаимная характеристика двух сигналов — находит большое практическое применение при цифровой обработке сигналов, в частности, при анализе деятельности человека-оператора (ЧО) в человеко-машинных системах слежения [1]. При реализации операции слежения внутренняя динамическая структура модели ЧО может значительно изменяться в зависимости от динамических свойств объекта управления и характеристик отслеживаемого сигнала. Ухудшение условий слежения (усложнение задачи), как правило, ведет к увеличению нелинейности управления, реализуемого ЧО. Однако временные и статистические критерии, такие как математическое ожидание, дисперсия и др., несут в себе мало информации об изменении внутренней структуры модели ЧО в зависимости от степени сложности деятельности в конкретной системе. В практике инженерно-психологических исследований широкое применение находят частотные методы анализа процессов, характеризующих деятельность оператора, и в частности методы, базирующиеся на вычислении функции когерентности.

Для линейно связанных процессов функция когерентности независимо от оператора связи равна единице на всех частотах. Отличие оператора связи от линейного вызывает уменьшение значений функ-

ции. Для некоррелированных процессов функция всегда равна нулю.

Вычисление дискретной функции когерентности двух временных процессов имеет ряд особенностей. Рассмотрим их более подробно.

Необходимость покадрового усреднения

Дискретная функция когерентности имеет вид

$$\gamma_{xy}(f_m) = \frac{|S_{xy}(f_m)|}{\sqrt{S_{xx}(f_m)S_{yy}(f_m)}},$$

где $S_{xx}(f_m)$, $S_{yy}(f_m)$, $S_{xy}(f_m)$ — спектральные и взаимная спектральная плотность мощности переменных во времени сигналов $x(t)$ и $y(t)$; черта сверху обозначает усреднение [2]. Усреднение должно выполняться по нескольким записям сигналов, поэтому в случае наличия единственной записи сигнала необходимо разбить эту запись на кадры длиной в L отсчетов. Разделение записи длиной M отсчетов на кадры длиной L отсчетов дает $N = \lfloor M/L \rfloor$ кадров, где k -й кадр имеет вид

$$X_k = (x_{(k-1)L+1} \ x_{(k-1)L+2} \ \dots \ x_{kL});$$

$$Y_k = (y_{(k-1)L+1} \ y_{(k-1)L+2} \ \dots \ y_{kL}).$$

Для каждого кадра необходимо вычислить быстрое преобразование Фурье (БПФ) и спектральную плотность в соответствии с нижеприведенными формулами:

$$FFTX_k = \text{БПФ}(X_k), \quad FFY_k = \text{БПФ}(Y_k),$$

$$S_{xxk} = FFTX_k \cdot FFTX_k^*, \quad S_{yyk} = FFY_k \cdot FFY_k^*,$$

$$S_{xyk} = FFTX_k \cdot FFY_k^*,$$

где FFY_k^* — вектор, комплексно сопряженный вектору $FFTX_k$ и т. д.

Усреднение проводится поэлементно среди всех спектральных плотностей S_{xxk} , S_{yyk} , S_{xyk} :

$$S_{xx}[i] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{xxk}[i], \quad S_{yy}[i] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{yyk}[i],$$

$$S_{xy}[i] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{xyk}[i],$$

где $S_{xx}[i]$, $S_{yy}[i]$, $S_{xy}[i]$ — i -е элементы соответствующих векторов.

Итоговая характеристика вычисляется по формуле:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}, \quad (1)$$

причем функция (1) удовлетворяет условию

$$0 \leq \gamma_{xy}^2(f) \leq 1, \quad \forall f \in [-\infty, \infty].$$

Выбор окна в соответствии с требованиями исследований

Для того чтобы избежать искажений ("растекания спектра") [3, 4], связанных с ограниченным временем наблюдения сигнала, необходимо к исходным сигналам применить некоторое сглаживающее окно, в соответствии с целями исследования. Например, на рис. 1 показаны графики функции когерентности, отличающиеся только применяемыми окнами (исследуемый сигнал один и тот же): на рис. 1, а — окно Ханна, на рис. 1, б — Хемминга.

Выбранная оконная функция может потребовать изменения величины кадра для сохранения требуемого разрешения по частоте:

$$L > \Delta F_0 \frac{F_s}{df},$$

где F_s — частота дискретизации сигнала, df — требуемое разрешение по частоте, ΔF_0 — константа, определяемая оконной функцией.

Для использования окна необходимо осуществить свертку сигнала с окном w :

$$X_k = (x_{(k-1)L+1} w_1 \ x_{(k-1)L+2} w_2 \ \dots \ x_{kL} w_L),$$

$$Y_k = (y_{(k-1)L+1} w_1 \ y_{(k-1)L+2} w_2 \ \dots \ y_{kL} w_L).$$

Выбор степени перекрытия кадров

Регулируя степень перекрытия кадров, можно добиться увеличения длины кадра при сохранении их числа на той же по длине реализации сигнала. В случае, если используется перекрытие в h отсчетов, число кадров определяется как $N = \left\lfloor \frac{M-h}{L-h} \right\rfloor$,

а k -й кадр имеет вид

$$X_k = (x_{(k-1)(L-h)+1} \ x_{(k-1)(L-h)+2} \ \dots \ x_{(k-1)(L-h)+L}).$$

Чувствительность к точности моделирования сигналов

Функция когерентности чувствительна к любым незначительным погрешностям (определяемым методами решения дифференциальных уравнений,

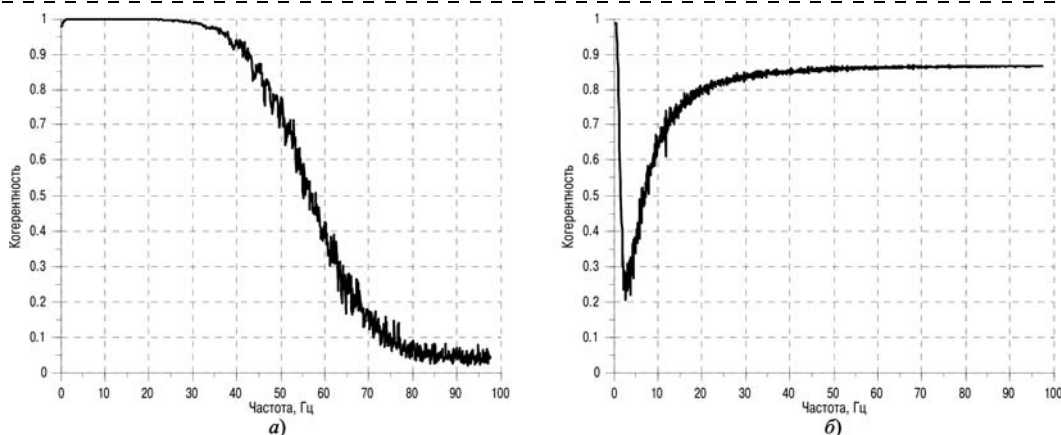


Рис. 1. Сглаживание окном Ханна и окном Хемминга

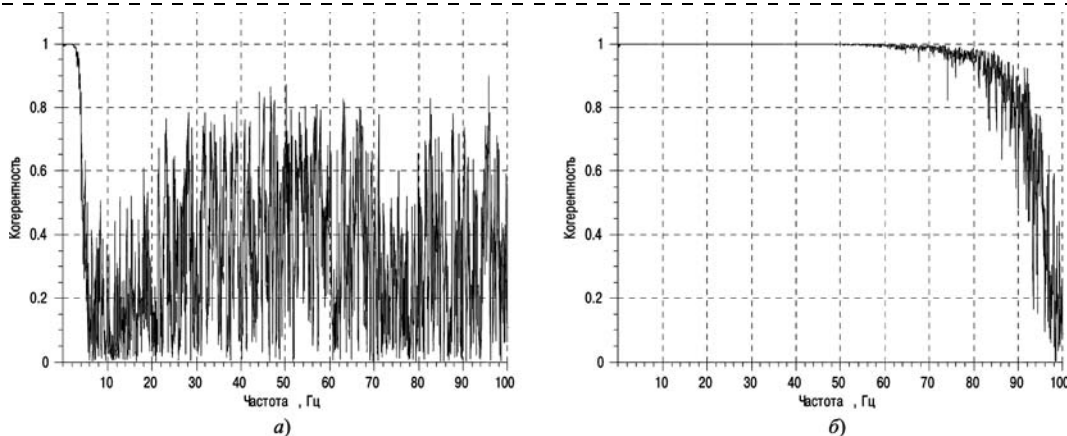


Рис. 2. Влияние точности регистрации сигнала на функцию когерентности

способом представления данных при регистрации и обработке), увеличивающим дискретизацию и квантование, а также изменяющим частотные характеристики реального непрерывного сигнала. На рис. 2 показано, как число знаков после десятичного разделителя (3 или 6) при регистрации сигнала влияет на конечную характеристику. В случае, когда сигнал регистрируется с тремя знаками после разделителя (рис. 2, а), характеристика не соответствует аналитическим значениям функции когерентности и содержит много шумов, а при регистрации сигнала с точностью в шесть знаков после разделителя (рис. 2, б) характеристика точнее визуализирует линейное соответствие между сигналами в области низших частот.

Результаты экспериментов

Реализованную с учетом вышеозначенных аспектов функцию удобно использовать для оценки линейности объекта, в частности, модели ЧО.

Были проведены две серии экспериментов на стенде по изучению работы ЧО в системах слежения [5]. В тестировании принимали участие два оператора с существенно различными операторскими навыками. Ставилась задача максимально точно отслеживать предъявляемый символ, совмещая с его изображением символ прицельной метки посредством задания управляющего воздействия через орган управления. Структурная схема контура слежения представлена на рис. 3, где: БГШ — генератор псевдослучайного белого гауссовского шума, ФФ — формирующий фильтр, М — монитор, ЧО — человек-оператор, УО — управляющий орган.

Входной сигнал (который отслеживает оператор) формировался следующим образом. Последовательность с генератора псевдослучайных чисел преобразовывалась в нормально распределенный шум и пропусклась через формирующий фильтр

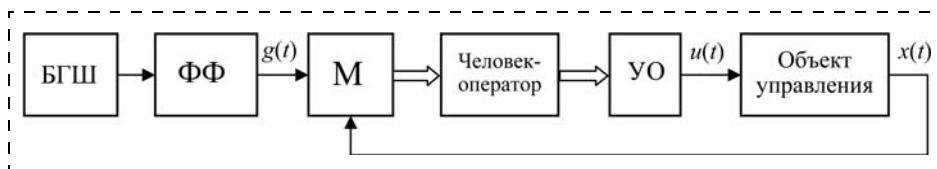


Рис. 3. Структурная схема контура слежения

(ФФ). В первой серии экспериментов в качестве фильтра использовалось звено второго порядка

$$W_{\text{ФФ}} = \frac{1}{p^2 + 2p + 1},$$

во второй серии — звено второго порядка

$$W_{\text{ФФ}} = \frac{1}{0,25p^2 + p + 1}.$$

Динамика объекта управления (ОУ) описывалась звеном первого порядка

$$W_{\text{ОУ}} = \frac{1}{0,5p + 1}.$$

Было проведено по пять экспериментов каждого типа, по 100 с каждый с шагом дискретизации сигналов 0,005 с. При обработке использовали окно Ханна. Длина кадра — 2048 отсчетов, с 75 %-ным перекрытием.

Результаты экспериментов представлены на рис. 4 и 5.

Результаты экспериментов подтверждают, что если функция когерентности исследуемых функционально связанных процессов оказывается меньше единицы, то это проявление, по крайней мере, одного из следующих случаев:

- результаты измерения содержат посторонний неконтролируемый шум;
- связь между процессами — нелинейна.

В том случае, когда задача, стоящая перед оператором, достаточно проста, как в случае первой серии экспериментов, когда входной сигнал отно-

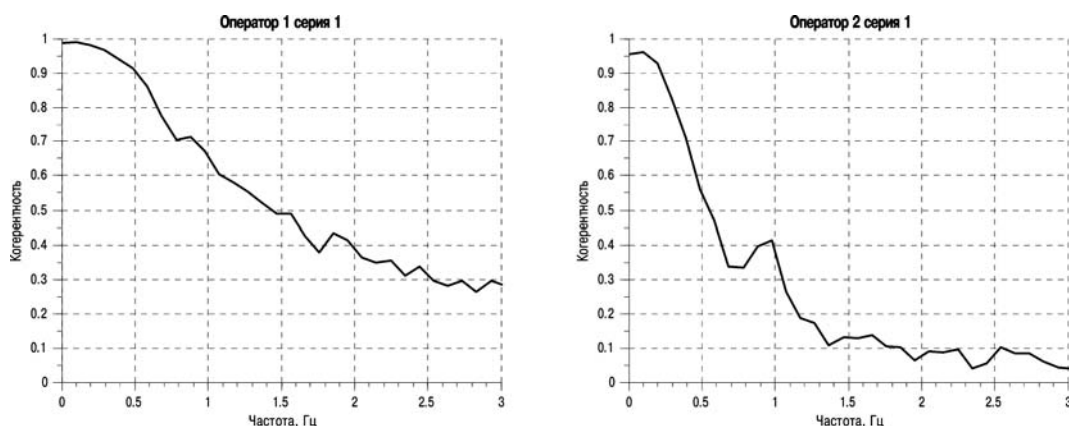


Рис. 4. Результаты первой серии экспериментов

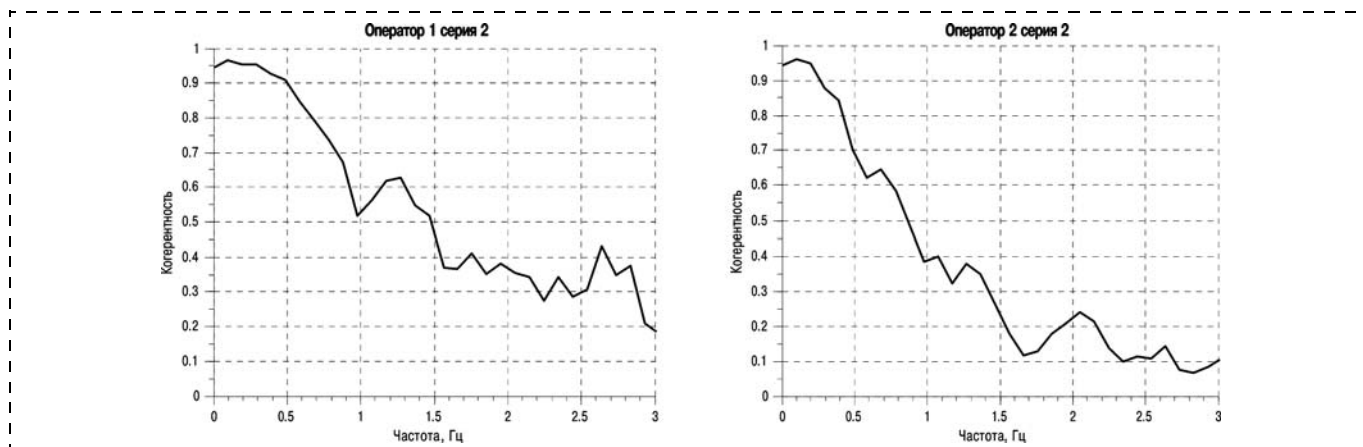


Рис. 5. Результаты второй серии экспериментов

сительно удобен оператору, ему удастся реализовать близкий к линейному алгоритм управления, и функция когерентности между стимулом и реакцией человека-оператора близка к единице.

Усложнение задачи, стоящей перед оператором, как в случае второй серии экспериментов, когда входной сигнал содержит больше высокочастотных компонент, приводит к возникновению дополнительных ошибок слежения, что находит свое отражение в уменьшении функции когерентности на частотах, соответствующих указанным ошибкам. Дальнейшее усложнение задачи управления вынуждает оператора перейти к нелинейным режимам работы. Возможность такого перехода является для оператора дополнительным резервом обеспечения необходимой точности. Однако переход к нелинейным алгоритмам обработки сигналов оператором должен проявиться в изменении функции когерентности, поскольку приводит к обогащению спектра выходного сигнала системы в области высоких частот.

Заключение

Для линейно связанных процессов функция когерентности равна единице на всех частотах. Увеличение нелинейности связи уменьшает значения функции.

Вычисление функции когерентности двух цифровых сигналов сопряжено с рядом аспектов (в частности, с пок кадровым усреднением, выбором оконной функции и степени перекрытия кадров), которые существенно влияют на вид функции.

Из результатов экспериментов, представленных на рис. 4, 5, видно, что функция когерентности ха-

рактеризует индивидуальные операторские способности человека. В обоих случаях график функции когерентности для первого оператора показывает менее крутой спад значений, чем для второго. Следовательно, первый оператор реализует управление, более близкое к линейному.

Таким образом, можно утверждать, что функция когерентности хорошо выявляет линейную связь между процессами, чувствительна к наличию посторонних шумов и нелинейностей и поэтому является удобным аппаратом исследования человеко-машинных систем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 12-08-31290.

Список литературы

1. Себряков Г. Г. Методика исследования алгоритмов деятельности человека-оператора в динамических системах слежения // Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах: Сб. статей XXI всероссийской конференции научно-технической школы-семинара. М.: РПА "АПР", 2010. С. 367—373.
2. Welch P. D. The Use of Fast Fourier Transform the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms // IEEE transactions on audio and electroacoustics, 1967. V. AU-15, № 2, June. P. 70—73.
3. Ханян Г. С. Некоторые аспекты конструирования и вычисления дискретной функции когерентности двух сигналов // Вестник научно-технического развития. 2010. № 7 (35). С. 31—35.
4. Спектральный анализ на ограниченном интервале времени. Оконные функции [электронный ресурс]. URL: <http://www.dsplib.ru/content/win/win.html> (дата обращения 25.05.2013).
5. Огинский А. А., Бурлак Е. А., Набатчиков А. М. Аппаратно-программный комплекс для проведения экспериментов по изучению работы человека-оператора в системах слежения // 60 научно-техническая конференция МИРЭА, Сб. трудов. Ч. 1, 2011. С. 87—91.

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
Институт автоматики и процессов управления
ДВО РАН, г. Владивосток,
Дальневосточный федеральный университет,
г. Владивосток

К. А. Числов, канд. техн. наук, науч. сотр.,
Институт автоматики и процессов управления
ДВО РАН, г. Владивосток

Нейросетевая коррекция безгироскопной инерциальной навигационной системы по спутниковой навигационной информации¹

Предложены концепция нейроморфизма и модель комплексования спутниково-инерциальной навигационной системы с функцией оценки аномалии напряженности гравитационного поля Земли. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: нейроморфизм, нейросеть, гравитационное поле Земли, напряженность, спутниковая навигационная система, инерциальная навигационная система, алгоритм

Введение

Рассматривается модель интегрированной системы, основанная на общности теоретико-механических представлений об инерциальной навигации и гравиметрии. Система комплексуется динамическим блоком трехкомпонентной инерциальной навигационной системы (3D-ИНС) — источником инерциальной информации, получаемой только от ньютономеров, а также двухпозиционным приемным блоком навигационной спутниковой системы (НСС, например, ГЛОНАСС) в качестве источника текущей информации о координатах места объекта-носителя и его скорости относительно Земли. Такой состав системы достаточен для построения на борту объекта приборного координатного трехгранника, являющегося физической моделью некоторого трехгранника, выбранного в качестве идеального, относительно которого предполагается судить об угловых эволюциях самого объекта.

В статье проблема комплексования инерциальной и спутниковой информации интерпретируется как задача коррекции 3D-ИНС по позиционной спутниковой информации или, в математической постановке, как обратная задача в форме "состояние—измерение", обуславливающей и возможность оценки аномалии напряженности гравитационного поля Земли (GE-поля) на траектории движения

объекта. Для решения указанной задачи коррекции предлагается мультимодельный алгоритм динамического обращения нейроподобного типа, интерпретирующий некоторые достаточно общие положения нейрофизиологии и нейроморфизма [1—4], реализуемые в рамках калмановской теории наблюдения [5].

Основные модельные представления

Полагаем, что приборный координатный трехгранник $\tilde{o}q = \tilde{o}q_1q_2q_3$ с началом $\tilde{o}$ в центре масс объекта-носителя физически моделирует правый ортогональный трехгранник $ou_1u_2u_3$ с началом в центре масс Земли, осями ou_1 и ou_2 , направленными соответственно на географические Восток и Север, и осью ou_3 — по радиус-вектору места объекта, так что в идеальном случае соответствующие оси трехгранников $\tilde{o}q$ и ou параллельны. Кроме того, рассматриваем ограниченную модель 3D-ИНС, представляя ее только динамической группой уравнений (ДГУ). Тогда при наличии полной позиционной информации (т. е. информации о радиус-векторе места объекта), наиболее доступным источником которой является НСС, например типа ГЛОНАСС, исходная идеализированная математическая модель задачи наблюдения может быть отождествлена со следующей обратной задачей вида "состояние—измерение":

$$Dq = p; q(0) = q_0;$$

$$Dp = G(q) + F; p(0) = p_0;$$

$$z = q,$$

где q и p — векторы положения и абсолютной линейной скорости в проекциях на оси трехгранника oq ;

$D = \frac{d}{dt} + \hat{\omega}$ — оператор абсолютной производной;

ω — абсолютная угловая скорость вращения трехгранника oq ; $\hat{\omega}$ — кососимметричная матрица (тензор вращения), такая что $\hat{\omega}q = \omega \times q$; $G(q)$ — напряженность GE-поля; F — равнодействующая сил негравитационной природы; z — вектор измерений, доставляемых НСС.

Уравнения, описывающие эволюцию во времени векторов q и p , — это ДГУ, или уравнения состояния, которые при функционировании системы интегрируются. При этом наличие погрешностей (δq_0 и δp_0) в начальных данных (q_0 и p_0), инструментальных погрешностей (f) при измерениях ньютономерами равнодействующей сил негравитационной природы (F), погрешностей (v) оценки абсолютной угловой скорости (ω) по данным НСС, а также погрешности $g = (g_1, g_2, g_3)^T$ при моделировании напряженности GE-поля ($G(q)$) приводит к погрешностям (δq и δp) интегрирования ДГУ. С учетом этого может быть поставлена задача оценки значе-

¹ Исследование выполнено при поддержке РФФИ–ДВО (грант № 11-01-98501-р_восток_а) и ДВО РАН (грант № 12-1-0-03-005).

ний $\delta \mathbf{q}$, $\delta \mathbf{p}$ и $\mathbf{g}$, отождествляемая с обратной задачей "в малом" типа "состояние — измерение":

$$\begin{aligned} D\delta \mathbf{q} &= \delta \mathbf{p} - \hat{\mathbf{v}} \mathbf{q}; \delta \mathbf{q}(0) = \delta \mathbf{q}_0; \\ D\delta \mathbf{p} &= -\frac{\mu}{r^3} \delta \mathbf{q} + \mathbf{g} + \mathbf{f} - \hat{\mathbf{v}} \mathbf{p} + \frac{3\mu \varepsilon_r}{r^4} \mathbf{q}; \delta \mathbf{p}(0) = \delta \mathbf{p}_0; \quad (1) \\ \dot{\mathbf{g}} &= \chi(t); \mathbf{g}(0) = \mathbf{g}_0; \\ \delta \mathbf{z} &= \delta \mathbf{q} + \varepsilon, \end{aligned}$$

где $r = |\mathbf{q}_3|$; $\mathbf{g} = \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \mathbf{G}_m(\mathbf{q})$ — аномалия напряженности GE-поля; $\mathbf{G}_m(\mathbf{q}) = -\frac{\mu \mathbf{q}}{r^3}$ — модель напряженности GE-поля, в которой при интегрировании ДГУ значение r замещается измеренным значением $r + \varepsilon_r$ (ε_r — погрешность измерения); μ — гравитационный параметр Земли; $\chi(t)$ — скорость изменения вектора $\mathbf{g}$ на траектории объекта-носителя; $\delta \mathbf{z}$ — вектор невязок измерений; $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)^T$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_{q_1}$,

$\varepsilon_2 = \varepsilon_{q_2}$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_r = \varepsilon_{q_3}$, причем ε_{q_1} , ε_{q_2} , ε_r — погрешности определения координат носителя с помощью НСС.

Для последующего обсуждения удобно представить (1) в общем виде:

$$\begin{aligned} \delta \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \delta \mathbf{x} + \mathbf{w}, \delta \mathbf{x}(0) = \delta \mathbf{x}_0, \\ \delta \mathbf{z} &= \mathbf{H} \delta \mathbf{x} + \varepsilon, \end{aligned}$$

где $\delta \mathbf{x}^T = (\delta \mathbf{q}^T, \delta \mathbf{p}^T, \mathbf{g}^T)$ — вектор состояния, $\dim \delta \mathbf{x} = n = 9$; "Т" — символ транспонирования векторов и матриц; $\mathbf{A}$ и $\mathbf{H}$ — матрицы, а $\mathbf{w}$ — вектор, содержание и смысл которых соответствуют (1) и вполне очевидны. Для решения задач типа "состояние — измерение" применяются алгоритмы динамического обращения [6].

Целью решения рассматриваемой задачи является получение оценки вектора $\delta \mathbf{x}$, т. е. $\delta \mathbf{x}^* = (\delta q_1^*, \delta q_2^*, \delta q_3^*, \delta p_1^*, \delta p_2^*, \delta p_3^*, \delta g_1^*, \delta g_2^*, \delta g_3^*)^T$, содержащей оценку $\mathbf{g}^* = (g_1^* g_2^* g_3^*)^T$ аномалии $\mathbf{g}$ напряженности GE-поля, и оценки (α^*) вектора малого угла (α) поворота приборного трехгранника $\mathbf{oq}$ относительно идеального трехгранника $\mathbf{oу}$. Компоненты оценки α^* ($\alpha_1^* = -\frac{\delta q_2^*}{r}$, $\alpha_2^* = \frac{\delta q_1^*}{r}$, α_3^* — измеренное при двухпозиционном приеме значение угла между осями $\mathbf{oу}_2$ и $\mathbf{oq}_2$) далее используются в процедуре приведения трехгранника $\mathbf{oq}$ к трехграннику $\mathbf{oу}$. Заметим, что рассмотренный состав системы не включает гироскопических измерителей угловой скорости ω , а алгоритм функционирования не требует интегрирования известных [7] уравнений кинематической группы (уравнений Пуассона).

Концепция нейросетевого алгоритма динамического обращения

Известно, что понятие "искусственная нейросеть" ассоциировано с представлениями о деятельности мозга. В связи с этим отметим некоторые из положений, характеризующих мышление, а именно:

- целенаправленность [2, 3] — ориентация процессов в центральной нервной системе (ЦНС) на устойчивое решение конкретной задачи;
- структурная блочность нейросистемы как необходимое условие мышления [1] — формирование ЦНС синхронизированных блоков, которые разыгрывают разные возможные сценарии отклика на поступающую в ЦНС информацию, обеспечивая, таким образом, множество возможных решений, вообще говоря, разноудаленных от оптимального, но содержащих наилучшее на каждом временном шаге выбора одного из них;
- привыкание [4] — ситуация, когда имеет место изменяющаяся во времени динамика отклика нейросети на стимуляцию, и сеть может даже перестать реагировать на очередной стимул.

В представляемой здесь искусственной нейросети на базе алгоритма калмановского типа реализуются первые два положения — целенаправленность, проявляющая себя как свойство асимптотической устойчивости процесса динамического обращения, и блочность — многомодельная структура сети. Последнее же из положений — привыкание — интерпретируется как свойство асимптотической устойчивой системы наблюдения, реализуемой сетью, с некоторого момента времени выходить на режим функционирования, близкий к стационарному (квазистационарному), и слабо реагировать на возмущения, динамические характеристики которых далеки от характеристик системы.

В качестве исходной парадигмы алгоритма динамического обращения для решения задачи рассмотрим линейный алгоритм (фильтр) следующего вида:

$$\delta \dot{\mathbf{x}}^* = \mathbf{A} \delta \mathbf{x}^* + \mathbf{K}(\delta \mathbf{z} - \mathbf{H} \delta \mathbf{x}^*), \delta \mathbf{x}^*(0) = \delta \mathbf{x}_0^*, \quad (2)$$

где $\mathbf{K} = \mathbf{K}^*$, $\mathbf{K}^* = \arg \min_{\mathbf{K}} J$, $J = 0,5 \|\delta \mathbf{z} - \mathbf{H} \delta \mathbf{x}^*\|^2$, $\|\cdot\|$ — евклидова норма вектора. Если пара матриц ($\mathbf{A}$, $\mathbf{H}$) наблюдаема, то выбор, матричного коэффициента обратной связи $\mathbf{K}$ может обеспечить асимптотическую устойчивость алгоритма. О достижимости этого свойства алгоритма свидетельствует то, что если интерпретировать (2) как алгоритм калмановского типа, т. е. положить $\mathbf{K} = \mathbf{D} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1}$, где $\mathbf{D}$ удовлетворяет матричному уравнению Риккати $\dot{\mathbf{D}} = \mathbf{A} \mathbf{D} + \mathbf{D} \mathbf{A}^T - \mathbf{D} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{D} + \mathbf{Q}$, $\mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0$, с симметрическими положительно определенными матрицами $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$, $\mathbf{D}_0$, то уравнение (2) — асимптотически устойчиво [5].

Из изложенного следует, что помимо прямого выбора ($\mathbf{K} = \mathbf{K}^*$, $\mathbf{K}^* = \arg \min_{\mathbf{K}} J$) допустим альтернатив-

ный ($\mathbf{K} = \mathbf{K}^*$; $\mathbf{K}^* = \mathbf{K}^*(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*)$; $(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*) = \arg \min_{\mathbf{Q}, \mathbf{R}} J$), на который и обращено внимание в данной работе. Достоинство его в том, что он гарантирует асимптотическую устойчивость (2) и сходимость предлагаемого ниже решения экстремальной задачи.

Заметим следующее. Модель (1) построена на основе теоретико-механических и математических представлений, т. е. на абстрактных образах как продуктах деятельности и развития человеческого мозга. Эти абстракции обязаны нейролингвистическому сегменту мозга, в значительной степени локализованному в неокортексном модуле (новая кора больших полушарий мозга) [1]. Поэтому об алгоритме (2), построенном на представлениях модели (1), можно говорить, что он нейроморфен (нейроподобен), и отождествлять его с искусственной динамической нейросетью с синаптическими (по сути) коэффициентами $\mathbf{A}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{K}$ и вектор-функцией активации $\psi[\cdot]$, такой что $\psi[\mathbf{K}(\delta \mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x}^*)] = \mathbf{K}(\delta \mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x}^*)$. Особенность этой нейросети состоит в том, что ее структура и значения части синаптических коэффициентов ($\mathbf{A}$ и $\mathbf{H}$) предопределены теоретически, а обучение выполняется в процессе решения экстремальной задачи и отождествимо с адаптивной настройкой матричного параметра $\mathbf{K} = \mathbf{K}(\mathbf{Q}, \mathbf{R})$.

При численном исследовании задачи (2) $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$ выбраны в виде $\mathbf{Q} = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_1^2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_2^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_3^2, \sigma_3^2)$, $\mathbf{R} = \text{diag}(\sigma_4^2, \sigma_4^2, \sigma_4^2)$; таким образом, в этом варианте экстремальная задача решается в пространстве только четырех параметров: $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$ и σ_4^2 . Заметим, что в исходном варианте ее пришлось бы решать в пространстве 27 параметров K_{ij} .

Для решения экстремальной задачи в данной статье предлагается мультисистема из $3^4 = 81$ параллельных систем — алгоритмов калмановского типа (в этом суть механизма нейроморфизма). Работа каждого из них выполняется при одинаковых для всех стартовых на шаге решения условиях, но при разных значениях параметров $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$. Победившей в таком соревновательном на шаге процессе признается система с наименьшим значением J , а значения ее переменных $\mathbf{x}^*$ и $\mathbf{D}$ принимаются в качестве стартовых на следующем шаге решения для всех систем мультисистемы; новый же набор значений параметров $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$ формируется около (как центра) значений параметров $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$ победившей системы. Например, если $\tilde{\sigma}_1$ — значение параметра σ_1 системы-победителя, то новый набор значений этого параметра есть $\{\tilde{\sigma}_1(1 - \alpha), \tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_1(1 + \alpha)\}$; $0 < \alpha < 1$; аналогичным образом назначаются новые значения параметров σ_2, σ_3 и σ_4 . Реализация такой нейросети требует моделирования 4374 эволюционных уравнений первого порядка (включая уравнения Риккати).

Еще раз возвращаясь к исходному варианту экстремальной задачи с 27 параметрами K_{ij} , отметим, что при формировании наборов значений параметров K_{ij} так же, как параметров σ_i , пришлось бы реализовывать мультисистему с $3^{27} = 7,625597484987 \cdot 10^{12}$ параллельными системами (2) (с общим числом эволюционных уравнений первого порядка — $9 \cdot 3^{27} = 3^{29} = 6,8630377364883 \cdot 10^{14}$) и, кроме того, приводить совокупность значений параметров K_{ij} в область (вообще говоря, априорно неизвестную), в которой обеспечивается асимптотическая устойчивость динамической нейросистемы.

Отметим, что концепция блочности (многомодельности) сохраняется при обоих вариантах экстремальной задачи, если на временном шаге принятия решения мощности вычислителей допускают последовательные реализации отдельных моделей (алгоритмов) в циклах с полными переборами комбинаций значений параметров (т. е. K_{ij} или σ_i) в режиме реального времени. Именно таким образом организован вычислительный эксперимент, некоторые результаты которого представлены ниже.

Вычислительный эксперимент

Цель вычислительного эксперимента — верификация предложенной концепции нейросетевой системы коррекции векторной гравиметрической 3D-ИНС и оценка возможности ее практической реализации. Эксперимент проводили в вычислительной среде пакета MATLAB для случая движения объекта по географической параллели (широта = 45°) со скоростью относительно Земли 100 м/с в восточном направлении. Предполагалось, что погрешности всех измерителей представлены равномерно распределенными шумами с нулевыми средними и среднеквадратическими значениями соответственно $\sigma_v = 0,001^\circ/\text{ч}$ — для НСС при оценке угловой скорости, $\sigma_f = 10^{-3} \text{ м/с}^2$ — для ньютономеров и $\sigma_{pos} = 1 \text{ м}$ по каждой координате для системы спутникового позиционирования. Интервал дискретизации ре-

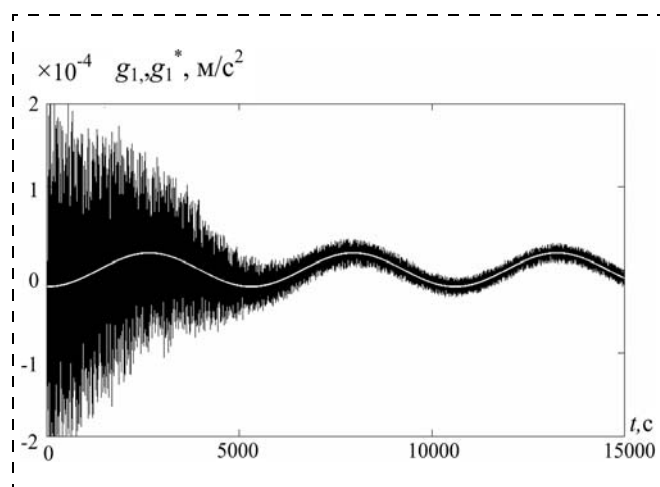


Рис. 1

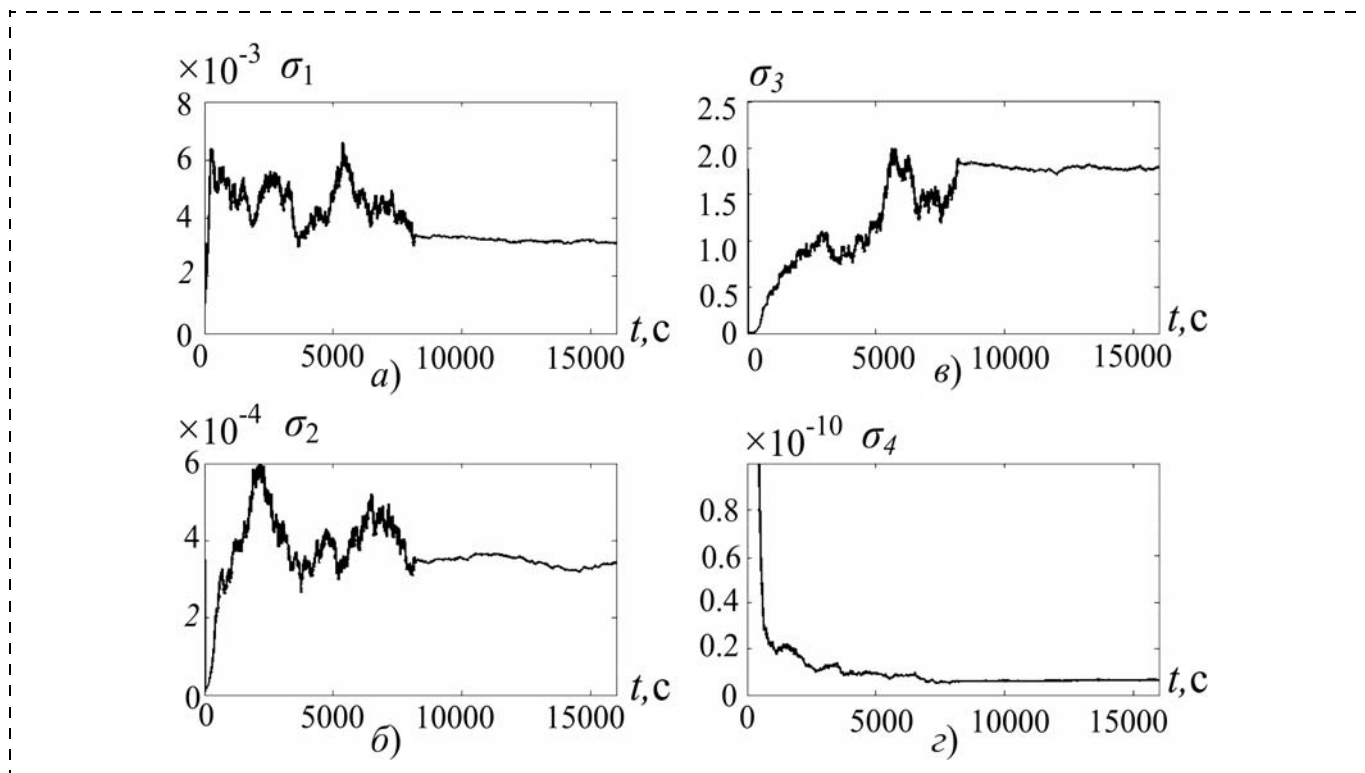


Рис. 2

шения задачи по времени — 1 с. Функции $g_i(t)$, $i = \overline{1, 3}$, взяты синусоидальными и отличающимися друг от друга значениями амплитуд и фаз.

На рис. 1 представлены графики функции $g_1(t)$ (белая линия) и ее нейросетевой оценки $g_1^*(t)$ (черная линия). Аналогичная картина имеет место и по другим (g_2 и g_3) компонентам аномалии напряженности GE-поля.

На рис. 2 (а, б, в, г) представлены, соответственно, графики эволюции параметров σ_1 , σ_2 , σ_3 , σ_4 , управляющих значениями синаптических коэффициентов K_{ij} .

Для оценки возможности работы предложенной нейросетевой системы в режиме реального време-

ни введен показатель $\tau = \frac{T_R}{T_M}$, где T_M — интервал

времени, затрачиваемого при численном моделировании реального процесса длительностью T_R . Это показатель в рассматриваемом случае равен $\tau = 11$, что вполне приемлемо (очевидно, должно быть $\tau > 1$), тем более, если учесть, что система коррекции будет реализовываться специализированными вычислительными средствами.

Закключение

Основные результаты исследования следующие:

- предложена концепция нейроморфизма, основанная на интерпретации современных пред-

ставлений о развитии и функционировании головного мозга человека;

- разработан и численно исследован нейроморфный алгоритм коррекции безгироскопной 3D-ИНС с функцией оценки аномалии напряженности GE-поля, в основу которого положена мультимодельная интерпретация калмановского фильтра;
- расширено представление об алгоритмах динамического обращения.

Список литературы

- Иваницкий Г. Р., Медвинский А. Б., Цыганов М. А. От динамики популяционных волн, формируемых живыми клетками, к нейроинформатике // Успехи физических наук (УФН). 1994. Т. 164. № 10. С. 1041—1072.
- Олескин А. В. Нейрохимия и симбиотическая микрофлора человека: биополитические аспекты // Вестник РАН. 2009. Т. 79. № 5. С. 431—438.
- Аршавский Ю. И. И. М. Гельфанд о математике и нейрофизиологии // Вестник РАН. 2010. Т. 80. № 10. С. 937—940.
- Павлов А. Н., Храмов А. Е., Короновский А. А., Ситникова Е. Ю., Макаров В. А., Овчинников А. А. Вейвлет-анализ в нейродинамике // Успехи физических наук (УФН). 2012. Т. 182. № 9. С. 905—938.
- Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971. 400 с. (Kalman R. E., Falb P. L., Arbib M. A. Topics in mathematical system theory. (McGraw-Hill, New York, 1969)).
- Осипов Ю. С., Крайковский А. В. Задачи динамического обращения // Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 7. С. 615—624.
- Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967. 648 с.

CONTENTS

Tararykin S. V., Apolonskiy V. V., Terehov A. I. Investigation of the Structure and Parameters of Polynomial Regulators "Input-Output" on Robust Properties of Synthesized Systems	2
---	---

The effect of the degree of the denominator polynomial of the transfer function of the dynamic controller "input-output" on robust properties of automatic control systems (ACS), synthesized by the method of modal control.

The features of the systems in the so-called "risk areas", appearing in the formation of the negative regulator of the polynomial coefficients and determining its non-minimally-phase nature. The possibilities of the systems in these conditions by plotting the corresponding regions of robust stability under variations of the parameters of the control object.

Keywords: automatic control system, polynomial controller, the area of robustness, the poles and zeros, stability, in a variation of parameters.

Cheburakhin I. F. About Logical Control and Information Handling in Discrete Technical System on Base of the Functional Equations	9
--	---

The Designed methods to realization logical algorithm (the boolean function) on base of the functional equations (structured-functional parallel decomposition), which allow alongside with syntheses of the circuit, get corresponding to importances of the different factors to difficulties in miscellaneous base.

Keywords: boolean function, syntheses formula and circuit, decomposition, difficulty, minimization, functional of the equation

Krasnodubets L. A. Analytical Designing of Laws of the Trajectory Control by Vehicles on the Air-Cushion	17
---	----

Application of new technology of analytical designing of algorithmic providing of motion control systems for designing of the law of trajectory control by nonlinear object with three degree of freedoms on a vehicle example on an air-cushion is considered. The task of trajectory control is brought together to three inverse tasks of dynamics which are decided by local optimization by the power criteria containing deflections of operated processes from the reference. The found solutions are presented in the firm of laws of adaptive control with feedback. The behavior of the trajectory control system with linear object is probed at unlimited growth of an amplification coefficient. On the basis of the analysis of processes of adaptation is developed relations and recommendations for synthesis of parameters of adaptive regulators. By means of modeling the system of trajectory control by nonlinear object on the appointed trajectory is investigated.

Keywords: a trajectory, the energy criterion, local optimization, the law of adaptive control, a feedback, the regulator, the analysis, synthesis, modeling

Briskin E. S., Leonard A. V. Unshocking Motion of Walking Machine with Dual Turning Mover	25
--	----

Plane motion of walking machine with dual rotating mover has been considered. Method of non-impact movement of the walking machine has been investigated. Numerical simulation motions modes of machine has been carried.

Keywords: walking dual — rotating mover, walking machine, modeling of the motion, unshocking turn

Skobelev P. O., Simonova E. V., Kozhevnikov S. S., Mayorov I. V., Feoktistov A. L., Kleimenova E. M., Polonchuk E. V. General Review of the Adaptive Production Scheduling Systems	28
---	----

The review of the world developments in the field of adaptive production processes scheduling for manufacturing enterprises is given in the present paper. The advantages of multi-agent technology for resource scheduling and optimization are proved.

Keywords: multi-agent system, adaptive scheduling, production process

Korostelev V. F. Control of Metals and Alloys Treatment Processes to the Given Trajectory in the Space of Conditions	37
---	----

This paper describes a solution of control task of casting process with the imposition of pressure. It is determined, that the pressure generated in the liquid metal, changes the conditions and mechanism of the subsequent crystallization. Based on the results of dilatometric and calorimetric studies it is suggested, that the formation of associative complexes of atoms, that change the values of the thermodynamic functions and at a certain combination of parameters "temperature—pressure—time" can contribute to amorphization, bypassing the process of crystallization. It is shown that the intelligent control to the given trajectory in the space of these parameters ensures the production of products with the desired combination of properties.

Keywords: vector, the state of conditions, energy level, clusters, liquid—crystal—amorphization, inverse dynamics, intelligent control forming properties

Drozd O. V., Kapulin D. V. Modeling and Analysis of Control and Dispatching System for Technological Processes with Fuzzy Logic	41
--	----

The control system designing for drum-boiler unit TGM-96B and its integration in HMI/SCADA Proficy iFIX is considered. The basic components and principles of operation are described, the structure of the control scheme of boiler units are shown, the results of the simulation are also presented. The development process of a fuzzy logic model and its integration in HMI/SCADA iFIX by used MATLAB instruments is considered in detail. A comparison of direct indicators of quality control for the PID controller and the controller based on fuzzy logic is done.

Keywords: boiler unit, simulation, dispatching and control system, PID controller, fuzzy logic

Novosyolov B. V., Nikolaev V. Ya. Concept of Development, Construction and Efficient Use of Servo Drives Server Software	47
---	----

The concept of development, construction and efficient use of server software set (SS) for servo drives is considered which allows to develop the SS with such consumer behavior that permits to provide the guaranteed on-line testing, maintenance, troubleshooting and repair of servo drives extending thereby its operation life.

Keywords: servo drives, server software, special process equipment, repair documentation, testing devices, test benches

Epifanov O. K., Kolpakov A. I. Trends of Development of Power Electronics Modules for Modern Small Power Drives	52
--	----

The article considers some issues connected with increasing of reliability, miniaturization and integration level of the power section of motor drive, modern circuit engineering and technological solutions has been considered, main features of intellectual, high integrated power modules has been considered.

Keywords: power module, reliability, inverter, electric drive, thermocycling, low temperature sintering technology, press-contact technology

Solovyev I. V. Predictive Star Image Detection and Location Estimation Using Kalman Filter for Star Sensors . .	59
--	----

This paper presents a new method for star images detection and their centers estimation when photo detector noise and spurious lights are present. To address the problem of detecting the star images among the spikes (fakse stars) an algorithm predicting the star image approximate location from a priori information is proposed. To increase the accuracy of star image center estimation a Kalman filter performing sequential filtering of the star image coordinates in consecutive frames is designed. Simulation results demonstrate that the proposed method makes it possible to remarkably increase the accuracy of the stars directions estimates even from very coarse (the error of the order of 1 arcmin) measurements.

Keywords: attitude determination systems, star sensor, Kalman filter

Nabatchikov A. M., Burlak E. A. Analysis of Human Operator Characteristics in Dynamic Tracking System . . .	63
--	----

Basic information about the coherence function is shown. The aspects of implementation of the algorithm for calculating the discrete signals were analyzed. The practical applications of the coherence function for investigating the characteristics of the human operator in the tracking system were shown.

Keywords: coherence function, digital signal processing, frequency method, the window function, nonlinearity, the human operator

Devyatishil'nyi A. S., Chislov K. A. Neural Network Correction of the Inertial Navigation System without Gyroscopes by Satellite Navigation Information	67
--	----

The conception of neuromorphism and the model of complexing of the satellite-inertial system with the function of the Earth's gravitational fields strength anomaly estimation is proposed. The results of numerical simulation are represented.

Keywords: neuromorphism, neural network, Earth's gravitational field, strength, satellite navigation system, algorithm

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова*.

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 30.08.2013. Подписано в печать 14.10.2013. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1113. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,

телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансд солиушнз". Отпечатано в ООО "Авансд солиушнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.