Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Главный редактор

Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЛЕГИЯ:

Бучаченко А.Л. — д.х.н., проф., ИПХФ РАН
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Дегтярёв Ю. И. — д.т.н., проф., МАИ
Иванов А. П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор — **Селихова Е.В.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

2

2015

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

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

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

ООО "Издательство "Машиностроение"

Адрес редакции:
107076, Москва,
Колодезный пер., 2А.
Тел.: (495) 661-38-80.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Адрес издательства:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4.
Тел.: (499) 268-38-58.
Факс: (499) 269-48-97.

© Издательство "Машиностроение",
© Издательство " Инновационное машиностроение"

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Климовицкий М.Д., Ларин А.А. Автоматическое регулирование температуры при термической обработке холоднокатаных сталей 3

Буренин В.В., Иванина Е.С. Новые конструкции механических и силовых фильтров для очистки рабочей жидкости систем гидроавтоматики и объёмного гидропривода машин и механизмов 7

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Кузнецов С.А. Специализированные САПР — результат технологии предметно-ориентированного проектирования программных продуктов 14

Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Толстых С.Г., Островский Г.М. Интегрированное проектирование промышленных автоматизированных технических систем и производств 20

Капля Е.В. Оптимальная по расходу энергии длина отрезка терминального управления сервоприводом с двигателем постоянного тока 27

Михайленко В.С. Исследование экспертного показателя качества переходных процессов в автоматизированных системах регулирования. 32

Амелькина С.А., Железникова О.Е., Микаева С.А. Экспериментальная исследовательская установка со светодиодными источниками света 37

Кожевников А.В., Волков В.Н. Разработка функции самонастройки системы управления электроприводом на базе генетического алгоритма 41

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов. 46

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

Klimovitskiy M.D., Larin A.A. Temperature automatic adjustment at heat treatment of the cold-rolled steels 3

Burenin V.V., Ivanina E.S. New designs of the mechanical and power filters for working fluid cleaning in the hydroautomatic systems and volumetric hydraulic drive for machines and machinery. 7

MODERN TECHNOLOGIES

Kuznetsov S.A. Specialized CAD as result subject-oriented design technology of software products. 14

Dvoretskiy D.S., Dvoretskiy S.I., Tolstykh S.G., Ostrovskiy G.M. Integrated design of the industrial automatic technical systems and production. 20

Kaplya E.V. The terminal control segment length of servodrive with DC motor with optimum energy consumption 27

Mikhaylenko V.S. Expert quality index research of the transients processes in automatic control systems 32

Amelkina S.A., Zheleznikova O.E., Mikaeva S.A. Experimental research facility with LED light source. 37

Kozhevnikov A.V., Volkov V.N. Self-adjustment function development of the electric drive control system based on genetic algorithm. 41

SURVEY OF PERIODICALS

Periodicals review. 46

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

Сдано в набор 01.12.2014.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 22.01.2015.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	119071, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2015 г.

УДК 681.516.75

М.Д. Климовицкий, д-р техн. наук, **А.А. Ларин**
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))
andalarin@gmail.com

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ХОЛОДНОКАТАНЫХ СТАЛЕЙ

Представлена автоматическая система управления режимами термической обработки холоднокатаных сталей, обеспечивающая допустимую неравномерность температурного поля в пластине и ошибку регулирования температуры по отношению к заданной не более 5 °С. Реализован алгоритм идентификации, расчёта и автоматической настройки коэффициентов ПИД-регулятора по методу с внутренней моделью. Результаты физического моделирования внедрены в производство, и получен высокий уровень сходимости с промышленными циклами термической обработки.

Ключевые слова: переменные параметры, автоматическое управление, автоматическая настройка коэффициентов ПИД-регулятора, термическая обработка холоднокатаных сталей.

The automatic control system of cold-rolled steels heat treatment modes, that provide a acceptable temperature irregularity in the plate and temperature control error in relation to a given no more than 5 °C are introduced. The algorithm for identification, calculation and automatic setting of the PID-controller according to method with the internal model is realized. The physical modeling results are implemented in production and a high level of convergence with the industrial heat treatment cycles is received.

Key words: variables parameters, automatic control, automatic setting of the PID-controller coefficients, heat treatment of the cold-rolled steels.

Введение. Современные САУ являются неотъемлемой частью лабораторных установок и комплексов, применяемых как для исследования существующих промышленных режимов термической обработки холоднокатаных сталей, так и для создания принципиально новых марок сталей, удовлетворяющих требованиям внутреннего и внешнего рынка [1—3].

Объектом управления в рассматриваемых установках, моделирующих реальный технологический процесс или вновь создающийся, является физическая модель с электроконтактным нагревом и охлаждением, к достоинствам которой относится управляемое выделение тепловой энергии электрического тока практически в каждом элементарном объёме нагреваемого тела, несмотря на частичное выделение теплоты в окружающую среду за счёт конвекции, кондуктивного теплообмена и излучения, а также в приконтактные зоны. Высокая точность, предъявляемая к температуре термической обработки холоднокатаных сталей, в таких системах достигается за счёт работы автоматической системы управления. Однако в процессе регулирования температуры происходит изменение параметров объекта управления: активного и индуктивного сопротивления полезной нагрузки и всей установки, коэффициента мощности, тока нагрева, напряжения на концах образца, распределения температурного поля в нагреваемом теле, теплоёмкости нагреваемого изделия, теплопроводности и магнитной проницаемости.

В этой связи необходимо разработать систему автоматического управления, учитывающую переменные параметры объекта управления и обеспечивающую высокую точность между заданной температурой от оператора и достигаемой в результате регулирования.

Описание регулятора температуры. Для обеспечения необходимой точности температуры, скоростей нагрева и охлаждения, возможности ввода параметров режима термической обработки сталей через пользовательский интерфейс ПК оператора разработана структура системы управления, представленная на рис. 1, и сам контроллер управления на базе *LPC*1343*FBD*48.

Система состоит из ПК оператора с пользовательским интерфейсом для ввода параметров управления и отображения состояния системы в процессе её работы. По шине USB

Рис. 1. Автоматическая система управления температурой

осуществляется отправка программы управления и получение данных о ходе выполнения режима термической обработки сталей с возможностью сохранения параметров журнала экспериментов для последующего анализа. Контроллер управления на базе *LPC*1343*FBD*48 в зависимости от переданных параметров выбирает коэффициенты ПИД-регулятора для контура тока, температуры и отрабатывает входное воздействие, заданное оператором зависимостью температуры от времени. Управление нагревом осуществляется за счёт симисторного регулятора, установленного между фазой и первичной обмоткой лабораторного автотрансформатора. Регулятор получает информацию от АЦП, обрабатывающего датчик тока, температуры и модуль контроля фазы, на основании которой формирует сигнал для открытия симистора, тем самым управляя током и количеством теплоты, выделяемой для нагрева стальной пластины. Образцы охлаждаются включением/выключением электромагнитного клапана компрессора. Избыточное охлаждение компенсируется нагревом, в результате чего происходит выполнение режима термической обработки холоднокатаной стали.

Описание объекта управления. Рассмотрим температурное поле внутри образца (пластины) длиной до 300 мм, шириной до 60 мм и толщиной до 3 мм в декартовых прямоугольных координатах, которое описывается уравнением в частных производных с распределёнными параметрами [4]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \mathrm{div}(k\,\mathrm{grad}\,T) + Q, \qquad (1)$$

где $c = c(x, y, z)$ — удельная теплоёмкость стали; $\rho = \rho(x, y, z)$ — плотность стали; $T = T(x, y, z, t)$ — функция распределения температуры в теле; $k = k(x, y, z)$ — коэффициент теплопроводности стали; $Q = Q(x, y, z, t)$ — удельная мощность внутреннего источника теплоты.

В многочисленных публикациях [5] показано, что процессы нагрева и охлаждения пластины могут быть описаны уравнением апериодического звена с запаздыванием, коэффициенты которого изменяются во времени:

$$T(t) = K(t) - K(t)\, e^{\frac{\tau - t}{T_{\text{п}}(t)}}, \qquad (2)$$

где $T(t)$ — температура термической обработки и технологический параметр управления; $K(t)$, $T_{\text{п}}(t)$ — переменные параметры; τ — время запаздывания.

Для поддержания заданного режима, введённого оператором через интерфейс персонального компьютера, используется разработанный ПИД-регулятор. В связи с тем, что параметры объекта управления изменяются в процессе термической обработки сталей, необходимо выполнять идентификацию этих параметров и автоматически рассчитывать коэффициенты регулятора в процессе его работы.

Синтез системы управления. При решении задачи идентификации использован метод наименьших квадратов, в котором на основании численного метода Хука—Дживса [6] находились коэффициенты уравнения (2). Расчёт и настройка коэффициентов определены методом с внутренней моделью [7].

Данный метод по идентифицированной модели $M(s)$ объекта управления $P(s)$ ($s = \sigma + i\omega$ — комплексная переменная) позволяет рассчитывать параметры ПИД-регулятора, обладающего структурой, представленной на рис. 2.

В свою очередь $F(s)$ — фильтр, обычно выбираемый из передаточных функций:

$$F(s) = \frac{1}{sT_{\text{ф}} + 1}, \qquad (3)$$

где $T_{\text{ф}}$ — постоянная времени фильтра; ε — разность сигналов на выходе объекта управления и модели; E — ошибка управления; Q — обращённая модель объекта управления (асимптотически устойчива), т. е. $Q(s) \approx M^{-1}(s)$.

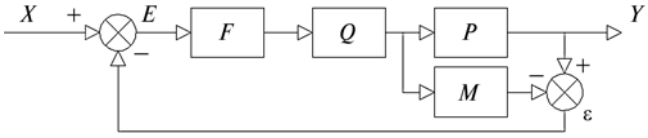


Рис. 2. Регулятор с внутренней моделью *M*

Знак приближённого равенства используется потому, что обращение модели редко можно выполнить точно.

В силу начальных предположений, что $M(s) = P(s)$, $Q(s) = M^{-1}(s)$, внешние возмущения и шумы измерения отсутствуют ($\varepsilon = 0$), получим:

$$Y(s) = P(s)Q(s)F(s)X(s) = F(s)X(s).$$

Поскольку в установившемся режиме $F(s) = 1$, то в результате $Y(s) = X(s)$. Таким образом, регулятор с внутренней моделью точно поддерживает значение уставки в статическом режиме.

Фильтр нижних частот $F(s)$ в такой структуре с помощью настройки постоянной времени фильтра $T_ф$ позволяет выбрать компромисс между запасом устойчивости и быстродействием замкнутой системы [8].

Регулятор, представленный на рис. 3 переносом блока вычисления разности ε, может быть преобразован в эквивалентную классическую форму ПИД-регулятора (рис. 3), где передаточная функция регулятора:

$$PID(s) = \frac{F(s)\,Q(s)}{1 - F(s)\,Q(s)\,M(s)}. \qquad (4)$$

В общем случае регулятор может иметь высокий порядок, который определяется объектом.

В нашем случае из-за наличия запаздывания, которое определяет трансцендентный характер характеристического уравнения системы, необходимо привести систему к линейному виду, а звено запаздывания заменить аппроксимацией Паде первого порядка [9]. Использование аппроксиматора Паде обосновано практической применимостью и достаточно высокой точностью, т. е. значения в бесконечности для рассматриваемого объекта управления аппроксимация даёт с точностью до 8 %, по сравнению, например, с более общим методом Вейерштрасса. Поэтому, используя приближённое разложение звена запаздывания в два члена ряда, получим:

$$e^{-\tau s} = \left(1 - \frac{1}{2}\tau s\right)\left(1 + \frac{1}{2}\tau s\right). \qquad (5)$$

В свою очередь, идентифицированная модель управления примет следующий вид:

$$M(s) = \frac{K}{1 + T_п s} e^{-\tau s} = \frac{K}{1 + T_п s} \frac{1 - \frac{\tau s}{2}}{1 + \frac{\tau s}{2}}. \qquad (6)$$

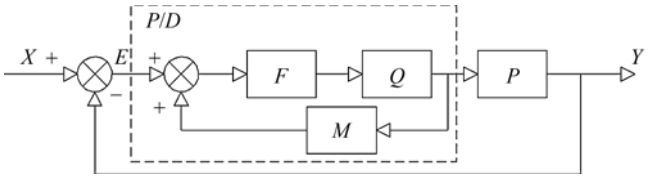


Рис. 3. Регулятор с внутренней моделью в классической форме представления

Нахождение обратного оператора $M(s)^{-1}$ имеет ряд трудностей, связанных с физической реализуемостью, а именно с возможным появлением дополнительных полюсов, влияющих на устойчивость, которые необходимо компенсировать, и необходимостью реализации операции идеального дифференцирования.

Таким образом, задача нахождения обратной нереализуемой передаточной функции сводится к искусственно выбранной реализуемой функции по критерию минимума погрешности с учётом обозначенных выше трудностей.

В рассматриваемой задаче передаточная функция обратного оператора мала на тех частотах, на которых она имеет максимальную чувствительность к изменению параметров. Поэтому обратный оператор $M(s)^{-1}$ можно аппроксимировать выражением:

$$M(s)^{-1} = \frac{1 + T_п s}{K}. \qquad (7)$$

С учётом (3), (6) и (7) выражение (4) примет вид:

$$PID(s) = \frac{\frac{1}{1 + T_ф s}\frac{1 + T_п s}{K}}{1 - \frac{1 + T_п s}{K(1 + T_ф s)}\frac{K}{1 + T_п s}\frac{1 - \frac{\tau s}{2}}{1 + \frac{\tau s}{2}}} = \frac{(1 + T_п s)\left(1 + \frac{\tau s}{2}\right)}{Ks\left(T_ф + \tau + \frac{T_ф \tau}{2} s\right)}. \qquad (8)$$

Составляющей в выражении (8) $\frac{T_ф \tau}{2} s$ можно пренебречь, так как она значительно меньше $T_ф + \tau$. Тогда, учитывая, что форма идеального ПИД-регулятора имеет вид:

$$PID(s) = K_п\left(1 + \frac{1}{s T_и} + T_д s\right),$$

Механические свойства проката из IF стали (после дрессировки/без дрессировки)

Тип термической обработки	Технологические параметры		Механические свойства				
	$T_{т.о.}$, °C	$\varepsilon_{др}$, %	$\sigma_т$	$\sigma_в$	δ_4	n	R
Моделирование	830	0,75	152/111	281/274	43/43	0,21	2,1
Промышленный эксперимент	840	0,8	155/—	290/—	39/—	0,24	2,5

Примечание: $T_{т.о}$ — температура термической обработки холоднокатаной стали; $\varepsilon_{др}$ — степень обжатия при дрессировке; $\sigma_т$ — предел текучести; $\sigma_в$ — предел временного сопротивления; δ_4 — относительное удлинение; n — коэффициент деформационного упрочнения; R — коэффициент пластической анизотропии.

получим:

$$K_п = \frac{\frac{\tau}{2} + T_п}{K(T_ф\tau)},\ T_и = \frac{\tau}{2} + T_п,\ T_д = \frac{\tau T_п}{\frac{\tau}{2} + T_п}.$$

Практические результаты. На рис. 4 приведён режим термической обработки холоднокатаной стали, построенный по результатам журнала экспериментов системы управления, с использованием автоматически рассчитываемых коэффициентов ПИД-регулятора с внутренней моделью, где $T_ф = 0{,}16$ с, $\tau = 0{,}007$ с.

Разработанная и внедрённая система управления показала, что точность температуры при термической обработке холоднокатаного проката находится в интервале +/— 1 °C. Предложенная система управления обладает необходимым быстродействием, запасами устойчивости и высокой точностью воспроизведения заданной температуры.

После проведения экспериментов по заданным режимам термической обработки отожжённые образцы подвергали дрессировке. Затем проводили испытания механических свойств металла после отжига и дрессировки по ГОСТ 11701 (см. таблицу).

Результаты испытаний механических свойств после моделирования в лабораторных условиях и в промышленности показали высокий уровень подобия, что свидетельствует о возможности использования данной системы управления для последующего переноса результатов в промышленные условия.

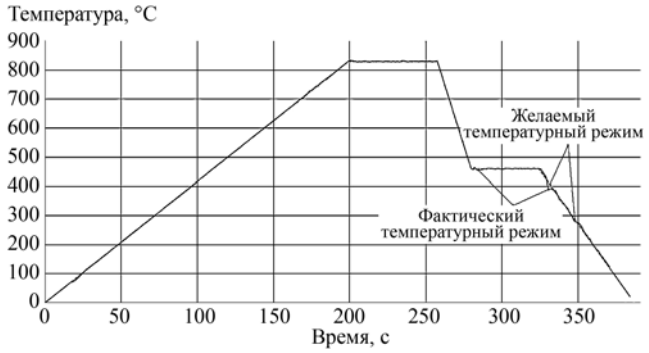


Рис. 4. Режим термической обработки холоднокатаной стали

Заключение. Таким образом, разработана система управления автоматическим регулированием температуры при термической обработке холоднокатаных сталей, в составе которой реализован алгоритм идентификации, расчёта и автоматической настройки коэффициентов ПИД-регулятора по методу с внутренней моделью.

Результаты физического моделирования перенесены в промышленные условия, и получен высокий уровень сходимости с промышленными циклами термической обработки холоднокатаных сталей.

Библиографические ссылки

1. **Ларин А.А., Климовицкий М.Д., Шевков А.А., Казанджиян О.А.** Система управления режимами термической обработки сталей // Металлург. 2014. № 2. С. 76—79.

2. **Ящук С.В., Бакланова О.Н., Родионова И.Г.** Влияние термической обработки на формирование структуры и свойств перспективных высокопрочных низколегированных сталей // Перспективные материалы. 2011. № 5. С. 968.

3. **Горбунов А.В., Ветренко А.Г., Курамшин Р.Р., Родионова И.Г., Ящук С.В., Белов В.К.** Перспективы развития производства высокопрочных автолистовых сталей // Сталь. 2012. № 2. С. 113—115.

4. **Бутковский А.Г.** Методы управления системы с распределёнными параметрами. М.: Наука, 1975. 568 с.

5. **Тимофеев Б.Б., Климовицкий М.Д., Ефроймович С.Ю.** Адаптивная система управления отжигом металла // Сталь. 1984. № 4. С. 51—61

6. **Kelley C.T.** Iterative methods for optimization. 1999. P. 180

7. **Rivera D.E., Morari M., Skogestad S.** Internal model control: PID controller Design. Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev. 1986. P. 252—265.

8. **Leva A., Colombo A.M.** IMC-based Synthesis of the Feedback Block of ISA-PID Regulators. Proc. ECC 2001. P. 125—247.

9. **Бейкер Дж. мл., Питер Грейвс-Моррис.** Аппроксимации Паде. М.: МИР. 1986. 502 с.

УДК 621.6.03

В.В. Буренин, канд. техн. наук, проф.
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)),
Е.С. Иванина, канд. техн. наук
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))
ivanina.es@inbox.ru

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ СИСТЕМ ГИДРОАВТОМАТИКИ И ОБЪЁМНОГО ГИДРОПРИВОДА МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Рассмотрены новые конструкции фильтров для обеспечения оптимального уровня очистки рабочей жидкости систем гидроавтоматики и объёмного гидропривода машин и механизмов. Показаны основные тенденции развития конструкций этих фильтров.

Ключевые слова: объёмный гидропривод, гидравлический фильтр, рабочая жидкость, тенденции развития.

The new filter designs that provide the optimal cleaning level of the working fluid in the hydroautomatic system and volumetric hydraulic drive for machines and machinery are considered. The basic development trends of structures of these filter design are shown.

Key words: volumetric hydraulic drive, hydraulic filter, working fluid, development trends.

Широкое применение систем гидроавтоматики и объёмного гидропривода в современных энергонасыщенных машинах и механизмах — одно из основных направлений их совершенствования и развития [1].

Рабочая жидкость, используемая в гидрофицированных (оборудованных системами гидроавтоматики и объёмным гидроприводом) машинах и механизмах, является рабочим телом, смазывающим и охлаждающим агентом пар трения, средой, удаляющей из пар трения продукты изнашивания и обеспечивающей при длительной эксплуатации защиту деталей от коррозии. Рабочая жидкость должна обладать рядом свойств, одно из которых основное — отсутствие в ней механических примесей (твёрдых и пластичных частиц загрязнений), засоряющих гидроагрегаты гидравлических систем и приводящих их к преждевременному выходу из строя.

Многолетний опыт эксплуатации гидрофицированных машин и механизмов показал, что до 80 % всех отказов и повреждений гидроагрегатов гидравлических систем связан с загрязнением рабочей жидкости различными вредными примесями [2].

Рабочие жидкости подвергаются очистке от загрязняющих примесей, состоящих из частиц загрязнений, попадающих в жидкость в процессе изготовления гидроагрегатов извне, частиц, образовавшихся в результате эксплуатации гидравлических систем и износа деталей пар трения гидроагрегатов, а также частиц, состоящих из продуктов окисления рабочей жидкости, с помощью специальных устройств — гидравлических фильтров, которые в зависимости от способа очистки бывают механическими и силовыми [3].

В системах гидроавтоматики и объёмном гидроприводе машин и механизмов для качественной очистки рабочей жидкости от твёрдых и пластичных частиц загрязнений применяются преимущественно механические фильтры, в которых частицы загрязнений отделяются от рабочей жидкости в зависимости от размеров отверстий фильтрующих сеток или размеров проходных капиллярных каналов фильтрующих перегородок из пористых материалов. В качестве фильтрующих перегородок применяются фильтрующие элементы в виде тканевых рукавов, мешков, патронов, модулей и т. д.

В механических фильтрах для очистки рабочей жидкости фильтрующий материал для перегородок (фильтрующих элементов) выбирают с учётом основных характеристик: тонкости фильтрации, гидравлического сопротивления, срока службы до регенерации (очистки) или замены, совместимости с очищаемой рабочей жидкостью и т. д.

Фильтрующий материал должен быть максимально проницаемым для рабочей жидко-

сти, но способным задерживать мельчайшие частицы твёрдых и пластичных загрязнений. В соответствии с этим фильтрующий материал должен иметь мельчайшую однородную сетку с максимальной площадью проходных ячеек (пор, отверстий) и количеством их на единицу площади поверхности материала. Количество ячеек на единицу площади поверхности материала и определяет тонкость фильтрации, которая характеризуется размерами отверстий и поровых каналов в фильтрующей перегородке или, что то же самое, размерами частиц загрязнений, которые удерживаются в фильтре.

Фильтрующие перегородки изготовляют из различных материалов, отличающихся по фильтрационным показателям, физико-химическим свойствам, химическому составу, способам изготовления и т. д.

Отделение твёрдых и пластичных частиц загрязнений от рабочей жидкости силовых фильтров осуществляется силовыми полями: магнитным, электрическим, инерционным, гравитационным и др.

Силовые гидравлические фильтры используются в системах гидроавтоматики и объёмном гидроприводе, как правило, в виде первой ступени очистки рабочей жидкости.

В последние годы ведущие в области фильтровальной техники российские и зарубежные фирмы разработали, запатентовали и выпускают новые конструкции гидравлических фильтров для очистки рабочей жидкости, отличающихся улучшенными характеристиками.

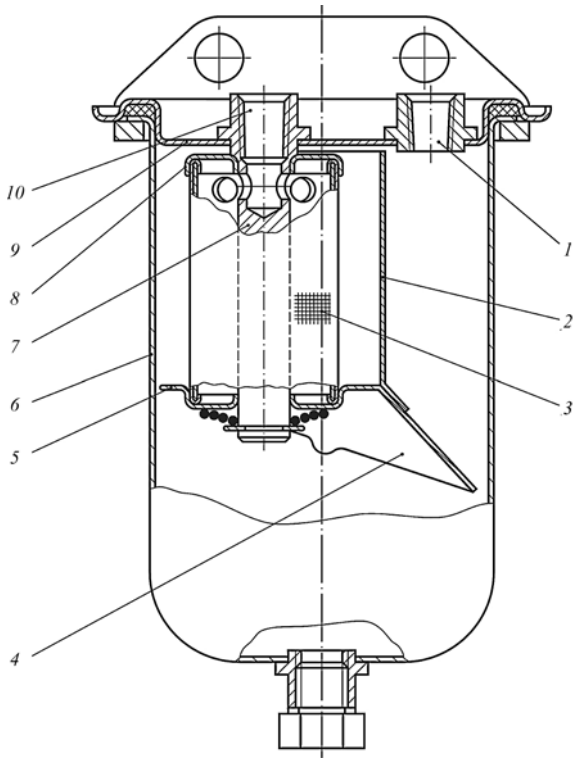


Рис. 1. Гидравлический механический фильтр-отстойник с сетчатым фильтрующим элементом

Для эффективной очистки рабочей жидкости от взвешенных твёрдых и пластичных частиц загрязнений предназначен механический фильтр-отстойник [4], отличающийся простотой конструкции и пониженной металлоёмкостью. Фильтр-отстойник содержит крышку *9* (рис. 1) со штуцером *1* для подвода рабочей жидкости на очистку и с центральным стержнем *7*, имеющим штуцер *10* для отвода очищенной рабочей жидкости, стакан *6*, сетчатый фильтрующий элемент *3*, расположенный на центральном стержне *7* между успокоителем *4* рабочей жидкости и отражателем *2*, верхнюю *8* и нижнюю *5* опорные пластины для фиксации фильтрующего элемента *3*.

Рабочая жидкость поступает на очистку в фильтр-отстойник через штуцер. При этом непосредственное попадание неотстоявшейся рабочей жидкости к сетке фильтрующего элемента предохраняется отражателем. Далее рабочая жидкость стекает по конусной поверхности успокоителя через щель между внутренней поверхностью стакана и наружной кромкой успокоителя. Косой срез конусной поверхности и выступы на успокоителе обеспечивают равномерность щели для стока рабочей жидкости по периметру стакана. Вследствие потери скорости потока рабочей жидкости под успокоителем крупные частицы загрязнений оседают на дне стакана. Затем очищаемая рабочая жидкость проходит через фильтрующий элемент. Сетка фильтрующего элемента задерживает мелкие частицы загрязнений. Далее отфильтрованная рабочая жидкость поступает из фильтра через штуцер отвода в центральном стержне и подается по трубопроводу в гидравлическую систему.

Механические фильтры марки Micropur [5] фирмы "Knoll Mashinenbau GmbH" (Германия) очищают рабочие жидкости от частиц загрязнений с размерами более 3 мкм. Фильтры отличаются компактностью, технологичны в изготовлении и удобны в эксплуатации.

Фирма "Mann + Hummel GmbH" (Бельгия) выпускает фильтрационные установки для высокоэффективной механической очистки рабочих жидкостей силовых гидросистем, удаляя из них твёрдые частицы загрязнений свыше 5 мкм [6]. Изготовляемые бельгийской фирмой фильтрационные установки отличаются стабильной и надёжной работой, мини-

мальным техническим обслуживанием, низкими эксплуатационными расходами и длительным сроком службы.

Большой ресурс работы имеет гидравлический механический фильтр отстойного типа [7], состоящий из корпуса *1* (рис. 2) с входным *А* и выходным *Б* отверстиями, стакана-отстойника *4*, фильтрующего элемента *3*, внутри которого расположен трубчатый стержень *2* с винтом *5*. В нижней части пустотелого стержня *2* выполнены отверстия *В*. Площадь внутреннего поперечного сечения стержня *2* равна суммарной площади сквозных отверстий *В*. Для уплотнения неподвижных разъёмных соединений в фильтре применены резиновые кольца круглого поперечного сечения *8* и *9* и резиновые прокладки *6* и *7*. Течение очищаемой рабочей жидкости в фильтре показано стрелками.

Эффективно очищает рабочую жидкость от твёрдых и пластичных частиц, ржавчины и других загрязнений и удобен в эксплуатации механический фильтр [8], состоящий из цилиндрического корпуса, верхней и нижней крышек, фильтрующего элемента, центральной трубки и крепёжного винта, удерживающего в сборе детали фильтра. Фильтрующий элемент фильтра состоит из двух частей: наружной втулки, выполненной в виде сильфона из ткани для тонкой очистки, и внутренней втулки с тонкой ячеистой структурой для грубой очистки рабочей жидкости, вставляемой в наружную втулку. Рабочая жидкость на очистку поступает во входной штуцер в нижней крышке, поднимается по центральной трубке вверх, выходит через отверстие в верхней части центральной трубки во внутреннюю втулку, проходит через внутреннюю втулку в наружную втулку и выходит очищенной из корпуса фильтра через выходной штуцер в нижней крышке в гидравлическую систему.

Простотой конструкции, технологичностью изготовления, удобством эксплуатации, позволяющей быстро заменить фильтрующий элемент в случае его засорения, небольшими габаритными размерами и массой отличается гидравлический механический фильтр [9], состоящий из цилиндрического корпуса *5* (рис. 3), в верхней части полости которого ниже бурта *2* установлена шайба *4* с центральным резьбовым отверстием и вырезанными сегментами *13*. На боковой поверхности корпуса *5* выполнен выступ *14*, входящий в один из сегментов *13* шайбы *4*, для предотвращения проворачивания шайбы относительно корпуса. Крышка *16*

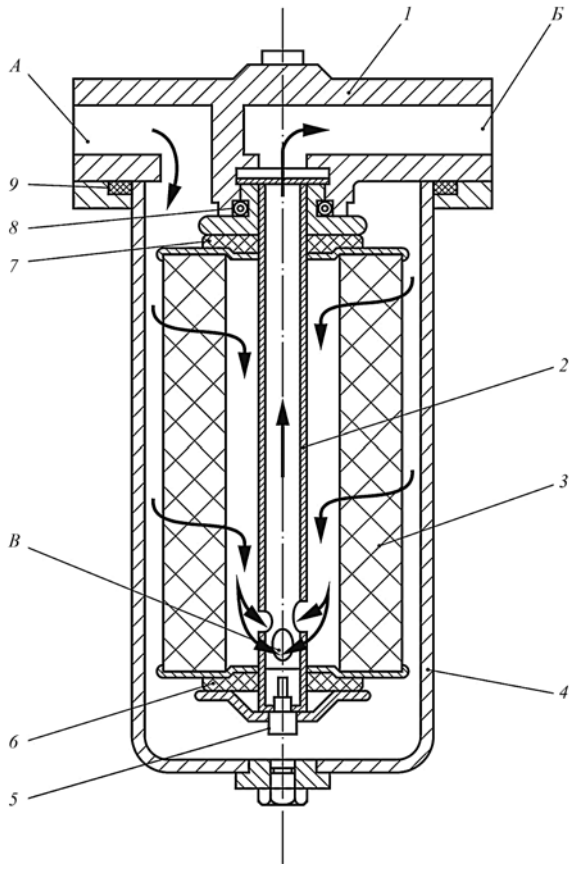


Рис. 2. Гидравлический механический фильтр отстойного типа с фильтрующим элементом, внутри которого расположен трубчатый стержень

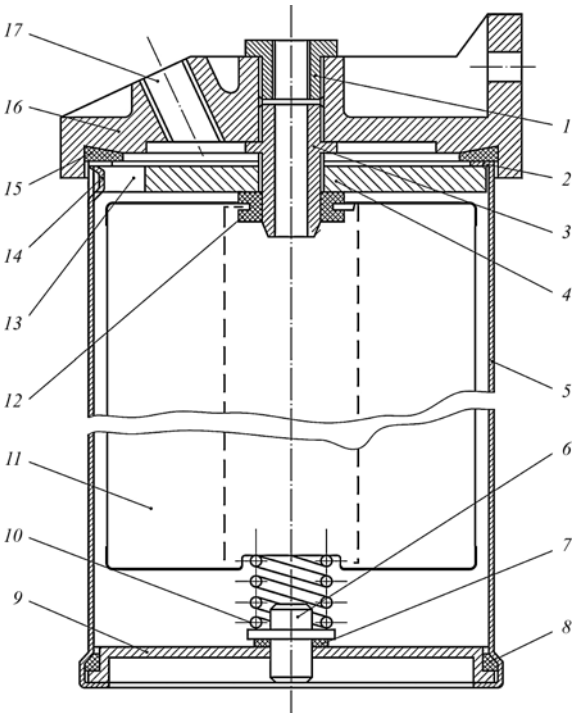


Рис. 3. Гидравлический механический фильтр с корпусом, позволяющим избежать при его изготовлении сварочные работы

связана с корпусом *5* через уплотнительное резиновое кольцо *15* при помощи штуцера *3* и наворачиваемой на него шайбой *4*. Фильтрующий элемент *11* поджат к шайбе уплотнением *12* пружиной *10*, опирающейся в сливную пробку *6*, на которой в месте контакта пробки с корпусом установлено резиновое уплотнительное кольцо *7*. В нижней части между корпусом и дном *9* установлено резиновое уплотнительное кольцо *8*.

Рабочая жидкость на очистку поступает в корпус фильтра через входной канал *17* в крышке *16*, заполняет внутреннюю полость корпуса, проходит через фильтрующий элемент, подвергаясь очистке от частиц загрязнений, далее через штуцера *3* и *1* по трубопроводу подается в гидравлическую систему.

Конструкция гидравлического фильтра позволяет избежать при изготовлении сварочные работы в полости корпуса, при которых невозможно полностью удалить окалину от сварного шва, откалывающуюся при дальнейшей работе фильтра. Частицы окалины вместе с рабочей жидкостью попадают в гидравлическую систему, что отрицательно сказывается на ресурсе работы гидроагрегатов.

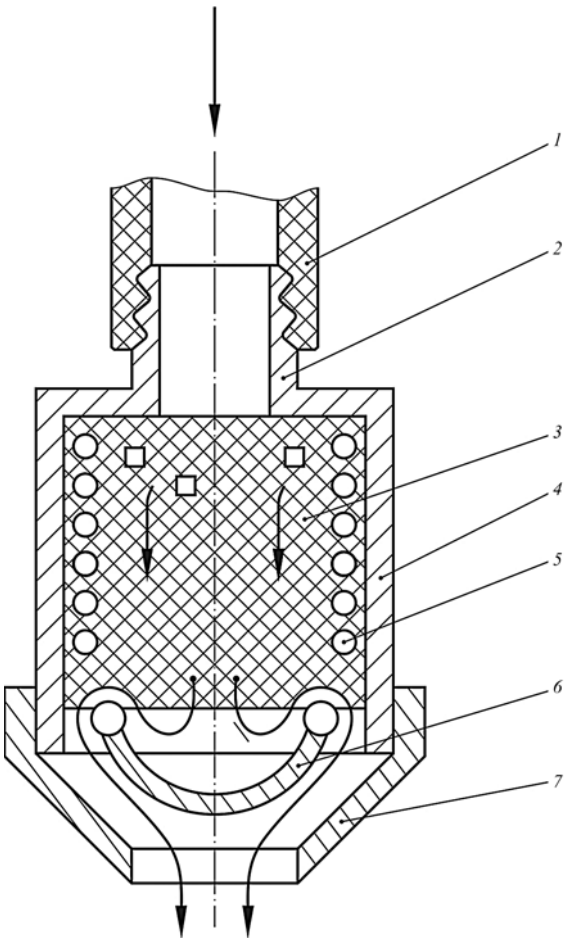


Рис. 4. Гидравлический механический фильтр с фильтрующим элементом из упругопластичного материала

Фирма "Roemeheld GmbH" (Германия) разработала гидравлический механический фильтр [10] двухстороннего действия (реверсивный, работающий в двух направлениях). Фильтр обладает небольшим гидравлическим сопротивлением, надёжен в работе, выдерживает давление очищаемой рабочей жидкости до 35 МПа, удобен в эксплуатации.

Простотой конструкции, низкой стоимостью изготовления и удобством эксплуатации отличается механический фильтр [11], содержащий корпус *4* (рис. 4) с входным *2* и выходным *7* патрубками, фильтрующий элемент *3* из упругопластичного материала, например, из поролона, и средство его саморегенерации в виде витой цилиндрической пружины *5*. Фильтрующий элемент установлен внутри пружины, которая, в свою очередь, установлена соосно внутри корпуса *4*. Один конец пружины *5* закреплён на внутренней поверхности корпуса *4,* а второй выполнен свободным (консольным) и снабжён гидравлическим сопротивлением в виде полусферы *6*, выпуклая часть которой направлена в сторону выходного патрубка *7*. Рабочая жидкость на очистку подаётся через входной патрубок *2* по резиновому рукаву *1* и поступает внутрь корпуса *4* фильтра, где проходит через фильтрующий элемент *3*, очищается от находившихся в ней твёрдых частиц загрязнений, входит частично в полость полусферы *6*, изменяет в ней направление своего движения на противоположное, а затем переливается через кромки полусферы и направляется к выходному патрубку. При взаимодействии протекающего потока очищенной рабочей жидкости с вогнутой частью полусферы возникает скоростной напор, который смещает полусферу вниз, растягивает пружину и фильтрующий элемент.

Проходящая под действием скоростного напора через растянутый фильтрующий элемент рабочая жидкость очищается от присутствующих в ней твёрдых частиц загрязнений (они остаются в фильтрующем элементе). Очищенная рабочая жидкость выходит через выходной патрубок.

При прекращении подачи рабочей жидкости на очистку пружина усилием сжатия возвращается в исходное положение (состояние), сжимает фильтрующий элемент, выдавливая из него остатки рабочей жидкости вместе с застрявшими твёрдыми частицами загрязнений.

Очень загрязнённая рабочая жидкость вместе с твёрдыми частицами загрязнений удаляется из корпуса фильтра через патрубок *7*. Использование пружины для накопления упругой энергии при фильтровании за счёт скоростного напора очищаемой рабочей жидкости и удаление твёрдых частиц загрязнений из фильтрующего элемента сжатием его пружиной после прекращения подачи рабочей жидкости на очистку позволяет автоматически осуществлять регенерацию фильтрующего элемента.

На выставке METAV—2006 фирма "Mann+ Hummel Hydromation N.V. GmbH" (Германия) показала гидравлические механические фильтры серии MT, обеспечивающие высокую степень очистки рабочих жидкостей [12]. Фильтры имеют расход очищаемой рабочей жидкости от 50 до 1500 л/мин и отличаются большим ресурсом работы.

Фирма "Z-Filter GmbH" (Германия) выпустила установку для механической очистки рабочих жидкостей [13], которая работает в автоматическом режиме, имеет обратную промывку фильтрующих элементов. Установка экономична и удобна в эксплуатации.

Для снижения трудоёмкости монтажа и повышения качества очистки рабочей жидкости разработана конструкция механического фильтра [14], состоящего из корпуса, выполненного в виде цилиндрического стакана *7* (рис. 5) с выходным штуцером *13* для отвода очищенной рабочей жидкости и с фланцем *5*. В днище стакана *7* установлен каркас в виде конического стакана *8* с отверстиями *A* на боковой поверхности для выхода очищенной рабочей жидкости. В днище стакана *8* установлен входной штуцер *12*, а на его внутренней поверхности находится многослойный фильтрующий элемент *9*. Внутри стакана *8* установлена коническая пробка *10*, прижатая пружиной *1*. Между фильтрующим элементом и пробкой установлена коническая спираль *11*, образующая проточную полость для прохождения потока очищаемой рабочей жидкости. К фланцу *5* стакана *7* герметично крепится крышка *4* с помощью болтов *3* и прокладки *6*. В крышке установлен выходной штуцер *2* для отвода загрязнённой рабочей жидкости. Рабочая жидкость для очистки подается под давлением через входной штуцер *12* в конический стакан *8*, где по проточной полости, созданной спиралью *11*, приобретает вращательное движение. За счёт вращательного движения поток очищаемой рабочей жидкости с частицами загрязнений испытывает воздействие

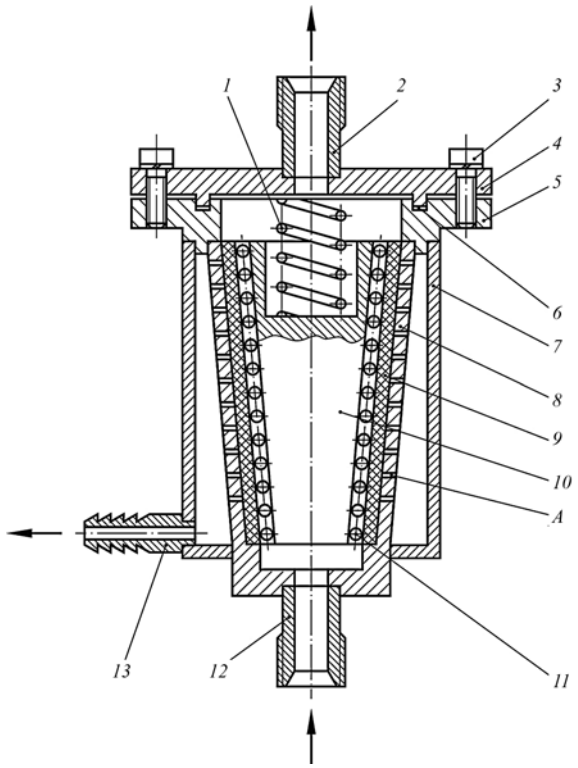


Рис. 5. Комбинированный фильтр для очистки рабочей жидкости со сменным механическим фильтрующим элементом

центробежных сил, прижимающих частицы загрязнений к поверхности фильтрующего элемента, а очищенная рабочая жидкость через фильтрующий элемент под действием этих сил и давления проходит через отверстия *A* в стакане *8* и выходит через штуцер. Частицы загрязнений, осевшие на фильтрующем элементе *9* под действием тангенциальных сил потока очищаемой рабочей жидкости, поступают к выходному штуцеру в ёмкость для очень загрязнённой рабочей жидкости. При загрязнении фильтрующего элемента на выходе из штуцера уменьшается расход очищенной рабочей жидкости, который регистрируется датчиком расхода (на рис. *5* датчик расхода не показан). Загрязнённый фильтрующий элемент вынимается из стакана *8* и направляется на регенерацию, а на его место устанавливается чистый фильтрующий элемент.

Для эффективной очистки рабочих жидкостей от частиц загрязнений фирма "Donaldson Company Inc." (США) разработала современный фильтрующий синтетический многослойный материал "Triboguard" [15], позволяющий на 73 % увеличить грязеёмкость механического фильтра и на 47 % снизить гидравлические потери (перепад давления рабочей жидкости на фильтре). Для обеспечения необходимой

прочности фильтрующего материала при работе под высоким перепадом давления на фильтре и сохранения равномерной структуры материала наружный и внутренний слой материала выполнены из мелкой прочной металлической сетки с эпоксидным покрытием.

Простую, надёжную и компактную конструкцию имеет удобный в эксплуатации механический переносной фильтр для рабочей жидкости [16], выполненный в виде полого цилиндрического корпуса *3* (рис. 6) с крышкой *2* и ручкой *1*. Внутри корпуса установлен фильтрующий элемент *6*, через который циркулирует очищаемая рабочая жидкость, поступающая в отверстие *А* и выходящая после очистки через отверстие *Б*. В отверстиях *А* и *Б* установлены соответственно впускной *4* и выпускной *5* клапаны.

Для улавливания из рабочей жидкости ферромагнитных частиц износа фирма "RT-Filtertechnik GmbH" (Германия) выпускает высокоэффективные силовые магнитные фильтры [17], которые в сочетании с расположенными после них механическими фильтрами надёжно улавливают частицы загрязнений (включая и немагнитные) с размерами до 0,1 мкм. В магнитных фильтрах используются постоянные магниты, создающие сильное магнитное поле. Кроме того, они оснащаются специальными успокоителями, благодаря которым очищаемый поток рабочей жидкости имеет в фильтре ламинарное течение со скоростью до 0,25 м/с.

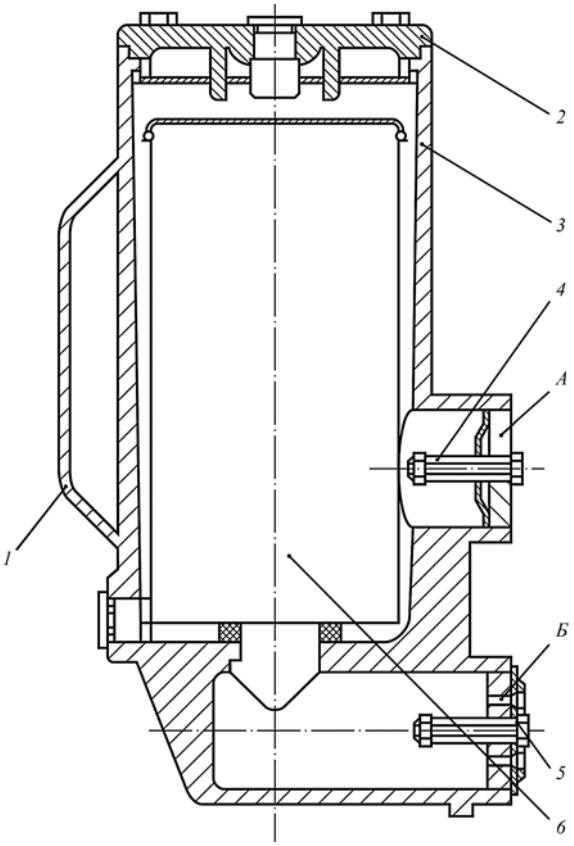


Рис. 6. Переносной механический фильтр для очистки рабочей жидкости с ручкой на корпусе

Фирма "Eclipse Magnetics Ltd" (Великобритания) разработала установку автоматической фильтрации рабочей жидкости марки Automag Scid [18], состоящую из силового магнитного фильтра, бака для очищаемой рабочей жидкости, трубопроводов и гидроаппаратуры. Установка обеспечивает качественную очистку рабочей жидкости не только от ферромагнитных частиц, но и от немагнитных твёрдых и пластичных частиц загрязнений.

Выпускаемые фирмой "Friess GmbH" (Германия) силовые магнитные фильтры [19] для очистки рабочих жидкостей от ферромагнитных частиц с размерами менее 1 мкм позволяют продлить срок службы как самих жидкостей, так и гидроагрегатов. Фильтры имеют производительность 70—900 л/мин, легко встраиваются в действующие гидравлические системы и удобны в эксплуатации.

Фирма "Küma Apparatebau GmbH und Co. KG" (Германия) выпускает гидравлические механические фильтры с бумажной лентой [20], отличающиеся низкой ценой, удобством обслуживания, высокой эксплуатационной готовностью и длительным сроком службы. Фильтры имеют полуавтоматическое управление, могут оснащаться сепараторами для предварительного улавливания ферромагнитных частиц, занимают в зависимости от марки площадь от 0,5 до 9,0 м^2. Расход очищаемой рабочей жидкости в фильтрах от 10 до 1000 л/мин.

Повышенную эффективность и надёжность работы имеет двухступенчатый фильтр [21], содержащий корпус *5* (рис. 7) с тангенциальным щелеобразным входом *А* для рабочей жидкости, фланцем *1* для крепления фильтра к вертикальной стенке и фланцем *12* для соединения с бункером *7* для частиц загрязнений, фильтрующий элемент *4* с сетчатой гофрированной шторой, внутренней цилиндрической трубкой *13* с отверстиями и опорными втулками *2* и *11*. Фильтрующий элемент уплотнён в корпусе по торцам и поджимается со стороны бункера пружиной *10*, расположенной в подвижном осевом направлении стакане *9* с уплотнением *6* в корпусе бункера, имеющего магнит *8* для сбора магнитного осадка. Вокруг фильтрующего элемента *4* расположена труба *3* с входными пазами для формирова-

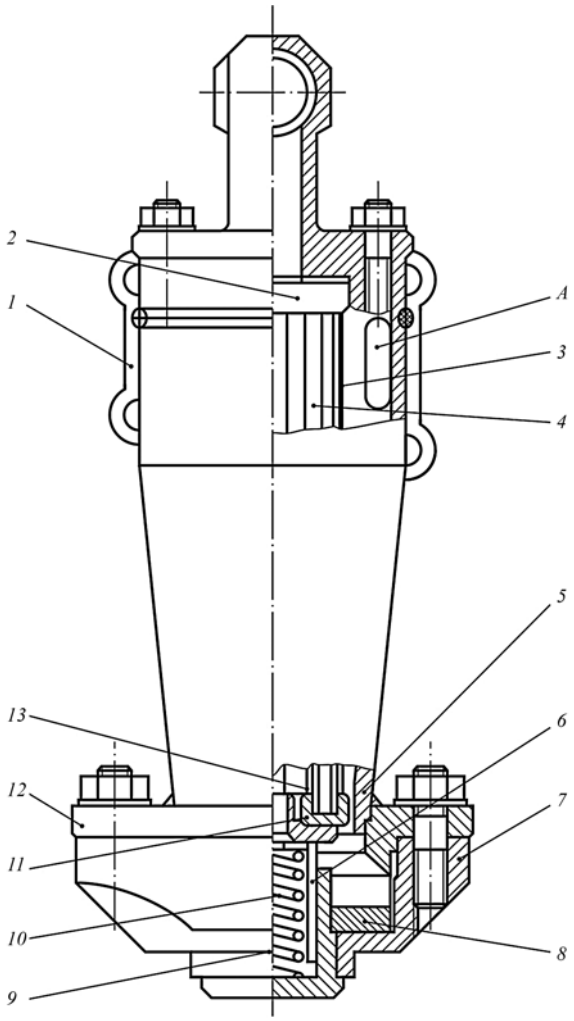


Рис. 7. Комбинированный фильтр для очистки рабочей жидкости с механическим фильтрующим элементом и гидроциклоном

ния потока очищаемой рабочей жидкости. Корпус двухступенчатого фильтра представляет собой гидроциклон (первая ступень силовой очистки), в котором отделение частиц загрязнений от рабочей жидкости происходит в поле действия центробежных сил. Очищенная рабочая жидкость через пазы трубы *3,* наружную поверхность фильтрующего элемента *4* и по трубке *13* выходит из фильтра.

Прогресс в разработке и освоении производства новых высокоэффективных конструкций механических и силовых фильтров для очистки рабочей жидкости систем гидроавтоматики и объёмного гидропривода машин и механизмов создаёт новые возможности для удовлетворения жёстких требований к чистоте рабочей жидкости, связанных с повышением надёжности и ресурса работы гидроагрегатов и гидравлических систем в целом.

Выбор типа конструкции и основных параметров гидравлического фильтра для конкретных условий эксплуатации в системах гидроавтоматики и объёмного гидропривода зависит от его назначения, места установки и требования качества очистки рабочей жидкости.

Библиографические ссылки

1. **Буренин В.В.** Объёмные гидравлические приводы агрегатов технологического оборудования: Учеб. пособие. М.: Изд-во МАДИ, 1998. 167 с.

2. **Бродский Г.С.** Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин. М.: НПК ГЕМОС Лтд. 2004. 360 с.

3. **Буренин В.В.** Новые конструкции фильтров для рабочей жидкости систем гидроавтоматики и объёмного гидропривода машин и механизмов // Автоматизация и современные технологии, 2008, № 1. С. 10—16.

4. **Куколев П.В., Шабанова Р.Ф.** Топливный фильтр-отстойник // Патент России № 2118199. 1998. Бюл. № 24.

5. **Sauberkeit**-basis für Präzision // Werkstatt und Betr., 2011, № 5. S. 72—73.

6. **Separieren** von Partikeln bis fünf Mikrometer // Werkstatt und Betr., 2007, № 1—2. S. 77.

7. **Заявка** на патент 102007024990 Германия. МПК B01D 35/02. Фильтр для очистки жидкости. Опубликовано 12.11.2008.

8. **Топливный** фильтр / Патент США № 7857971. 2010.

9. **Русаков В.С., Карбушев В.Ф., Русаков Ю.В., Карбушева Г.Н.** Топливный фильтр тонкой очистки // Патент России № 2174038. 2001. Бюл. № 27.

10. **Beiseitige** Filterung // Werkstatt und Betr., 2007. № 11. S. 102.

11. **Русинов П.С.** Фильтр для очистки жидкости // Патент России № 2202399. 2003. Бюл. № 11.

12. **Effektiver** Metallpartikelkiller // Masch. und Werkzeug., 2007. № 7—8. S. 126.

13. **Multifunktionaler** Filter // Masch. und Werkzeug., 2007. № 3. S. 9.

14.**Ковальский В.И., Васильев С.И., Безбородов Ю.Н.** Фильтр для очистки жидкости // Патент России № 2237509. 2004. Бюл. № 28.

15. **A cleaner** world for industry // Filtration solutions Donaldson. — Donaldson Company Inc., 2010. 28 p.

16. **Заявка** на патент 102008048454 Германия. МПК B01D 35/153. Фильтрующее приспособление. Опубликовано 04.02.2009.

17.**Magnetfiltration** ist und bleibt wichtig // DHF Intrulogistik, 2008. № 4. S. 26—28.

18. **Automated** filtration system reduced machine downtime // Mod. Mach. Shop, 2013. № 11. P. 152, 154.

19. **Sauber** bis runter auf ein Mikrometer // Werkstatt und Betr., 2011. № 5. S. 95.

20. **Grobes** Comeback // Masch. Und Werkzeug., 2007. № 7—8. S. 138—139.

21. **Заявка** на патент 102005004287 Германия. МПК B01D 35/27. Фильтр. Опубликовано 03.05.2005.

УДК 658.512:681.31

С.А. Кузнецов, канд. техн. наук
(Институт автоматики и электрометрии Сибирского Отделения Российской Академии Наук, г. Новосибирск)
S.A.KUZ@mail.ru

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ САПР — РЕЗУЛЬТАТ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ

Показано, что любая специализированная САПР может быть высокоэффективной и полноценной только в том случае, если она является результатом предметно-ориентированного подхода к её разработке. Анализ широко распространённых САПР в лёгкой промышленности показывает приверженность как зарубежных, так и отечественных компаний-разработчиков этой отрасли к предметно-ориентированному проектированию, чем и объясняется высокая эффективность таких программных продуктов.

Ключевые слова: компьютерные технологии, программный продукт, универсальная САПР, специализированная САПР, предметная область, профессионал, предметно-ориентированное проектирование (DDD), лёгкая промышленность.

It is shown that any specialized CAD can be highly effective and full value only if it is result of subject-oriented approach to its development. The analysis of widespread CAD in light industry shows commitment of both the foreign and domestic companies developers in this branch to subject-oriented design, than such software products high efficiency is explained.

Key words: computer technology, software product, universal CAD, specialized CAD, object field, expert, subject-oriented design (DDD), light industry.

Грандиозные темпы развития компьютерных технологий в современных условиях обусловили появление такой важнейшей области человеческой деятельности, как разработка систем автоматизированного проектирования (САПР), основной целью которых является повышение эффективности и качества проектирования. Поэтому широкое использование САПР специалистами различных предметных областей стало насущной необходимостью. В настоящее время невозможно представить себе сколь-нибудь серьезную организацию, тем более крупную производственную фирму или предприятие, которые обходились бы в своей работе без использования компьютерных технологий и функционирующих на их основе САПР, призванных автоматизировать порой сложнейшие процессы создания новых изделий и являющихся по своей сути компьютерными системами.

Сегодня повсеместная компьютеризация деятельности проектных организаций поднимает проектную работу на качественно новый уровень, при котором резко повышаются темпы и качество проектирования, более обоснованно решаются многие сложные инженерные задачи, которые раньше рассматривались лишь упрощённо. Всё это происходит, как показано в работе [1], главным образом благодаря использованию высокоэффективных специализированных САПР. Мировой опыт развития САПР показывает, что настоящими средствами автоматизации проектно-конструкторских работ являются именно специализированные САПР, а не универсальные графические пакеты наподобие систем AutoCAD, SolidWorks и КОМПАС, которые так и остались до настоящего времени по своей сути "электронными кульманами". Эти графические системы могут применяться лишь при разработке очень малых и достаточно простых проектов, автоматизируя только рутинную работу кульмана и не более того. Современному же проектировщику нужно гораздо больше, чем просто быстрое и красивое выполнение чертежей. Несмотря на то, что универсальные графические системы обладают на сегодняшний день богатым инструментарием, достигнутым благо-

даря преимущественному участию в их разработке профессиональных математиков и программистов, они не удовлетворяют насущные потребности большинства проектировщиков, работающих в многочисленных предметных областях. Поэтому только специализированные САПР, являющиеся по своему содержанию интеллектуальными системами, предоставляют проектировщику широкие возможности для быстрого воплощения в моделях своих замыслов и способны самостоятельно синтезировать проектные решения в конкретной предметной области. Никогда никакая универсальная САПР не будет лучше специализированной САПР, учитывающей все нюансы конкретной предметной области. При этом любая специализированная САПР может быть высокоэффективной и полноценной только в том случае, если она является результатом предметно-ориентированного подхода к её разработке. А это значит, как следует из работы [1], над созданием специализированной САПР должна работать команда разработчиков, главенствующая роль в которой принадлежит профессиональным и высококвалифицированным специалистам той предметной области, на которую собственно и ориентирована создаваемая САПР. Именно специалисты-профессионалы конкретной предметной области должны занимать ключевые позиции при разработке соответствующих предметной области моделей, которые бы отвечали реальным потребностям будущих пользователей. Несмотря на очевидную важность предметно-ориентированного подхода, при котором модели предметной области должны находиться в центре внимания при создании специализированной САПР, отечественные компании, работающие в области создания программного обеспечения для САПР, уделяют очень мало внимания моделированию предметных областей в практике разработки специализированных САПР. И, как следствие, результат анализа мирового рынка программных продуктов, выполненный в работе [2], показывает очевидную монополию на нём зарубежных специализированных САПР.

Явное отставание отечественных разработчиков программных продуктов в области создания специализированных САПР объясняется тем, что в России практически отсутствуют какие-либо пособия, ориентированные на внедрение моделирования предметных областей в процесс разработки специализированных САПР. При этом за рубежом и, в частности, в США начиная с 1990-х гг. появилось изрядное количество книг и учебных пособий по предметно-ориентированному проектированию (Domain-Driven Design, DDD). Поэтому весьма своевременно издательство "ВИЛЬЯМС" начало выпуск на русском языке серии книг зарубежных специалистов, посвящённых вопросам проектирования программных продуктов на основе предметно-ориентированного подхода**.** Обратим своё внимание только на некоторые из этих книг в порядке выхода их в издательстве Addison-Wesley Professional.

Один из лучших и опытных разработчиков программного обеспечения Эрик Эванс, который ещё с 1980-х гг. работал в качестве дизайнера и программиста больших объектно-ориентированных систем, является основоположником предметно-ориентированного подхода. В своей книге [3] он доходчиво и убедительно освещает наиболее общий, стратегический круг вопросов, связанных с предметно-ориентированным подходом к разработке программного обеспечения, имеющим определяющее значение при разработке полноценных программных продуктов. Это переработка и структуризация знаний о предметных областях, построение и анализ моделей предметных областей, проектирование программных объектов с точки зрения качества их взаимодействия и передачи логической структуры знаний, организация программ на основе крупномасштабных структур, выработка общего языка и стратегии коммуникации в группе. Как подчёркивается в книге, "особенность предметно-ориентированного проектирования такова, что в его процессе в модель закладывается огромное количество знаний, отражающих глубокое понимание предметной области и концентрацию на её ключевых концепциях. Это требует сотрудничества между теми, кто владеет предметом, и теми, кто умеет писать программы. Так как разработка носит итеративный характер, сотрудничество должно продолжаться на протяжении всего срока существования проекта".

В 2008 г. вышла книга Джимми Нильссона [4], в которой представлена информация о том, как строится чёткая и удобная модель предметной области, рассматриваются вопросы проектирования, ориентированного на предметную область. В книге описываются методы, которые относятся к ключевым технологиям разработки программных продуктов. Автором книги показано, что понимание принципов и движущих сил в предметной области имеет решающее значение для успешной

разработки программного обеспечения. Эта книга вносит большой вклад в осуществление крупных, но важных идей проектирования на основе предметной области и является практическим путеводителем в область проектирования специализированных САПР на основе соответствующих предметных областей.

В 2014 г. была издана на русском языке книга Вона Вернона по предметно-ориентированному проектированию [5], в которой автор описывает конкретные и реалистичные приёмы методики DDD, иллюстрируя их примерами из знакомых предметных областей. Как следует из книги, предметно-ориентированное проектирование в настоящее время является наилучшей методикой, позволяющей ускорить выполнение и обеспечить контролируемую модификацию программных проектов. Книга облегчает изучение методики DDD, позволяет идентифицировать наилучшие возможности для её применения и обойти распространённые ловушки. Используя приёмы, описанные в книге, организации могут уменьшить срок вывода продукта на рынок и создать более гибкое, масштабируемое и соответствующее целям бизнеса программное обеспечение.

Как следует из упомянутых выше источников [3—5], специализированные САПР могут быть высокоэффективными и полноценными программными продуктами только в том случае, если они являются результатом предметно-ориентированного подхода к их разработке. А это значит, что главным разделом создания любой специализированной САПР должно являться моделирование предметной области. В этом случае команда разработчиков специализированной САПР представляет собой группу специалистов, состоящую из программистов и специалистов предметной области, в результате тесного сотрудничества которых происходит переработка знаний из конкретной предметной области и зарождается её модель. Эта группа специалистов превращается в квалифицированных "переработчиков знаний", которые отсеивают всё лишнее и переделывают модель во всё более полезную форму. В конечном счёте, благодаря вкладу специалистов предметной области, модель отражает глубокие знания соответствующей предметной области, а сама САПР становится поистине интеллектуальной системой.

Использование предметно-ориентированного подхода при разработке специализированной САПР вполне естественно и обусловлено тем, что в этом случае в модель предметной области обязательно загружается огромное количество знаний, отражающих глубокое понимание предметной области. К тому же применение этого подхода позволяет систематизировано хранить всю информацию, необходимую для процессов проектирования и изготовления изделия. И это всё возможно, если над созданием специализированной САПР будет работать команда, главенствующая роль в которой принадлежит высококвалифицированным профессионалам того направления предметной области, на которое и ориентирована создаваемая САПР. Только в этом случае командой разработчиков САПР будет учтено современное направление в сфере информационных технологий, в котором на концептуальном уровне на первом месте находится информатизация знаний соответствующей предметной области, т. е. предметная ориентация.

Благодаря указанному обстоятельству настоящие специализированные САПР, в которых заложен предметно-ориентированный подход, появляются только в тех организациях и научно-производственных коллективах, где специалистами-профессионалами накоплен многолетний опыт в области проектирования и изготовления изделий в конкретной предметной области. Всё это очень характерно, например, для таких ведущих отраслей промышленности, как архитектура и строительство, судостроение и электроника, для которых разработчиками и поставщиками специализированных САПР, как показано в работе [2], являются, к большому сожалению, преимущественно зарубежные компании.

Однако в такой предметной области, как лёгкая промышленность, начиная с 90-х гг. вслед за зарубежными стали появляться и отечественные специализированные САПР, которые нисколько не уступают своим зарубежным аналогам. Посмотрим, как за рубежом и в России появляются специализированые САПР в этой области и обратим при этом в первую очередь внимание на такие зарубежные компании, программные продукты которых получили наиболее широкое распространение на мировом рынке и успешно работают на многочисленных предприятиях лёгкой промышленности. Среди зарубежных разработчиков таких САПР следует отметить такие компании, как "Gerber Technology" (США), "Lectra Sistemes" (Франция), "Investronica Sistemas" (Испания) и "Assyst GmbH" (Германия).

Gerber Technology — американская компания, основанная в 1968 г., начала первой про-

изводить оборудование для "сквозной" автоматизации моделирования одежды, конструирования лекал и промышленных раскладок. В 1969 г. "Gerber Technology" впервые в отрасли разработала и запатентовала автоматизированный резак Gerber Cutter. Начав первой, компания "Gerber Technology" и в настоящее время сохраняет за собой мировое лидерство в поставке комплексных программ и оборудования для лёгкой промышленности. С 1968 г. "Gerber Technology" инвестирует огромные средства в развитие перспективных технологий, доводя до совершенства предлагаемые клиентам решения.

Продукция "Gerber Technology" включает в себя программное обеспечение для планирования производства, создания дизайна, САПР для конструирования, моделирования и градации, трёхмерного проектирования и планирования раскроя, системы маркирования, фабричного настила ткани, раскройные комплексы и, в частности, установки для лазерного раскроя.

Первые поставки на территорию стран СНГ компания "Gerber Technology" осуществила в 1987 г., а активное продвижение "Gerber Technology" в странах СНГ началось с 2004 г.

Клиентами компании "Gerber Technology" в настоящее время являются свыше 80 % крупных производителей одежды.

Lectra Systems — французская фирма, основанная в 1973 г., является всемирно известным разработчиком программного обеспечения и оборудования для комплексной автоматизации процесса подготовки производства от создания лекал до раскроя.

"Lectra Systems" — мировой лидер в области технологических решений в лёгкой промышленности (резки, проектирования и разработки), успешно работающих на швейных, текстильных, трикотажных и обувных предприятиях во многих странах мира.

Фирма "Lectra Systems", так же как и компания "Gerber Technology", разрабатывает оборудование для подготовительно-раскройного производства (ПРП). В частности, одним из направлений в работе фирмы является повышение производительности и мощности создаваемых и выпускаемых ею установок для лазерного раскроя. В последнее время фирма "Lectra Systemes" расширила сферу своей деятельности от традиционных раскройных систем и оборудования до конструирования и моделирования изделий, формирования технологической документации и маркетинга.

Investronica Sistemas — испанская компания, была создана в 1980 г. на базе многолетнего опыта развития швейного производства, накопленного ведущим в Испании текстильно-швейным объединением INDUYCO, принадлежащим к известной торгово-промышленной группе ElCorte Ingles.

Компания "Investronica Sistemas" представляет на рынке систему INVESMARK, которая является наиболее продуктивной системой из числа САПР с традиционной схемой проектирования. Система включает в себя основные модули для конструирования, моделирования, градации и изготовления раскладок, а также автоматизированный настилочный и раскройный комплекс. Она достаточно проста в освоении и открыта для сопряжения с различными форматами автоматизированного проектирования. Система INVESMARK поставляется в Россию с 1996 г. и постоянно развивается.

Assyst GmbH — немецкая компания, являющаяся признанным мировым лидером по разработке систем автоматизированного проектирования одежды. Эта компания осуществляет свою деятельность с 1985 г. и обеспечивает своими системами десятку лидирующих немецких производителей на рынке швейной промышленности, а также около 30 % из 250 самых крупных европейских производителей.

Флагманским продуктом этой престижной технологической компании является система автоматизированного проектирования одежды CAD Assyst, представляющая собой комплекс программ "Конструирование, моделирование, градация", "Раскладка лекал". В лидирующих на рынке САПР одежды система CAD Assyst выделяется богатством функций, включая более чем 400 пользовательских функций.

САПР CAD Assyst отличается удобным интерфейсом, позволяющим быстро и легко решать необходимые задачи конструктора. Программа позволяет сохранить и использовать накопленный опыт конструктора, в 3—4 раза сократить трудозатраты на рутинные операции по построению и моделированию, не снижая качества конструкции и лекал. 40 % немецких швейных предприятий и 200 ведущих мировых брендов индустрии моды работают именно с этой системой. Официальным представителем компании "Assyst GmbH" в России с 2010 г. является ООО "ТрансМеталл".

В нашей стране активное внедрение САПР в лёгкой промышленности началось только после состоявшейся в Москве Международной выставки оборудования "Инлегмаш-88", на которой были продемонстрированы САПР

ранее упомянутых зарубежных компаний: "Investronica Sistemas", "Lectra Systems" и "Gerber Technology".

В 1988—1989 гг. на отечественных предприятиях лёгкой промышленности было внедрено большое число САПР ведущих западных фирм. При этом внедрение этих систем позволяло автоматизировать работу только отдельных участков производства, но не позволяло произвести комплексную автоматизацию предприятия в целом. Кроме того, зарубежные САПР имели ряд неустранимых недостатков и, главное, они не были адаптированы к условиям производства отечественных предприятий.

Выход из столь неблагоприятной ситуации был один — создание отечественных САПР для предприятий лёгкой промышленности. Поэтому начиная с 90-х гг. одновременно с внедрением лицензионных импортных САПР многие отечественные компании пошли по пути создания собственных специализированных. В настоящее время наибольшей популярностью среди этих компаний пользуются "САПРЛЕГПРООМ","ВИЛАР",НПО"ГРАЦИЯ" и ООО "КОМТЕНС".

Компания "*САПРЛЕГПРООМ*" (Москва), организованная в 1989 г., является широко известным разработчиком программ для предприятий лёгкой промышленности и занимает одну из лидирующих позиций на рынке информационных технологий. Коллектив профессионалов этой компании создал и внедрил на предприятиях России, Украины, Германии, Болгарии, Беларуси, Молдовы, Казахстана, Киргизии и Монголии программный комплекс JULIVI, который включает в себя систему компьютерного конструирования и проектирования швейных изделий (САПР одежды) и автоматизированную систему управления производством (АСУП), интегрированную с САПР одежды.

Специалисты компании "САПРЛЕГПРООМ" разработали нисколько не уступающую зарубежным аналогам программу "Электронный манекен", входящую в состав комплекса JULIVI и позволяющую значительно повысить гибкость и оперативность работы подготовительного производства предприятия.

Программный комплекс JULIVI соответствует требованиям, предъявляемым в настоящее время как к массовому производству, так и к производству одежды по индивидуальным заказам. Применение комплекса для конструктора ускоряет его работу в 4 раза, а для раскладчика — эффективность раскроя возрастает в 10 раз.

Компания "*ВИЛАР*" (Москва), основанная в 1989 г., занимается разработкой программного обеспечения для лёгкой промышленности. Одним из основных направлений деятельности компании является разработка системы проектирования одежды ЛЕКО. Большинство сотрудников компании "ВИЛАР" — модельеры-конструкторы, поэтому при разработке системы учтены реальные потребности конструкторов.

Система ЛЕКО, являющаяся одной из первых российских САПР для модельера-конструктора, предназначена для автоматизации процесса создания конструкций одежды и лекал. Программа максимально профессиональна и нет ничего такого в конструировании, чего бы ЛЕКО не смогла выполнить.

Систему ЛЕКО отличает от используемых в настоящее время отечественных и зарубежных САПР то, что она автоматизирует именно создание конструкции и лекал. В основу системы конструирования САПР ЛЕКО заложена задача максимально автоматизировать рутинные типовые действия конструктора при построении лекала, дать конструктору принципиально новые возможности построения лекал и предоставить возможность накопления и повторного использования опыта конструктора.

Система ЛЕКО идеально подходит для ателье и малых предприятий благодаря невысокой стоимости всего комплекта, большой базе данных моделей, полной базе данных размерных признаков по ГОСТ.

Научно-производственное объединение "*ГРАЦИЯ*" (Москва), созданное в 1992 г., является разработчиком известной отечественной САПР ГРАЦИЯ.

ГРАЦИЯ — САПР нового поколения, реализующая высокие компьютерные технологии и на качественно новом уровне решающая задачи проектирования и подготовки производства швейных изделий с улучшением всех показателей. Использование специальных математических методов отличает ГРАЦИЮ от зарубежных и отечественных систем.

Разработка системы велась в тесном сотрудничестве с ведущими специалистами передовых предприятий и учебных заведений. Это позволило учесть особенности отечественного производства и создать предпосылки для дальнейшего развития и совершенствования.

В настоящее время программа ГРАЦИЯ является одной из самых востребованных и профессионально разработанных САПР для швейной промышленности, предлагающей

комплексный теоретически проработанный и практически реализованный подход к конструированию лекал на компьютере.

Одним из направлений использования системы ГРАЦИЯ стала замена работающих на предприятиях зарубежных САПР. Так, в 1994 г. на трикотажном комбинате "Сейм" (г. Курск), где использовалась САПР компании Investronica Sistemas (Испания), была установлена САПР ГРАЦИЯ.

САПР ГРАЦИЯ с 1992 г. с успехом работает на 170 предприятиях и более десяти лет используется при обеспечении учебного процесса в 57 вузах, 54 колледжах и 12 лицеях СНГ.

Компания ООО "КОМТЕНС" была основана в 1992 г. Основным видом деятельности компании является разработка и поставка программных и технических средств системы автоматизированного проектирования лекал и раскладок швейного и трикотажного производства. Результатом многолетней работы коллектива разработчиков стал многофункциональный программный комплекс САПР СОМТЕНС, созданный на базе передовых компьютерных технологий, обеспечивающий комплексную автоматизацию подготовительно-раскройного производства и радикально упрощающий процесс проектирования лекал и раскладок. Комплекс САПР КОМТЕНС широко используется в индивидуальном и серийном швейном (трикотажном) производстве. В настоящее время САПР КОМТЕНС полностью заменила САПР компании Investronica Sistemas (Испания).

Из рассмотренных выше примеров видно, что в отличие от других отраслей на отечественных предприятиях лёгкой промышленности наравне с зарубежными программными продуктами успешно используются и отечественные специализированные САПР, нисколько не уступающие своим зарубежным аналогам. Благодаря тому, что специализированные САПР, разработанные в РФ, учитывают особенности отечественного производства в лёгкой промышленности, они пользуются повышенным спросом на рынке программных продуктов. Более того, поскольку зарубежные САПР не адаптированы к условиям российского производства, у отечественных предприятий лёгкой промышленности просматривается явная тенденция к замене этих САПР на аналогичные отечественные программные продукты.

Разработка в России специализированных САПР для лёгкой промышленности началась значительно позже, чем за рубежом. Несмотря на это, успехи, достигнутые при создании отечественных специализированных САПР в этой отрасли, объясняются тем, что они являются результатом предметно-ориентированного подхода к их разработке. Как видно из проведённого обзора, эти специализированные САПР создаются в компаниях и организациях, в которых накоплен многолетний опыт в области проектирования и изготовления изделий лёгкой промышленности, а в команде разработчиков этих программных продуктов главенствующая роль принадлежит специалистам-профессионалам конкретного вида изделий лёгкой промышленности.

Есть уверенность в том, что отечественные разработчики программных продуктов после ознакомления с зарубежными технологиями начнут более активно использовать при разработке САПР в различных отраслях промышленности предметно-ориентированный подход, имеющий определяющее значение при создании полноценных и высокоэффективных программных продуктов. Стоит учесть, что для таких, например, ведущих отраслей промышленности, как архитектура и строительство, судостроение и электроника на мировом рынке программных продуктов наблюдается явная монополия зарубежных специализированных САПР, разработка которых базируется на использовании именно предметно-ориентированного подхода. Однако на примере такой отрасли, как лёгкая промышленность хорошо видно, что благодаря предметно-ориентированному подходу к разработке программных продуктов были созданы специализированные САПР, ни в чём не уступающие своим зарубежным аналогам.

Библиографические ссылки

1. **Кузнецов С.А.** Разработка специализированных САПР — главное направление при создании высокоэффективных программных продуктов // Автоматизация и современные технологии, 2011. № 10. С. 29—34.

2. **Кузнецов С.А.** К вопросу о монополии зарубежных специализированных САПР на мировом рынке программных продуктов // Автоматизация и современные технологии, 2013. № 3. С. 39—46.

3. **Эванс Эрик.** Предметно-ориентированное проектирование (DDD): структуризация сложных программных систем. М.: Вильямс, 2010. 448 с.

4. **Джимми Нильссон.** Применение DDD и шаблонов проектирования. Проблемно-ориентированное проектирование приложений с примерами на C# и .NET. М.: Вильямс, 2008. 560 с.

5. **Вон Вернон.** Реализация методов предметно-ориентированного проектирования. М.: Вильямс, 2014. 656 с.

УДК 66.012-52

Д.С. Дворецкий, д-р техн. наук, проф., **С.И. Дворецкий,** д-р техн. наук, проф.,
С.Г. Толстых, канд. техн. наук, доц.
(ФГБОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет"),
Г.М. Островский, д-р техн. наук, проф.
(ОАО "Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский физико-химический институт имени Л. Я. Карпова", г. Москва)
topt@topt.tstu.ru

ИНТЕГРИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОИЗВОДСТВ

Предложена методология проектирования промышленных технических систем, формирующих предпосылки эффективного управления и автоматизации, с учётом неопределённости части исходных данных. Формализована многоэтапная итерационная процедура решения задач интегрированного проектирования промышленных автоматизированных технических систем и производств. Разработана методика расчёта конструктивных параметров и режимных переменных, при которых обеспечивается оптимальное и безопасное функционирование технических систем и производств.

Ключевые слова: интегрированное проектирование, промышленная техническая система, условия неопределённости, гибкость, управляемость, система автоматического управления, задача стохастической оптимизации.

Design methodology of the industrial engineering systems, forming prerequisites for effective control and automation by taking into account the uncertainty of the input data part is proposed. Multi-step iterative procedure for the integrated design task solving of industrial automatic systems and production is formalized. The calculation method of the structural parameters and conditional variables, providing optimal and safety operation of the technical systems and production.

Key words: integrated designing, industrial engineering system, the uncertainty conditions, flexibility, manageability, automatic control system, the stochastic optimization task.

Введение. В настоящее время важное значение приобретают теоретические и прикладные научные исследования, связанные с интегрированным проектированием промышленных технологических процессов, аппаратов и систем, например, пищевых и химических технологий, с высоким уровнем автоматизации, экономичности, энерго- и ресурсосбережения, экологической чистоты [1—3].

Проблема интегрированного проектирования автоматизированных технических систем и производств ставилась и частично решалась на протяжении многих десятилетий [1—8]. Однако до настоящего времени нет законченной теории и сравнительно простых (инженерных) вычислительных алгоритмов для комплексного решения этой сложной многокритериальной проблемы.

Сложность решения проблемы заключается в том, что при интегрированном проектировании промышленных технических систем и производств проектно-конструкторские решения всегда принимаются в условиях неопределённости (противоречий), связанных с неполнотой имеющейся информации на ранних этапах проектирования, с грубым (неточным) описанием (моделированием) технологических процессов и аппаратов, использованием упрощённых методик оценки показателей эффективности их функционирования и т. п. В связи с этим принципиально важно рассматривать влияние неопределённых исходных данных для проектирования на работоспособность и оптимальность функционирования промышленных технических систем (ТС) и производств с предпосылками эффективного управления и автоматизации [1, 9, 10].

При интегрированном проектировании промышленных ТС и производств определяются структура производства, типы, оптимальные конструктивные параметры и режимы функционирования технологического оборудования, класс и структура САУ, при которых достигается оптимальность функционирования автоматизированного комплекса "ТС — САУ" с точки зрения энерго- и ресурсосбережения,

гибкости, экологической безопасности и качества функционирования [3, 7—11].

Методика интегрированного проектирования промышленных ТС и производств пищевых и химических технологий. Интегрированное проектирование промышленных ТС пищевых и химических технологий представляет собой последовательный анализ альтернативных вариантов "ТС — САУ" или, другими словами, последовательное решение двух блоков задач (см. рисунок):

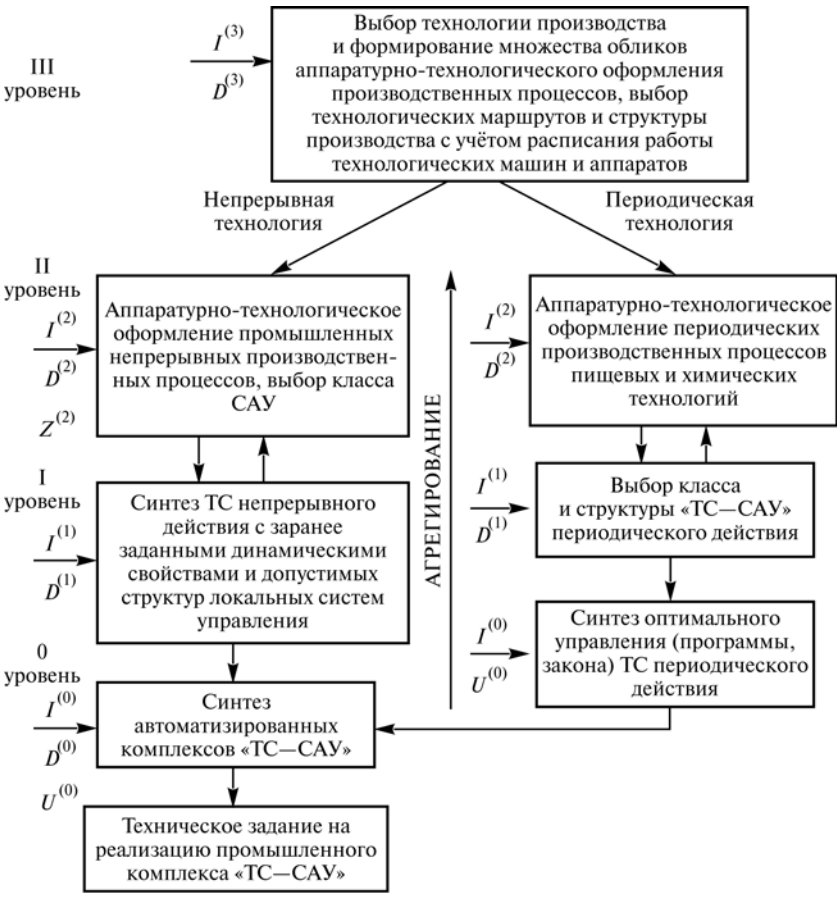
в первом блоке решаются задачи выбора типа $a \in A$ аппаратурного оформления ТС, набора переменных состояния (статических режимов или рабочих точек) $z \in Z$ ТС, множества H альтернативных структур САУ (системы связей) $h \in H$ между переменными состояния (рабочими точками функционирования ТС в статике) $z \in Z$ и управляющими переменными $u \in U$ ТС расчёта размеров $d \in D$ технологического оборудования и оптимальных стационарных режимов $z^* \in Z$ (оптимальных заданий регуляторам системы автоматической стабилизации (САС)) функционирования ТС (с использованием математических моделей статики);

во втором блоке решаются задачи синтеза ТС с заданными динамическими характеристиками, выбора класса $b \in B$ САУ, конструирования алгоритмов оптимального управления ТС или расчёта оптимальных настроек $s^* \in S$ регуляторов САС, поддерживающих оптимальные стационарные режимы (рабочие точки) функционирования $z^* \in Z$ ТС с заданной точностью.

В первом блоке после выбора типа $a \in A$ аппаратурного оформления технологических процессов пищевых и химических производств осуществляется конструирование ТС (технологических аппаратов и систем) с предпосылками эффективного управления и автоматизации. Задаются альтернативные наборы переменных состояния $z \in Z$ ТС и осуществляется синтез оптимальной структуры $h^* \in H$ САУ (системы связей между теми или иными наборами переменных состояния $z \in Z$ и управляющими переменными $u \in U$ ТС). Далее рассчитываются оптимальные стационарные режимы $z^* \in Z$ (оптимальные задания регуляторам САС) функционирования ТС с использованием математических моделей статики решением одно- или двухэтапных задач оптимизации в условиях интервальной неопределённости части исходных данных для проектирования [5, 6].

При интегрированном проектировании промышленных ТС пищевых и химических технологий требуется декомпозиция задачи, разработка стратегии применения методов автоматизированного проектирования, так как допустимая область проектных параметров $A \times B \times H \times D \times Z \times S \times \Xi$ строится в ходе процесса проектирования (см. рисунок). Этого можно добиться только на основе интегрированного подхода к проектированию ТС, её аппаратурно-технологического оформления и САУ в рамках единой постановки задачи.

При традиционном проектировании промышленных ТС, пищевых и химических производств при выборе структуры САУ часто предполагалось, что каналы управления ТС известны. В этом случае решение проблемы управляемости переносилось на стадию инженерного творчества и выполнялось средствами опыта и интуиции проектировщика.



Стратегия интегрированного проектирования промышленных ТС пищевых и химических технологий

Считалось очевидным, что грамотный инженер не мог предложить неуправляемую систему. Однако для сложных ТС пищевых и химических технологий не всегда следует полагаться на опыт и интуицию, так как ошибки при выборе неуправляемой структуры САУ могут привести к большим затратам средств и времени, связанными с необходимостью последующего перепроектирования ТС.

Проблема нахождения условий управляемости (возможности приведения ТС в заданное состояние с помощью управляющих воздействий) и наблюдаемости (возможности определения переменных состояния $z \in Z$ ТС по результатам измерения физических переменных в системе), т. е. краеугольных условий работоспособности ТС встала тогда, когда исследователям пришлось вплотную заняться синтезом регуляторов, синтезом не в смысле усовершенствования заданной конструктором стержневой структуры, а таким синтезом, который получил название "аналитического конструирования", при котором следовало начинать с нахождения алгоритма действия регулятора и реализующей его структуры по заданной цели управления [3].

Синтез структуры $h \in H$ системы управления режимами функционирования ТС начинают с построения математической модели динамики ТС, отображающей связь между выходными переменными ТС и входными (управляющими), и выбора (анализа) множества выходных переменных, управление которыми позволяет достичь поставленные цели.

Ещё одним важнейшим компонентом работоспособности промышленной ТС является наличие допустимых рабочих точек — устойчивых статических режимов функционирования для всего диапазона Ξ неопределённых условий, которые всегда имеют место в интегрированном проектировании.

Задача анализа работоспособности проектируемой промышленной ТС, определяемой векторами проектных параметров a и d, будет заключаться в определении режимных переменных z (например, заданий регуляторам САС) таких, чтобы выполнить ограничения (требования по спецификации качества выпускаемой продукции, производительности, энерго- и ресурсоэффективности, экологической безопасности производства и др.), описываемые неравенствами вида

$$g_j(a, d, z, \xi) \leqslant 0, j \in J, \forall \xi \in \Xi, \qquad (1)$$

где $g_j(\bullet)$ — проектные и регламентные требования к проектируемой ТС.

Эффективность функционирования промышленных ТС пищевых и химических технологий в статических режимах оценивается заданной целевой функцией. При этом в качестве множества вариантов A аппаратурного оформления ТС задаются альтернативные возможные конструкции аппаратов $a \in A$. В качестве класса систем автоматического управления ТС непрерывного действия рассмотрим САС оптимальных статических режимов функционирования ТС.

Структура локальных САС выбирается при решении задач первого блока с использованием множеств регулируемых (наблюдаемых) переменных и допустимых управляющих воздействий. При этом выбранные каким-либо образом структуры $h \in H$ локальных САС ранжируются по критерию экономической целесообразности с учётом наблюдаемости выходных переменных ТС, оценки затрат на разработку необходимых датчиков и приборов автоматического контроля, возможности и точности прогноза выходных переменных по косвенным показателям, управляемости ТС с той или иной комбинацией управляющих воздействий, динамических свойств каналов управления (показателей инерционности и регулируемости объекта управления) [4, 8].

Таким образом, решение задач первого блока заключается в том, чтобы среди множества возможных вариантов (моделей) проектируемой ТС пищевых и химических технологий найти наилучшие (оптимальные в том или ином смысле) альтернативы. Общим для задач принятия оптимальных решений, которые возникают в первом блоке задач при интегрированном проектировании ТС и САУ пищевых и химических технологий, является то, что они формулируются математически в форме задач нелинейного программирования для детерминированных объектов в условиях интервальной неопределённости исходных данных для проектирования.

Одноэтапное проектирование промышленной ТС тонкого органического синтеза. При одноэтапном проектировании промышленной ТС тонкого органического синтеза выделим два этапа: проектирования и функционирования. Уровень неопределённости в задаче одноэтапного проектирования не изменяется на этапе функционирования ТС, т. е. неопределённые параметры ξ (или их часть) не могут быть идентифицированы на этапе функционирования ТС. В этом случае режимные переменные $z \in Z$ (задания регуляторам САС)

находятся совместно с определением конструктивных переменных для всей области неопределённости Ξ.

Будем называть ТС гибкой, а соответствующее ей аппаратурно-технологическое оформление — допустимым, если на этапе её функционирования удовлетворяются все регламентные требования и проектные ограничения (3) при условии, что неопределённые параметры ξ могут принимать любые значения из заданной области неопределённости Ξ.

Постановку задачи и алгоритм одноэтапного проектирования рассмотрим на примере турбулентной трубчатой реакторной установки, в которой осуществляется непрерывный процесс диазотирования ароматических аминов нитритом натрия при синтезе азопигментов алого концентрированного, лакокрасочного и жёлтого светопрочного. Математическая модель непрерывного процесса диазотирования — это система нелинейных дифференциальных уравнений в обыкновенных производных для трубчатой части реакторной установки и система нелинейных алгебраических уравнений для диффузор-конфузорных устройств турбулизации потока реакционной массы [12—15].

Регламентные и проектные ограничения задачи интегрированного проектирования заключаются в следующем:

производительность Q реакторной установки диазотирования должна составлять 1000 т пигмента в год, т. е.

$$g_1(a, d, z) = 1000{,}0 - Q \leqslant 0; \qquad (2)$$

выход K_D диазосоединения должен составлять не менее 98 %, т. е.

$$g_2(a, d, z) = 98{,}0 - K_D \leqslant 0; \qquad (3)$$

для гладкого протекания реакции диазотирования концентрация азотистой кислоты $c_{\text{АК}}$ в зоне реакции должна находиться в диапазоне от 7 до 14 моль/м^3, т. е.

$$g_3(a, d, z) = 7{,}0 - c_{\text{АК}} \leqslant 0, \qquad (4)$$

$$g_4(a, d, z) = c_{\text{АК}} - 14{,}0 \leqslant 0; \qquad (5)$$

проскок Π_s твёрдой фазы амина не должен превышать 0,5 %, т. е.

$$g_5(a, d, z) = \Pi_s - 0{,}5 \leqslant 0; \qquad (6)$$

содержание диазосмол Π_χ на выходе из реакторной установки диазотирования не должен превышать 0,5 %, т. е.

$$g_6(a, d, z) = \Pi_\chi - 0{,}5 \leqslant 0; \qquad (7)$$

содержание нитрозных газов Π_σ на выходе из реакторной установки диазотирования не должен превышать 1 %, т. е.

$$g_7(a, d, z) = \Pi_\sigma - 1{,}0 \leqslant 0. \qquad (8)$$

Перечисленные требования выполняются при условиях интервальной неопределённости части исходных данных ξ для проектирования турбулентной трубчатой реакторной установки диазотирования: концентрации $[c_A]_s^{(0)}$ твёрдой фазы азо-амина (3-нитро-4-аминотолуола) и кинетического коэффициента β растворения полидисперсных частиц твёрдой фазы амина в водном растворе соляной кислоты, т. е. $\xi = ([c_A]_s^{(0)}, \beta)$. Номинальные (наиболее вероятные) значения неопределённых переменных и интервалы их изменения, соответственно, равны $[c_A]_s^{(0)} = 360$ моль/м^3; $\beta = 5{,}5 \cdot 10^5$ мкм^{1,4}кг/(моль с); $320 \leqslant [c_A]_s^{(0)} \leqslant 400$ моль/м^3; $5{,}0 \cdot 10^5 \leqslant \beta \leqslant 6{,}0 \cdot 10^5$ мкм^{1,4}кг/(моль с).

В качестве целевой функции одноэтапного проектирования промышленной ТС тонкого органического синтеза используем математическое ожидание $M_\xi\{C(\hat{a}, d, z, \xi)\}$ от приведённых затрат $C = (C_{\text{см}} + C_{\text{Эн}} + E_{\text{Н}} C_{\text{К}})/Q$ на производство 1 т пигмента, а в качестве ограничений — смешанные ограничения жёсткого и мягкого (вероятностного) типов, выполнение которых обеспечивает гибкость (работоспособность), экологическую безопасность и качество функционирования ТС независимо от того, какое значение принимает вектор неопределённых параметров ξ из заранее заданной области Ξ. Здесь $C_{\text{см}}$ — затраты на сырье и материалы (составляющая критерия по ресурсосбережению); $C_{\text{Эн}}$ — затраты на энергоносители (составляющая критерия по энергосбережению); $C_{\text{К}}$ — стоимость изготовления и транспортирования реактора, строительно-монтажных работ при его установке; $E_{\text{Н}}$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; Q — годовая производительность реакторной установки.

Постановка задачи одноэтапного проектирования: при фиксированных значениях количества вертикальных труб $\hat{a}_1$, диаметра $\hat{d}_{\text{тр}}$ и высоты $\hat{l}_{\text{тр}}$ трубы в секции турбулентного реактора требуется определить конструктив-

ные переменные d^* (общую длину L^* трубчатой части (или число секций N^* реактора), объём $V_{\text{кам}}$ диффузор-конфузора (камеры смешения)) и режимные z^* переменные (распределение температуры $T^{(i)*}$ и подачи нитрита натрия $G_N^*(i)$ по зонам $i = 1, 2, 3$ (длине трубчатой части)) реактора такие, чтобы целевая функция достигала минимального значения, т. е.

$$I(\hat{a}, d^*, z^*) = \min_{d,z} M_{\xi}\left\{\begin{array}{l} C(\hat{a}, d, z, \xi) = (C_{\text{см}}(\hat{a}, d, z, \xi) + \\ + C_{\text{Эн}}(\hat{a}, d, z, \xi) + \\ + E_{\text{Н}} C_{\text{К}}(\hat{a}, d, z, \xi)) / Q(\hat{a}, d, z, \xi) \end{array}\right\}$$

или

$$I(\hat{a}, d^*, z^*) = \min_{d,z} \sum_{i \in I_1} w_i C(\hat{a}, d, z, \xi^i) \quad (9)$$

при связях в форме уравнений математической модели $y = \Im(\hat{a}, d, z, \xi)$ статики непрерывного процесса диазотирования [12—14], мягких (вероятностных) ограничениях (2) — (5) и жёстких ограничениях (6)—(8), где w_i — весовые коэффициенты; $\sum_{i \in I_1} w_i = 1$; I_1 — множество номеров аппроксимационных точек в области Ξ. Мягкие ограничения (2)—(5) должны быть удовлетворены с заданной вероятностью $\rho_{\text{зад}}$.

При одноэтапном проектировании (9), (2)—(8) при заданном типе $\hat{a}$ аппаратурного оформления (турбулентной трубчатой реакторной установки диазотирования) требуется определить значения векторов конструктивных d^* и режимных z^* переменных, при которых достигается минимум целевой функции (9) независимо от того, какое значение принимает вектор неопределённых параметров ξ в заданной области Ξ. Если решение задачи не может быть найдено для заданной области Ξ, то необходимо поэтапно уменьшать область неопределённости Ξ, т. е. уточнять исходные данные для проектирования до тех пор, пока решение задачи не будет получено. Таким образом, формируется техническое задание на точность определения исходной информации для проектирования управляемых процессов и аппаратов пищевых и химических технологий.

Для решения одноэтапной задачи оптимизации со смешанными ограничениями (9), (2)—(8) введём множество аппроксимационных точек $S_0 = \{\xi^i : i \in I_0\}$ для приближённого вычисления целевой функции (9) и $S_0 = \{\xi^i : i \in I_0\}$ для накопления точек ξ с индексами $i \in I$, в которых нарушаются ограничения (2)—(8). Причём во множестве точек S_1 будут накапливаться точки, в которых нарушаются жёсткие ограничения (6)—(8): $(j = 5, 6, 7) \in J_1$, а во множестве S_2 — точки, в которых нарушаются мягкие ограничения (2)—(5): $(j = 1, 2, 3, 4) \in J_2$. Кроме того, введём обозначение $J = J_1 \cup J_2$, а в алгоритме будем использовать вспомогательную задачу НЛП;

$$I(\hat{a}, d^*, z^*) = \min_{d,z} \sum_{i \in I_0} w_i C(\hat{a}, d, z, \xi^i); \quad (10)$$

$$g_j(\hat{a}, d, z, \xi^l) \leqslant 0,$$
$$j \in J,\ l \in I,\ I = I_0 \cup I_1 \cup I_2. \quad (11)$$

Решение задачи (10), (11) заключается в определении оптимальных значений векторов конструктивных d^* и режимных (заданий регуляторам САС) z^* переменных для заданного типа $a^{(\mu)}$ конструкции реакторной установки диазотирования, при которых достигается минимальное значение целевой функции (10) и условие выполнения всех ограничений задачи (11) в заданном наборе точек ξ^l, $l \in I^{(\nu)}$.

Алгоритм.

Шаг 1. Принимаем $\mu = 1$, число альтернативных типов аппаратурного оформления ТС $\mu_{\text{зад}}$ и начальное приближение для конструкции ТС $a^{(\mu)}$.

Шаг 2. Принимаем $\nu = 1$, задаём начальные множества $S_0 = \{\xi^i : i \in I_0\}$, $S^{(\nu-1)} = S_1^{(\nu-1)} \cup S_2^{(\nu-1)}$, $I^{(\nu-1)}$ число n номеров точек $\xi^i : i \in I^{(\nu-1)}$ и начальные приближения $d^{(\nu-1)}$, $z^{(\nu-1)}$, $i \in I^{(\nu)}$, $\rho_{\text{зад}}$.

Шаг 3. Решаем вспомогательную задачу для выражений (10), (11):

$$I(a^{(\mu)}, d^*, z^*) = \min_{d,z} \sum_{i \in I_0} w_i \left(\begin{array}{l} C_{\text{см}}(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) + \\ + C_{\text{Эн}}(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) + \\ + E_{\text{Н}} C_{\text{К}}(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i)) / Q(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) \end{array}\right);$$

$$\Pr_{\xi}(g_1(a^{(\mu)}, d, z) = 1000 \text{ т. пигмента/г} - Q(a^{(\mu)}, d, z) \leqslant 0\} \geqslant \rho_{\text{зад}};$$

$$\Pr_{\xi}(g_2(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) = 98\ \% - K_D(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) \leqslant 0\} \geqslant \rho_{\text{зад}};$$

$$\Pr_{\xi}(g_3(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) = 7 \text{ моль/м}^3 - C_{AK}(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) \leqslant 0\} \geqslant \rho_{\text{зад}};$$

$$\Pr_{\xi}(g_4(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) = C_{AK}(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) - 14 \text{ моль/м}^3 \leqslant 0\} \geqslant \rho_{\text{зад}};$$

$$g_5(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) = \Pi_s(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) - 0{,}5\ \% \leqslant 0;$$

$$g_6(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) = \Pi_{\chi}(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) - 0{,}5\ \% \leqslant 0;$$

$$g_7(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) = \Pi_{\sigma}(a^{(\mu)}, d, z, \xi^i) - 1\ \% \leqslant 0,$$

и пусть $a^{(\mu)}$, $d^{(\nu)}$, $z^{(\nu)}$ есть решение этой задачи.

Шаг 4. Вычисляем

$$\chi_1(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}) = \max_{\xi\in\Xi} \max_{j\in J_1} g_j(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi) \quad (12)$$

с использованием алгоритма внешней аппроксимации [6]. Обозначим через $\bar{\xi}^{(\nu)}$ решение задачи (12) и проверяем выполнение условия

$$\chi_1(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}) \leqslant 0 \quad (13)$$

в точке решения $\bar{\xi}^{(\nu)}$ задачи (12). Если условие (13) не выполняется, то переходим к шагу 5, в противном случае — к шагу 6.

Шаг 5. Дополним множество точек $S_1^{(\nu)}$, в которых нарушаются ограничения (13), точкой $\bar{\xi}^{(\nu)}$, т. е. $S_1^{(\nu)} = S_1^{(\nu-1)} \cup \bar{\xi}^{(\nu)}$, $I_1^{(\nu)} = I_1^{(\nu-1)} \cup (n+1)$, увеличиваем число критических точек n на 1, $n = n + 1$, $p = 5$ и переходим к шагу 9.

Шаг 6. Проверяем выполнение мягких (вероятностных) ограничений

$$\Pr_{\xi}\{g_j(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi) \leqslant 0\} \geqslant \rho_j,\ j \in J_2. \quad (14)$$

Если условия (13), (14) выполняются, то решение для заданного типа аппаратурного оформления найдено $a^{(\mu)}$; $d^{(\mu)} = d^{(\nu)}$; $z^{(\mu)} = z^{(\nu)}$ и переходим к шагу 7.

Если условие (13) выполняется, а условие (14) не выполняется, то переходим к шагу 8.

Шаг 7. Проверяем выполнение условия "Множество альтернативных типов аппаратурного оформления ТС исчерпано?", т. е. $\mu \geqslant \mu_{зад}$. Если "Да", то получаем окончательное решение $a^* = a^{(\mu)}$; $d^* = d^{(\mu)}$; $z^* = z^{(\mu)}$; $i \in I^{(\nu)}$, и алгоритм заканчивает свою работу. В противном случае переходим к альтернативному типу аппаратурного оформления, т. е. увеличиваем число μ на единицу и переходим к шагу 2.

Шаг 8. Вычисляем

$$\chi_2(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}) = \max_{\xi\in\Xi} \max_{j\in J_2} \bar{g}_j\ (a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi) \quad (15)$$

с использованием алгоритма внешней аппроксимации [6]. Обозначим через $\bar{\bar{\xi}}^{(\nu)}$ решение задачи (15) и дополним точкой $\bar{\bar{\xi}}^{(\nu)}$ множество точек $S_2^{(\nu)}$, в которых нарушаются мягкие ограничения (14), т. е. $S_2^{(\nu)} = S_2^{(\nu-1)} \cup \bar{\bar{\xi}}^{(\nu)}$; $I_2^{(\nu)} = I_2^{(\nu-1)} \cup (n+1)$; $p = 8$, и увеличиваем число критических точек n на 1 ($n = n + 1$).

Шаг 9. Если $p = 5$, то переобозначим множества $S_2^{(\nu-1)}$, $I_2^{(\nu-1)}$, т. е. $S_2^{(\nu)} = S_2^{(\nu-1)}$; $I_2^{(\nu)} = I_2^{(\nu-1)}$, если $p = 8$, то $S_1^{(\nu)} = S_1^{(\nu-1)}$; $I_1^{(\nu)} = I_1^{(\nu-1)}$. Сформируем множества $S^{(\nu)} = S_0 \cup S_1^{(\nu)} \cup S_2^{(\nu)}$, $I^{(\nu)} = I_0 \cup I_1^{(\nu)} \cup I_2^{(\nu)}$, присвоим числу итераций ν значение $\nu + 1$ и переходим к шагу 3.

Рассмотрим некоторые пояснения алгоритму.

На шаге 6 неравенство $\chi_2(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}) \leqslant 0$ означает, что мягкие ограничения выполняются с вероятностью 1. Поэтому, если не выполняется условие (15), то заведомо не выполняется условие $\chi_2(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}) \leqslant 0$ и, следовательно, мы получим точку $\bar{\bar{\xi}}^{(k)}$, в которой нарушаются мягкие ограничения.

Предположим, что решена одноэтапная задача оптимизации (11) и получено решение [a^*, d^*, z^*]. В этом случае для реализации алгоритма необходимо обеспечить выполнение условий $a = a^*$, $d = d^*$, $z = z^*$ при изготовлении, монтаже и функционировании ТС.

Результаты решения задачи одноэтапного проектирования турбулентной трубчатой реакторной установки диазотирования (9), (2)—(8): общая длина трубчатой части реактора L = = 102 м; объём камеры смешения $V_{кам} = 0{,}025$ м^3; распределение температуры по зонам реактора 287 °K; 296,5 °K; 307,5 °K; распределение подачи нитрита натрия по зонам реактора 44,5; 32,5; 23 %; приведённые затраты производства 1 т пигмента в год 3100,8 у.е/т; производительность реакторной установки 1010 т/г; выход диазосоединения 99 %; заданное значение вероятности выполнения ограничений (2)—(5) $\rho_{зад} = 0{,}95$; проскок твёрдой фазы амина $П_s$ = = 0,45 %; содержание диазосмол в диазорастворе $П_\chi = 0{,}49$ %; содержание нитрозных газов в диазорастворе $П_\sigma = 0{,}96$ %; концентрация азотистой кислоты в диазорастворе $c_{АК}$ = = 7 моль/м^3.

Недостатком одноэтапного проектирования аппаратов и систем пищевой и химической технологии является то, что при определении оптимального режима z^* их функционирования на этапе проектирования не учитывается возможность уточнения векторов ξ и, соответственно, z при эксплуатации технологических аппаратов и систем. Такую возможность предоставляют постановки двухэтапных задач оптимизации [2, 3, 6].

Заключение. Одним из существенных результатов предложенной методики является разработка нового подхода к интегрированному проектированию управляемых промышленных автоматизированных технических систем и производств постановкой и решением одноэтапных задач оптимизации конструк-

тивных и режимных (заданий регуляторам САС) переменных ТС в условиях интервальной неопределённости части исходных данных для проектирования (параметров сырья, технологических переменных, коэффициентов математической модели ТС).

В общем случае можно говорить о задаче оптимального проектирования ТС и производств, создающих предпосылки для автоматизации, управления и обеспечивающих эффективность функционирования в смысле заданной целевой функции в условиях неопределённости.

Библиографические ссылки

1. **Кафаров В.В.** Методы кибернетики, химии и химической технологии. М.: Химия, 1985. 443 с.

2. **Островский Г.М., Зиятдинов Н.Н., Лаптева Т.В.** Оптимизация технических систем: учебн. пособие. М.: Кнорус, 2012. 432 с.

3. **Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Островский Г.М.** Новые подходы к проектированию химико-технологических процессов, аппаратов и систем в условиях интервальной неопределённости: монография. М.: Изд. дом "Спектр", 2012. 344 с.

4. **Девятов Б.Н.** Теория переходных процессов в технологических аппаратах с точки зрения задач управления. Новосибирск: СО АН СССР, 1964. 324 с.

5. **Halemane K.R., Grossmann I.E.** Optimal Process Design under Uncertainty // AIChE Journal, 1983. V.29. P. 425—433.

6. **Островский Г.М., Волин Ю.М.** Технические системы в условиях неопределённости: анализ гибкости и оптимизации: учебн. пособие для вузов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 319 с.

7. **Дьяконов С.Г., Елизаров В.В., Елизаров В.И.** Теоретические основы проектирования промышленных аппаратов химической технологии на базе сопряжённого физического и математического моделирования: моногр. Казанский ГТУ. Казань: КГТУ, 2009. 456 с.

8. **Бодров В.И., Дворецкий С.И.** Стратегия синтеза гибких автоматизированных ХТС // Теоретические основы химической технологии. 1991. Т. 25. № 5. С. 716—736.

9. **Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И.** Методология интегрированного синтеза энерго- и ресурсосберегающих ХТС // Вестник ТГТУ. 2008. Т. 14. № 4. С. 755—772.

10. **Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И.** Методология интегрированного синтеза энерго- и ресурсосберегающих ХТС // Вестник ТГТУ. 2008. Т. 14. № 4. С. 755—772.

11. **Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Островский Г.М.** Интегрированное проектирование энерго- и ресурсосберегающих химико-технологических процессов и систем управления: стратегия, методы и применение // Теоретические основы химической технологии. 2008. Т. 42. № 1. С. 29—39.

12. **Бодров В.И., Дворецкий С.И., Дворецкий Д.С.** Оптимальное проектирование энерго- и ресурсосберегающих процессов и аппаратов химической технологии // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т. 31. № 5. С. 542—560.

13. **Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Островский Г.М., Пешкова Е.В.** Оптимизация и аппаратурно-технологическое оформление непрерывных процессов тонкого органического синтеза в производстве органических полупродуктов и красителей // Вестник ТГТУ. 2008. Т. 14. № 1. С. 75—89.

14. **Бодров В.И., Дворецкий С.И., Кудрявцев А.М.** Математическое моделирование процесса получения азокрасителей // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 1985. Т. 28. № 1. С. 81—86.

15. **Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Пешкова Е.В.** Компьютерное моделирование турбулентных реакторных установок тонкого органического синтеза в условиях неопределённости // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2007. Т. 50, вып. 8. С. 70—75.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ПРИПУСКИ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ

Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов

2013 г. Объем 256 с. Формат 60x88 1/16 ISBN 978-5-94275-607-9 Цена 800 р.

Приведены нормативные материалы, необходимые технологу-машиностроителю для расчета и выбора припусков на механическую обработку, даны рекомендации по выбору вида заготовок, составлению маршрута обработки, нормы точности, а также операционные припуски на обработку различных поверхностей деталей.

Для инженеров-технологов заводов, проектно-конструкторских организаций, а также может быть полезна преподавателям и студентам вузов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

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

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

УДК 62-523

Е.В. Капля, канд. физ.-мат. наук, доц.
(Филиал Московского энергетического института, г. Волжский)
ev-kaple@yandex.ru

ОПТИМАЛЬНАЯ ПО РАСХОДУ ЭНЕРГИИ ДЛИНА ОТРЕЗКА ТЕРМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОПРИВОДОМ С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Получена формула, определяющая оптимальную (по расходу энергии) длину отрезка терминального управления сервоприводом с двигателем постоянного тока. Выполнена аппроксимация управляющего сигнала при оптимальной длине отрезка терминального управления. Сформулированы условия, при которых управляющий сигнал стремится к линейной функции времени. Найдена зависимость угловой скорости вала нагрузки от времени при оптимальной длине отрезка терминального управления.

Ключевые слова: терминальное управление, сервопривод, серводвигатель, двигатель постоянного тока, потребляемая энергия, конечные условия.

The formula determining the optimal (in accordance with energy consumption) terminal control segment length of servodrive with DC motor is derived. The control signal approximation at the optimum terminal control segment length is made. The conditions under which the control signal tends to a linear time function are stated. The dependence of the load schaft angular velocity versus time at the optimal terminal control segment length is finded.

Key words: terminal control, servodrive, servo motor, DC motor, power consumption, final conditions.

Введение. Терминальное управление объектом производится на конечном отрезке времени. Временной отрезок может задаваться в явном виде либо определяться моментом выполнения заданных краевых условий на координаты траектории движения объекта [1—3]. Терминальное управление позволяет парировать погрешность начальных фазовых координат управляемого объекта, поэтому терминальное управление необходимо в задачах робототехники и строительной техники.

Задача поиска оптимальной (по минимуму затраченной энергии) длины отрезка терминального управления сервоприводом имеет важное практическое приложение в системах управления различными объектами энергетики и, в частности, приводами лопастей ветроэнергетических установок [4] и приводами систем ориентации солнечных батарей.

При заданных энергетических ресурсах исполнительных элементов системы минимально допустимое значение длины отрезка T зависит от начальных и конечных условий на концах назначенной траектории движения. От величины T зависят требуемые значения управляющих сил, осуществляющих движение, и количество затраченной энергии. В статье [3] отмечено, что найти аналитические зависимости управляющих сил от величины T не представляется возможным. Задачу определения допустимого значения T решают численно. Начальное значение длины отрезка принимают заведомо меньше допустимого. В процессе решения системы уравнений, описывающих динамику объекта, фиксируют максимальные значения управляющих функций [3]. Проверяют выполнение ограничений для всех степеней свободы объекта. Выясняют, по каким степеням свободы указанные ограничения выполняются. Перечисленные операции повторяют при увеличенных отрезках T до тех пор, пока будет найдено такое значение T, при котором выполняются ограничения по всем степеням свободы.

Поиск аналитических выражений, позволяющих определить оптимальное значение T, — актуальная задача, которую можно решить для некоторого класса систем. В качестве объекта управления рассмотрим двигатель постоянного тока (ДПТ) с редуктором и механической нагрузкой.

Проанализируем зависимость энергии, затраченной сервоприводом на заданное угловое перемещение вала нагрузки, от длины отрезка терминального управления сервоприводом и сформулируем выражения, определяющие оптимальную по минимуму затраченной энергии длину отрезка терминального управления сервоприводом с ДПТ.

Математическая модель сервопривода постоянного тока. В основе известной [5] мате-

матической модели сервопривода постоянного тока — система дифференциальных уравнений:

$$J\frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} = k_m i(t) - M_c(t), \qquad (1)$$

$$L\frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = u(t) - k_\omega\frac{d\alpha(t)}{dt}, \qquad (2)$$

где J — суммарный момент инерции якоря ДПТ и механизма; $\alpha(t)$ — угол поворота якоря ДПТ; $i(t)$ — ток в цепи якоря; k_m — коэффициент пропорциональности, связывающий ток в цепи якоря и развиваемый двигателем вращающий момент $M_{вр}(t) = k_m i(t)$; n — передаточное число редуктора сервопривода; $u(t)$ — управляющее напряжение; L — индуктивность цепи якоря; R — активное сопротивление цепи якоря; $\omega(t)$ — угловая скорость вала ДПТ; k_ω — коэффициент противоЭДС, связывающий противодействующую ЭДС якоря $E(t)$ с угловой скоростью; $E(t) = k_\omega\omega(t)$; $M_{вр}(t) = k_m i(t)$ — вращающий момент, создаваемый ДПТ; $M_c(t)$ — момент сопротивления нагрузки, приведённый к валу двигателя.

Момент сил сопротивления будем считать линейно зависящим от угловой скорости вращения ротора ДПТ:

$$M_c(t) = \begin{cases} \chi_1\omega(t) + \chi_0, & \text{если } \omega(t) > 0; \\ \chi_1\omega(t) - \chi_0, & \text{если } \omega(t) < 0; \\ M_{вр}(t), & \text{если } \omega(t) = 0 \wedge |M_{вр}(t)| \leqslant \chi_0; \\ \chi_0, & \text{если } \omega(t) = 0 \wedge M_{вр}(t) > \chi_0; \\ -\chi_0, & \text{если } \omega(t) = 0 \wedge M_{вр}(t) < -\chi_0, \end{cases}$$

где χ_0 — момент трогания ротора двигателя и механической нагрузки сервопривода, приведённый к валу двигателя; χ_1 — коэффициент сопротивления движению.

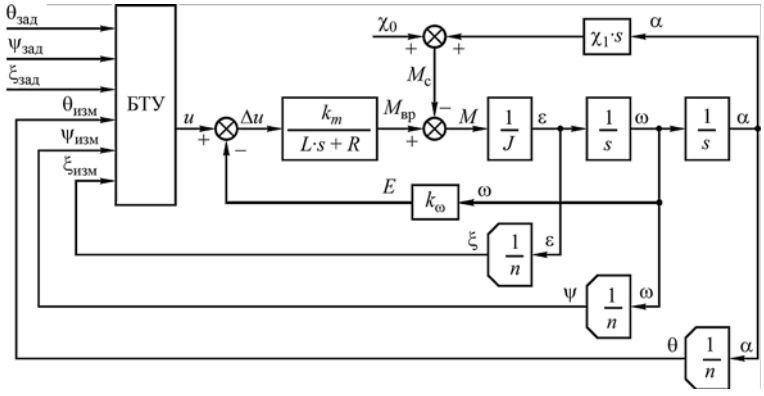


Рис. 1. Структурная схема САУ сервоприводом с блоком терминального управления

При жёсткой механической связи вала двигателя и ведомого вала нагрузки посредством зубчатых колес редуктора можно принять:

$$\theta(t) = \alpha(t)/n;\ \psi(t) = \omega(t)/n;\ \xi(t) = \varepsilon(t)/n,$$

где $\theta(t)$, $\psi(t)$, $\xi(t)$ — угол поворота, угловая скорость, угловое ускорение вала нагрузки соответственно; $\varepsilon(t)$ — угловое ускорение якоря ДПТ.

Структурная схема автоматизированной системы управления сервоприводом с блоком терминального управления (БТУ) представлена на рис. 1. На вход БТУ подаются заданные конечные значения фазовых координат вала нагрузки: $\theta_{зад}(T_0 + T) = \hat{\theta}$, $\psi_{зад}(T_0 + T) = \hat{\psi}$, $\xi_{зад}(T_0 + T) = \hat{\xi}$. Измеренные значения фазовых координат сравниваются с заданными. БТУ вычисляет и формирует управляющий сигнал $u(t)$ на основе выбранного закона терминального управления.

Терминальное управление при трёх конечных условиях. Известный [6] закон терминального управления при трёх конечных условиях применительно к сервоприводу на основе ДПТ представим в следующем виде:

$$u(t,\ T) = \begin{cases} k_u n\left(\dfrac{12\left(\hat{\theta} - \theta(t)\right)}{\left(\hat{T} - t\right)^2} - \dfrac{6\left(\hat{\psi} + \psi(t)\right)}{\hat{T} - t} + \hat{\xi}\right) \\ \text{при } t \in [T_0;\ T_0 + T], \\ 0 \quad \text{– в остальных случаях,} \end{cases} \qquad (3)$$

где $\hat{T} = T_0 + T + \Delta T$ — момент времени окончания переходного процесса; T_0 — момент времени начала процесса управления; T — длина отрезка терминального управления (продолжительность процесса управления); ΔT — жёсткость управления (временной интервал между ведущей и ведомой фазовыми точками); $\Delta T \ll T$; k_u — коэффициент пропорциональности между напряжением на обмотке ДПТ и угловым ускорением ротора; $k_u = JR/k_m$.

Параметры модели переходных процессов сервопривода. Рассмотрим модель процесса управления сервоприводом, обладающим следующими характеристиками: $L = 0{,}01$ Гн; $R = 2$ Ом; $k_m = 0{,}08$ Н·м/А; $k_\omega = 0{,}2$ В·с/рад; $J = 1{,}5$ кг·м^2; $n = 10$; $\chi_1 = 0{,}1$ Н·м·с/рад; $\chi_0 = 0{,}2$ Н·м при следующих начальных и конечных условиях: $\psi(T_0) = \omega(T_0) = 0$; $\theta(T_0) = 1°$; $\hat{\theta} = 4°$; $\hat{\psi} = \hat{\omega} = 0$; $\hat{\xi} = \hat{\varepsilon} = 0$. Примем: $t_0 = 0$; $T_0 = 1$ с; $\Delta T = 0{,}01$ с; $\Delta t = 10^{-3}$ с.

Расход энергии при терминальном управлении ДПТ. Энергия, потребляемая якорем ДПТ от источника электрической энергии в процессе терминального управления сервоприводом, выражается интегралом:

$$Q_m(T) = \int_{T_0}^{T_0+T} u(t,\ T)i(t,\ T)dt. \qquad (4)$$

Ток в цепи якоря ДПТ представим решением уравнения (2) относительно $i(t,\ T)$ для $t \geqslant T_0$:

$$i(t,\ T) = \exp\left(-\frac{R}{L}(t-T_0)\right)\left[\frac{1}{L}\int_{T_0}^{t}\exp\left(\frac{R}{L}(t'-T_0)\right)\times\right.$$
$$\left.\times\left[u(t',T) - k_\omega\frac{d\alpha(t',T)}{dt'}\right]dt' + i(T_0,T)\right], \qquad (5)$$

где $i(T_0,\ T)$ — ток в цепи якоря в момент времени T_0. При пуске двигателя можно принять $i(T_0,\ T) = 0$, так как ток через индуктивный элемент не может измениться мгновенно.

Оптимальное значение T_m длины отрезка терминального управления соответствует минимуму целевой функции $Q_m(T)$:

$$Q_m(T_m) = \min_{0<T<\infty} Q_m(T).$$

График целевой функции (4) показан на рис. 2. Зависимость $Q_m(T)$ при заданных начальных и конечных условиях и заданных характеристиках сервопривода имеет единственный минимум. Указанным характеристикам сервопривода и граничным условиям соответствует $T_m \approx 4{,}844$ с.

Оптимальный по расходу энергии закон управления ДПТ. Управляющий сигнал $u(t,\ T_m)$

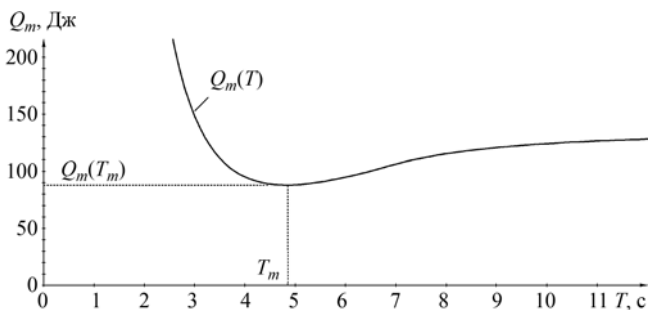


Рис. 2. График зависимости энергии, затраченной в процессе управления, от продолжительности процесса управления

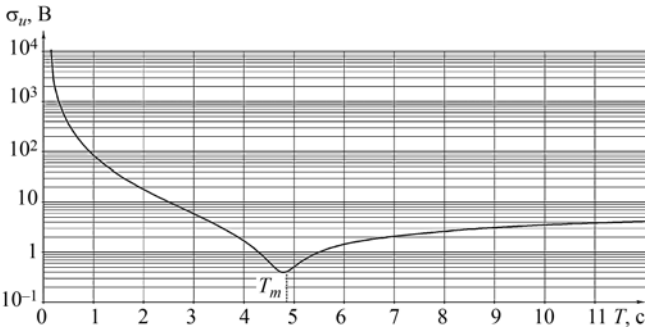


Рис. 3. График зависимости $\sigma_u(T)$

при $\psi(T_0) = \hat{\psi} = 0$ можно аппроксимировать кусочно-линейной по времени функцией $u^*(t)$:

$$u^*(t) = 2U_p\begin{cases}\operatorname{sign}\left(\hat{\theta} - \theta(T_0)\right)\left(1 - \dfrac{t-T_0}{T_m}\right), \\ \text{для } T_0 \leqslant t \leqslant T_0 + T_m, \\ 0 \text{ — в остальных случаях,}\end{cases} \qquad (6)$$

где U_p — пусковое напряжение сервопривода; $U_p = R\chi_0/k_m$.

Среднеквадратическое отклонение управляющего напряжения $u(t,\ T)$ при терминальном управлении от линейной зависимости $u^*(t)$ за время управления определяется выражением:

$$\sigma_u(T) = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{T_0}^{T_0+T}(u(t,T) - u^*(t))^2dt}\ .$$

Зависимость $\sigma_u(T)$ представлена в виде графика на рис. 3. Минимум функции наблюдается в окрестности $T = T_m$. Заданные характеристики сервопривода соответствуют $U_p = 5$ В, $\sigma_u(T_m) \approx 0{,}415$ В, что свидетельствует о возможности аппроксимации управляющего сигнала $u(t,\ T_m)$ при терминальном управлении линейной по времени зависимостью $u^*(t)$. График управляющего напряжения $u(t,\ T_m)$ при $T = T_m$ и линейная зависимость $u^*(t)$ представлены на рис. 4.

Оптимальная длина отрезка терминального управления. При $T = T_m$ выполняется условие $|u(T_0,\ T_m)| = 2U_p$. Полярность напряжения при пуске ДПТ определяется знаком углового перемещения: $\operatorname{sign}(u(T_0,\ T)) = \operatorname{sign}(\hat{\theta} - \theta(T_0))$, следовательно:

$$\operatorname{sign}(\hat{\theta} - \theta(T_0))u(T_0,\ T_m) = 2U_p. \qquad (7)$$

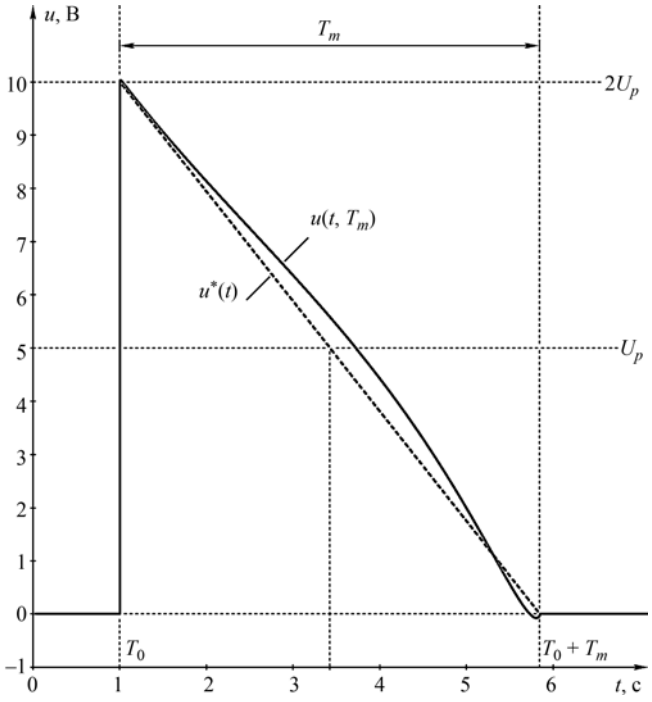


Рис. 4. Зависимость напряжения $u(t, T)$ при $T = T_m$ и линейная зависимость $u^*(t)$

Уравнение (7) с учётом формулы (3) для $(\psi(T_0) = \bar{\psi} = 0) \cap (\bar{\xi} = 0)$ принимает вид:

$$\text{sign}(\bar{\theta} - \theta(T_0))k_u n\frac{6\left(\bar{\theta} - \theta(T_0)\right)}{\left(T_m + \Delta T\right)^2} = U_p. \quad (8)$$

Решив уравнение (8) относительно T_m, получаем формулу:

$$T_m = \sqrt{6\frac{Jn}{\chi_0}\left|\bar{\theta} - \theta(T_0)\right|} - \Delta T =$$

$$= \sqrt{6\frac{k_u n}{U_p}\left|\bar{\theta} - \theta(T_0)\right|} - \Delta T. \quad (9)$$

Динамика нагрузки при оптимальном управлении сервоприводом. Угловая скорость $\psi(t)$ механической нагрузки в процессе терминального управления, когда $(T = T_m) \cap (\psi(T_0) = \bar{\psi} = 0)$, аппроксимируется параболической зависимостью $\psi^*(t)$:

$$\psi^*(t) = \begin{cases} 0 \text{ при } t < T_0, \\ k_2 t^2 + k_1 t + k_0 \text{ при } T_0 \leqslant t \leqslant T_0 + T_m, \\ 0 \text{ при } t > T_0 + T_m. \end{cases} \quad (10)$$

Угловое перемещение вала нагрузки равно интегралу угловой скорости:

$$\int_{T_0}^{T_0+T_m} \psi^*(t)dt = \bar{\theta} - \theta(T_0). \quad (11)$$

На основе заданных значений начальной и конечной угловой скорости $\psi(T_0) = \bar{\psi} = 0$ и равенства (11) получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} k_2 T_0^2 + k_1 T_0 + k_0 = \psi(T_0) = 0, \\ k_2\left(T_0 + T_m\right)^2 + k_1\left(T_0 + T_m\right) + k_0 = \bar{\psi} = 0, \\ k_2\frac{1}{3}\left(\left(T_0 + T_m\right)^3 - T_0^3\right) + \\ + k_1\frac{1}{2}\left(\left(T_0 + T_m\right)^2 - T_0^2\right) + k_0 T_m = \bar{\theta} - \theta(T_0). \end{cases} \quad (12)$$

В результате решения системы уравнений (12) относительно k_0, k_1, k_2 находим:

$$\begin{bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \frac{6\left(\bar{\theta} - \theta(T_0)\right)}{T_m^3}\begin{bmatrix} -T_0\left(T_m + T_0\right) \\ T_m + 2T_0 \\ -1 \end{bmatrix}.$$

Максимум функции $\psi^*(t)$ достигается при $t = T_0 + T_m/2$. Максимальная угловая скорость $\psi^*_{\max}$ вала нагрузки в процессе оптимального управления представляется формулой:

$$\psi^*_{\max} = \psi^*\left(T_0 + \frac{T_m}{2}\right) =$$

$$= k_0 - \frac{k_1^2}{4k_2} = \frac{3(\bar{\theta} - \theta(T_0))}{2T_m}.$$

Зависимости $\psi^*(t)$ и $\psi(t)$ при $T_0 = T_m$ показаны на рис. 5.

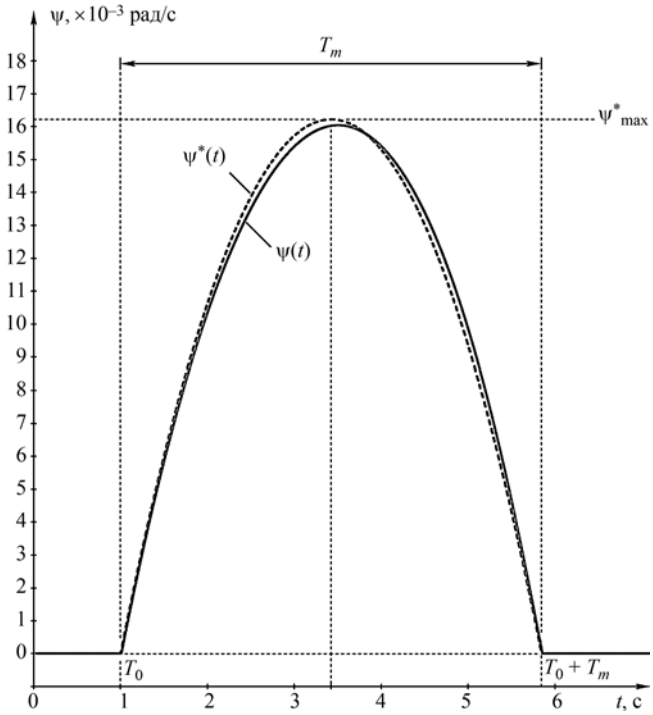


Рис. 5. Зависимость $\psi(t)$ при $T = T_m$ и параболическая зависимость $\psi^*(t)$

Линейное приближение оптимального управляющего сигнала. Выразив $i(t)$ из уравнения (1) и подставив в (2), получим уравнение:

$$A\frac{d^3\alpha(t)}{dt^3} + B\frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + C\frac{d\alpha(t)}{dt} = f(t, T), \quad (13)$$

где $A = LJ$; $B = RJ$; $C = k_\omega k_m$; $f(t, T) = k_m u(t, T) - RM_c(t) - L\frac{dM_c(t)}{dt}$.

Так как $\frac{d\alpha(t)}{dt} = \omega(t) = n\psi(t)$, то уравнение (13) для угловой скорости $\psi(t)$ вала нагрузки можно записать как

$$A\frac{d^2\psi(t)}{dt^2} + B\frac{d\psi(t)}{dt} + C\psi(t) = \frac{f(t,T)}{n}. \quad (14)$$

Замена $u(t, T) \to u^*(t)$ и $\psi(t) \to \psi^*(t)$ в уравнении (14) приводит к неравенству, в котором невязка левой и правой части минимальна, когда:

$$(T = T_m) \wedge \left(\frac{\Delta T}{T_m} \to 0\right) \wedge \left(\frac{k_\omega k_m + R\chi_1}{T_m}\frac{\chi_0}{J} \to 0\right) \wedge \left(L\left(\chi_1 - \frac{2J}{T_m}\right) \to 0\right). \quad (15)$$

Зависимость $u(t, T_m)$, соответствующую терминальному закону (3), можно аппроксимировать линейной по времени зависимостью $u^*(t)$. Минимальная погрешность аппроксимации достигается при выполнении условий (15).

Заключение. Получена новая формула для расчёта оптимальной (по расходу энергии) длины отрезка терминального управления сервоприводом с ДПТ:

$$T_m = \sqrt{6\frac{k_u n}{U_p}\left|\hat{\theta} - \theta(T_0)\right|} - \Delta T.$$

Эта формула позволяет оценить величину T_m при нулевой начальной и нулевой конечной скорости нагрузки.

Библиографические ссылки

1. **Батенко А.П.** Системы терминального управления. М.: Радио и связь, 1984. 160 с.

2. **Крутько П.Д.** Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М.: Машиностроение, 2004. 576 с.

3. **Крутько П.Д.** Терминальное управление движением лагранжевых систем // Известия академии наук. Теория и системы управления. 2002. № 6. С. 7—25.

4. **Капля Е.В.** Система финитного управления приводами лопастей ветроэнергетической установки // Автоматизация и современные технологии, 2013, № 5. С. 13—18.

5. **Фираго Б.И., Павлячик Л.Б.** Теория электропривода. Мн.: ЗАО "Техноперспектива", 2004. 527 с.

6. **Батенко А.П.** Управление конечным состоянием движущихся объектов. М.: Советское радио, 1977. 256 с.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ПЕЧИ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

учебное пособие **А.И. Маляров**

2014 г. Объем 256 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-735-9 Цена 400 р.

Изложены основы металлургической теплотехники применительно к печам литейного производства. Рассмотрены современные конструкции плавильных и нагревательных печей.

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 150700 "Машиностроение", профиль "Машины и технология литейного производства".

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК.685.1

В.С. Михайленко, канд. тех. наук, доц.
(Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина)

romannn30@gmail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРТНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Предложен комбинированный экспертный показатель качества процессов управления, позволяющий учесть требования эксперта-технолога к параметрам технологического процесса. Использование нового показателя в автоматизированных системах регулирования (АСР) способствует получению улучшенных переходных процессов по сравнению с АСР, рассчитанными по традиционным показателям качества.

Ключевые слова: показатели качества, переходный процесс, весовой коэффициент, система регулирования.

Combined expertise index of the control process quality, allowing to take into account the technology experts requirements to the technological process parameters is proposed. Using a new index in the automated adjustment systems (AAS) promotes to receipt of the improved transient processes compared with AAS calculated by using a traditional quality indicators.

Key words: quality indicators, the transition process, a weight index, adjustment system.

Введение. Большинство производственных объектов управления представляют собой сложные динамические системы. Аналитическое определение статических и динамических характеристик таких систем, например, в виде дифференциальных уравнений связано с большим объемом расчётных и исследовательских работ, как правило, не позволяющих получить точные математические модели без корректировки параметров типовых регуляторов в процессах пуска и наладки АСР.

В настоящее время большинство традиционных регуляторов (ПИ, ПИД) при проведении пусконаладочных работ настраиваются инженерами-наладчиками вручную. При этом выполняющий данную работу наладочный персонал, как правило, настраивает регулятор по реакции системы на ступенчатое воздействие, осуществляемое регулирующим органом, т.е. по переходной характеристике системы. Фиксируя вид этой характеристики при некоторой начальной настройке и имея из опыта определённое представление о характере влияния параметров регулятора на вид этой характеристики, эксперты-наладчики проводят соответствующую корректировку параметров настройки регулятора. Затем опыт повторяют и анализируют новую характеристику. Настройки оптимизируют до тех пор, пока переходный процесс регулирования не станет удовлетворительным. Данный подход является наиболее распространённым и его модификациям посвящены многочисленные публикации по адаптивным системам управления [1—3].

Основными критериями настройки регуляторов являются показатели качества переходных процессов, от выбора показателей и их значений во многом зависит дальнейшая эффективность АСР. Как правило, эксперты-наладчики или разработчики систем управления наиболее часто выбирают прямые показатели ввиду их простоты и наглядности. Прямые показатели качества определяют по графику переходного процесса, возникающего в системе управления при ступенчатом внешнем воздействии.

Рассмотрим основные показатели качества процесса управления [1] применительно к типовой одноконтурной АСР.

На рис. 1 показаны графики переходных процессов, вызванных ступенчатым изменением задания (рис. 1, *а*) и ступенчатым возмущающим воздействием (рис. 1, *б*).

К прямым показателям качества относятся следующие основные показатели: величина перерегулирования δ, динамический коэффициент регулирования R_g, время регулирования t_n, степень затухания ψ.

Перерегулирование δ определяется отношением первого максимального отклонения управляемой переменной $y(t)$ от её установив-

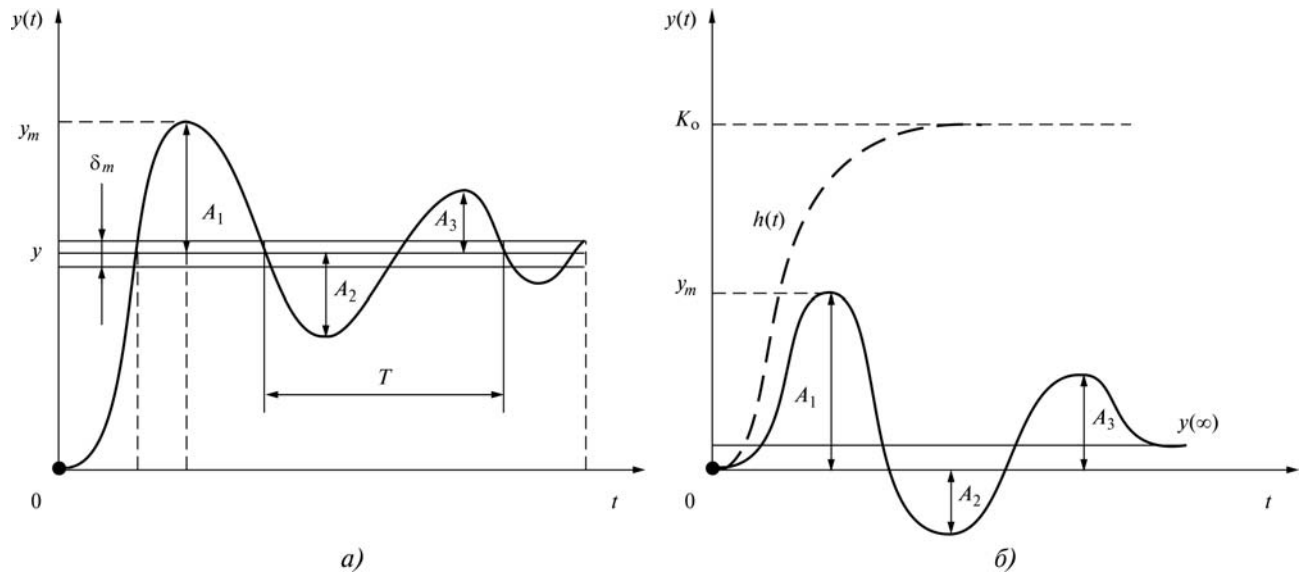


Рис. 1. Переходные процессы по каналам задающего (*а*) и возмущающего (*б*) воздействий

шегося значения $y(\infty)$ к этому установившемуся значению для переходных процессов, вызванных изменением задающего воздействия:

$$\delta = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)} 100\ \% = \frac{A_1}{y(\infty)} 100\ \%. \qquad (1)$$

Качество считается удовлетворительным, если перерегулирование не превышает 30—40 %.

Для переходных процессов, вызванных возмущающим воздействием на входе объекта (рис. 1, *б*), перерегулирование можно определить как отношение второго (отрицательного) максимального отклонения A_2 к первому максимальному отклонению A_1:

$$\delta = \frac{A_2}{y_m - y(\infty)} 100\ \% = \frac{A_1}{A_2} 100\ \%. \qquad (2)$$

Отметим, что первое максимальное отклонение y_m, возникающее от возмущения на входе объекта, является показателем качества. При формировании требований к системе указывают допустимое значение максимального отклонения.

Динамический коэффициент регулирования R_g равен отношению первого максимального отклонения y_m к отклонению выходной переменной $y(t)$ объекта, не охваченного обратной связью с регулятором (нерегулируемого объекта), вызванному тем же возмущением:

$$R_g = \frac{y_m}{K_0} 100\ \%, \qquad (3)$$

где R_g — коэффициент, показывающий, насколько эффективно компенсирующее действие регулятора на объект.

Время регулирования t_n определяется интервалом времени от момента приложения ступенчатого воздействия до момента, после которого отклонения управляемой величины $y(t)$ от её нового установившегося значения $y(\infty)$ становятся меньше некоторого заданного числа δ_n, т. е. до момента, после которого выполняется условие:

$$|y(t) - y(\infty)| \leqslant \delta_n. \qquad (4)$$

На практике величину δ_n принимают обычно равной 5 % от установившегося значения $y(\infty)$.

Дополнительными временными показателями качества являются время нарастания $t_н$, время достижения первого максимума t_m и период затухания колебаний T (см. рис. 1, *а*). Эти показатели вместе с t_n характеризуют быстродействие системы регулирования.

К прямым показателям качества относится также *степень затухания:*

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1}, \qquad (5)$$

где A_1 и A_3 — соседние максимальные отклонения (амплитуды) одного знака (рис. 1, *а*).

Интенсивность затухания колебаний считается удовлетворительной, если $\psi = 0{,}75—0{,}95$.

Колебания системы можно оценивать наряду с показателями δ и ψ количеством переходов N величины $y(t)$ через установившееся значение $y(\infty)$ на интервале t_n.

Рассмотренные прямые показатели качества удобно использовать в тех случаях, когда

график переходного процесса $y(t)$ можно получить экспериментально в реальной системе регулирования или моделированием АСР в специализированной программной среде, например, MatLab (Simulink).

Следует отметить, что особенности ПИ и ПИД-регуляторов таковы, что при оптимизации одного показателя качества, как правило, ухудшается другой. Например, уменьшение времени регулирования сопровождается ростом колебательности переходного процесса, а при желании получить апериодический переходной процесс появляется проблема уменьшения его длительности и первого отклонения и т. д. Данные противоречия затрудняют эффективную работоспособность АСР и требуют вмешательства в процесс настройки экспертов-технологов.

К особой категории показателей качества относятся интегральные оценки, которые вычисляют либо непосредственно по переходной функции, либо по коэффициентам передаточной функции системы.

Так используемый интегральный критерий качества переходного процесса [1]:

$$I = \int_0^\infty h(t)dt \to \min, \qquad (6)$$

также не учитывает возможность уменьшения времени регулирования с одновременным сглаживанием колебательности, так как

$$I = \frac{K_\lambda T_и}{K_{об} K_р}, \qquad (7)$$

где K_λ — коэффициент объекта по каналу возмущения; $K_{об}$ — коэффициент усиления объекта по каналу задания; $K_р$ — коэффициент пропорциональности; $T_и$ — постоянная интегрирования (настройки ПИ-регулятора).

Это дополнительно влияет на надёжностные характеристики оборудования, в частности на время безаварийной работы, а также сопровождается перерасходом топлива и электроэнергии на собственные нужды.

Теплоэнергетические агрегаты ТЭС, как объекты управления, характеризуются следующими особенностями:

1. Длительное и значительное превышение температуры перегрева пара относительного заданного значения может привести к повреждению труб пароперегревателя. В этом случае качество АСР связано с долговечностью работы (сроком службы) основного оборудования. Также кратковременные, но значительные отклонения, так называемые "выбросы" регулируемой величины, могут привести к повреждению основного оборудования. Например, перепитка барабанного парового котла водой может явиться причиной заброса воды в паропровод и повреждения турбины [4].

2. Основными причинами остановов энергоблоков являются дефекты котлов, в которых происходят сложные физико-химические процессы горения топлива, радиационного и конвективного теплообмена. Доля вынужденных остановов из-за отказа поверхностей нагрева составляет 37—45 % от общего числа отказов энергоблоков. Основная причина отказов заключается в исчерпании запаса длительной прочности металла. Превышение расчётной температуры всего на 10 °С снижает долговечность металла в 1,7—2,5 раза. Более 60 % повреждений сосредоточены в пароперегревательном тракте. По данным работы [5], снижение ресурса пароперегревателей из стали 12Х1МФ в 61 % случаев вызвано перегревом металла (38 % выше расчётной температуры и 23 % выше предельно допустимой 585 °С). Перегревы и колебания температуры металла ускоряют микроструктурные изменения, окисление, процессы ползучести и вызывают растрескивание защитной оксидной пленки (окалины) [5].

3. При изменении нагрузки котла изменяются температура и механические напряжения металла поверхностей нагрева, а также давление теплоносителя, пара и температуры пара. Надёжность отдельных его элементов зависит от эффективности управления динамическими процессами в котле. Соответственно, основной задачей является получение оптимальных значений параметров управления для переходного процесса, качество которого можно оценить по требованию экспертов-технологов. Для того чтобы обеспечить достаточно хорошее качество управления сложными тепловыми объектами в условиях существенной априорной неопределённости или частичного изменения параметров объекта управления, вызванного сменой режима, необходим поиск новых подходов в области показателей качества.

С учётом того, что ключевую роль в выборе показателей качества и расчёте значений параметров регуляторов выполняют эксперты (наладчик и технолог), предложено рассмотреть экспертную АСР (рис. 2), структура которой включает идентификатор, объект регулирования, регулятор, осуществляющий расчёт настроек, идентификатор, определяю-

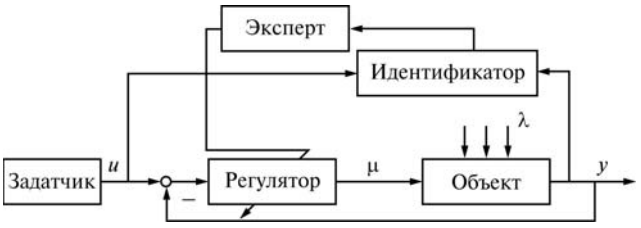


Рис. 2. Экспертная автоматическая система регулирования:
u — задание; *y* — выход объекта; μ — управляющее воздействие; λ — возмущения

щий значения показателей качества переходного процесса, и эксперта, отдающего приоритет ключевым показателям, так как одновременная оптимизация всех показателей невозможна. Роль эксперта может выполнять программный модуль, реализующий экспертную систему.

Из анализа научных публикаций и требований, предъявляемых к параметрам протекания теплоэнергетических процессов, можно сделать вывод в пользу выбора двух ключевых показателей качества переходного процесса, определяющих надёжность технологических агрегатов: (перерегулирование) и экономичность энергоресурсов (время регулирования). В силу сложности одновременной оптимизации обоих предложен *экспертный комбинированный показатель качества P* переходных процессов управления, представляющий собой минимум суммы взвешенных отношений перерегулирования к допустимому перерегулированию и времени регулирования к допустимому времени регулирования переходного процесса. Использование предлагаемого показателя в интеллектуальных АСР позволяет достичь ожидаемых переходных процессов соответствующих технологическому регламенту, по сравнению с традиционными показателями при функционировании объектов в условиях влияния глубоких внешних и внутренних возмущений,

$$P = \min_{i,\,j} (w_L G_i + w_R G_j), \qquad (8)$$

где $i = 1,...,n$; $j = 1,...,m$; n, m — количество переходных процессов при вариации параметров типовых регуляторов АСР; w_L, w_R — весовые коэффициенты; $w_L + w_R = 1$; взвешенное время регулирования: $G_j = T_{pj}/T_{dj}$; T_{pj} — время регулирования; T_{dj} — допустимое время регулирования; взвешенное перерегулирование: $G_i = \Delta G_i / \Delta G_{\partial i}$; ΔG_i — перерегулирование; $\Delta G_{\partial i}$ — допустимое перерегулирование.

Параметры: $\Delta G_{\partial i}$, T_{dj}, w_L, w_R определяет эксперт.

Для апробации предложенного показателя и сравнения его с типовыми проведём компьютерный эксперимент.

Пусть с точки зрения эксперта-технолога время регулирования переходного процесса значительно важнее его колебательности (например в 5 раз, что вызвано учётом перерасхода топлива). Следовательно, согласно методике [6] он приписывает элементу 2, 1 матрицы весовых коэффициентов $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11}...a_{12} \\ a_{21}...a_{22} \end{bmatrix}$ значение 5, т.е. $a_{21} = 5$. Это автоматически предполагает, что $a_{12} = 1/5$. Обозначив через R и L критерии времени регулирования и перерегулирования, можно записать матрицу сравнения в виде

$$\mathbf{A} = \begin{matrix} \\ L \\ R \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} L & R \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{5} \\ 5 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}. \qquad (9)$$

Относительные веса критериев R и L можно определить делением элементов каждого столбца на сумму элементов этого же столбца. Следовательно, для нормализации матрицы **A** делим элементы первого столбца на величину 1 + 5 = 6, элементы второго — на величину 1 + 1/5 = 1,2. Искомые относительные веса w_R и w_L критериев вычисляются теперь в виде средних значений элементов соответствующих строк нормализованной матрицы **A**. Следовательно,

$$N = \begin{matrix} \\ L \\ R \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} L & R \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} 0{,}17 & 0{,}17 \\ 0{,}83 & 0{,}83 \end{pmatrix} \end{matrix}.$$

Средние значения элементов строк

$$W_R = (0{,}83 + 0{,}83)/2 = 0{,}83,$$
$$W_L = (0{,}17 + 0{,}17)/2 = 0{,}17. \qquad (10)$$

Проведём *имитационное моделирование* АСР с ПИ-регулятором и инерционным объектом второго порядка с запаздыванием при влиянии на объект внешнего возмущения в виде инерционного звена (рис. 3).

Пусть по требованиям технологического процесса допустимое время регулирования T_d составляло 80 с, а допустимое перерегулирование $\Delta G_д = 20$ %. Безразмерные настройки ПИ-регулятора рассчитаны по табличному методу Копеловича [7] и составили $K_{р1} = 0{,}25$, $T_{и1} = 15$. Переходный процесс первой АСР показан на рис. 4.

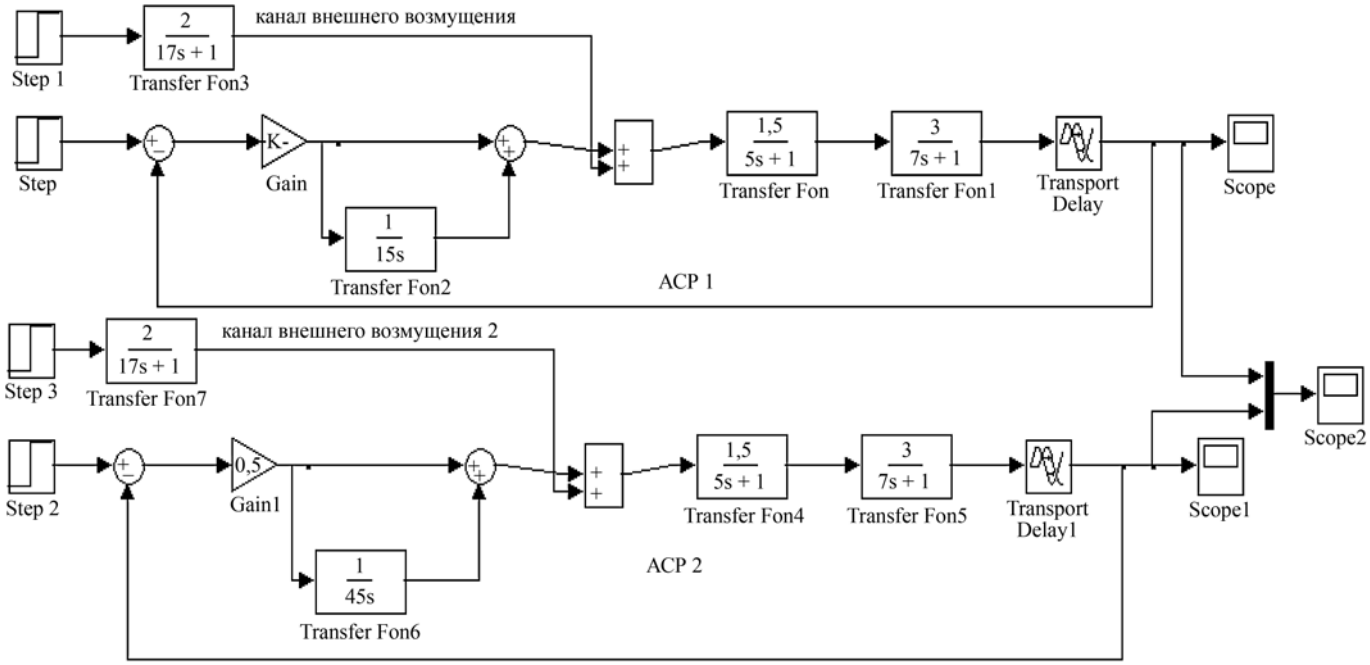


Рис. 3. Имитационная схема моделирования одноконтурной АСР

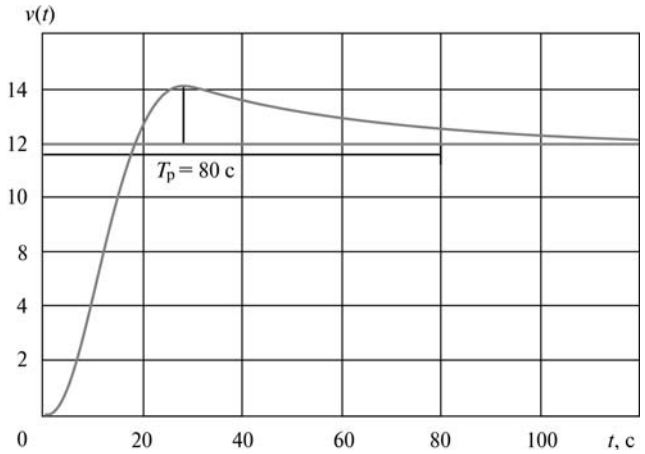


Рис. 4. Переходный процесс первой АСР

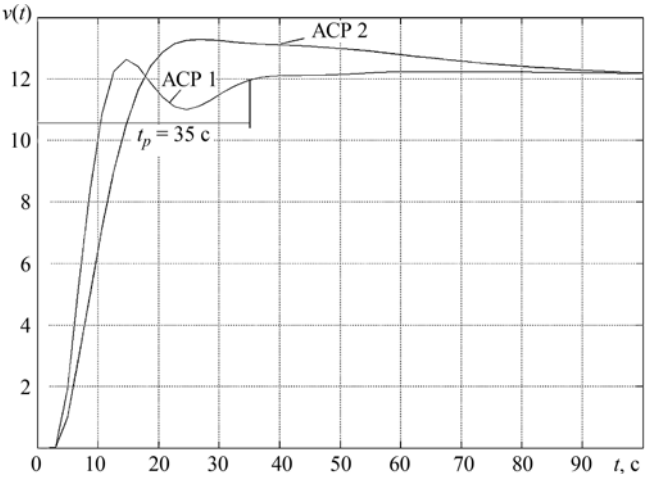


Рис. 5. Переходные процессы первой и второй АСР

Согласно выражению (8) $P_1 = (0{,}17(20/20) + 0{,}83(80/80)) = 1{,}0$.

Изменим настройки ПИ-регулятора для получения переходного процесса с меньшим временем регулирования, исходя из приоритетов (см. рис. 4 АСР-2), $K_{р2} = 1{,}12$, $T_{и2} = 45$. Переходный процесс второй АСР в сравнении с процессом первой АСР показан на рис. 5.

Комбинированный показатель качества второй АСР составит:

$$P_2 = ((0{,}17 \cdot 1) + 0{,}83(35/80)) = 0{,}53.$$

Заключение. Исходя из значений показателей, можно утверждать: так как P_2 меньше P_1, то ПИ-регулятор второй АСР настроен лучше по сравнению с регулятором первой. При этом учитывается мнение эксперта-технолога к требованиям по технологическому регламенту. Следует отметить, что к разным технологическим процессам могут быть предъявлены различные требования согласно опыту, знаниям и интуиции экспертов, выраженные в виде весовых коэффициентов. В ряде случаев рекомендации экспертов к качеству процесса регулирования могут отличаться от рекомендаций проектировщиков и наладчиков АСР. В этом случае, используя комбинированный показатель качества, легче и быстрее можно будет найти компромиссное решение, а значит, и эффективнее эксплуатировать автоматизированные технологические агрегаты.

Библиографические ссылки

1. **Плетнев Г.П.** Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. М.: Энергоиздат, 1981. 361 с.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: МЭИ, 2008. 396 с.
3. **Ротач В.Я.** К расчёту оптимальных параметров реальных ПИД-регуляторов по экспертным критериям // Промышленные АСУ и контроллеры. 2006. № 2. С. 22—29.
4. **Клюев А.С., Товарнов А.Г.** Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. М.: Энергия, 1970. 270 с.
5. **Копелович А.П.** Инженерные методы расчёта автоматических регуляторов. М.: ГНТИ, 1960. 190 с.
6. **Иванов В. А.** Регулирование энергоблоков. Л.: Машиностроение, 1982. 253 с.
7. **Саати Т., Керне К.** Аналитическое планирование. М.: Радио и связь. 1991. 244 с.

УДК 628.9:621.385.2:620.1.05

С.А. Амелькина, канд. тех. наук, **О.Е. Железникова,** канд. тех. наук
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск),
С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф. (Московский государственный университет приборостроения и информатики)
mikaeva@pechkin.npo.lit.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ УСТАНОВКА СО СВЕТОДИОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА

Описана разработанная экспериментальная исследовательская установка со светодиодными источниками света, позволяющая проводить исследования по изучению влияния светодиодного освещения на орган зрения и организм человека при различных цветовых температурах и уровнях освещённости рабочей поверхности.

Ключевые слова: светодиодное освещение, условия освещения, экспериментальная исследовательская установка, моделирование освещения.

The developed experimental research facility with LED light sources, allowing to carry out a research of the LED lighting influence on the vision organ and the human organizm at various color temperature and work surface light level.

Key words: LED lighting, lighting conditions, the experimental research facility, light modelling.

Для исследования условий светодиодного освещения разработана и создана экспериментальная исследовательская установка (ЭИУ) общего освещения [1], смонтированная в лаборатории светотехнического факультета Мордовского государственного университета (МГУ) им. Н.П. Огарёва. Лаборатория состоит из четырёх помещений, представленных на рис. 1. Одно помещение (для обследования наблюдателей) с коэффициентами отражения ограждающих поверхностей (потолка $\rho_п = 0,7$; стен $\rho_с = 0,5$ и пола $\rho_р = 0,3$) (рис. 2) и трёх экспериментальных помещений, в двух из которых смонтированы осветительные установки (ОУ) со светодиодными светильниками,

Рис. 1. Вид экспериментальной исследовательской установки

Рис. 2. Помещение для обследования наблюдателей (модель)

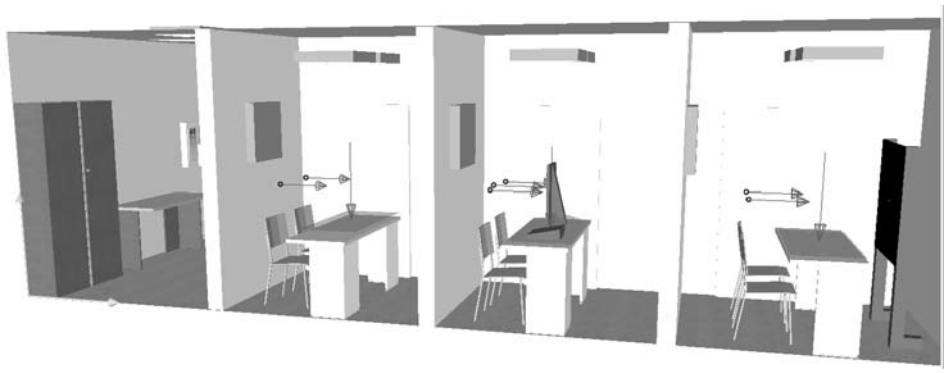


Рис. 3. Экспериментальные помещения. Размещение контрольных точек UGR для наблюдателей и горизонтальных рабочих поверхностей в экспериментальных помещениях

Таблица 1

Перечень светильников, используемых в экспериментальных исследованиях

Тип светильника	Краткая техническая характеристика, производитель	Тип источника света (ИС), производитель
ЛВО 04-4×14-041 PRS	IP20, рассеиватель призматический из ПММА, Т5, ПРА с управлением по протоколу DALI, cosφ = 0,99, ОАО "АСТЗ"	Osram FH 14W/830 HE; Master TL5 HE 14W/840, Philips
ЛВО 04-4×18-041 PRS	IP20, рассеиватель призматический из ПММА, ПРА с управлением по протоколу DALI, cosφ = 0,98, ОАО "АСТЗ"	Osram L 18W/950
ДВО 12-38-001 Prizma	IP 40, рассеиватель призматический из ПММА, драйвер с управлением по протоколу DALI, cosφ = 0,96, ОАО "АСТЗ"	СД STW8Q14B, Seoul Semiconductor
Cap Flat 66-16	IP 20, технология "удалённого люминофора", драйвер с управлением по протоколу DALI, cosφ = 0,94, ООО "Непес Рус"	СД, $T_{цв}$ = 4094 K, ООО "Непес Рус"
Cap Flat 66-16	IP 20, технология "удалённого люминофора", драйвер с управлением по протоколу DALI, cosφ = 0,94, ООО "Непес Рус"	СД, $T_{цв}$ = 3045 K, ООО "Непес Рус"

а в одном — ОУ с традиционными люминесцентными. В помещении для обследования три световых проёма были перекрыты жалюзи с ρ = 0,1, в экспериментальных помещениях естественное освещение отсутствовало.

Рис. 4. Зрительная работа во втором и третьем помещениях

Высота помещений 3 м. Коэффициенты отражения потолка, стен, пола и рабочей поверхности соответственно составили: $\rho_п$ = 0,7; $\rho_с$ = 0,7; $\rho_р$ = 0,3 и $\rho_{р.п}$ = 0,3. Ограждающие и рабочая поверхности экспериментальных помещений диффузно отражающие.

В экспериментальных помещениях для того, чтобы создать необходимый уровень вертикальной освещённости на экране с тест-объектом для измерения времени ахроматической адиспаропии и на кампиметре на стене каждого помещения за спиной наблюдателя выше его головы, смонтированы светильники (рис. 3, 4).

Для экспериментальных исследований выбраны светильники следующих производителей:

совместного российско-корейского предприятия ООО "Непес Рус" (светильники с СД — Cap Flat 66—16);

ОАО "Ардатовский светотехнический завод" (светильники с СД — ДВО12-38-001 Prizma и ЛЛ — ЛВО04-4х14-041 PRS, ЛВО04-4х18-041 PRS).

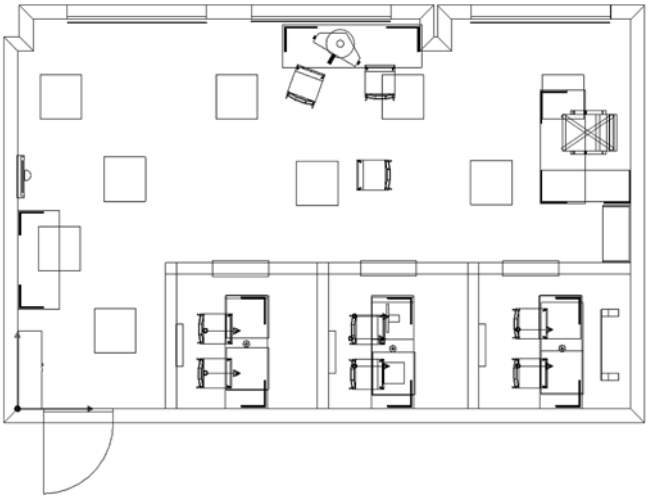


Рис. 5. Схема размещения светильников в ЭИУ

Перечень выбранных для экспериментальных исследований светильников представлен в табл. 1, схема размещения светильников в ЭИУ — на рис. 5.

Перед тем как оборудовать экспериментальные помещения светильниками, были смоделированы варианты освещения в программе DIALux для выполнения требований, предъявляемых СП 52.13330.2011 "Естественное и искусственное освещение" и СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278—03 "Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий" и СанПиН 2.2.1/2.1.1.2585—10 "Изменения и дополнения № 1 к санитарным правилам и нормам СанПиН 2.2.1/2.1.11278—03 "Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий" к общему освещению общественных и административных зданий.

Требования к количественным и качественным показателям общего освещения в помещениях общественных и административных зданий, где проводятся зрительные работы разряда А-2, выбранного за базовый, представлены в табл. 2.

Для определения обоснованных областей применения светодиодных светильников в ОУ различного функционального назначения экспериментальные исследования проведены при трёх уровнях освещённости: 200, 400 и 1000 лк,

Таблица 2

Нормируемые количественные и качественные показатели световой среды основных помещений общественных и административных зданий

Помещения	Плоскость нормирования освещённости (Г — горизонталь, В — вертикаль), м	Разряд и подразряд зрительной работы	Освещённость рабочей поверхности при общем освещении, лк	Объединённый показатель дискомфорта UGR, не более	Коэффициент пульсации освещённости, не более
Основные помещения общественных и административных зданий	Г-0,8	А-2	400	21	10

Таблица 3

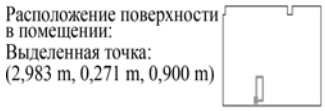
Исследуемые варианты освещения

Базовый вариант освещения	Исследуемый вариант освещения	Уровень освещённости, лк
ЛВО 04-4×14-041 PRS, $T_{цв}$ = 2953 K	Cap Flat 16-66, коррелированная $T_{цв}$ = 3045 K	200
ЛВО 04-4×14-041 PRS, $T_{цв}$ =2953 K	Cap Flat 16-66, коррелированная $T_{цв}$ = 3045 K	400
ЛВО 04-4×14-041 PRS, $T_{цв}$ =2953 K	Cap Flat 16-66, коррелированная $T_{цв}$ = 3045 K	1000
ЛВО 04-4×14-041 PRS, $T_{цв}$ = 3917 K	Cap Flat 16-66, коррелированная $T_{цв}$ = 4094 K	200
ЛВО 04-4×14-041 PRS, $T_{цв}$ = 3917 K	Cap Flat 16-66, коррелированная $T_{цв}$ = 4094 K	400
ЛВО 04-4×14-041 PRS, $T_{цв}$ = 3917 K	Cap Flat 16-66, коррелированная $T_{цв}$ = 4094 K	1000
ЛВО 04-4×18-041 PRS, $T_{цв}$ = 4914 K	ДВО 12-38-001 Prizma, коррелированная $T_{цв}$ = 5033 K	200
ЛВО 04-4×18-041 PRS, $T_{цв}$ = 4914 K	ДВО 12-38-001 Prizma, коррелированная $T_{цв}$ = 5033 K	400
ЛВО 04-4×18-041 PRS, $T_{цв}$ = 4914 K	ДВО 12-38-001 Prizma, коррелированная $T_{цв}$ = 5033 K	1000

UGR Список расчётных точек

Обозначение	Позиция [m] X	Y	Z	Направление взгляда[°]	Значение
UGR Расчётная точка 1	2,700	0,500	1,200	0,0	< 10
UGR Расчётная точка 2	2,700	1,100	1,200	0,0	10
UGR Расчётная точка 3	4,840	1,242	1,200	0,0	< 10
UGR Расчётная точка 4	4,840	0,600	1,200	0,0	< 10
UGR Расчётная точка 5	7,185	1,115	1,200	0,0	14
UGR Расчётная точка 6	7,185	0,600	1,200	0,0	14

Рис. 6. UGR в контрольных точках при освещении светодиодными светильниками



Растр: 4 × 8 Точки

$E_{ср}$[lx]	E_{min}[lx]	E_{max}[lx]	$E_{min}/E_{ср}$	E_{min}/E_{max}
1015	960	1054	0,946	0,911

Рис. 7. Распределение освещённости и её неравномерность при освещении двумя светильниками типа CapFlat 66-16 ($T_{цв}$ = 3045 K)

которые наиболее характерны для выполнения зрительных работ в помещениях различного функционального назначения [2, 3]. В табл. 3 представлены исследуемые варианты освещения.

Изменение уровня освещённости рабочей поверхности достигалось за счёт использования регулируемых пускорегулирующих аппаратов (ПРА) и драйверов. При использовании люминесцентных и светодиодных светильников диммирование светового потока проводилось по протоколу DALI. Яркость выходного отверстия светильников во всех вариантах освещения при равной освещённости всегда была одинаковой.

Моделирование вариантов освещения с помощью программы DIALux позволило определить высоту подвеса светильников, обеспечивающую на рабочей поверхности освещённость E = 1000 лк, другие же, более низкие уровни освещённости, вплоть до E = 100 лк, создавались диммированием светового потока.

Моделирование в программе DIALux позволило также создать нормируемые количественные и качественные показатели ЭИУ (горизонтальную освещённость на рабочей поверхности, неравномерность распределения освещённости и показатель UGR) (рис. 6, 7).

Проведённые психофизиологические и гигиенические исследования условий СД освещения на базе разработанной ЭИУ приведены в работах [4—6].

Библиографические ссылки

1. **Железникова О.Е., Амелькин Э.А.** Разработка экспериментальной установки со светодиодными источниками света // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: Сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-техн. конф. Саранск: 2013. С. 122—126.

2. **Амелькина С.А.** Принципы и методы оценки световой среды, создаваемой высокоэффективными источниками света: дис. канд. техн. наук. Саранск. 2003. С. 240.

3. **Амелькина С.А., Железникова О.Е., Кирюхина С.А. Синицына Л.В.** Разработка комплексной методики оценки влияния условий светодиодного освещения на состояние органа зрения и организма человека в целом // Естественные и технические науки. 2013. № 5. С. 249—258.

4. **Амелькина С.А., Железникова О.Е., Синицына Л.В.** Об оценке психофизиологической эффективности светодиодного освещения: сб. науч. тр. Sworld. 2013. Т. 10. № 3. С. 63—66.

5. **Амелькина С.А. Железникова О.Е., Синицына Л.В., Кокинов А.М.** Экспериментальные исследования психофизиологической и гигиенической эффективности светодиодного освещения // Естественные и технические науки. 2014. № 1. С. 159—168.

6. **Железникова О.Е., Амелькина С.А., Синицына Л.В., Аксенова С.В., Куликова М.П.** Исследования состояния органа зрения в условиях светодиодного освещения // Естественные и технические науки. 2014. № 1. С. 169—176.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации,

можно найти на сайте **www.mashin.ru**

УДК 681.513.7:004.896

А.В. Кожевников, канд. техн. наук, доц., **В.Н. Волков**
(ФГБОУ ВПО "Череповецкий Государственный Университет")
kojevnikovav@chsu.ru

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИИ САМОНАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Рассмотрено использование интеллектуальных технологий для самонастройки системы управления электроприводом. В качестве основы для настройки системы управления используется модифицированный генетический алгоритм. Данный метод может быть реализован на базе микропроцессорной системы управления электроприводом или как внешнее по отношению к электроприводу программное обеспечение.

Ключевые слова: электропривод, искусственный интеллект, генетический алгоритм, самонастройка, система управления.

The intelligent technologies utilization for self-adjusting of the electic drive control system is considered. As a basis for the control system adjusting the modified genetic algorithm is used. This method can be implemented from a microprocessor control system of the electric drive or as external software with respect to the electric drive.

Key words: electric drive, artificial intelligence, genetic algorithm, self-adjusting, control system.

Введение. Интенсивное развитие вычислительной техники в настоящее время позволяет реализовывать в технических устройствах многие функции, ранее традиционно выполнявшиеся человеком. Возросшая сложность новых объектов управления и их растущее количество снижают эффективность классических методов проектирования и ручного обслуживания при наладке и эксплуатации. Актуальными становятся подходы, позволяющие автоматизировать процесс настройки системы управления под конкретные объекты. Одним из таких направлений является развитие интеллектуальных технологий, заменяющих или дополняющих традиционные подходы.

Учитывая надёжность и простоту классических методов управления и новые возможности перспективных интеллектуальных технологий, их можно объединить для решения задач управления объектами.

На сегодняшний день управление подавляющим большинством объектов построено на классических пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторах (ПИД-регуляторах) или не использующих дифференциальное звено пропорционально-интегральных регуляторах (ПИ-регуляторах), доказавших свою надёжность при одновременной простоте практической реализации [1].

На базе микропроцессорной системы управления многие современные устройства оснащают системами автоматической настройки ПИ-регуляторов. Одним из наиболее популярных является метод Николса—Цигеля [2] и его модификации. С помощью данного метода осуществляется грубая настройка, требующая ручной подстройки человеком—экспертом.

В настоящее время ведутся работы, в которых предложены альтернативные способы настройки системы управления на базе методов искусственного интеллекта (ИИ) [3—5]. Наиболее популярные из них такие как: нечёткая логика, искусственные нейронные сети (ИНС) [4] и генетические алгоритмы (ГА) [6], а также комбинации их между собой и с классическими методами.

Однако большинство работ носят обобщённый теоретический характер и малое количество работ с привязкой к конкретным типам объектов управления. Между тем методы ИИ применительно к техническим устройствам сравнительно новое направление и часто требуют индивидуального подхода в решении конкретных задач, касающихся вопросов управления.

Поэтому актуальным на данном этапе развития методов ИИ в технике является исследование их применимости к конкретным типам промышленных устройств и для реализации конкретных задач в данных устройствах.

Ниже рассмотрено применение интеллектуальных технологий в составе электроприводной техники. Электроприводы являются наиболее распространёнными техническими устройствами в составе промышленной и бытовой техники. Всё чаще становится актуаль-

ным применение электроприводов в условиях труднодоступных и опасных для присутствия человека. Также, в связи с возрастающим количеством применяемых регулируемых электроприводов в самых различных областях жизнедеятельности, актуальна задача осуществления самонастройки системы управления без привлечения специалистов в области электроприводной техники.

Цель данного исследования — разработка эффективного метода самонастройки системы управления электроприводом постоянного тока с применением ГА для реализации в микропроцессорном устройстве.

Объектом данного исследования является метод самонастройки системы управления электроприводом.

Основная часть. Для построения алгоритма самонастройки предложено использовать ГА [7], модифицированный для задачи настройки коэффициентов ПИ-регуляторов двухконтурной системы управления электроприводом [8]. Поскольку возможность настройки непосредственно на электроприводе ограничена из-за опасности возникновения переходных процессов, ведущих к разрушению оборудования, то настройку предложенным алгоритмом необходимо осуществлять на программной модели электропривода. Причём требуется модель, способная, по возможности, повторять нелинейную динамику электропривода. Это связано с тем, что предложенный способ настройки основан на сравнении во временной области управляющего задания и выходной координаты электропривода, по которой ведётся оптимизация. Для этого можно использовать, например, нейросетевую модель, которая способна аппроксимировать нелинейное поведение электропривода [9, 10].

В рамках исследования рассматривается двухконтурная система с подчинённым регулированием координат [8], где в качестве регуляторов тока $i_я$ и скорости ω используется ПИ-регулятор.

Показатели качества системы управления с ПИ-регуляторами достигаются оптимизацией коэффициентов звеньев регулятора k_p, k_i. Коэффициенты ПИ-регулятора можно представить в рамках ГА генами, обеспечивающими требуемое поведение объекта, и образующими массив-хромосому. Для двухконтурной системы хромосома имеет следующий вид:

$$A = (k_{p_{\text{РТ}}}, k_{i_{\text{РТ}}}, k_{p_{\text{РС}}}, k_{i_{\text{РС}}}),$$

где $k_{p_{\text{РТ}}}$ — ген, кодирующий пропорциональный коэффициент регулятора тока; $k_{i_{\text{РТ}}}$ — ген, кодирующий интегральный коэффициент регулятора тока; $k_{p_{\text{РС}}}$ — ген, кодирующий пропорциональный коэффициент регулятора скорости; $k_{i_{\text{РС}}}$ — ген, кодирующий интегральный коэффициент регулятора скорости.

В дальнейшем получившийся массив A коэффициентов именуется как особь. ГА осуществляет поиск решения из популяции возможных особей. Популяция имеет следующий вид:

$$P = (A_1, A_2, ..., A_M),$$

где A_1, A_2, ..., A_M — особи популяции; M —количество особей популяции.

До начала работы ГА генам начальной популяции присваиваются случайные значения из натуральных чисел в заданном диапазоне. После этого вычисляется функция приспособленности, которая должна быть критерием оптимизации для системы управления.

Под приспособленностью конкретных особей понимается степень соответствия выходной скорости модели ω и управляющего задания $U_з$ при подстановке в регуляторы коэффициентов, соответствующих закодированным в особи значениям с соблюдением критериев оптимальности системы управления. При этом достигается необходимое движение рабочего органа исполнительного механизма с точки зрения технологических и технико-экономических требований [8]. В качестве критерия оптимизации выбрана улучшенная интегральная оценка, которая имеет следующее математическое описание:

$$I_{в(t)} = \int_0^K \left(e(t)^2 + \alpha \left[\frac{d}{dt} e(t) \right]^2 \right) dt, \qquad (1)$$

где $e(t) = U_з - \omega$ — ошибка регулирования; $\frac{d}{dt} e(t)$ — скорость нарастания ошибки регулирования; α — коэффициент, отражающий постоянную времени; K — время интегрирования.

Улучшенная интегральная оценка (кроме площади ошибки) учитывает скорость нарастания ошибки, что позволяет алгоритму заданием величины параметра α настраивать коэффициенты регулятора на различный характер переходных процессов (1).

Чтобы определить приспособленность особей начальной и последующих популяций, на модель электропривода подается управляющее задание $U_з$ и снимается скорость ω на заданных интервалах времени для каждой особи. Форма $U_з$ должна быть одинаковой для каждой особи для корректного сравнения их приспособленностей.

После вычисления оценки приспособленности (1) для каждой особи результаты сводятся в массив для последующего анализа:

$$I_{в(t)} = (I^1_{в(t)},\ I^2_{в(t)},\ ...,\ I^M_{в(t)}).$$

Особи с наилучшей оценкой приспособленности (1) образуют родительский пул, который участвует в скрещивании. Для скрещивания применяется метод рулетки [7] с некоторыми модификациями. Вероятность селекции хромосомы имеет вид

$$P_s(A_i) = \frac{F(A_i)}{\sum\limits_{i=1}^{M} F(A_i)}, \qquad (2)$$

где $F(A_i)$ — значение функции приспособленности.

Занимаемый сектор на рулетке вычисляется по формуле

$$V(A_i) = P_s(A_i)\cdot 100\ \%.$$

Количество копий каждой особи в отобранных для скрещивания родительских парах определяется по формуле

$$e(A_i) = P_s(A_i)M.$$

Для экономии памяти микропроцессорного устройства целесообразно делать популяцию небольшой. При этом возникает проблема преждевременной сходимости, когда все особи становятся одинаковыми, но решение ещё не оптимально. Чтобы предотвратить преждевременную сходимость, проводится периодическая замена одной из особей родительского пула на случайную новую особь. Подобное, частичное и периодическое обновление позволяет поддерживать поиск новых решений постоянно, гарантируя поиск всё новых решений. Кроме того, используется подход с применением элитарных особей [7], не подлежащих случайному удалению, пока не образуются более приспособленные особи.

Генетические операторы применяются над парами особей, выбираемыми в порядке их вероятности селекции (2). Используются два основных генетических оператора: скрещивание с вероятностью ($0{,}5 \leqslant P_c \leqslant 1$) в зависимости от скорости схождения алгоритма к оптимуму и мутация с вероятностью ($0 \leqslant P_m \leqslant 0{,}1$) соответственно [7].

В эксперименте применён алгоритм с вещественным кодированием, при котором коэффициенты регулятора не переводятся в бинарный вид для операций. В качестве оператора скрещивания используется арифметический кроссовер. Суть данного оператора в том, что создаются два "потомка" $C_1 = (C^1_1, ..., C^1_n)$ и $C_2 = (C^2_1, ..., C^2_n)$, которые рассчитываются по формулам

$$C^1_k = m R^1_k + (1 - m) R^2_k;$$
$$C^2_k = m R^2_k + (1 - m) R^1_k,$$

где R^1_k и R^2_k — скрещивающиеся родительские особи; m — константа из интервала [0;1].

В исследовании применена случайная мутация, роль которой второстепенна.

Процесс оптимизации носит итерационный характер с отбором лучших особей на каждой итерации и уничтожением остальных. Таким образом, процесс повторяется, пока на какой-то итерации не будет достигнута заданная оценка приспособленности. Тогда алгоритм завершает свою работу и проводится тестирование на новом задании при разных условиях. После подбора коэффициентов и завершения тестирования при разных входных заданиях с соблюдением условия оптимальности (1) систему управления можно считать настроенной.

Ниже представлены результаты экспериментов. Эксперимент с моделированием предложенного алгоритма самообучения был проведён в пакете прикладных программ *MATLAB*.

При помощи ГА проведена настройка коэффициентов системы управления. Предварительно на вход модели подано случайное управляющее задание в течение 30 с из допустимого диапазона (рис. 1) и, для наглядности результата, момент нагрузки с 13 до 17 с. Из рис. 1 видно, что достижение задания имеет инерционный характер, а при подаче момента сопротивления скорость модели нерегулируемого электродвигателя не достигает заданной. Настройка коэффициентов регуляторов при помощи модернизированного ГА проводилась на данном обучающем множестве.

Итерации повторяются до достижения минимальной улучшенной интегральной погрешности. Процесс оптимизации экспонен-

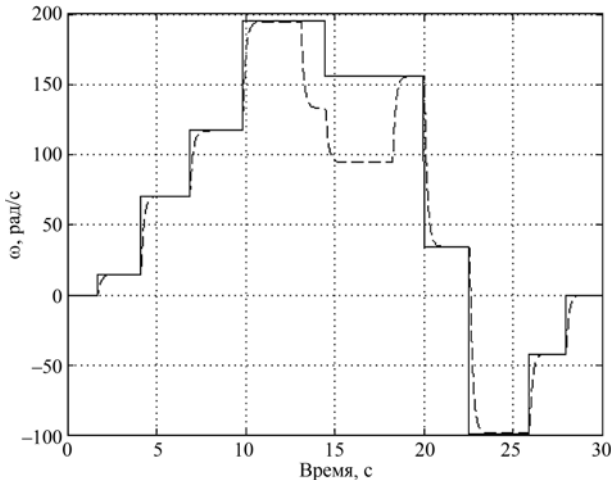


Рис. 1. Управляющее задание (сплошная линия) и скорость электропривода (штриховая линия) в разомкнутой системе управления

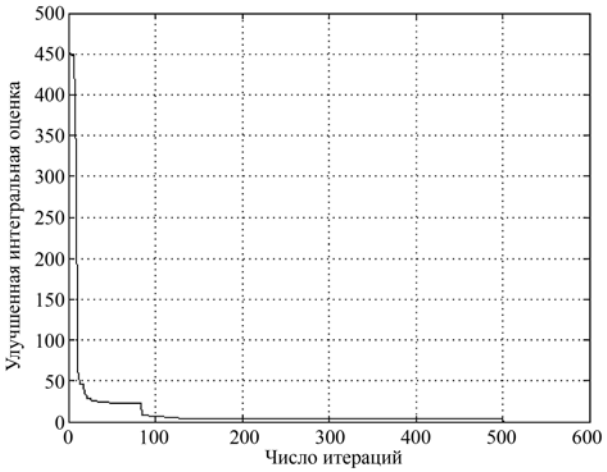


Рис. 2. Интегральная оценка по итерациям при адаптации коэффициентов системы с помощью модифицированного ГА

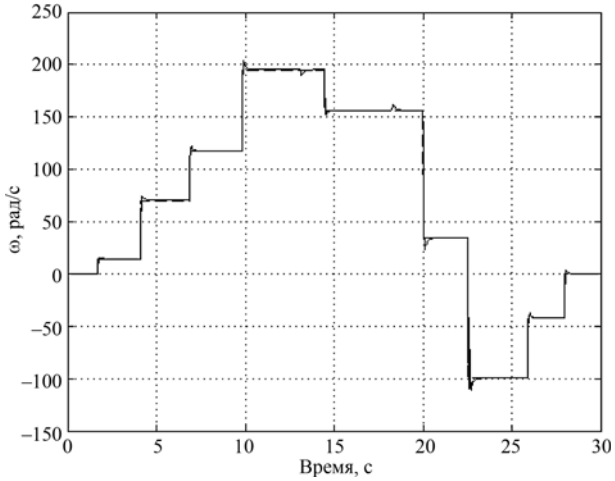


Рис. 3. Управляющее задание (сплошная линия) и скорость электропривода (штриховая линия) в настроенной при помощи ГА системе управления

циально уменьшится по мере приближения интеграла оценки к нулю в диапазоне 500—5000 итераций (рис. 2). В результате коэффициенты регулятора, заданные в финальной лучшей особи, демонстрируют при подстановке в систему управления достаточно точные результаты при всех запусках алгоритма (рис. 3).

Заключение. Таким образом, при исследовании с помощью моделирования показана принципиальная возможность применения интеллектуальных технологий в вопросах автоматической настройки системы управления электроприводом. Несмотря на то, что в настоящее время уже разработано множество методов как ручной настройки системы управления, так и самонастройки, предложенный метод может быть достойной альтернативой и имеет свои преимущества. Методы, построенные на аналитических соотношениях, предполагают относительную линейность объектов управления и электроприводов, в том числе реальные объекты всегда нелинейны. Иногда нелинейности существенные и тогда требуется участие человека—эксперта, чтобы скорректировать систему управления, так как эксперт способен оценить фактическую динамику объекта и внести эмпирические поправки. Предложенный метод, подобно эксперту, способен в автоматическом режиме осуществить корректную настройку системы управления. При этом, как и эксперт, алгоритм сначала быстро находит грубое решение в пространстве поиска и, если оно найдено, доводит решение до оптимума согласно заданным критериям, осуществляя тонкую подстройку.

Следует отметить, что при использовании классических методов рост сложности объектов усложняет и их математическое описание. Предложенный метод основан на представлении объекта как "черный ящик". ГА при этом будет одинаково эффективным для объектов любой сложности, так как опирается только на поведение выходной координаты относительно заданного критерия качества при коррекции параметров регулятора.

Также была рассмотрена самонастройка простых по своей структуре ПИ-регуляторов, но алгоритм может быть легко модернизирован под настройку других типов регуляторов, таких как нейросетевые регуляторы с адаптацией весов, *fuzzy*-регуляторы с настройкой правил или осуществлять подбор оптимального распределения корней характеристических уравнений в вопросах модального управления. Данный метод применим к другим

вопросам электроприводной техники, таким как позиционирование или вопросы энергоэффективности.

Предложенный метод работает медленней, чем метод Никольса—Цигеля и другие массово применяемые сегодня, между тем, он может осуществить точную подстройку без участия человека. При этом время поиска решения предложенным методом сопоставимо со временем, которое затратил бы эксперт при настройке простого электропривода. Существенное преимущество предложенного метода появляется, если электропривод достаточно сложный с неочевидными внутренними связями.

Данный метод по своей структуре ближе к численным методам и работает итерационно, поэтому может быть воплощен на современной вычислительной машине. Учитывая, что большинство технических устройств снабжаются микропроцессорными средствами, то предложенный подход может быть адаптирован к другим типам объектов, отличных от электропривода.

Библиографические ссылки

1. **Денисенко В.В.** ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2007. № 1. С. 78—88.

2. **Ротач В.Я.** Настройка регуляторов модифицированным методом Циглера—Николса // Промышленные АСУ и контроллеры 2008. № 2. С. 38—42.

3. **Вороновский Г.К., Махотило К.В., Петрашов С.Н., Сергеев С.А.** Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. Харьков: Основа, 1997. 112 с.

4. **Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю.** Нейросетевые системы управления: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа 2002. 183 с.

5. **Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П.** Искусственные интеллект и интеллектуальные системы управления. Отделение информ. технологий и вычислительных систем РАН. М.: Наука, 2006. 333 с.

6. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления // ExponentaPro. Математика в приложениях. 2004. № 3—4. С. 78—85.

7. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия—Телеком, 2006. 452 с.

8. **Терехов В.М., Осипов О.И.** Системы управления электроприводов.: учеб. для студ. высш. учебн. заведений. 2-е издание, стер. М.: издательский центр "Академия", 2006. 304 с.

9. **Волков В.Н., Кожевников А.В.** Нейросетевая идентификация электропривода постоянного тока // Современные научные исследования и инновации. Апрель, 2013 [Электронный ресурс]. URL: http://web.snauka.ru/issues/2013/04/23648 (дата обращения: 01.08.2014 г.).

10. **Волков В.Н., Кожевников А.В.** Построение эталонной модели электропривода постоянного тока с использованием рекуррентных нейронных сетей // Вестник Череповецкого государственного университета. Научн. журнал. Череповец: ФБГОУ ВПО ЧГУ. № 3 (50). Т. 2. 2013. С. 15—19.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УЧЕБНИК В.Ф. Безъязычный

2013 г. Объем 568 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-669-7 Цена 1000 р.

Изложены основы технологии машиностроения в соответствии с программой учебного курса. Даны основные понятия и положения, основы базирования, основы проектирования технологических процессов, общие принципы обработки деталей, причины возникновения погрешностей при механической обработке. Приведены расчет режимов резания, методика выбора способа обработки деталей, основы технического нормирования, пути повышения производительности станочных операций. Показана последовательность проектирования технологических процессов сборки.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Конструкторско-технологическое обеспечение».

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

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

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

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Структурно-параметрические модели и схемы многослойного пьезодвигателя нано- и микроперемещений при поперечном пьезоэффекте. *Вестник машиностроения.* 2014. № 8.

Получены структурно-параметрические модели и схемы многослойного пьезодвигателя при поперечном пьезоэффекте с учётом противоэлектродвижущей силы, определены передаточные функции с учётом влияния его геометрических параметров и физических показателей, а также противоэлектродвижущей силы и внешней нагрузки.

Методика решения задач для автоматических линий с участками разной производительности. *Вестник машиностроения.* 2014. № 8.

На основании скрытых или невидимых постоянных и переменных процессов, протекающих при главных состояниях автоматических линий, разработана методика решения задач для линий с участками разной производительности.

Имитационное моделирование технических систем на основе статистических оценок. *Вестник машиностроения.* 2014. № 8.

Рассмотрен способ формирования описания элементов модели, позволяющий решать задачу автоматизации построения иерархии моделей в данной предметной области. Системный подход основан на последовательном переходе от общего к частному, при использовании на каждом этапе модели разной степени детализации.

Перспективы повышения долговечности машин. *Вестник машиностроения.* 2014. № 8.

Проанализированы причины массовой аварийности оборудования в разных отраслях машиностроения. Сделано предположение, что уменьшение ресурса безаварийной работы машин связано с низкими механическими свойствами конструкционных сталей.

Влияние цементации на контактные напряжения при трении качения. *Вестник машиностроения.* 2014. № 8.

Рассматривается влияние цементации на контактную прочность в подшипнике путём исследования напряжённо-деформированного состояния в зоне контакта ролика при качении с использованием программного комплекса ANSYS Workbench.

Технология вибрационной сборки плоских деталей. *Вестник машиностроения.* 2014. № 8.

Рассмотрена математическая модель относительного движения детали на ориентирующем диске при автоматической сборке. Разработана компьютерная программа для моделирования процесса ориентирования, показана возможность использования данного способа для манипулирования деталями сложной конфигурации.

Нанотехнологическая вакуумная установка модульного типа. *Наноинженерия.* 2014. № 8.

Описана конструкция лабораторной установки модульного типа, предназначенной для нанесения тонких плёнок в вакууме и формирования наноструктур в виде островковых плёнок и углеродных нанотрубок. Представлена методика проведения исследований по нанесению тонких плёнок на опаловые матрицы и ситалловые подложки методами термического испарения, магнетронного распыления и газофазного осаждения.

Исследование параметров механизмов микро- и нанoперемещений. *Наноинженерия.* 2014. № 8.

Представлены методические материалы для изучения методов оценки точности прецизионных механизмов микро- и нанoперемещений в режиме позиционирования, методов тестирования активных демпферов для компенсации возмущающих вибрационных воздействий на исследовательское и технологическое оборудование. Особое внимание уделено исследованию перспективных приводов на основе магнито- и электрореологических жидкостей и демпферов на основе магнитореологических эластомеров.

Перспективные методы формирования планарных наноструктур. *Наноинженерия.* 2014. № 8.

В работе представлены перспективные методы формирования планарных наноструктур на основе опаловых матриц, развиваемые в лаборатории микро- и наноструктур кафедры "Электронные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приведены результаты исследования названных структур на аналитическом оборудовании кафедры.

Назначение технологических условий обработки ответственных деталей при обработке режущим инструментом с износостойкими покрытиями. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2014. № 8.

Исследовано влияние наноструктурированных покрытий режущего инструмента на параметры процесса резания и параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Разработаны уравнения обрабатываемости для расчётного определения оптимальных режимов резания. Изложена методика назначения технологических условий обработки, обеспечивающих требуемые параметры качества поверхностного слоя детали с учётом трибологических характеристик покрытий режущего инструмента.

Моделирование погрешностей закрепления тонкостенных сварных корпусов в трёхкулачковых патронах. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2014. № 8.

Приведён пример моделирования погрешностей закрепления тонкостенных сварных корпусов в трёхкулачковых патронах с помощью пакета прикладных программ SolidWorks Simulation, основанного на методе конечных элементов. Показано доминирующее влияние ребер жёсткости на величину остаточных погрешностей после раскрепления сварного корпуса из патрона.

Раскрой листовых неметаллических материалов водоледяной струей высокого давления. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2014. № 8.

Представлен перспективный способ раскроя листовых неметаллических материалов водоледяной струей высокого давления. Дана сравнительная характеристика предложенного способа с другими гидроструйными технологиями.

Инновационные технологии обработки рабочих поверхностей деталей машин. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2014. № 8.

Изложена методология создания инновационных технологий обработки рабочих поверхностей деталей машин, исходя из их функционального назначения. Приведены примеры этих технологий при обработке различных деталей: роликов, чашек дифференциала, кулачков, железнодорожных рельсов и колес.

Современные методы антикоррозионной защиты оборудования в нефтехимическом машиностроении. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2014. № 8.

Рассмотрены современные методы защиты оборудования от коррозии, применяемые в нефтехимическом машиностроении. Представлены результаты исследований биметаллических материалов, металлизационных и силикатно-эмалевых покрытий. Также рассмотрены сегменты применения полимерных покрытий.

О "геопереходной" российской ракете-носителе нового поколения. *Полёт*. 2014. № 8.

Приведены результаты исследований по возможному варианту новой "геопереходной" коммерческой РН для выведения КА массой 6 т на ГПО без использования РБ с морского старта. Показана целесообразность создания такой РН на основе кислородно-керосиновых ракетных блоков разрабатываемых РН сверхтяжелого класса и верхней ступени РН семейства "Ангара".

Цели, задачи и общая структура государственной системы геоинформационного, навигационного и фундаментального обеспечения. *Полёт*. 2014. № 8.

Посвящена развитию государственной системы геоинформационного, навигационного и фундаментального обеспечения (ГеоИНФО) Российской Федерации. Рассматривается вариант возможного построения системы ГеоИНФО, в том числе её цели, задачи и общая структура.

Логистическая модель построения комплекса средств эксплуатации районов падения отделяющихся частей ракет-носителей. *Полёт*. 2014. № 8.

Предложена логистическая модель построения комплекса средств эксплуатации районов падения (КЭРП) отделяющихся частей ракет-носителей. По результатам запусков РН "Протон" и "Днепр" оценена эффективность действующего КЭРП космодрома Байконур и предложена схема построения такого комплекса на перспективном космодроме Восточный.

Способы уменьшения энергетических затрат при облёте элементов спутниковой группировки. *Полёт*. 2014. № 8.

Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой затрат суммарной характеристической скорости (СХС), требуемой для восполнения спутниковых систем, функционирующих на круговых и близких к ним орбитах. Предметом исследования служат как действующие спутниковые системы, так и группировки космического мусора, классифицированные по результатам работы с каталогом космиче-

ских объектов. Выделены отличия динамической группировки объектов космического мусора от классической спутниковой системы. Приведены примеры расчётов СХС, необходимой для облёта одной из группировок космического мусора за заданное время.

Исследование динамики и управления маневром разворота в горизонтальной плоскости дискообразного летательного аппарата. *Полёт.* 2014. № 8.

Исследованы два способа выполнения манёвра разворота дискообразного ЛА в горизонтальной плоскости — посредством поворота маршевых двигателей и с использованием подъёмного двигателя. Оценены потребные управляющие силы и энергозатраты на манёвр (избыточные тяги и время манёвра).

Акустическое активирование процесса газопламенного напыления проволочными материалами. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2014. № 8.

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса формирования покрытий газопламенным распылением проволок с акустическим активированием. Исследовано влияние параметров акустического активирования и размера частиц распылённых проволок на свойства наносимых покрытий.

Влияние методов удаления ионно-плазменного покрытия на основе нитрида титана на точность и качество обработки поверхности титанового сплава. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2014. № 8.

Рассмотрены особенности удаления ионно-плазменного покрытия TiN с поверхности титанового сплава различными методами. Показано, что метод снятия покрытия, включающий химическое разрыхление с последующей абразивной и отделочной обработкой поверхности обеспечивает наибольшую точность обработки и формирование в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений.

Упрочняющие технологии — основа повышения ресурса и срока службы машины. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2014. № 8.

Одной из причин медленного повышения срока службы и надёжности сельскохозяйственных машин является разрозненность исследований по основным направлениям проблемы без учёта взаимодействия всех факторов, влияющих на износостойкость рабочих поверхностей деталей и соединений. Очень мало внимания уделяется деталям, которые не определяют ресурс агрегата или машины в целом. Таких деталей в машинах и оборудовании агропромышленного комплекса более 90 %. Они практически отрабатывают полностью установленный срок службы, который для российской техники можно значительно увеличить. Показано, что внедрение новых упрочняющих финишных операций в технологические процессы при изготовлении и ремонте нересурсных деталей позволит увеличить срок службы машин более чем на 80 %.

Локальное карбооксидирование титановых сплавов. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2014. № 8.

Рассматриваются вопросы повышения надёжности и увеличения ресурса эксплуатации гидроцилиндров авиационной техники. Снижение износа рабочей поверхности гидроцилиндров достигается нанесением карбооксидированного покрытия с последующим выглаживанием.

Снижение тепловой нагрузки на высоконагруженные охлаждаемые конструкции. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2014. № 8.

Рассматриваются наиболее применимые конструкции турбулизаторов, используемых в теплонагруженных изделиях, в частности в ракетных двигателях, анализируются технологии их изготовления и возможности снижения тепловых нагрузок, влияющих на эксплуатационные показатели изделий.

Влияние режимов плазменной обработки на структурообразование хромовых диффузионных покрытий на стали 60Х2СМФ. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2014. № 8.

Изучено влияние режимов плазменной обработки на структуру и свойства диффузионных хромовых покрытий на стали 60Х2СМФ. Установлено, что обработка плазменной струей гальванических хромовых покрытий приводит к формированию диффузионных слоёв с повышенной твердостью. Показано, что меньшая сила тока плазменной дуги способствует образованию более твердых поверхностных слоев.