

# Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## Главный редактор

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Афанасьев В.Н.** — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ  
**Басараб М.А.** — д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Большаков А.А.** — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)  
**Буддакова Т.И.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Ван Мэйлин** — д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)  
**Зинченко Л.А.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Кларк Р.** — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик, Великобритания)  
**Криони Н.К.** — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)  
**Кузнецов А.Е.** — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)  
**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»  
**Пролетарский А.В.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Проталинский О.М.** — д.т.н., проф., НИУ МЭИ  
**Путилов В.Н.** — ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель главного редактора)  
**Румянцева О.Н.** — генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»  
**Ся Юаньцин** — д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)  
**Фу Ли** — д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)  
**Фёдоров И.Б.** — д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Хэ Юн** — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)  
**Чистякова Т.Б.** — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)  
**Шахнов В.А.** — д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Шибанов Г.П.** — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова

Редакторы — **Мырина И.Н., Селихова Е.А.**  
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

## Адрес редакции:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.  
Тел.: 8 (499) 268-41-77.  
E-mail: [ast@mashin.ru](mailto:ast@mashin.ru); [astmashin@yandex.ru](mailto:astmashin@yandex.ru);  
<http://www.mashin.ru>

## Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г. (ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Издаётся с 1947 г.

Том 74

5  
2020

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

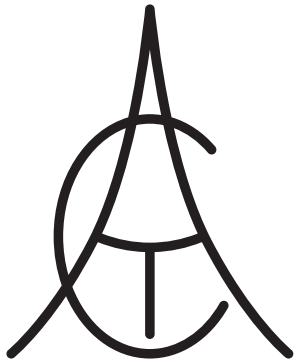
- Галкин Е.В.** Управление ресурсами с применением имитационной модели производственного процесса . . . . . 195
- Иванов В.К.** К вопросу создания комплексной математической модели производственной системы . . . . . 199
- Байнева И.И., Кузяков А.В.** Исследование и расчёт оптических элементов светосигнальных светильников . . . . . 202
- Васильева Л.А., Бойчук М.И., Микаева С.А.** Кварцевые генераторы . . . . . 207

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н.** Итерационный критерий асимптотической устойчивости дескрипторной системы . . . . . 213
- Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У.** Алгоритмы адаптивной идентификации динамических систем на основе принципа регулярности . . . . . 219

### СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Елисеев В.А., Дегтярёв Ю.И.** Процедуры управления реализацией научно-технологического развития . . . . . 225
- Денисов М.С.** Автоматизированная система программного управления процессом наложения давления на жидкий и кристаллизующийся металл . . . . . 234



# Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

## Chief in Editor

**Mikrin E.A.** – dr.en.s., prof., academician of the RAS,  
RSC «Energy» behalf of S.P. Korolev

## EDITORIAL COUNCIL:

**Afanasyev V.N.** – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE

**Basarab M.A.** – dr.ph.-m.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Bolshakov A.A.** – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)

**Buldakova T.I.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Wang Meiling** – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,  
P.R. China

**Zinchenko L.A.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Clark R.** – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK

**Krioni N.K.** – dr.en.s., prof., USATU, Ufa

**Kuznetsov A.E.** – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan

**Maltseva S.V.** – dr.en.s., prof., NRU HSE

**Mikaeva S.A.** – dr.en.s., prof., MSUPI

**Neusypin K.A.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Nefedov E.I.** – dr.ph.-m.s., IRE RAS

**Nikiforov V.M.** – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP  
behalf of N.A. Pilyugin»

**Proletarskiy A.V.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Protalinsky O.M.** – dr.en.s., prof., NRU MPEI

**Putilov V.N.** – LLC «Innovative Mashinostroenie»  
Publishers» (deputy chief editor)

**Rumyantseva O.N.** – General Director of LLC «Innovative  
Mashinostroenie» Publishers»

**Xia Yuantsin** – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,  
P.R. China

**Fu Li** – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China

**Fedorov I.B.** – dr.en.s., prof., academician RAS, President  
of MSTU behalf of N.E. Bauman

**He Yung** – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science  
and Technology, P.R. China

**Chistyakova T.B.** – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)

**Shakhnov V.A.** – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,  
MSTU behalf of N.E. Bauman

**Shibanov G.P.** – dr.en.s., prof., State Flight Test Center  
behalf of V.P. Chkalov

Editors — **Mymrina I.N.**, **Selikhova E.A.**

Computer layout — **Konova E.V.**

## Editorial address:

107076, Moscow, Kolodezny lane – 2a, build. 2

Tel.: +7 (499) 268-41-77.

E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;

http://www.mashin.ru

## Founder:

LLC «INNOVATIVE MASHINOSTROENIE» PUBLISHERS»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014 (PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian index scientific citation (RINC)

It is published since 1947

Volume 74  $\frac{5}{2020}$

## CONTENTS

### AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

**Galkin E.V.** Resource management using a simulation model of  
the production process . . . . . 195

**Ivanov V.K.** To the question of creating a complex mathematical  
model of a production system . . . . . 199

**Bayneva I.I., Kzyzakov A.V.** Research and calculation of optical  
elements for light-signal illuminating attachments . . . . . 202

**Vasileva L.A., Boychuk M.I., Mikaeva S.A.** Quartz generators . . . . . 207

### MODERN TECHNOLOGIES

**Mikrin E.A., Zubov N.E., Ryabchenko V.N.** Iterative criterion of  
the descriptor system asymptotic steadiness . . . . . 213

**Igamberdiev Kh.Z., Sevinov Zh.U.** The adaptive identification  
algorithms of dynamical systems based on the principle of regu-  
larity . . . . . 219

### SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

**Eliseev V.A., Degtyarev Yu.I.** The managing procedures for the  
implementation of scientific and technological development . . . . . 225

**Denisov M.S.** Automated system for software control of the pro-  
cess of applying pressure on liquid and crystallizing metal . . . . . 234



**Е.В. Галкин**, канд. техн. наук, доц.

(Московский авиационный институт — национальный исследовательский университет)

e.v.galkin@yandex.ru

## УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

*Представлены два подхода к созданию имитационной модели производственного процесса. Целью статьи является определение количества производственных запасов для выпуска изделий. С помощью дискретно-событийного подхода в AnyLogic описан процесс производства изделий в виде системы массового обслуживания (СМО). Системно-динамический подход позволил разработать расчётный инструмент (ПИ-регулятор), который был добавлен в созданную модель. Применение ПИ-регулятора в имитационной модели производственного процесса наиболее эффективно при обработке большого количества заказов.*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование; концепция бережливого производства; управление ресурсами; ПИ-регулятор.

*Two approaches to creating a simulation model of the production process are presented. The purpose of the article is to determine the amount of inventory for the production of products. The process of manufacturing products in the form of a queuing system (QS) is described in AnyLogic by using a discrete event-trigger approach. The system-dynamic approach permits to develop a calculation tool (PI regulator), which was added to the created model. The use of a PI regulator in a simulation model of the production process is most effective at fulfillment a large number of orders.*

**Keywords:** simulation modeling; the concept of lean manufacturing; resource management; PI regulator.

**Введение.** Имитационное моделирование применяется как на действующих предприятиях, так и на создаваемых. Процесс имитационного моделирования представляет собой совокупность действий, направленных на сбор, анализ и систематизацию определённых последовательных событий, возникающих в случайное время. При этом протекающие на производстве бизнес-процессы рассматриваются в виде СМО [1–3]. Дискретно-событийный подход позволяет реализовать данную возможность в имитационном моделировании с учётом того, что материальные ресурсы принимают участие в моделируемом процессе в виде заявок и подвергаются последовательным этапам обработки, продиктованным технологией производства.

Среди основных недостатков применения дискретно-событийного подхода можно назвать наблюдение и выявление проблем без возможности их устранения, в то время как для создания модели сложного производственного процесса необходимо иметь возможность учитывать такие параметры, как производственные ресурсы (сырьё, запасы и пр.). Такой управленческий подход подразумевает понятие

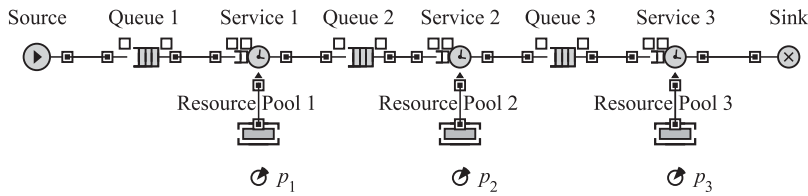
«бережливого производства». ПИ-регулятор — инструмент, широко применяемый в теории автоматического управления. Именно он даёт возможность вовлечь элементы динамического моделирования в модели СМО. Для управления потоками ресурсов в СМО применяют формулу Литтла [4]:

$$W = \frac{1}{\lambda} L, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — интенсивность потока заявок-заготовок;  $W$  — среднее время рассмотрения заявки;  $L$  — среднее число заявок в системе.

В целях исследования области применения двух подходов (дискретно-событийного и системно-динамического) разработана имитационная модель с применением системы AnyLogic [5, 6], которая даёт возможность их совмещать, моделировать различные производственные процессы, а также рассчитать ежедневный оптимальный объём заготовок, передаваемых на производство.

**Решение задачи.** В процессе решения задачи применена система AnyLogic, которая



**Рис. 1. Схема производственного процесса:**

Queue — формирование очередности передачи заготовок на производство; Service — выполнение технологического процесса; ResourcePool — расчёт количества ресурсов для выполнения процесса; Sink — расчёт количества выполненных заявок;  $p_1, p_2, p_3$  — ожидаемое время выполнения процессов

необходима для создания базовой схемы производственного процесса (рис. 1).

Queue — формирование очередности передачи заготовок на производство; Service — выполнение технологического процесса; ResourcePool — расчёт количества ресурсов для выполнения процесса; Sink — расчёт количества выполненных заявок;  $p_1, p_2, p_3$  — ожидаемое время выполнения процессов.

Построенная имитационная модель даёт возможность рассчитать результаты производственного процесса на каждом этапе с учётом изменяющихся исходных параметров для каждой операции.

Моделирование технологического процесса обладает следующими преимуществами при его проведении: даёт возможность детального изучения всех процессов на производстве, учёта погрешности при расчётах, установить показатели времени (минимальное, среднее и максимальное) для каждой операции. Максимальная приближённость имитационной модели к реальности достигается за счёт возможности варьировать время выполнения каждой операции.

Потребность внедрения управленческой составляющей в имитационную модель обус-

ловлена необходимостью управления рациональным объёмом производства и складских остатков.

В теории автоматического управления [7, 8] разработаны принципы управления с помощью различных регуляторов.

В системе управления складскими запасами достаточно эффективным показал себя ПИ-регулятор, основанный на пропорционально-интегральном законе управления.

В ходе расчётов получена математическая модель элемента управления (рис. 2), состоящая из алгебраического уравнения (2) и двух дифференциальных уравнений (3, 4):

$$c = c_i + k_p(Q_{str} - Q), \tag{2}$$

где  $c_i$  — интегральная составляющая входного потока;  $k_p$  — коэффициент при пропорциональной составляющей входного потока;  $Q_{str}$  — страховой запас;  $Q$  — минимальный объём запасов;

$$\frac{dc_i}{dt} = k_i(Q_{str} - Q), \tag{3}$$

где  $k_i$  — коэффициент при интегральной составляющей входного потока;

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\alpha}(kc - s - Q), \tag{4}$$

где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности, определяемый параметрами объекта управления;  $k$  — коэффициент усиления объекта по управлению;  $s$  — выходной поток.

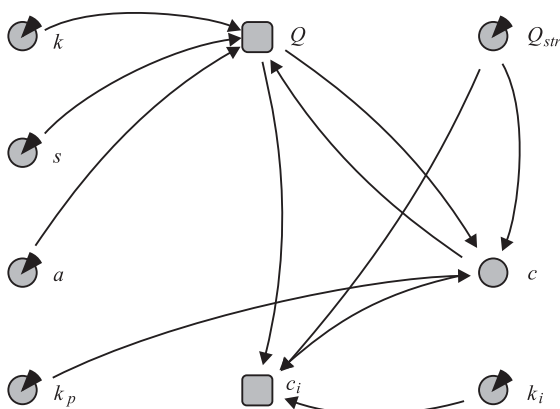
Присвоим начальное значение заготовок  $Q$ , равное 60. Значение  $c$  примем в виде вспомогательной переменной. Это значение будет изменяться в зависимости от текущей загрузки склада. Остальные показатели постоянные:

$$\alpha = 10; k = 1; k_p = 0,5; k_i = 0,5; Q_{str} = 90 \text{ шт.}; s = 45 \text{ шт.}$$

В модель добавлен временной график для отражения динамики изменения размера запасов  $Q$ . В свойствах накопителей и вспомогательной переменной заданы соответствующие уравнения (1—3). Изменения графика показаны на рис. 3.

На графике (см. рис. 3) показан процесс регулирования уровня запасов. Расчёт необходимого размера партии заготовок, поставляемой на производство, ведётся исходя из страхового запаса, равного 90 шт.

Уровень запасов — это накопитель, цель которого отслеживать объём деталей на складе.



**Рис. 2. Математическая модель управления объёмом запасов**

Соответственно, при получении заявки от производителей, пропорционально уменьшается количество деталей на складе. План на день показывает ожидаемый дневной объём производства.

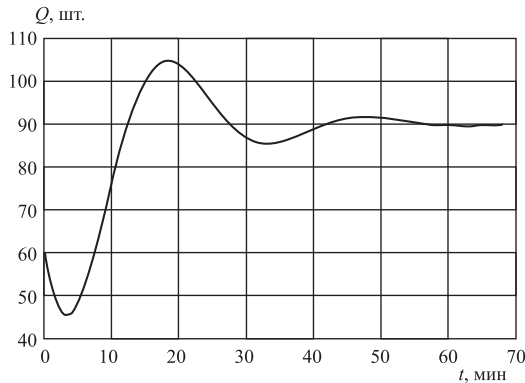


Рис. 3. Динамика изменения объема запасов  $Q$

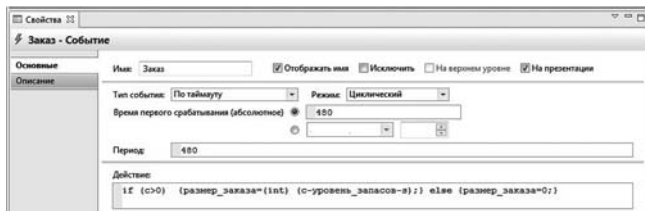


Рис. 4. Формирование заказа в системе AnyLogic

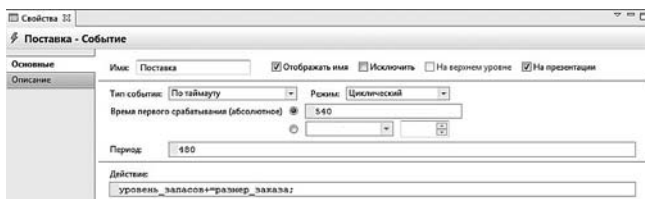


Рис. 5. Расчёт поставки в системе AnyLogic

В динамической подмодели ПИ-регулятора рассчитывается количество поставляемых заготовок. Чтобы сформировать заказ на поставку деталей на склад цеха, в имитационную модель добавлены инструменты, которые производят расчёт размера поставки деталей на склад цеха и моделируют её (рис. 4 и 5).

**Поиск оптимального решения.** Рассмотрим процесс моделирования для поиска оптимальных решений, для чего в систему добавим возможность изменения условий (рис. 6).

Все параметры имеют исходные значения. В диаграмме (см. рис. 6) представлена возможность в процессе моделирования процесса варьировать значения плана программы производства и производственных мощностей.

Управление размерами запасов на складе осуществляется с помощью ПИ-регулятора (рис. 7).

Проведём анализ модели при изменении плана выпуска изделий и производственных мощностей (рис. 8). Первые три дня цех производил не менее 45 изделий (заказ № 1). В течение четвёртого рабочего дня план производства увеличивается в два раза за счёт потребности в производстве дополнительного объёма изделий (заказ № 2). Затем на восьмой день цех завершил производство заказа № 1 и продолжил выполнение заказа № 2. План производства вновь сокращается до первоначального значения (см. рис. 8).

Когда происходило увеличение значения параметра мощности, увеличивалось количество рабочих мест на всех трёх технологических операциях. В случае необходимости

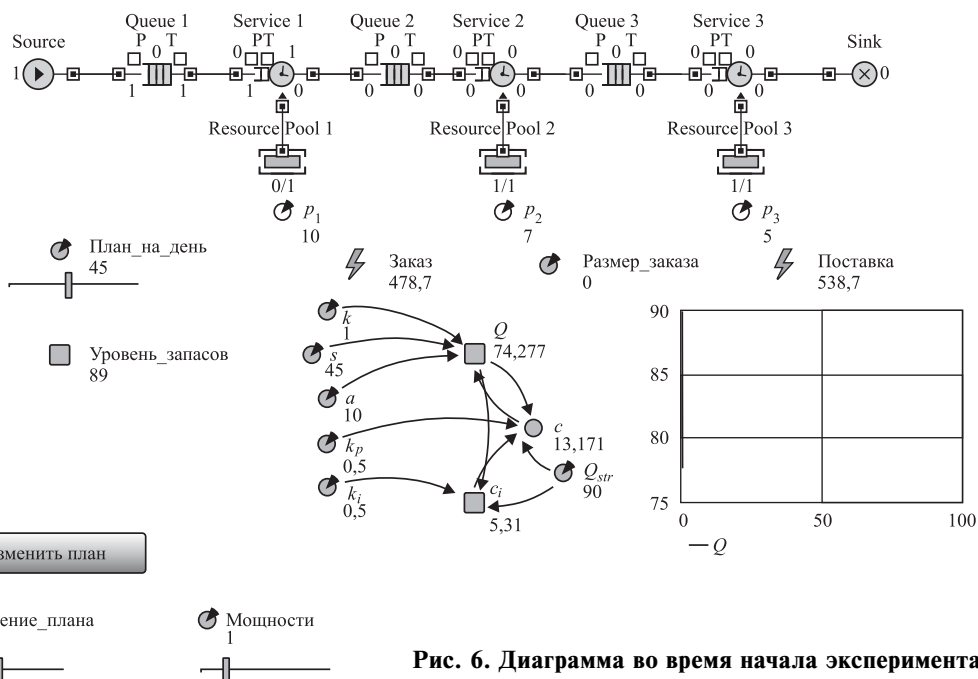


Рис. 6. Диаграмма во время начала эксперимента



возможно регулирование отдельных этапов. После увеличения плана производства и мощностей ПИ-регулятор автоматически обновляет размер страхового запаса и рассчитывает размеры заказов заготовок (рис. 9).

Из рисунка видно, что произошло изменение плана производства на день (план\_на\_

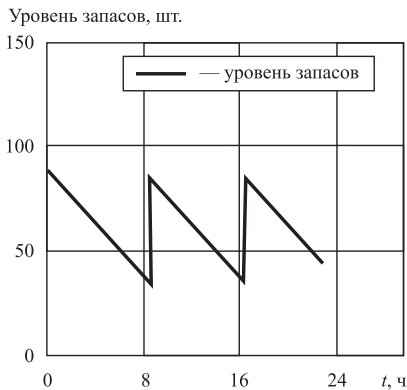


Рис. 7. График движения запасов при стабильной программе производства

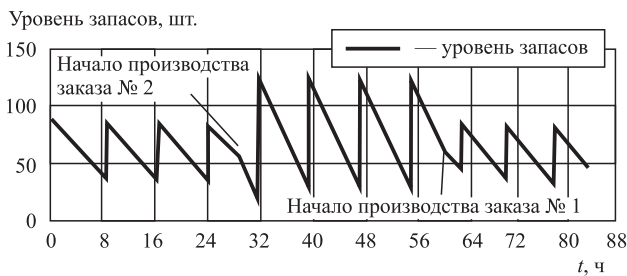


Рис. 8. График движения запасов при изменении плана производства

день = 90 шт.), автоматически скорректировался размер дополнительного запаса ( $Q_{str} = 135$  шт.). Таким образом, график изменения  $Q$  отражает работу ПИ-регулятора. Количество рабочих мест на трёх участках производства увеличилось в два раза. После сокращения дневной нормы производства все параметры также будут обновлены.

Для управления складскими запасами при выполнении небольшого количества заказов производства (одного-двух) можно без применения ПИ-регулятора, поскольку данный инструмент больше подходит для обработки большого объёма заказов.

Имитационная модель, описанная в данной статье, является универсальным инструментом для оптимизации производства. Необходимо подчеркнуть, что её эффективность подтверждается возможностью интегрировать модель в систему управленческих решений, так как она предоставляет следующие возможности: оценивать ожидаемое время выполнения операций, пересчитывать текущие значения параметров производства, что гипотетически позволяет использовать данный метод в качестве основы для внедрения и организации концепции «бережливого производства».

**Выводы.** Созданная модель, имитирующая производственный процесс и имеющая в основе данные в виде СМО, позволяет вносить изменения во все применяемые производственные параметры как до начала моделирования, так и в процессе него. Предложена и обуслов-

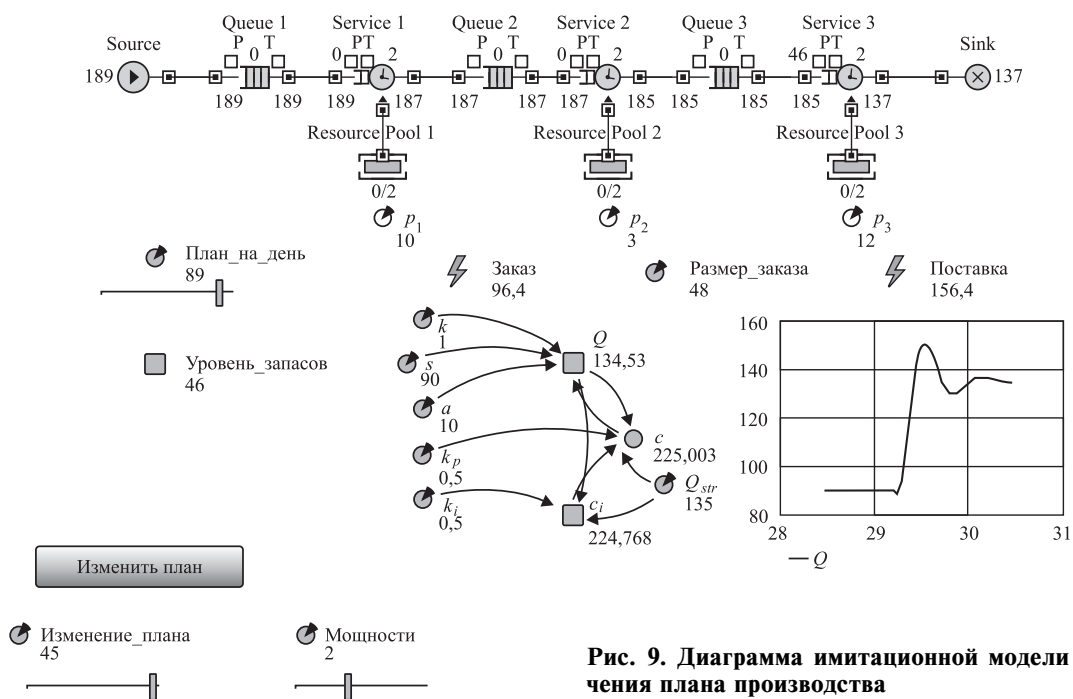


Рис. 9. Диаграмма имитационной модели после увеличения плана производства

лена возможность применения ПИ-регулятора. Созданная модель является универсальной имитацией любого производственного процесса без привязки к отрасли, но имеющего большой и переменный объем заказов.

### Библиографические ссылки

1. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. М.: Наука, 1966. 431 с.
2. Лифшиц А.Л., Мальц Э.А. Статистическое моделирование систем массового обслуживания. М.: Советское радио, 1978. 249 с.
3. Осипов Г.С. Математическое и имитационное моделирование систем массового обслуживания. М.: Изд. дом Академии Естествознания, 2017. 56 с.

4. Маликов Р.Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6. Уфа: БГПУ, 2013. 296 с.

5. Мезенцев К.В. Моделирование систем в AnyLogic 6.4.1: учеб. пособие. Ч. 2. М.: МАДИ, 2011. 108 с.

6. Поляков К.Ю. Теория автоматического управления для «чайников». СПб.: К.Ю. Поляков, 2008. 80 с.

7. Куприяшкин А.Г. Основы моделирования систем. Норильск: НИИ, 2015. 135 с.

8. Боярченко М.А., Кербников Ф.И., Раев В.К., Розенблат М.А. Импульсные регуляторы на бесконтактных магнитных элементах. М.: Энергия, 1966. 120 с.

### Ссылка для цитирования

Галкин Е.В. Управление ресурсами с применением имитационной модели производственного процесса // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 5. С. 195—199. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-195-199.

УДК 519.711.3

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-5-199-202

**В.К. Иванов**, д-р техн. наук, доц.

(Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола)

[ivladko1@mail.ru](mailto:ivladko1@mail.ru)

## К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

*Рассмотрен один из подходов к разработке комплексной математической модели производственной системы.*

**Ключевые слова:** математическая модель; целевая подсистема; критерий качества; управляющий параметр; иерархическая структура.

*One of the approaches to the development of a complex mathematical model of a production system is considered.*

**Keywords:** mathematical model; target subsystem; quality criterion; controlling parameter; hierarchical structure.

Исследуемая производственная система имеет несколько уровней управления и состоит из подсистем (предприятие, цех, участок, производственный модуль), необходимых для выполнения поставленных перед ней задач. Выделены основные параметры, которые определяют функционирование подсистем, входящих в исследуемую производственную систему. Выбраны критерии, характеризующие свойства подсистем, учитываемые при их проектировании и управлении, а также варианты математических моделей различных структур подсистем производственной системы.

При построении комплексной математической модели исследуемой производственной системы реализован новый подход к по-

строению структуры сложной иерархической многоуровневой системы, в основу которого заложена следующая идея взаимосвязи между уровнями [1]: управляющие функции и параметры подсистемы верхнего уровня, которая называется целевой, назначаются критериями качества для подсистем следующего нижнего уровня, в свою очередь, управляющие параметры целевой подсистемы данного уровня назначаются критериями качества для подсистем следующего нижнего уровня и т. д. Связь между подсистемами на одном уровне может быть, а может отсутствовать. Тогда, если функционирование подсистем нижнего уровня не приводит к нарушению ограниченный на критерий качества, то автоматически

выполняются требования, предъявляемые к поведению целевых подсистем следующего более высокого уровня и т. д., следовательно, выполняются и общесистемные цели целевой подсистемы самого высшего уровня.

При таком подходе к построению математической модели структуру производственной системы можно построить следующим образом. Пусть главная цель проектирования и управления сложной системы задаётся целевыми функционалами (критериями)  $I_{0\eta}^0$  ( $\eta = \overline{1, \theta_0}$ ), где  $\eta$  — вид критерия;  $\theta$  — число критериев, а основные требования, предъявляемые к системе, заключаются в указании области изменения этих функционалов  $D^0$  в виде неравенств

$$D^0 = \{I^0 | d_{0\eta}^0 \leq I_{\eta}^0 \leq D_{0\eta}^0, \eta = \overline{1, \theta_0}\}, \quad (1)$$

где  $D^0$  — область (множество) критериев;  $d_{0\eta}^0$  и  $D_{0\eta}^0$  — заданные постоянные, которые определяются требованиями к производственной системе в целом.

Конкретный вид функционалов зависит от постановки задачи проектирования и определяет выбор варианта целевой подсистемы и выполнение всех требований (1). Функции и (или) параметры целевой подсистемы, являющиеся управляющими, обозначаются  $\omega^0 \in \Omega^0$ , где  $\Omega^0$  — область изменения управляющих параметров (множество). Как только цели и требования в виде ограничений (1) установлены на высшем уровне (уровень 0) для всей системы в целом, могут быть сформулированы подцели с ограничениями для подсистем более низкого уровня (уровень 1). Тогда компоненты управляющего вектора в целом всей системы  $\omega^0 \in \Omega^0$  назначаются функционалами (подцелями) подсистем первого уровня

$$I_{j\eta}^1 = \omega_{j\eta}^0; j = \overline{1, m_1}; \eta_1 = \overline{1, \chi_1}; \Omega^0 \subseteq D^1, \quad (2)$$

где  $j, m_1$  — виды управляющих параметров и их число всей производственной системы в целом;  $\eta_1, \chi_1$  — вид и число критериев подсистемы первого уровня;  $D^1$  — область критериев (множество) подсистемы первого уровня.

Конкретный вид критериев (функционалов) (2) определяет набор подсистем первого уровня, формирование и решение задач для которых должно обеспечивать вычисление функционалов (2). Области изменений

$$D^1 = D_1^1 \cup D_2^1.$$

Функционалы (2) первого уровня определяются из решения задачи распределения

ограничений на проектные параметры для целевой подсистемы высшего уровня (уровня 0) в виде неравенств

$$D_1^1 = \{I^1 | d_{j\eta}^1 \leq I_{j\eta}^1 \leq D_{j\eta}^1, \\ j = \overline{1, m_1}; \eta = \overline{1, \chi_1}, I^1 \in D^1\}. \quad (3)$$

На качество функционирования подсистем первого уровня могут быть наложены некоторые дополнительные требования

$$D_2^1 = \{I^{1+} | d_{j\eta}^1 \leq I_{j\eta}^1 \leq D_{j\eta}^1, \\ j = \overline{1, m_1}; \eta = \overline{\chi_1 + 1, \theta_1}, I^{1+} \in D^1\}, \quad (4)$$

которые также должны выполняться при проектировании подсистем первого уровня. В выражениях (3) и (4)  $D_1^1$  и  $D_2^1$  — подмножества множества  $D^1$ .

Дальнейшее построение структуры сложной системы осуществляется по схеме, аналогичной описанной выше, если среди подсистем первого уровня можно выделить одну или несколько целевых подсистем. Тогда для целевых подсистем первого уровня решаются задачи определения для компонент управляющих векторов  $\omega^{1s}$  областей их допустимых изменений  $\Omega^{1s}$  ( $s = \overline{1, k}$ ). Здесь  $s$  и  $k$  — виды управляющих параметров и их число в подсистемах первого уровня. Все компоненты управляющих векторов  $\omega^{1s}$  ( $s = \overline{1, k}$ ) целевых подсистем первого уровня назначаются функционалами (критериями) второго уровня:

$$I_{j\eta}^2 = \omega_{j\eta}^{1s}, j = \overline{1, m_2}; \eta_2 = \overline{1, \chi_2}; \\ \omega_{j\eta}^1 = \sum_{s=1}^k \omega_{j\eta}^{1s}, \Omega^1 \subseteq D^2, \quad (5)$$

где  $\eta_2, \chi_2$  — вид и число критериев подсистем первого уровня;  $D^2$  — область критериев подсистем второго уровня.

При этом ограничения на компоненты управляющих векторов  $\omega^{1s}$  ( $s = \overline{1, k}$ ) определяют непосредственно требования в виде ограничений на критерии подсистем второго уровня:

$$D_1^2 = \{I^2 | d_{j\eta}^2 \leq I_{j\eta}^2 \leq D_{j\eta}^2, \\ j = \overline{1, m_2}, \eta = \overline{1, \chi_2}, I^2 \in D^2\}. \quad (6)$$

На качество функционирования подсистем второго уровня также могут быть наложены дополнительные требования в виде ограничений типа неравенств

$$D_2^2 = \{I^{2+} | d_{j\eta}^2 \leq I_{j\eta}^2 \leq D_{j\eta}^2, \\ j = \overline{1, m_2}, \eta = \overline{\chi_2 + 1, \theta_2}, I^{2+} \in D^2\}, \quad (7)$$



причём все эти функционалы (критерии) (6), (7) должны вычисляться при решении задач аналитического проектирования для подсистем второго уровня. Если же подсистемы второго уровня включают целевые подсистемы, то в результате решения задач аналитического проектирования выделяются компоненты управляющего вектора  $\omega^2 \in \Omega^2$ , по которым комплектуются подсистемы третьего уровня и т. д. Если на каком-то  $n$ -м уровне не удаётся выделить ни одной целевой подсистемы, то процесс построения структуры сложной иерархической многоуровневой системы прекращается.

Очевидно, что при таком методе построения структуры любая сложная система может быть представлена в виде иерархической композиции блоков. Каждый такой блок состоит из многоуровневых, многокритериальных, многорежимных и многовариантных подсистем, имеет на верхнем уровне только одну целевую подсистему и, самое главное, имеет свою математическую модель, позволяющую решать задачи моделирования и оптимизации в каждом блоке в отдельности с целенаправленным достижением общих системных целей.

В иерархических системах понятия «проектный параметр» и «целевой критерий» имеют относительный характер, поскольку проектные параметры верхнего уровня при переходе к нижнему уровню обычно превращаются в целевые критерии.

Таким образом, комплексная математическая модель производственной системы (уровень 0) включает в себя модели трёх уровней:

производственной системы цеха — (уровень 1). Включает математические модели расчёта времени изготовления изделий, стоимости и количества продукции [2];

производственного участка (уровень 2). Включает математические модели технологической, накопительной и транспортной подсистем [3];

производственного модуля (уровень 3). Включает математическую модель в виде передаточных функций или системы дифференциальных уравнений [4].

В каждой из этих математических моделей при решении основной задачи управления и задачи оптимизации выделены проектные параметры и целевые критерии. Так, управляющие функции и параметры

$$\omega^0 = \{T_F^p, \delta T_k^p, S_k^p, T_L^p, \delta T_m^p, S_m^p, S, T, N_k^p, N_m^p\}$$

подсистемы верхнего уровня (уровень 0), которая называется целевой подсистемой, на-

значаются критериями качества для подсистем следующего нижнего уровня (уровень 1), т. е.

$$I^1[\omega^1] = \omega^0 = \{T_F^p, \delta T_k^p, S_k^p, T_L^p, \delta T_m^p, S_m^p, S, T, N_k^p, N_m^p\},$$

где  $T_F^p$  — время изготовления необходимого числа изделий  $p$ -го вида на оборудовании  $k$ -го вида;  $\delta T_k^p$  — время простоя оборудования  $k$ -го вида при изготовлении изделий  $p$ -го вида;  $S_k^p$  — стоимость обработки изделий  $p$ -го вида на оборудовании  $k$ -го вида;  $T_L^p$  — время изготовления необходимого числа изделий  $p$ -го вида специалистами  $L$ -го вида;  $\delta T_m^p$  — время простоя специалистов  $m$ -го вида при изготовлении продукции  $p$ -го вида;  $S_m^p$  — стоимость обработки изделий  $p$ -го вида специалистами  $m$ -го вида;  $S$  — полная стоимость работы в рублях при изготовлении всей продукции;  $T$  — полное время в часах, затраченное на изготовление всей продукции;  $N_k^p$  — количество продукции  $p$ -го вида, которое можно изготовить за заданное время при условии работы всего располагаемого оборудования  $k$ -го вида;  $N_m^p$  — количество продукции  $p$ -го вида, которое можно изготовить за заданное время при наличии специалистов  $m$ -го вида.

Управляющие параметры

$$\omega^1 = \{S_k, F_k, S_m, L_m, n_k^p, n_m^p, T_k^p, T_m^p\}$$

целевой подсистемы (уровень 1) назначаются критериями качества для подсистем следующего нижнего уровня (уровень 2), т. е.

$$I^2[\omega^2] = \omega^1 = \{S_k, F_k, S_m, L_m, n_k^p, n_m^p, T_k^p, T_m^p\},$$

где  $S_k$  — стоимость работы оборудования  $k$ -го вида;  $F_k$  — располагаемое количество оборудования  $k$ -го вида;  $S_m$  — стоимость работы специалиста  $m$ -го вида;  $L_m$  — располагаемая численность специалистов  $m$ -го вида;  $T_k^p$  — время изготовления необходимого количества ( $n$  единиц) продукции  $p$ -го вида на оборудовании  $k$ -го вида;  $T_m^p$  — время изготовления необходимого количества ( $n$  единиц) продукции  $p$ -го вида специалистами  $m$ -го вида;  $n_k^p, n_m^p$  — число деталей  $p$ -го вида, которые необходимо изготовить на оборудовании  $k$ -го вида или специалистами  $m$ -го вида, т. е. производительность производственного участка  $F$ .

Управляющие параметры

$$\omega^2 = \{F_k, R, V, N, n^p\}$$

целевой подсистемы (уровень 2) назначаются критериями качества для подсистем следующего нижнего уровня (уровень 3), т. е.

$$I^3(\omega^3) = \omega^2 = \{F_k, R, V, N, n^p\},$$

где  $F_k$  — располагаемое количество оборудования  $k$ -го вида;  $R$  — число вариантов компоновки оборудования;  $V$  — скорость транспортного средства;  $N$  — количество транспортных средств;  $n^p$  — количество продукции  $p$ -го вида, которое необходимо изготовить.

Характеристики переходного процесса  $t_{cp}$ ,  $t_p$ ,  $\sigma$  системы управления оборудованием (станков с различными типами приводов) становятся целевыми критериями подсистемы (уровень 3), т. е. управляющие параметры  $\omega^3$  целевой подсистемы (уровень 3) имеют вид

$$\omega^3 = \{k_1, T_1, k_5, T_5, k_6, k_7\},$$

где  $k_1, k_5, k_6, k_7, T_1, T_5$  — коэффициенты усиления и постоянные времени элементов системы управления станка соответственно.

Тогда, если функционирование подсистем нижнего уровня не приводит к нарушению ограничений на критерии качества, то оборудование  $k$ -го вида производственного участка выбирается для подсистемы верхнего уровня (уровень 2), затем осуществляется переход на следующий уровень и т. д. Таким образом, автоматически выполняются требования, предъ-

являемые к поведению целевых подсистем следующего более высокого уровня, а следовательно, достигаются и общесистемные цели целевой подсистемы самого высшего уровня.

#### Библиографические ссылки

1. Куршев В.Н. К аналитическому проектированию сложных технических систем // Изв. вузов. Авиационная техника. 1981. № 2. С. 35—39.
2. Иванов В.К. Автоматизация моделирования и управления возможностями производственной системы // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 4. С. 24—28.
3. Иванов В.К. К решению основной задачи управления мелкосерийным машиностроительным производством // Автоматизация. Современные технологии. 2019. № 3. С. 104—108.
4. Иванов В.К. К задаче аналитического проектирования элементов гибких производственных систем // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2010. № 1. С. 91—96.

#### Ссылка для цитирования

Иванов В.К. К вопросу создания комплексной математической модели производственной системы // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 5. С. 199—202. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-199-202.

УДК 628.9:004.9

И.И. Байнева, канд. техн. наук, доц., А.В. Кузяков

(Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Институт электроники и светотехники, г. Саранск)

baynevaii@rambler.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЁТ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЕТСИГНАЛЬНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ

*Рассмотрены особенности светосигнальных приборов и их характеристики. Описаны элементы конструкций таких приборов и их оптических систем. Исследованы методики расчёта оптических линзовых систем на основе линз Френеля, проведены расчёт и компьютерное моделирование такой линзы. Для этого в системе САПР КОМПАС-3D разработаны 3D-модели прибора, линзы Френеля. Для заданных свойств светодиодов и выбранных материалов получено и проанализировано светораспределение прибора в программе TracePro.*

**Ключевые слова:** светосигнальный прибор; оптическая система; линза; светодиод; светораспределение; сигнал; моделирование.

*The features of light-signal devices and their characteristics are considered. The structural elements of such devices and their optical systems are described. The methods of calculating optical lens systems based on Fresnel lenses are researched; such lens calculation and computer simulation is carried out. For these 3D models of the device and Fresnel lenses are developed in the CAD system COMPASS-3D. The device light distribution is obtained and analyzed in the TracePro program for the given properties of the LEDs and the selected materials.*

**Keywords:** light-signal device; optical system; lens; Light-emitting diode; light distribution; signal; modeling.

**Введение.** Система светосигнального оборудования аэродрома (вертодрома), его по-

садочной площадки включает в себя совокупность светосигнальных огней (приборов),

размещённых по определённой схеме и предназначенных для обеспечения взлёта, заключительного этапа захода на посадку, посадки и руления воздушных судов.

Эффективность действия светосигнальных приборов, как и любых других светотехнических изделий, определяется спектральным составом излучения, несущего световой сигнал, плотностью этого излучения, попадающего на приёмник (глаз), и временем воздействия.

**Характеристики световых сигналов.** Дальность действия светового сигнала — основная эксплуатационная характеристика любой светосигнальной установки. В зависимости от поставленной зрительной задачи дальность действия светового сигнала можно подразделить на дальность видимости, дальность различимости и дальность пеленгования. В последнем случае по расположению светосигнальной установки на местности наблюдатель определяет своё местоположение.

Для светосигнальных приборов наибольшее значение имеют первые две характеристики. Одна из них — дальность видимости — определяется расстоянием между светосигнальным прибором и наблюдателем в момент обнаружения или потери светового сигнала, а другая — дальность различимости — расстоянием в момент, когда наблюдатель начал уверенно различать или терять все отличительные признаки, присущие данному сигналу (цвет, ритм прерывности, форму и расположение сигнальной фигуры и др.).

Дальность действия световых сигналов зависит от многих факторов и, в первую очередь, от геометрических и светотехнических характеристик сигнальной фигуры и сигнального огня.

**Конструкция светосигнальных приборов и оптических систем.** Конструктивное оформление светосигнальных приборов определяется типом и размерами источника света и оптической системы, используемых в них. Типы источника света и оптической системы прибора, их характеристики выбираются с учётом согласованности друг с другом. Для сигнальных огней пространственного действия светосигнальный прибор может иметь, например, лишь источник света и защитный колпак.

Большинство сигнальных фонарей комплектуется специальным защитным стеклом, которое обеспечивает большую концентрацию и параллельность лучам, исходящим от источника света. Для дисковой линзы Френеля (рис. 1) и отражателей светящее тело ис-



Рис. 1. Дисковая линза Френеля

точника света желательно иметь в форме диска или прямоугольника с максимумом силы света в направлении к линзе или отражателю. Линзы Френеля обладают рядом достоинств по сравнению с обычными линзами: небольшим весом, малой толщиной, способностью изменять кривизну (справедливо для пластиковых линз) и, самое главное, низкими потерями на поглощение светового потока.

Приборы с круговой характеристикой светораспределения создаются при использовании цилиндрических линз, а также дисковых линз или отражателей при их вращении вокруг вертикальной оси, проходящей через точку фокуса оптики.

Для секторных огней часто применяют цилиндрические линзы, которые частично перекрывают непрозрачным экраном или используют часть цилиндра. Более эффективные светосигнальные приборы для секторных огней получают при использовании комбинированной оптической системы — с отражателями и подвижными линзами с общей точкой фокуса, куда помещают лампу.

Конструкция отражателя характеризуется двумя основными внутренними поверхностями: параболической, которая обеспечивает концентрацию светового потока;

конической или цилиндрической, которая предназначена для увеличения глубины отражателя и тем самым уменьшает выгорание красителя светофильтра.

Материал защитного колпака играет большую роль в обеспечении эффективности работы светосигнального прибора. Изначально все приборы изготавливались с колпаком из стекла, которое обладает отличными оптиче-

скими и защитными характеристиками. В настоящее время к перспективным относятся оптические системы из поликарбоната. Они не уступают стеклянным по оптическим характеристикам, прочности и надёжности.

#### Светосигнальные приборы со светодиодами.

Применение светильников со светодиодным источником света даёт существенную экономию денежных средств по сравнению с традиционными источниками за счёт:

использования кабеля меньшего сечения;  
минимизации затрат на техническое обслуживание;

снижения энергопотребления на 70 %;

большого срока службы;

экологической безопасности и, как следствие, отсутствия необходимости принятия специальных мер по утилизации;

высокой надёжности и механической прочности;

полного отсутствия вредного эффекта низкочастотных пульсаций, исключая усталость глаз и создающего освещённость с более высокой контрастностью, что улучшает качество освещения объекта;

спектра излучения светодиодов, максимально приближенного к дневному спектру Солнца, что обеспечивает комфортные условия работы.

**Методы расчёта линзовых оптических систем.** Основной задачей оптического расчёта френелевской линзы является нахождение

формы наружной преломляющей поверхности каждого её элемента, удовлетворяющей условию отклонения элементом фокальных лучей, падающих на соединительные грани параллельно оптической оси.

Форма преломляющих элементов, т. е. фактически угол между прямолинейной гранью и оптической осью линзы  $\alpha$  (рис. 2), напрямую влияет на потери светового потока при его прохождении через профиль линзы. Алларовский профиль линзы Френеля позволяет свести такие потери к минимуму.

В линзах с постоянной глубиной при увеличении расстояния от центра изменяются угол наклона зубца  $\varphi$  и расстояние между зубцами. При расчёте линз расстояние от зубца до центра  $h$  может быть найдено по порядковому номеру  $i$  зубца:

$$h = \sqrt{2f(n-1)id - i^2d^2}, \quad (1)$$

угол наклона зубца

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{hn}{(n-1)f}\right), \quad (2)$$

число ступеней в линзе

$$N = \frac{(n-1)f - \sqrt{i^2(n-1)^2 - D^2}}{d}. \quad (3)$$

В формулах (1)...(3) используются следующие обозначения:  $f$  — фокусное расстояние линзы;  $n$  — показатель преломления среды;  $D$  — диаметр линзы;  $d$  — диаметр центрального элемента.

При выборе источника света для сигнальных приборов необходимо учитывать коэффициент использования светового потока источника света  $\eta_{\text{исп}}$  при выбранной оптической системе,

$$\eta_{\text{исп}} = \frac{\sum (1 - \cos \varphi) I_{\varphi}}{2I_0}, \quad (4)$$

где  $2(1 - \cos \varphi)$  — телесный угол, в пределах которого световой поток источника света захватывается оптической системой;  $I_{\varphi}$  и  $I_0$  — сила света этого источника света в пределах угла охвата  $\varphi$  и его средняя сферическая сила света соответственно.

Расчёт зональной кривой силы света в меридиональной плоскости для линзы, работающей с шаровым равномерным светящим

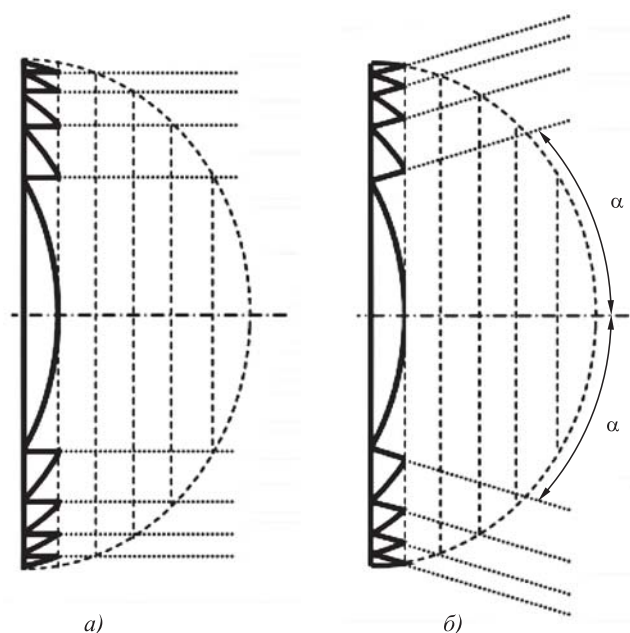


Рис. 2. Профили линзы Френеля:  
а — френелевский; б — алларовский

телом, начинается с определения формы и размеров эквивалентного элементарного отображения (ЭО) и яркости его лучей по формулам [1]

$$L_{\text{Э}} = L_V \frac{V}{V + U_{\text{Э}}}, \quad (5)$$

$$L_{\text{Э}} = \tau L_c \left(1 + \frac{U_{\text{Э}}}{V}\right)^{-1}, \quad (6)$$

$$\xi_{\text{Э}} = \frac{d(V + U_{\text{Э}})}{2r}, \quad (7)$$

$$\xi_{\text{Э}} = \frac{d \cos \varphi_{\text{ср}}(V + U_{\text{Э}})}{2f}, \quad (8)$$

где  $U_{\text{Э}}$ ,  $V$  — размеры эквивалентного ЭО;  $L_c$  — яркость светящего тела источника;  $\xi_{\text{Э}}$  — угловой размер ЭО;  $\varphi_{\text{ср}}$  — угол середины оптической системы;  $f$  — фокусное расстояние линзы.

#### Расчёт и моделирование линзы Френеля.

С появлением специализированного программного обеспечения для оптических расчётов оптических элементов отпала необходимость в «ручных» расчётах их светораспределения [2—4]. Поэтому воспользуемся для этих целей программой TracePro, которая используется для трассировки (моделирования) хода лучей с возможностью фотометрического и оптического анализов оптических систем.

Осуществлены моделирование и расчёт линзы Френеля со следующими техническими требованиями: материал — оптический поликарбонат; фокусное расстояние 52 мм; внутренний диаметр 100 мм; высота линзы 120 мм; толщина несущего слоя 3,5 мм.

В системе КОМПАС-3D создали модель линзы Френеля (рис. 3), задали свойства стекла (оптическое бесцветное стекло БК10 с плотностью 3,12 г/см<sup>3</sup>, показателем преломления 1,57), рассчитали её МЦХ-модель (МЦХ — массцентровочные характеристики): масса колпака составила 0,564 кг.

Для модели в качестве материала задали поликарбонат с плотностью 1,2 г/см<sup>3</sup>, показателем преломления 1,591. Рассчитали её МЦХ-модель: масса колпака составила 0,219 кг. Это в 2,5 раза меньше, чем у стеклянного колпака. При замене обычного стекла оптическим поликарбонатом, линза визуально не изменилась по конструкции, сохранив прежние габариты. Однако масса уменьшилась более чем в два раза; коэффициент уси-

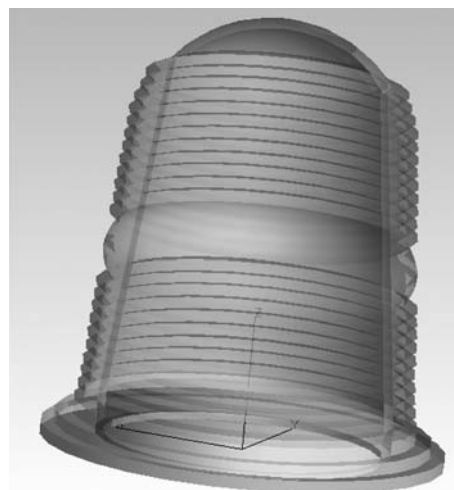


Рис. 3. 3D-модель линзы Френеля

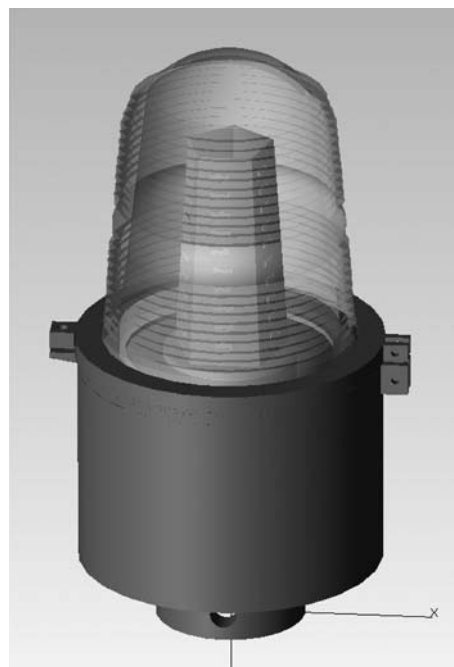
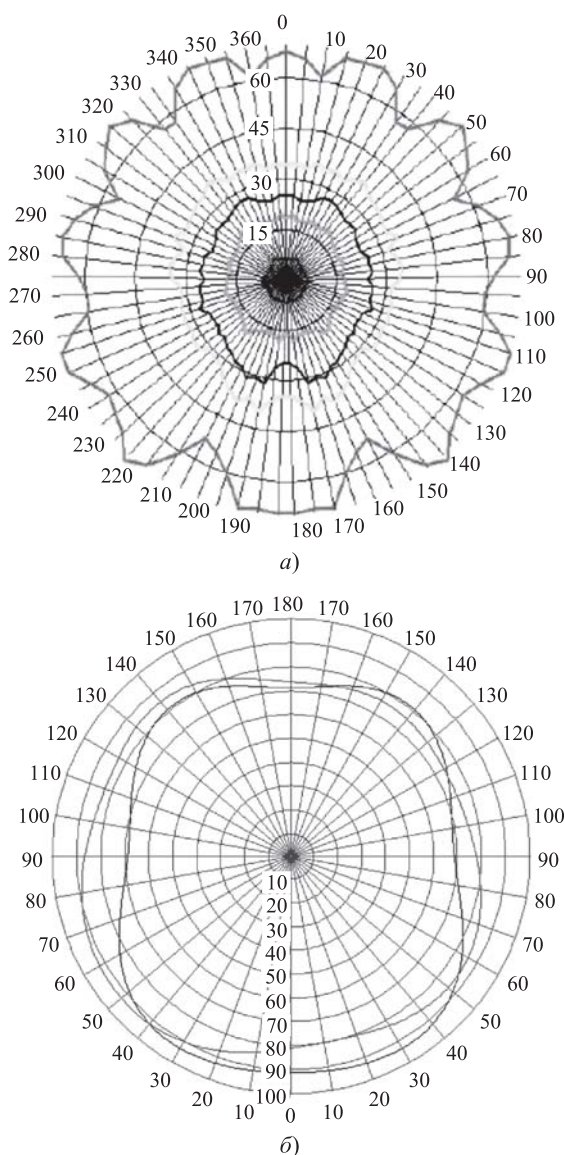


Рис. 4. Модель светосигнального светильника, импортированная в систему TracePro

ления линзы равен 10, что соответствует требованиям на данную линзу.

**Исследование светораспределения оптической системы светосигнального светильника.** Для исследования светораспределения 3D-модель светосигнального светильника, разработанная в системе КОМПАС-3D, была импортирована в программу TracePro (рис. 4).

В TracePro выполнили следующее: задали свойства светодиодам; задали материалы радиатора-подложки, корпуса прибора и его колпака; осуществили трассировку лучей прибора; получили светораспределение (рис. 5).



**Рис. 5. Светораспределение прибора:**  
 а — необходимое; б — полученное

**Выводы.** Светосигнальные приборы имеют разнообразное назначение и в связи с этим различные требования к их конструктивному исполнению и формируемому светораспределению. Поэтому важным является исследование методов их расчёта и моделирования. В работе, представленной в данной статье, осуществлено исследование методик расчёта оптических систем на основе линз Френеля, проведён расчёт и компьютерное моделирование линзовых светосигнальных приборов. В системах КОМПАС-3D и TracePro разработаны модели элементов прибора и линзы Френеля, получено и проанализировано светораспределение прибора для различных условий.

#### *Библиографические ссылки*

1. **Трембач В.В.** Световые приборы. М.: Высш. шк. 1990. 415 с.
2. **Bayneva I.I.** The study of reflective optical system characteristics // Dilemas contemporaneos-educacion, politica y valores. 2019. Vol. 6 (SI). P. 61.
3. **Bayneva I.I.** Calculation and construction of optical elements of light devices // Dilemas contemporaneos-educacion politica y valores. 2019. Vol. 6 (SI). P. 58.
4. **Baynev V., Fedosin S.** Implementation and Optimization of Ray Tracing Algorithm in an Optical System // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems (JARDCS). 2019. Vol. 11. 02-Special Iss., P. 489—493.

#### *Ссылка для цитирования*

**Байнева И.И., Кузяков А.В.** Исследование и расчёт оптических элементов светосигнальных светильников // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 5. С. 202—206.

### **Требования к оформлению библиографических ссылок**

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003 и ГОСТ Р 7.0.5—2008 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — No., том — Vol., страница — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом <http://translit.ru/>.



УДК 621.373.5

**Л.А. Васильева, М.И. Бойчук**(АО «ЛИТ-ФОНОН», Физико-технологический институт МИРЭА —  
Российский технологический университет),**С.А. Микаева**, д-р техн. наук, проф.

(Физико-технологический институт МИРЭА — Российский технологический университет)

mikaeva@npo.lit.ru

**КВАРЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ**

*Проведён анализ маркировки ориентированных кварцевых секций, используемых для изготовления кристаллических элементов, входящих в состав кварцевых генераторов в SMD-корпусах. Отражены особенности технологии изготовления кристаллических элементов. Показаны особенности промышленной технологии выращивания высокодобротного радиационно стойкого кварца. Установлено, что кристаллические элементы, изготовленные из кристаллов кварца, подвергнутых электроочистке и термофизической обработке путём гамма-облучения и высокотемпературного отжига, полностью удовлетворяют предъявляемым в настоящее время требованиям по радиационной стойкости при непрерывных и импульсных облучениях. Приведены данные об испытаниях образцов кварцевых генераторов GK108-П на стойкость к воздействию спецфакторов КГС «Климат-7».*

**Ключевые слова:** генератор; радиационно стойкий кварц; ориентированные кварцевые секции; испытания кварцевых генераторов.

*The marking analysis of the oriented quartz sections used for the manufacture of crystalline elements included in the composition of quartz generators in SMD-cases is carried out. The features of the technology for manufacturing crystalline elements are reflected. The features of the production technology for growing high-quality radiation-resistant quartz are shown. It is established that crystalline elements made from quartz crystals subjected to electrical purification and thermo-physical treatment by gamma irradiation and high-temperature annealing fully satisfy the current requirements over radiation resistance in continuous and pulsed irradiation. The data on testing samples of quartz generators GK108-P for resistance to the effects of special factors KGS «Climate-7» are presented.*

**Keywords:** generator; radiation-resistant quartz; oriented quartz sections; tests of quartz generators.

Промышленная технология выращивания высокодобротного радиационно стойкого кварца, основанная на гидротермических процессах, обеспечивает стабильное качество выращенных кристаллов пьезокварца в соответствии с требованиями стандарта IES 60758 МЭК. С развитием атомной энергетики и космонавтики возникла необходимость эксплуатации пьезоэлектрических приборов, таких как кварцевые генераторы и резонаторы, в условиях повышенных статических и импульсных воздействий ионизирующих и реакторных излучений. При эксплуатации в широком температурном интервале в условиях повышенных уровней радиационных воздействий пьезоэлектрические приборы должны обеспечивать бесперебойную работу и высокую стабильность частоты, идентичность параметров и характеристик. Эти обстоятельства, в свою очередь, повышают требования к качеству выращиваемых кристаллов кварца [1, 2]. Требуемый уровень качества искусственных кри-

сталлов кварца при серийном производстве обеспечивается существующей технологией их выращивания [3, 4].

Особенности промышленной технологии выращивания высокодобротного радиационно стойкого кварца:

примесь алюминия, изовалентно замещающая ионы кремния в кристаллической решётке и одновалентные ионы — компенсаторы избыточного заряда решётки (H, Na, K, Li), ответственные за величину температурного коэффициента частоты и радиационную стойкость, равномерно распределена в кварце, что обеспечивает его высокую добротность;

концентрация примеси алюминия и железа в кварце существенно снижена за счёт использования шихты с низкой концентрацией примеси алюминия и железа, повышения качества обработки поверхности затравочных пластин, завески в камеру роста кристаллов-адсорбентов примеси из раствора, затравок с низкой плотностью линейных дефектов;

снижение захвата примеси солей лития, добавленных в раствор, достигается за счёт изменения соотношения скорости роста различных пирамид кристалла, а также «связывания» примеси раствором;

выращенные кристаллы радиационно стойкого кварца, не требующего корректировки угла среза, обладают концентрацией примеси алюминия менее  $1 \cdot 10^{-4}$  % мас. и добротностью более  $2,2 \cdot 10^6$ ;

сведена до минимума плотность линейных дефектов;

изменение температурно-частотной характеристики, эквивалентное увеличению угла среза для кристаллических элементов с условным обозначением среза АТ до 30" после электроочистки кварца, устраняется последующими гамма-облучением и высокотемпературным отжигом [5].

На базе закупаемого пьезокварца удаётся обеспечить выпуск пьезоэлектрических приборов нового класса, удовлетворяющих высоким требованиям к их техническим характеристикам, таких как кварцевый генератор в SMD-корпусе ГК108-П. Основные технические характеристики кварцевого генератора ГК108-П приведены в табл. 1 [6].

В соответствии с техническими условиями генераторы ГК108-П должны быть стойкими к воздействию специальных факторов 7И и 7С со значениями характеристик  $7И_1...7И_8$ ,  $7И_{10}...7И_{11}$ ,  $7С_1...7С_5$ , соответствующими группе унифицированного исполнения 2У<sub>с</sub> по ГОСТ РВ 20.39.414.2. Также генераторы должны быть стойкими к воздействию специального фактора 7К со значениями характеристик  $7К_1$  и  $7К_4$ , соответствующими группе унифицированного исполнения 1,9×1К по ГОСТ РВ 20.39.414.2.

Таблица 1

**Основные технические характеристики кварцевого генератора ГК108-П**

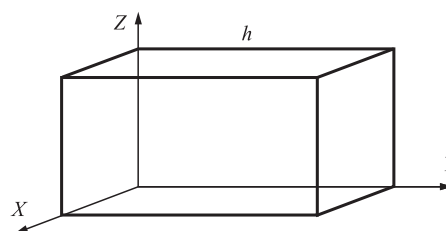
Характеристика	Норма
Номинальная частота (диапазон частот), МГц	От 0,02 до 125
Точность настройки при температуре $(+25 \pm 1)^\circ\text{C}$ (класс точности)	От $\pm 20 \cdot 10^{-6}$ (15) до $\pm 100 \cdot 10^{-6}$ (18)
Температурная нестабильность частоты в интервале температур $-60...+85^\circ\text{C}$	От $\pm 50 \cdot 10^{-6}$ до $\pm 100 \cdot 10^{-6}$
Напряжение питания, В	От $5 \pm 5\%$ до $3,3 \pm 5\%$

Для изготовления кристаллических элементов, входящих в состав генератора ГК108-П, используются ориентированные кварцевые секции СКО 2,4 Іб 2 ЭК ( $17 \times 17$ ) зуб/ $\pm 0^\circ$ . Маркировка закупаемых ориентированных кварцевых секций (СКО) включает в себя значение добротности — 2,4 для сорта В; сорт для определения плотности включений Іб, плотность включений составляет не более 3 на  $\text{см}^3$  для сорта Іб и диапазона размеров 10...30 мкм; сорт для определения плотности каналов травления 2, максимальное число каналов травления составляет 30 на  $\text{см}^2$  для сорта 2; вид кварца — ЭК — электроочищенный кварц; размер —  $17 \times 17$ ; ориентацию СКО относительно кристаллографических осей — зуб/ $\pm 0^\circ$  (рис. 1).

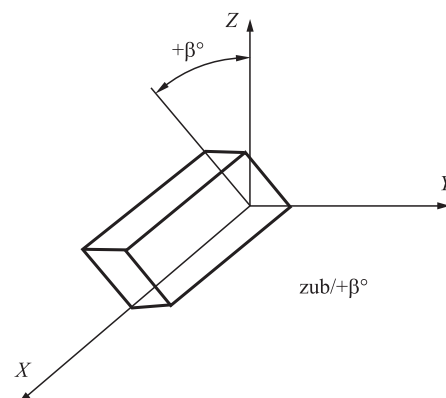
Кристаллические элементы, вырезанные из секций кристалла кварца, также имеют определённую ориентацию относительно кристаллографических (кристаллофизических) осей.

Условное обозначение среза кристаллических элементов, используемых при изготовлении генератора ГК108-П — АТ, показано на рис. 2 [7].

В пьезоэлементе АТ-среза могут быть возбуждены колебания сдвига по толщине  $h$  (поперечные колебания). Размер, определяющий частоту колебаний, — толщина. На рис. 3 показаны такие колебания, возбуждаемые в пьезоэлементах у-среза, срезов  $ухб/+35^\circ 15'$  и  $ухб/-49^\circ$ .



**Рис. 1. Ориентация СКО относительно кристаллографических осей зуб/ $\pm 0^\circ$**



**Рис. 2. Пример изображения АТ-среза кристаллических элементов**

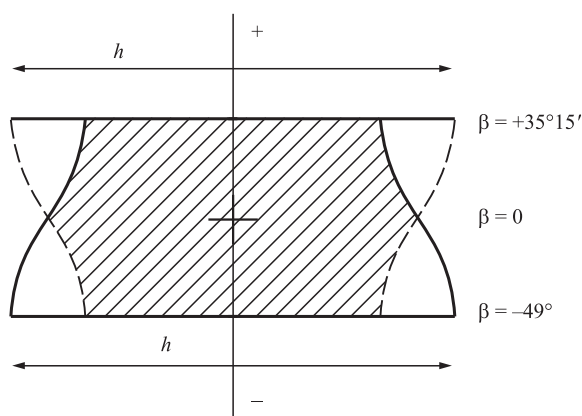


Рис. 3. Колебания сдвига по толщине пластины

Технология выращивания высокодобротного однородного радиационно стойкого кварца предназначена для производства прецизионных и высокочастотных резонаторов и генераторов с применением современных методов изготовления кристаллических элементов (проволочной резки, шлифовки, химического травления в полирующих растворах). Механическая обработка кварцевых кристаллических элементов (КЭ) занимает большую часть времени изготовления кварцевых генераторов и резонаторов. В акционерном обществе «ЛИТ-ФОНОН» (г. Москва) используются современные методы группового формообразования КЭ, позволяющие максимально сократить технологический процесс.

Особенности технологии изготовления КЭ от резки секций кварцевых ориентированных до сортировки кристаллических элементов и порядок технологических операций следующие:

резка СКО — проводится на станках проволочной резки YJXQ120A, предназначенных для ровной резки образцов особенно хрупких кристаллов  $\text{SiO}_2$ , что позволяет уменьшить толщину заготовок (минимальная толщина в настоящее время 200 мкм) и величину нарушенного слоя, определяемую зернистостью используемого абразива (M14);

шлифовка групповых пластин — проводится на станках планетарного типа TDL-5B-8L, YJ2M5B/8L с контролем частоты, обеспечивающих удобство в управлении, высокую точность регулирования толщины пластин, минимальный разброс разнотолщинности по пластине и минимальный разброс толщины между пластинами при одновременной загрузке 40 пластин;

травление групповых пластин низкочастотного диапазона кристаллических элементов с фаской;

склейка групповых пластин в пакет с припуском в размер длины КЭ; резка пакетов в размер длины КЭ — проводится на станке проволочной резки;

шлифовка контура пакетов в размер длины КЭ — проводится на планетарном станке;

резка пакетов пластин в размер ширины КЭ — проводится на станке проволочной резки;

шлифовка контура пакетов в размер ширины КЭ — проводится на планетарном станке;

химическая расклейка пакетов и очистка КЭ;

формообразование двухсторонней фаски КЭ — проводится на автоматическом высокоскоростном шлифовальном станке GE-HBV200, обеспечивающем стабильный процесс фаскирования за счёт поддержания условий процесса постоянными. Это достигается наличием специальных элементов, таких как климатизация рабочей зоны, охлаждение двигателя и поддержание заданного температурного режима. Для высокочастотного диапазона используется глубокое травление в полирующих растворах;

химическая посадка на частоту КЭ;

автоматическая сортировка КЭ — проводится на сортировщике кристаллических элементов GVS-2200, позволяющем сортировать КЭ с заданными параметрами и осуществлять автоматизацию с возможностью мониторинга в режиме реального времени.

Резонаторы и генераторы с кристаллическими элементами, изготовленными из кристаллов кварца, подвергнутых электроочистке и термофизической обработке путём гамма-облучения и высокотемпературного отжига, полностью удовлетворяют предъявляемым в настоящее время требованиям по радиационной стойкости при непрерывных и импульсных облучениях.

В рамках работы по разработке кварцевого генератора в микросхемном исполнении с выходными сигналами уровня транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) и логики комплементарной структуры металл—оксид—полупроводник (КМОП) в микроминиатюрном керамическом корпусе для поверхностного монтажа на частоты до 70 МГц были проведены испытания образцов кварцевых генераторов ГК108-П на стойкость к воздействию спецфакторов комплекса государственных стандартов (КГС) «Климат-7».

Для проведения испытаний были отображены 9 генераторов ГК108-П на частоты 10,0000, 21,1015 и 70,0060 МГц: кварцевые генераторы № 2...4 на частоту 10,0000 МГц; № 5...7

Таблица 2

**Контролируемые параметры кварцевых генераторов в процессе спецвоздействий при температуре (+25 ± 5) °С**

Контролируемый параметр	Значение параметра			Факторы, для которых необходим контроль данного параметра
	до воздействия (норма)	в процессе воздействия	после воздействия	
Относительное изменение рабочей частоты генераторов $\Delta F/F$	$\pm 2,0 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2,0 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2,0 \cdot 10^{-5}$	7И <sub>6</sub> , 7И <sub>1</sub> , 7И <sub>7</sub> — в процессе и после воздействия
Ток потребления $I_{\text{пот}}$ , мА	≤50	—	≤50	7И <sub>6</sub> , 7И <sub>1</sub> , 7И <sub>7</sub> — после воздействия

Таблица 3

**Воздействующие факторы и соответствующие номера моделирующих установок**

Воздействующий фактор	Номер моделирующей установки
7И <sub>6</sub> , 7И <sub>8</sub>	5
7И <sub>7</sub>	200
7И <sub>1</sub>	40

на частоту 21,1015 МГц; № 8...10 на частоту 70,0060 МГц [8].

Согласно требованиям, предъявляемым к кварцевым генераторам, они должны быть стойкими к воздействию специальных факторов 7И КГС «Климат-7» со значениями характеристик, соответствующими группе исполнения 2У<sub>с</sub>. В процессе воздействия специальных факторов допускается временная потеря работоспособности на время, не пре-

вышающее 50 мс. Уровень фактора 7И<sub>8</sub> устанавливается в процессе испытаний [9].

Перечень параметров, контролируемых в процессе испытаний (до, в процессе и после спецвоздействия) и нормы на них приведены в табл. 2.

Нормы для испытаний при воздействии факторов 7И:  $7И_{6н.и} = 1,5 \cdot 7И_{6тр}$  ( $K_t = 1$ );  $7И_{8н.и} = 1,5 \cdot 7И_{8тр}$  ( $K_t = 1$ );  $7И_{1н.и} = 7,5 \cdot 7И_{1тр}$ ;  $7И_{7н.и} = 2,4 \cdot 7И_{7тр}$ , где индексом «н.и» — обозначены нормы; «тр» — требуемые значения;  $K_t$  — коэффициент эффективной длительности воздействия фактора.

Испытания проводились на моделирующих установках научно-исследовательского института приборов (НИИП), г. Лыткарино. Воздействующие факторы и соответствующие им номера моделирующих установок представлены в табл. 3.

Результаты дозиметрического сопровождения испытаний на моделирующей установке № 5 приведены в табл. 4. Результаты измерения

Таблица 4

**Результаты дозиметрического сопровождения испытаний при воздействии специальных факторов 7И<sub>6</sub>, 7И<sub>8</sub>**

Номер изделия	Порядковый номер воздействия	Детектор		Изделие		
		Номер	Тип	Уровни фактора 7И <sub>8</sub>	Эффективная длительность (воздействия фактора) $\tau_{\text{эфф}}$ , нс	Уровни фактора 7И <sub>6</sub>
1	4	51	ИС-7	0,04·2У <sub>с</sub>	19,4	4,1·2У <sub>с</sub>
2	5	101	ИС-7	0,03·2У <sub>с</sub>	19,8	3,0·2У <sub>с</sub>
3	7	42	ИС-7	0,03·2У <sub>с</sub>	20,1	3,0·2У <sub>с</sub>
4	2	139	ИС-7	0,02·2У <sub>с</sub>	20,4	2,0·2У <sub>с</sub>
5	6	171	ИС-7	0,016·2У <sub>с</sub>	20,1	1,6·2У <sub>с</sub>
6	7	226	ИС-7	0,117·2У <sub>с</sub>	19,6	1,7·2У <sub>с</sub>
7	1	201	ИС-7	0,016·2У <sub>с</sub>	19,8	1,6·2У <sub>с</sub>
8	2	142	ИС-7	0,017·2У <sub>с</sub>	20,2	1,7·2У <sub>с</sub>
9	3	32	ИС-7	0,017·2У <sub>с</sub>	19,2	1,8·2У <sub>с</sub>

критериальных параметров — потребляемого тока  $I_{\text{п}}$  и частоты выходного сигнала  $F_{\text{вых}}$  — кварцевых генераторов до, в процессе и после испытаний на воздействие фактора  $7И_6$  установки № 5 приведены в табл. 5.

При воздействии на кварцевые генераторы № 1...9 спецфактора  $7И_6$  установки № 5 с уровнем  $(1,6...4,1) \cdot 2У_c$  наблюдалось увеличение частоты входного сигнала от 40 Гц (изделие № 3) до 160 Гц (изделие № 9). После спецвоздействия потребляемые токи  $I_{\text{п}}$  и частота кварцевых генераторов  $F_{\text{вых}}$  не изменились.

Результаты дозиметрического сопровождения испытаний на моделирующей установке № 200 приведены в табл. 6, а результаты измерения критериальных параметров кварцевых генераторов до, в процессе и после испытаний на воздействие фактора  $7И_7$  установки № 200 — в табл. 7.

При воздействии на кварцевые генераторы № 1...9 спецфактора  $7И_7$  установки № 200

Таблица 6

**Результаты дозиметрического сопровождения испытаний при воздействии специального фактора  $7И_7$**

Номер изделия	Детектор				Изделие	
	Номер	Тип	Время облучения, мин	Уровни фактора $7И_7$	Время облучения, мин	Уровень фактора $7И_7$
1	25	ИС-7	20	2,5-2У <sub>c</sub>	20	2,5-2У <sub>c</sub>
2	288	ИС-7	20	2,7-2У <sub>c</sub>	20	2,7-2У <sub>c</sub>
3	122	ИС-7	20	2,6-2У <sub>c</sub>	20	2,6-2У <sub>c</sub>
4	25	ИС-7	20	2,5-2У <sub>c</sub>	20	2,5-2У <sub>c</sub>
5	288	ИС-7	20	2,7-2У <sub>c</sub>	20	2,5-2У <sub>c</sub>
6	122	ИС-7	20	2,6-2У <sub>c</sub>	20	2,5-2У <sub>c</sub>
7	25	ИС-7	20	2,5-2У <sub>c</sub>	20	2,5-2У <sub>c</sub>
8	288	ИС-7	20	2,7-2У <sub>c</sub>	20	2,5-2У <sub>c</sub>
9	122	ИС-7	20	2,6-2У <sub>c</sub>	20	2,5-2У <sub>c</sub>

Таблица 5

**Результаты измерения критериальных параметров кварцевых генераторов  $I_{\text{п}}$ ,  $F_{\text{вых}}$  до, в процессе и после испытаний на воздействие фактора  $7И_6^*$**

Номер изделия	Номер импульса	Уровень фактора $7И_6$	Измеряемые параметры		
			до воздействия	в процессе воздействия	после воздействия
1	4	4,1-2У <sub>c</sub>	$\frac{8,7}{10\ 000,06}$	—	$\frac{8,7}{10\ 000,06}$
2	5	3,0-2У <sub>c</sub>	$\frac{9,2}{10\ 000,10}$	—	$\frac{9,2}{10\ 000,10}$
3	7	3,9-2У <sub>c</sub>	$\frac{9,9}{10\ 000,10}$	—	$\frac{9,9}{10\ 000,10}$
4	2	2,0-2У <sub>c</sub>	$\frac{12,0}{21\ 101,72}$	—	$\frac{12,0}{21\ 101,72}$
5	5	1,6-2У <sub>c</sub>	$\frac{17,5}{21\ 101,03}$	—	$\frac{17,5}{21\ 101,03}$
6	7	1,7-2У <sub>c</sub>	$\frac{14,0}{21\ 101,82}$	—	$\frac{14,0}{21\ 101,82}$
7	1	1,6-2У <sub>c</sub>	$\frac{34,3}{70\ 006,12}$	—	$\frac{34,3}{70\ 006,12}$
8	2	1,7-2У <sub>c</sub>	$\frac{39,4}{70\ 006,20}$	—	$\frac{39,4}{70\ 006,20}$
9	3	1,8-2У <sub>c</sub>	$\frac{38,6}{70\ 005,07}$	—	$\frac{38,6}{70\ 005,07}$

\*В числителе приведены значения  $I_{\text{п}}$ , мА, в знаменателе  $F_{\text{вых}}$ , кГц.

Таблица 7

**Результаты измерения критериальных параметров кварцевых генераторов  $I_{\text{п}}$ ,  $F_{\text{вых}}$  до, в процессе и после испытаний на воздействие фактора  $7И_7^*$**

Номер изделия	Уровень фактора $7И_7$	Измеряемые параметры		
		до воздействия	в процессе воздействия	после воздействия
1	2,5-2У <sub>c</sub>	$\frac{8,7}{10\ 000,10}$	$\frac{8,9}{10\ 000,10}$	$\frac{8,9}{10\ 000,10}$
2	2,5-2У <sub>c</sub>	$\frac{9,2}{10\ 000,10}$	$\frac{9,5}{10\ 000,10}$	$\frac{9,5}{10\ 000,10}$
3	2,5-2У <sub>c</sub>	$\frac{9,9}{10\ 000,12}$	$\frac{11,0}{10\ 000,12}$	$\frac{11,0}{10\ 000,12}$
4	2,5-2У <sub>c</sub>	$\frac{11,9}{21\ 101,72}$	$\frac{12,2}{21\ 101,72}$	$\frac{12,2}{21\ 101,72}$
5	2,5-2У <sub>c</sub>	$\frac{17,5}{21\ 101,3}$	$\frac{18,0}{21\ 101,3}$	$\frac{18,0}{21\ 101,3}$
6	2,5-2У <sub>c</sub>	$\frac{14,0}{21\ 101,9}$	$\frac{15,5}{21\ 101,9}$	$\frac{15,0}{21\ 101,9}$
7	2,5-2У <sub>c</sub>	$\frac{34,6}{70\ 006,15}$	$\frac{36,0}{70\ 006,15}$	$\frac{36,0}{70\ 006,15}$
8	2,5-2У <sub>c</sub>	$\frac{41,0}{70\ 006,3}$	$\frac{41,7}{70\ 006,3}$	$\frac{41,7}{70\ 006,3}$
9	2,5-2У <sub>c</sub>	$\frac{38,7}{70\ 005,9}$	$\frac{40,2}{70\ 005,9}$	$\frac{40,2}{70\ 005,9}$

\*В числителе приведены значения  $I_{\text{п}}$ , мА, в знаменателе  $F_{\text{вых}}$ , кГц.

Таблица 8

**Результаты дозиметрического сопровождения испытаний при воздействии специального фактора  $7И_1$**

Номер изделия	Детектор	Воздействующие факторы		
	Тип/номер	Уровень сопутствующего фактора $7И_7$	$\tau_{эфф}^*$ мкс	Уровень сопутствующего фактора $7И_1$
1...3	S <sup>32</sup> /489	—	101,2	7,7·2У <sub>с</sub>
	S <sup>32</sup> /83	—		7,8·2У <sub>с</sub>
	СГД-8/50	0,2·2У <sub>с</sub>	166,7	—
	СГД-8/59	0,2·2У <sub>с</sub>		—
4...6	S <sup>32</sup> /134	—	104,3	7,9·2У <sub>с</sub>
	S <sup>32</sup> /311	—		7,8·2У <sub>с</sub>
	СГД-8/50	0,2·2У <sub>с</sub>	168,4	—
	СГД-8/59	0,14·2У <sub>с</sub>		—
7...9	S <sup>32</sup> /134	—	103,6	7,7·2У <sub>с</sub>
	S <sup>32</sup> /311	—		7,9·2У <sub>с</sub>
	СГД-8/50	0,2·2У <sub>с</sub>	166,9	—
	СГД-8/59	0,2·2У <sub>с</sub>		—

\*Погрешность измерения  $q_{0,1} = 9,5$ .

с уровнем  $2,5 \cdot 2U_c$  частота выходного сигнала генераторов не изменилась, ток потребления кварцевых генераторов вырос незначительно и находился в пределах норм ТУ.

Результаты дозиметрического сопровождения испытаний на моделирующей установке № 40 приведены в табл. 8.

При воздействии на кварцевые генераторы спецфактора  $7И_1$  с уровнем  $(7,7...7,9) \cdot 2U_c$  частота выходного сигнала генераторов не изменилась, токи потребления после спецвоздействия не изменились.

Кварцевые генераторы на частоты 10,0000, 21,1015 и 70,0060 МГц, разработанные в процессе ОКР «Мистика», были признаны соответствующими требованиям технического задания при воздействии факторов  $7И$  с уровнем, соответствующим группе  $2U_c$  КГС «Климат-7».

Уровень фактора  $7И_8$  по параметру относительное изменение рабочей частоты генераторов  $(\Delta F/F)$  — не менее  $1,1 \cdot 2U_c$ .

В заключение следует отметить, что кварцевые генераторы ГК108-П относятся к изделиям общего оборонного назначения, требования стойкости к специальным внешним воздействиям факторам которых соответствуют унифицированной группе исполнения  $2U_c$ . Экспериментально подтвержден уровень соответствия генераторов ГК108-П к воздействию спецфакторов по ГОСТ РВ 20.39.414.2—98 со значениями характеристик  $7И_1...7И_8$ ,  $7И_{10}...7И_{11}$ ,  $7C_1...7C_5$  [10].

#### Библиографические ссылки

1. Смагин А.Г. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы и их применение. М.: Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1967.
2. Бойчук М.И., Микаева А.С., Микаева С.А. Температурно-частотные характеристики резонаторов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. № 8.
3. 60758 МЭК. Редакция 4.0 2008-11. Кристалл синтетического кварца — Спецификация и руководство по применению.
4. Микаева С.А., Микаева А.С. Современные электронные системы и устройства. М.: РУСАЙНС, 2019.
5. Кабанович И.В. Основы промышленной технологии выращивания высокочастотного однородного радиационно-стойкого пьезокварца для электронной техники. М., 1990.
6. Генераторы кварцевые ГК108-П. Технические условия АФТП.433520.007ТУ.
7. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. Л.: Энергия, 1969.
8. Протокол испытаний кварцевых генераторов ОКР «Мистика» на стойкость к воздействию спецфакторов КГС «Климат-7» от 11.11.2004.
9. Техническое задание на ОКР «Разработка кварцевого генератора в микросхемном исполнении с выходными сигналами уровня ТТЛ- и КМОП-логики в микроминиатюрном керамическом корпусе для поверхностного монтажа на частоты до 70 МГц». Шифр «Мистика». 30.06.2003.
10. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций: справочник / под ред. Н.А. Сидорова, В.К. Князева. М.: Сов. радио, 1976.

#### Ссылка для цитирования

Васильева Л.А., Бойчук М.И., Микаева С.А. Кварцевые генераторы // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 5. С. 207—212.

### Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу:

«Пресса России» — индекс 27838.





**Е.А. Микрин**, д-р техн. наук, проф., акад. РАН, **Н.Е. Зубов**, д-р техн. наук, проф.,  
**В.Н. Рябченко**, д-р техн. наук, проф.  
(ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

nik.zubov@gmail.com

## ИТЕРАЦИОННЫЙ КРИТЕРИЙ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕСКРИПТОРНОЙ СИСТЕМЫ

*Рассмотрен итерационный критерий асимптотической устойчивости линейной дескрипторной системы. Критерий построен на основе итерационного алгоритма вычисления обобщённой матричной сигнум-функции. В качестве примера приведена задача анализа асимптотической устойчивости большой дескрипторной системы.*

**Ключевые слова:** линейная дескрипторная система; критерий устойчивости; матричная сигнум-функция; алгоритм поиска.

*An iterative criterion for the asymptotic steadiness of a linear descriptor system is considered. The criterion is based on an iterative algorithm for computing a generalized matrix sign-function. As an example, the problem of analyzing the asymptotic steadiness of a large descriptor system is given.*

**Keywords:** linear descriptor system; steadiness criterion; matrix sign-function; search algorithm.

**Введение.** В технических системах проблема анализа устойчивости нормальных, аварийных и послеаварийных режимов занимает одно из центральных мест [1, 2]. В качестве основного объекта практических расчётов здесь выступает линеаризация нелинейной дескрипторной (алгебро-дифференциальной) математической модели

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}); \quad (1)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}), \quad (2)$$

где  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n_x}$  — вектор переменных состояния;  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{n_y}$  — вектор параметров;  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{n_u}$  — вектор входных воздействий;  $\mathbf{f}(\cdot)$  и  $\mathbf{g}(\cdot)$  — нелинейные векторные функции;  $\mathbb{R}$  — множество действительных чисел.

Стандартный подход к линеаризации (1) и (2) связан с процедурой разложения в ряд Тейлора нелинейной векторной функции в малой окрестности установившегося движения. В результате линеаризации получается следующая аппроксимация:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{u}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \Delta \mathbf{x} + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \Delta \mathbf{y} + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \Delta \mathbf{u}; \quad (3)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) = \mathbf{g}(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{u}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \Delta \mathbf{x} + \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \Delta \mathbf{y} + \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \Delta \mathbf{u}, \quad (4)$$

где нижний индекс 0 обозначает установившееся движение;

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}' \in \mathbb{R}^{n_x},$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_0 = \mathbf{y}'' \in \mathbb{R}^{n_y},$$

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_0 = \mathbf{u} \in \mathbb{R}^{n_u}$$

— отклонения соответствующих векторов.

Линеаризация уравнений установившегося режима даёт дескрипторные (алгебро-дифференциальные) уравнения

$$\dot{\mathbf{x}}' = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \mathbf{x}' + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \mathbf{y}'' + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \mathbf{u}; \quad (5)$$

$$\mathbf{0} = \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \mathbf{x}' + \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \mathbf{y}'' + \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} \mathbf{u}. \quad (6)$$

При формальной обратимости матрицы  $\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{y}$  уравнения (5) и (6) могут быть преоб-

разованы к форме Коши (форме пространства состояний):

$$\dot{x}' = \left( \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right) x' + \left( \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \right) u. \quad (7)$$

Если матрица  $\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{y}$  вырождена, тогда уравнение (7) не существует. Однако даже в случае обратимости  $\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{y}$  в практических расчётах на первый план выступает проблема обусловленности этой матрицы.

Напомним, что число обратимости матрицы  $\text{cond}(\cdot)$  является отношением максимального сингулярного числа  $\sigma_{\max}$  матрицы к её минимальному сингулярному числу  $\sigma_{\min}$  [3]. При

$$\text{cond}(\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{y}) = \frac{\sigma_{\max}(\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{y})}{\sigma_{\min}(\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{y})} \gg 1 \quad (8)$$

матрица  $\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{y}$  близка к вырожденности и математическая модель (7) становится чрезвычайно чувствительной («жесткой») по отношению к малым ошибкам вычислений и вариациям параметров.

В более общем случае математическая модель (7) при справедливости неравенства (8) или

$$\det(\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{y}) \approx 0 \quad (9)$$

является некорректной по А.Н. Тихонову [4].

Если не принимать дополнительных мер, то все вычисления с использованием матриц

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}}, \quad \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \quad (10)$$

(анализ статической устойчивости, анализ управляемости и наблюдаемости и др.) будут приводить к серьёзным ошибкам. В качестве одной из таких мер можно рассматривать процедуру преобусловливания матрицы [5, 6]. Однако в общем случае данный метод наталкивается на ряд существенных трудностей [7]. Иными словами, улучшение обусловленности матрицы  $\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{y}$  будет сопровождаться ухудшением обусловленности произведения матриц

$$\left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}}, \quad \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}},$$

а значит, и матриц (10).

Альтернативой здесь является использование в расчётах исходной линеаризованной модели (5) и (6).

Введём следующие обозначения:

$$x = \begin{pmatrix} x' \\ x'' \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n; \quad n = n_x + n_y; \quad (11)$$

$$E = \begin{pmatrix} I_{n_x} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n};$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \\ \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}; \quad B = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \\ \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n_u}, \quad (12)$$

где  $I_{n_x}$  — единичная матрица размера  $n_x \times n_x$ .

Тогда модель (5) и (6) можно переписать в виде

$$E \dot{x} = Ax + Bu. \quad (13)$$

В современной математической теории систем линейную модель (13) называют линейной дескрипторной (linear descriptor system), линейной сингулярной (linear singular system), а также линейной алгебро-дифференциальной системой (linear algebraic differential system) [8, 9]. Для данного вида систем, как и для обычных линейных систем общие вопросы теории управления в настоящее время интенсивно развиваются [8—16].

Сразу же заметим, что асимптотическая устойчивость линейной дескрипторной системы (13) практически не связана с асимптотической устойчивостью матрицы  $A$ . Точнее, только при  $E = I_n$  устойчивость этой системы определяется устойчивостью (гурвицевостью) матрицы  $A$ . При обратимой матрице  $E$  для асимптотической устойчивости (13) необходима и достаточна гурвицевость матриц  $E^{-1}A$ ,  $AE^{-1}$  [5].

Рассматривая в контексте дескрипторной системы задачу определения асимптотической устойчивости, заданной в форме (13), следует отметить, что она относится к обобщённым задачам на собственные значения пучка матриц [17]

$$\lambda E - A, \quad \det E = 0. \quad (14)$$

В общем случае при выполнении условия регулярности пучка (14) [17]

$$\exists \lambda \in \mathbb{C} : \det(\lambda E - A) \neq 0, \quad (15)$$

система (13) имеет  $k$  конечных собственных значений  $\lambda^{\text{fin}}$  и  $n - k$  собственных значений «на бесконечности»  $\lambda^\infty$ . При этом можно утверждать, что динамическая система, заданная в дескрипторной форме (13), является устойчивой тогда и только тогда, когда все конечные собственные значения  $\lambda^{\text{fin}}$  обобщённого пучка матриц (14) лежат в левой полуплоскости комплексной плоскости  $C$ , т. е.

$$\forall \lambda^{\text{fin}} : \operatorname{Re}(\lambda^{\text{fin}}) < 0. \quad (16)$$

Набор методов анализа динамической системы, заданной в дескрипторной форме (13), существенно мал. Он включает: спектральные методы (методы обобщённой проблемы собственных значений) и итерационные методы (методы на основе различных итерационных процедур).

В данной работе вводится новый итерационный критерий асимптотической устойчивости динамической системы, заданной в дескрипторной форме (13). Данный критерий построен на основе итерационного алгоритма вычисления обобщённой матричной сигнум-функции.

**Матричная сигнум-функция (МСФ).** Рассмотрим некоторую числовую матрицу  $W \in \mathbb{R}^{n \times n}$  и множество её собственных значений

$$\Lambda(W) = \{\lambda_i \in C \mid \det(\lambda_i I_n - W) = 0, \quad i = \overline{1, n}\}. \quad (17)$$

Пусть ни одно из собственных значений  $\lambda_i$  не лежит на мнимой оси. В этом случае справедлива следующая вещественная жорданова декомпозиция матрицы [17, 18]:

$$W = T \left( \begin{array}{c|c} J_- & 0 \\ \hline 0 & J_+ \end{array} \right) T^{-1}, \quad (18)$$

где  $J_- \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ,  $J_+ \in \mathbb{R}^{(n-m) \times (n-m)}$  — жордановы блоки, представляющие соответственно устойчивое ( $\operatorname{Re} \lambda_i < 0$ ) и неустойчивое ( $\operatorname{Re} \lambda_i > 0$ ) подмножества собственных значений  $\lambda_i$  матрицы (18).

Введём определение [19].

**Определение 1.** Матричной сигнум-функцией (МСФ, от англ. matrix sign-function) матрицы  $W$  (18) называется выражение

$$\operatorname{sign}(W) = T \left( \begin{array}{c|c} -I_m & 0 \\ \hline 0 & I_{n-m} \end{array} \right) T^{-1}. \quad (19)$$

Таким образом, согласно введённому определению жорданов блок  $J_-$  из разложения (18) ассоциируется в формуле (19) с единичной матрицей  $-I_m$ , т. е. со скалярной матрицей,

на диагонали которой размещены числа «-1», а жорданов блок  $J_+$  — с обычной единичной матрицей  $I_{n-m}$ . Здесь  $m$  — число собственных значений матрицы  $W$  с  $\operatorname{Re} \lambda_i < 0$ .

Отметим, что МСФ  $\operatorname{sign}(W)$  единственна для заданной матрицы  $W$  и не зависит от алгебраической и геометрической кратности [17, 18] её собственных значений.

Исследование МСФ связано с именами отечественных и зарубежных учёных: А.А. Абрамова, Р. Биверса, В. Денмона, А. Робертса, Ф.А. Алиева, Б.А. Бордюга, В.Б. Ларина и др.

Кратко рассмотрим некоторые из свойств МСФ, доказательства которых можно найти в работе [20].

**Свойство 1.** Если матрица  $W$  асимптотически устойчива (гурвицева), тогда

$$\operatorname{sign}(W) = -I_n. \quad (20)$$

**Свойство 2.** Если все собственные значения матрицы  $W$  лежат в правой полуплоскости  $C$ , тогда

$$\operatorname{sign}(W) = I_n. \quad (21)$$

**Свойство 3.** Для любой матрицы  $T^{-1}WT$

$$\operatorname{sign}(T^{-1}WT) = T^{-1} \operatorname{sign}(W) T. \quad (22)$$

Для вычисления МСФ используют различные алгоритмы [13]. В качестве базового рассмотрим итерационную процедуру Ньютона.

Пусть матрица  $X \in \mathbb{R}^{n \times n}$  является решением квадратного уравнения (т. е. является матричным квадратным корнем)

$$X^2 = I_n. \quad (23)$$

Применяя для решения (23) метод Ньютона, получим следующую итерационную процедуру (ИПН):

$$X_0 = X, \quad X_{k+1} = \frac{1}{2}(X_k + X_k^{-1}), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (24)$$

Тогда справедливо утверждение [12].

**Утверждение 1.** Если последовательность  $\{X_k\}_{k=0}^\infty$  сходится, тогда

$$\operatorname{sign}(X) = \lim_{k \rightarrow \infty} X_k. \quad (25)$$

Таким образом, согласно выражению (25) предел ИПН (24) даёт МСФ (19).

Известно, что итерационная процедура (24) сходится с квадратической скоростью [12].

**Обобщённая матричная сигнум-функция (ОМСФ).** Определение стандартной МСФ и практическая процедура для её вычисления могут быть распространены на обобщённый пучок квадратных матриц  $\lambda E - A$  [13].

Введём ещё одно определение [13].

*Определение 2.* Обобщённой матричной сигнум-функцией (ОМСФ) пучка матриц (14) называется выражение

$$\text{sign}(A, E) = Y \left( \begin{array}{c|c} -E_{11} & 0 \\ \hline 0 & E_{22} \end{array} \right) X^{-1}, \quad (26)$$

где матрицы  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $X$  и  $Y$  определены следующим образом:

$$A = Y \left( \begin{array}{c|c} A_{11} & 0 \\ \hline 0 & A_{22} \end{array} \right) X^{-1}, \quad E = Y \left( \begin{array}{c|c} E_{11} & 0 \\ \hline 0 & E_{22} \end{array} \right) X^{-1}. \quad (27)$$

Для вычисления ОМСФ применяется следующая обобщённая итерационная процедура Ньютона (ОИПН):

$$X_0 = A, \quad X_{k+1} = \frac{1}{2} (X_k + EX_k^{-1}E). \quad (28)$$

При обратимой матрице  $E$  и некоторых других допущениях [13] итерации (28) сходятся к матрице

$$E \text{sign}(E^{-1}A) = \text{sign}(AE^{-1})E.$$

ОИПН (28) является привлекательной для решения задачи на обобщённые собственные значения. Высокая производительность программного обеспечения для таких матричных вычислений является доступной в широком классе компьютерных технологий и, особенно, в параллельных компьютерах.

Существенным недостатком ОИПН (28) является требование обращения на каждом шагу итерации матрицы  $X_k$ .

Следующая процедура нахождения ОМСФ не использует в явном виде операцию обращения матриц:

$$\begin{aligned} X_0 &= A, \quad Y_0 = E, \\ \left( \begin{array}{c} -X_k \\ Y_k \end{array} \right)^\perp &= (\tilde{Y}_k \mid \tilde{X}_k), \\ X_{k+1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\rho_k^{-1} \tilde{X}_k X_k + \rho_k \tilde{Y}_k Y_k), \\ Y_{k+1} &= \sqrt{2} \tilde{X}_k Y_k. \end{aligned} \quad (29)$$

Здесь  $(\cdot)^\perp$  — операция вычисления нуль-пространства прямоугольной транспониро-

ванной матрицы [14];  $\rho_k > 0$  — коэффициент ускорения.

При обратимой матрице  $E$  справедливо утверждение [13].

*Утверждение 2.* Если последовательность матриц  $\{X, Y\}_{k=0}^\infty$  сходится, тогда

$$\text{sign}(A, E) = \lim_{k \rightarrow \infty} X_k Y_k^{-1} = \lim_{k \rightarrow \infty} Y_k X_k^{-1}. \quad (30)$$

Отметим, что если в выражении (29) положить  $Y_0 = I_n$  и

$$\rho_k^n = \frac{|\det \tilde{X}_k|}{|\det \tilde{Y}_k|},$$

тогда

$$\text{sign}(A) = \lim_{k \rightarrow \infty} X_k.$$

Другими словами, ОИПН (29) даёт возможность вычислить стандартную МСФ без явного использования операции обращения.

Процедура (29) получена авторами путём модификации алгоритма, описанного в работах [21, 22] и применяемого при нахождении численного решения обобщённых алгебраических уравнений Риккати.

**Итерационный критерий устойчивости на основе МСФ.** Понятие МСФ (19) и рассмотренная ИПН (24) в работе [20] были положены в основу формирования практических критериев устойчивости. Речь идёт о критериях типа критерия В.И. Зубова [23]. Напомним, что для проверки асимптотической устойчивости матрицы  $A$  по критерию В.И. Зубова необходимо найти преобразованную матрицу

$$F = I_n - 2(I_n + A)^{-1},$$

а затем проверить условие

$$\lim_{i \rightarrow \infty} F^i = 0,$$

например, следующим (практическим) способом:

$$\|F\| > \|F^2\| > \dots > \|F^i\|.$$

Здесь  $\|\cdot\|$  — какая-либо матричная норма.

На основании ИПН (24) в работе [20] предложен следующий итерационный критерий асимптотической устойчивости, заданной в форме Коши:

$$\dot{x} = Ax + Bu. \quad (31)$$

**Итерационный критерий устойчивости (ИКУ).** Динамическая система устойчива тогда и только тогда, когда последовательность  $\{\det(I_n - X)\}_{k=0}^{\infty}$  сходится к  $2^n$ . При этом для устойчивой системы  $\{\det X\}_{k=0}^{\infty} = (-1)^n$ .

Обратно: динамическая система неустойчива тогда и только тогда, когда последовательность  $\{\det(I_n - X)\}_{k=0}^{\infty}$  сходится к нулю. При этом для неустойчивой системы  $\{\det X\}_{k=0}^{\infty} = -1$ .

Общее описание алгоритма ИКУ выглядит следующим образом:

*шаг 1* — положить, что

$$X_0 = \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial f}{\partial y} \left( \frac{\partial g}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial x},$$

вычислить  $d_0 = \det(I_n - X_0)$ ;

*шаг 2* — вычислить

$$X_1 = \frac{1}{2}(X_0 + X_0^{-1}), \quad d_1 = \det(I_n - X_0);$$

*шаг N* — вычислить

$$X_N = \frac{1}{2}(X_{N-1} + X_{N-1}^{-1}), \quad d_N = \det(I_n - X_{N-1}).$$

Затем необходимо проверить характер изменения функции  $d_k$ ,  $k = 0, 1, \dots, N$ . Если данная функция глобально убывающая, то динамическая система неустойчива. Если функция  $d_k$ ,  $k = 0, 1, \dots, N$  сходится к значению  $2^n$ , то система устойчива.

**Итерационный критерий устойчивости (ИКУ без обращения).** Динамическая система устойчива тогда и только тогда, когда последовательность

$$\{\|X_k - Y_k\|\}_{k=0}^{\infty} \quad (32)$$

сходится к нулю. Здесь  $\|X_k - Y_k\|$  — произвольная матричная норма.

Эквивалентно: динамическая система статически неустойчива тогда и только тогда, когда последовательность  $\{\|X_k - Y_k\|\}_{k=0}^{\infty}$  сходится к ненулевому числу.

Действительно, для устойчивой системы МСФ в соответствии с выражением (20)

$$\text{sign}(A) = -I_n. \quad (33)$$

Из сопоставления выражений (30) и (33) следует, что при

$$k \rightarrow \infty: Y_k = X_k \quad (34)$$

или иначе

$$k \rightarrow \infty: X_k - Y_k = 0. \quad (35)$$

Таким образом, для устойчивой системы существует последовательность

$$k \rightarrow \infty: \|X_k - Y_k\| = 0, \quad (36)$$

что и требовалось доказать.

Далее полученные результаты по анализу устойчивости распространяются на модель системы, заданной в дескрипторной форме (13).

Сформулируем на основании алгоритма (29) итерационный критерий устойчивости динамической системы, заданной в дескрипторной форме (13).

**Обобщённый итерационный критерий устойчивости (ОИКУ).** Динамическая система, заданная в дескрипторной форме (13), является статически устойчивой тогда и только тогда, когда последовательность

$$\{\|X_k - Y_k\|\}_{k=0}^{\infty} \quad (37)$$

сходится к нулю. Здесь  $\|X_k - Y_k\|$  — произвольная матричная норма.

Обратно: динамическая система, заданная в дескрипторной форме (13), является неустойчивой тогда и только тогда, когда последовательность (37) сходится к ненулевому числу.

Доказательство ОИКУ основано на справедливости формулировки утверждения 2, выражения (30) и рассуждениях, аналогичным (33)—(36).

Общее описание алгоритма ОИКУ выглядит следующим образом:

*шаг 1* — положить, что

$$X_0 = \left( \begin{array}{c|c} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \\ \hline \frac{\partial g}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial y} \end{array} \right), \quad Y_0 = E = \left( \begin{array}{c|c} I_{n_x} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{array} \right);$$

вычислить  $\eta_0 = \|X_0 - Y_0\|$ ;

задан  $\rho_0 > 0$ ;

вычислить

$$\left( \begin{array}{c} -X_0 \\ Y_0 \end{array} \right)^{\perp} = (\tilde{Y}_0 \mid \tilde{X}_0);$$

$$X_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\rho_0^{-1} \tilde{X}_0 X_0 + \rho_0 \tilde{Y}_0 Y_0);$$

$$Y_1 = \sqrt{2} \tilde{X}_0 Y_0;$$

$$\eta_1 = \|X_1 - Y_1\|;$$

шаг 2 — задать  $\rho_1 > 0$ ;  
вычислить

$$\left(\frac{-X_1}{Y_1}\right)^\perp = (\tilde{Y}_1 \mid \tilde{X}_1);$$

$$X_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\rho_1^{-1}\tilde{X}_1X_1 + \rho_1\tilde{Y}_1Y_1);$$

$$Y_2 = \sqrt{2}\tilde{X}_1Y_1;$$

$$\eta_2 = \|X_1 - Y_1\|;$$

шаг  $N$  — задать  $\rho_N > 0$ ;  
вычислить

$$\left(\frac{-X_N}{Y_N}\right)^\perp = (\tilde{Y}_{N-1} \mid \tilde{X}_{N-1});$$

$$X_N = \frac{1}{\sqrt{2}}(\rho_{N-1}^{-1}\tilde{X}_{N-1}X_{N-1} + \rho_{N-1}\tilde{Y}_{N-1}Y_{N-1});$$

$$Y_N = \sqrt{2}\tilde{X}_1Y_1;$$

$$\eta_N = \|X_N - Y_N\|.$$

Затем следует проверить характер изменения функции  $\eta_k$ ,  $k = 0, 1, \dots, N$ . Если данная функция глобально убывает до нуля, то динамическая система устойчива. Если функция  $\eta_k$ ,  $k = 0, 1, \dots, N$  сходится к ненулевому значению, то динамическая система неустойчива.

Рассмотрим динамическую систему в дескрипторной форме [20], где согласно выражению [24]

$$E = \begin{pmatrix} I_{258} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{544 \times 544},$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \\ \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{544 \times 544}. \quad (38)$$

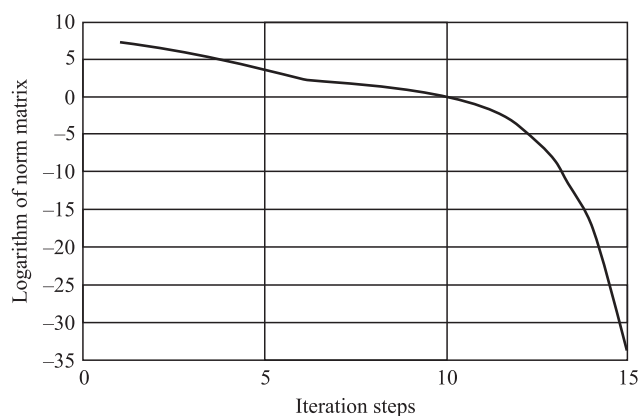


График изменения  $\lg(\|X_k - Y_k\|)$  по шагам ОИКУ

В результате применения ОИКУ к модели (38) при  $\rho_k = 1$  получается график, приведённый на рисунке. Как видно, уже при 15 итерациях они сходятся к нулю, что свидетельствует об устойчивости рассматриваемой системы.

**Заключение.** Анализ асимптотической устойчивости на основе линеаризованных уравнений является важной и актуальной задачей. Исходными уравнениями зачастую являются дескрипторные, алгебро-дифференциальные уравнения, вытекающие из физических процессов. В процессе преобразования этих уравнений в форму Коши возникают неизбежные вычислительные ошибки, которые при плохой обусловленности матриц преобразования имеют решающее значение. В работе предложены итерационный критерий устойчивости и алгоритм, построенный на основе матричной сигнум-функции и позволяющий проводить анализ асимптотической устойчивости динамической системы в исходной линеаризованной дескрипторной форме. Продемонстрирована высокая скорость сходимости алгоритма для модели системы с матрицами размера  $544 \times 544$ .

#### Библиографические ссылки

1. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высш. шк., 1970.
2. **Строев В.А.** Статическая устойчивость электроэнергетических систем (системный подход): дис. ... д-ра техн. наук. М.: МЭИ, 1987.
3. **Деммель Дж.** Вычислительная линейная алгебра. Теория и приложения. М.: Мир, 2001.
4. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1977.
5. **Голуб Дж., Ван Лоун Ч.** Матричные вычисления. М.: Мир, 1999.
6. **Икрамов Х.Д.** Численное решение матричных уравнений / под ред. Д.К. Фадеева. М.: Наука, 1984.
7. **Баландин М.Ю., Шурина М.П.** Методы решения СЛАУ большой размерности. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.
8. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Управление по выходу спектром дескрипторной динамической системы // Доклады Академии наук. 2016. Т. 468. № 2. С. 134—136.
9. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Управление конечными собственными значениями дескрипторной системы // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460 № 4. С. 381—384.
10. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Стабилизация взаимосвязанных движений летательного аппарата в каналах тангаж-рысканье при отсутствии информации об угле скольжения // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. № 1. С. 95—105.
11. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Управление по выходу продольным



движением летательного аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. № 5. С. 164—175.

12. **Зубов Н.Е.** и др. Синтез законов управления боковым движением летательного аппарата при отсутствии информации об угле скольжения. Аналитическое решение // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 1. С. 14—20.

13. **Зубов Н.Е., Зыбин Е.Ю., Микрин Е.А.** и др. Управление по выходу спектром движения космического аппарата // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 111—122.

14. **Зубов Н.Е., Лапин А.В., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** Управление по выходу спектром линейной динамической системы на основе подхода Ван-дер-Воуда // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476. № 3. С. 260—263.

15. **Бронников А.М., Буков В.Н., Рябченко В.Н., Зубов Н.Е.** Алгебраические особенности динамических систем в виде делителей нуля и их передаточных матриц // Изв. РАН. ТиСУ. 2004. № 3. С. 28—36.

16. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Олейник А.С.** и др. Оценка угловой скорости космического аппарата в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали // Вестник МГТУ. Приборостроение. 2014. № 5. С. 3—15.

17. **Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А.** Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984.

18. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц. М.: Наука, 1988.

19. **Kenney C., Laub A.J.** The matrix sign function // IEEE Trans. Autom. Contr., 40 (8). 1995. P. 1330—1348.

20. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Матричная сигнум-функция в задачах анализа и синтеза линейных систем // Автоматика и Телемеханика. 2008. № 2. С. 26 — 51.

21. **Bernstein D.S.** Matrix mathematics. Princeton Univ. Press, 2005.

22. **Benner P., Byers R.** An arithmetic for matrix pencil: Theory and new algorithms // Tech. Report, Univ. of Kansas, 2003.

23. **Зубов В.И.** Устойчивость движения. М.: Высш. шк., 1984.

24. **Тузлукова Е.В.** Развитие методов анализа динамических свойств энергосистем на основе решения частичной проблемы собственных значений: дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2004.

#### Ссылка для цитирования

**Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н.** Итерационный критерий асимптотической устойчивости дескрипторной системы // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 5. С. 213—219. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-213-219.

УДК 62-503.5

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-5-219-224

**Х.З. Игамбердиев**, д-р техн. наук, проф., **Ж.У. Севинов**, д-р техн. наук, доц.  
(Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова,  
Республика Узбекистан)

sevinovjasur@gmail.com

## АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА РЕГУЛЯРНОСТИ

*Рассмотрены вопросы синтеза адаптивных алгоритмов идентификации динамических систем на основе принципа регулярности. Получены оценки погрешности задания исходных данных для различных модельных структур, позволяющие, не производя непосредственного решения оценивать сверху погрешность искомого решения и выбирать оптимальное значение параметра регуляризации. На основе методов решения некорректно поставленных задач получены регулярные рекуррентно-итерационные вычислительные схемы решения задачи параметрической идентификации.*

**Ключевые слова:** объект управления; система управления; параметрическая идентификация; динамическая фильтрация; регуляризация; параметр регуляризации.

*The questions of the adaptive algorithms synthesis for identifying dynamic systems based on the principle of regularity are considered. Estimates of the error in setting the initial data for various model structures, which allow, without making a direct decision, to estimate the error of the desired solution from above and choose the optimal value of the regularization parameter, are obtained. Based on methods for solving incorrectly posed problems, regular recurrent iterative computational schemes for solving the parametric identification problem are obtained.*

**Keywords:** control object; control system; parametric identification; dynamic filtering; regularization; regularization parameter.

**Введение.** В современной теории управления идеализация, основанная на предположении, что математическая модель объекта

довольно точно описывает его поведение и заранее известна, уже практически не рассматривается. При решении практических про-

блем управления технологическими процессами может оказаться, что ряд характеристик реального объекта заранее не известен или изменяется в процессе его функционирования. В связи с этим представляется весьма заманчивым путь построения адаптивных управляющих систем, не требующих полного априорного знания объекта управления и условий его функционирования. К системам подобного типа относятся, в первую очередь, системы, называемые адаптивными системами с настраиваемыми моделями [1—8]. В такого рода системах алгоритмы настройки должны на основании текущей информации о входных и выходных сигналах объекта приблизить поведение модели к поведению объекта. Несмотря на теоретическую обоснованность построения адаптивных оптимальных в классическом смысле алгоритмов параметрического оценивания и управления, их практическая реализация в ряде случаев является малоэффективной. Основным недостатком метода настраиваемой модели является сложность получения условий работоспособности системы. Для преодоления возникающих трудностей используются два пути. Первый — принятие специальных мер к обогащению спектра входного сигнала в целях обеспечения сходимости оценок к истинным значениям. Этот путь обычно используется для достижения сложных целей управления, в частности для синтеза оптимальных систем. Второй путь состоит в отказе от сильной состоятельности оценок параметров, т. е. от сходимости оценок к истинным значениям. Обоснование работоспособности системы проводится при условии достижения более слабой цели адаптации — близости выходов или состояний модели и объекта [2, 3]. При этом, как правило, не удаётся обеспечить оптимальность системы и приходится ограничиваться более слабыми целями управления, например стабилизацией системы. Это обусловлено тем, что многие задачи идентификации и синтеза управляющих воздействий относятся к классу некорректных. В такой ситуации задачу синтеза методов и алгоритмов оценивания целесообразно рассматривать с точки зрения теории обратных задач [9, 10], когда определение структуры алгоритмов и расчёт их параметров выполняются на основе принципа регулярности. Такой подход позволяет обеспечить не только близость выходов или состояний модели и объекта, но также сильную сходимость оценок к истинным значениям, что позволяет сохранить работоспособность синтезируемой

системы управления, по крайней мере, при малых воздействиях не учтённых при первоначальном синтезе факторов, т. е. обеспечить грубость по отношению к ним. В этой связи разработка алгоритмов синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями на основе принципа регулярности представляется актуальной.

**Постановка задачи.** Предположим, что объект управления в переменных «вход-выход» описывается линейным разностным уравнением

$$A(\lambda) y_t = B(\lambda) u_t + \xi_t, \quad (1)$$

где  $y_t$  —  $l$ -вектор выходов объекта управления;  $u_t$  —  $m$ -вектор управляющих воздействий;  $A(\lambda)$ ,  $B(\lambda)$  — полиномиальные матрицы размерностей  $l \times l$  и  $l \times m$  соответственно,  $A(\lambda) = I_n + \lambda A_1 + \dots + \lambda^r A_r$ ,  $B(\lambda) = \lambda B_1 + \dots + \lambda^r B_r$ ;  $I_n$  — единичная  $l \times l$ -матрица;  $\lambda$  — оператор единичной задержки;  $\xi_t$  — стационарная векторная помеха, формируемая фильтром  $L(\lambda)\xi_t = E(\lambda)\omega_t$ ,  $L(\lambda) = I_n + \lambda L_1 + \dots + \lambda^p L_p$ ,  $E(\lambda) = I_n + \dots + \lambda^p L_p$ ,  $\omega_t$  — векторные случайные величины с независимыми значениями, удовлетворяющие условиям  $M[\omega_t] = 0$ ,  $M[\omega_t \omega_s^T] = R_\omega \delta_{ts}$ ,  $R_\omega$  — не зависящая от  $l$  положительная матрица ковариаций случайной величины  $\omega_t$ .

Матричные полиномы  $A(\lambda)$ ,  $E(\lambda)$  предполагаются устойчивыми, т. е. полиномы  $\det A(\lambda)$ ,  $\det E(\lambda)$  не имеют корней в замкнутом единичном круге комплексной плоскости.

Управления  $u_t$  формируются с помощью линейных обратных связей вида [2, 3]

$$C(\lambda) u_t = D(\lambda) y_t, \quad (2)$$

где  $C(\lambda) = I_m + \lambda C_1 + \dots + \lambda^q C_q$ ;  $D(\lambda) = D_0 + \lambda D_1 + \dots + \lambda^q D_q$ ;  $C_i$  —  $m \times m$ -матрицы;  $D_i$  —  $m \times l$ -матрицы.

Функционал качества имеет вид

$$J = \overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} M \{Q(y_t, u_t)\}. \quad (3)$$

Здесь  $Q$  — положительная квадратичная форма переменных  $y$ ,  $u$ , т. е.  $Q(y, u) > 0$  при  $|y| + |u| \neq 0$  и

$$Q(y, u) = y^T Q_{11} y + 2y^T Q_{12} u + u^T Q_{22} u, \quad (4)$$

$Q_{11}$ ,  $Q_{12}$ ,  $Q_{22}$  — вещественные матрицы соответствующих размерностей.

Требуется синтезировать регулятор (2), минимизирующий функционал качества (3), (4) в классе стабилизирующих регуляторов. Разностный порядок регулятора (2) обычно зара-

нее не фиксируется, т. е. минимизация функционала (3) проводится в классе всех линейных стабилизирующих обратных связей.

Задача минимизации функционала качества адаптивного управления, как правило, приводит к задачам решения матричных линейных алгебраических уравнений идентификации и настройки регулятора вида [3, 4, 11]

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + \xi(t), \quad (5)$$

$$Az = f, \quad A: Z \rightarrow F, \quad (6)$$

где  $\varphi(t) = [y^T(t-1), \dots, y^T(t-p), u^T(t-1), \dots, u^T(t-q)]^T$ ;  $\theta = [A_1, A_2, \dots, A_p, B_1, \dots, B_q]^T$ ;  $\xi(t)$  — возмущающее воздействие размерности  $l \times 1$  с ковариационной матрицей  $R$ ;  $A = A(\tau)$  и  $f = f(\tau)$  определяются на основе характеристического полинома оптимальной системы  $g(\lambda) = a(\lambda)\alpha(\lambda) - b(\lambda)\beta(\lambda)$  и полиномов  $\alpha(\lambda, \tau)$ ,  $\beta(\lambda, \tau)$  регулятора  $\alpha(\nabla, \tau)u_t = \beta(\nabla, \tau)y_t$ ,  $z = \text{col}(\alpha_1, \dots, \alpha_p, \beta_1, \dots, \beta_p)$ .

Уравнения (5) и (6) с вычислительной точки зрения относятся к классу некорректно поставленных задач [9, 10], т. е. малые погрешности в исходных данных приводят к большим погрешностям решения. Это связано с тем, что в большинстве случаев, как правило, нарушаются условия устойчивости решений уравнений (5) и (6). Поэтому естественным образом возникает стремление проанализировать особенности задач синтеза систем адаптивного управления с настраиваемыми моделями с позиций методов регулярного оценивания.

**Алгоритмы решения.** В целях унификации и анализа возможных разновидностей математического описания в работе произведена характеристика структуры и множества моделей динамических объектов управления. Установлено, что в теории и практике идентификации в терминах «вход-выход» наибольшее распространение получили модельные структуры вида

$$y(t) = \sum_{j=1}^p A_j y(t-j) + \sum_{j=1}^q B_j u(t-j) + \xi(t), \quad (7)$$

$$t = 1, 2, \dots, N,$$

$$y(t) = Bu(t) + \xi(t), \quad t = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

где  $u(t)$  — входной сигнал размерности  $m \times 1$ ;  $y(t)$  — выходной сигнал размерности  $l \times 1$ ,  $\xi(t)$  — возмущающее воздействие размерности  $l \times 1$  с ковариационной матрицей  $R$ ;  $A_i - (l \times l)$ -матрицы;  $B_i - (l \times m)$ -матрицы;  $B - (l \times m)$ -матрица.

Модельные структуры (7) и (8) при решении задачи идентификации обычно преобразуются к модельным представлениям вида

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + \xi(t), \quad (9)$$

$$y = X\beta + \xi, \quad (10)$$

где  $\varphi(t) = [y^T(t-1), \dots, y^T(t-p), u^T(t-1), \dots, u^T(t-q)]^T$ ;  $\theta = [A_1, A_2, \dots, A_p, B_1, \dots, B_q]^T$ ;  $X - (ln \times lm)$ -матрица,  $[X(1) | X(2) | \dots | X(n)]^T$ ,  $X(t) = I_l \otimes u(n)^T$ ;  $\beta$  — вектор размерности  $ml$ , составленный из  $l$  подстолбцов  $\beta^{(i)}$  ( $i = 1, 2, \dots, l$ ) матрицы  $B$ ;  $I_l$  — единичная  $(l \times l)$ -матрица;  $\otimes$  — символ кронекерова произведения;  $n$  — объём наблюдений.

Матричный оператор  $\varphi^T(t)$ , вектор параметров  $\theta$  и правая часть  $y(t)$  модельной структуры (9) представим в виде

$$\begin{aligned} \varphi^T(t) &= [y(t-1) \otimes I_l | y(t-2) \otimes I_l | \dots \\ &\dots | y(t-p) \otimes I_l | u(t-1) \otimes I_l | u(t-2) \otimes I_l | \dots \\ &\dots | u(t-q) \otimes I_l], \end{aligned} \quad (11)$$

$$y(t-i) \otimes I_l = [y_1^l(t-i) | y_2^l(t-i) | \dots | y_l^l(t-i)], \quad (12)$$

$\forall i = 1, 2, \dots, p,$

$$y_1^l(t-i) = \begin{bmatrix} y_1(t-i) & | & 0 & | & \dots & | & 0 \\ \hline 0 & | & y_1(t-i) & | & \dots & | & 0 \\ \hline \dots & | & \dots & | & \dots & | & \dots \\ \hline 0 & | & 0 & | & \dots & | & y_1(t-i) \end{bmatrix}, \dots, \quad (13)$$

$$\dots, y_l^l(t-i) = \begin{bmatrix} y_l(t-i) & | & 0 & | & \dots & | & 0 \\ \hline 0 & | & y_l(t-i) & | & \dots & | & 0 \\ \hline \dots & | & \dots & | & \dots & | & \dots \\ \hline 0 & | & 0 & | & \dots & | & y_l(t-i) \end{bmatrix},$$

$$u(t-j) \otimes I_l = [u_1^l(t-j) | u_2^l(t-j) | \dots | u_m^l(t-j)], \quad (14)$$

$\forall j = 1, 2, \dots, q,$

$$u_1^l(t-j) = \begin{bmatrix} u_1(t-j) & | & 0 & | & \dots & | & 0 \\ \hline 0 & | & u_1(t-j) & | & \dots & | & 0 \\ \hline \dots & | & \dots & | & \dots & | & \dots \\ \hline 0 & | & 0 & | & \dots & | & u_1(t-j) \end{bmatrix}, \dots, \quad (15)$$

$$\dots, u_m^l(t-j) = \begin{bmatrix} u_m(t-j) & | & 0 & | & \dots & | & 0 \\ \hline 0 & | & u_m(t-j) & | & \dots & | & 0 \\ \hline \dots & | & \dots & | & \dots & | & \dots \\ \hline 0 & | & 0 & | & \dots & | & u_m(t-j) \end{bmatrix},$$

$$\theta = [a | b]^T, \quad (16)$$

где

$$a = [a_{11}^1 \dots a_{1l}^1 a_{12}^1 \dots a_{1l}^1 \dots a_{ll}^1 \dots a_{11}^p \dots a_{1l}^p a_{12}^p \dots a_{1l}^p \dots a_{ll}^p]; \quad (17)$$

$$b = [b_{11}^1 \dots b_{1l}^1 b_{12}^1 \dots b_{1l}^1 \dots b_{1m}^1 \dots b_{1m}^1 \dots b_{11}^q \dots b_{1l}^q b_{12}^q \dots b_{1l}^q \dots b_{1m}^q \dots b_{1m}^q]; \quad (18)$$

$$y(t) = [y_1(t) \mid y_2(t) \mid \dots \mid y_l(t)]^T. \quad (19)$$

Будем полагать, что составляющие  $u_j(t)$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  и  $y_j(t)$ ,  $j = 1, 2, \dots, l$  вектора входных и выходных переменных измеряются с погрешностью с соответствующими дисперсиями  $\delta_{y_j}^2(t)$  и  $\delta_{u_j}^2(t)$ . Тогда, учитывая структуру матричного оператора  $\varphi^T(t)$  и правой части  $y(t)$  модельной структуры (9), и представления (11)...(16), (19), в предположении стационарности переменных  $u(t)$  и  $y(t)$  можно записать следующие выражения для погрешности задания матрицы  $\varphi^T(t)$  и вектора  $y(t)$ :

$$h = \left\{ l^2 \left( \sum_{i=1}^l \delta_{y_i}^2(t) + \sum_{j=1}^m \delta_{u_j}^2(t) \right) \right\}^{1/2}; \quad (20)$$

$$\sigma = \left\{ l \sum_{i=1}^l \delta_{y_i}^2(t) \right\}^{1/2}.$$

Полученные выражения, а именно оценки (20), позволяют, не производя непосредственного решения, оценивать сверху погрешность решения уравнения (9). Используя выражения (20), можно также получать априорную информацию о порядке погрешности решения для получения качественных выводов о том, с какой точностью разумно далее решать систему. Полученная таким образом информация может быть использована для выбора оптимального значения параметра регуляризации. Очевидно, не имеет смысла стремиться получить решение системы с погрешностью, существенно меньшей, чем значение точностного вектора  $\gamma = [\delta, \eta]$ .

Выполнив преобразования, аналогичные (12)...(19), для модельной структуры (10), можно получить следующие выражения для погрешностей  $h$  и  $\delta$  матричного оператора  $X$  и вектора правой части  $y$ :

$$h = \left\{ \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^l \delta_{y_j}^2(i) + l \sum_{k=1}^m \delta_{X_i}^2(j) \right) \right\}^{1/2}; \quad (21)$$

$$\delta = \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \delta_{y_j}^2(i) \right\}^{1/2}.$$

Оценки (21) естественным образом могут быть использованы для выбора оптимального параметра регуляризации  $\alpha$  при решении уравнения (10).

Для решения уравнения (9) предложена регулярная рекуррентная схема вида

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t|t) &= \hat{\theta}(t|t-1) + K(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t|t-1)]; \\ \hat{\theta}(t|t-1) &= \hat{\theta}(t-1|t-1); \\ K(t) &= P(t|t-1)\varphi(t)G_\alpha(D(t)); \\ G_\alpha(D(t)) &= [D(t) + R(t) + \alpha I]^{-1}; \\ D(t) &= \varphi^T(t)P(t|t-1)\varphi(t); \\ P(t|t-1) &= K(t-1)M(v(t)v^T(t)) \times \\ &\quad \times K^T(t-1) + P(t-1); \\ P(t) &= P(t|t-1) - P(t|t-1)\varphi(t) \times \\ &\quad \times G_\alpha(D(t))\varphi^T(t)P(t|t-1), \end{aligned} \quad (22)$$

где  $G_\alpha(D(t))$  — порождающая система функций для метода регуляризации;  $\alpha$  — параметр регуляризации;  $M[\xi(t)\xi^T(j)] = R(t)\delta(tj)$ ;  $v(t) = y(t) - \varphi^T(t)\theta(t)$ .

При решении уравнения (10) оказывается целесообразной следующая регулярная итерационная схема [12]:

$$b_{i,r} = b_{i,r-1} - (U_n^T U_n)_h b_{i,r} + (U_n^T Y_n^T)_\delta + w_r, \quad r \geq 1, \quad (23)$$

где  $w_r$  — случайные величины, обладающие свойствами  $M\|w_k - Mw_k\|^2 \leq \varepsilon^2$ ,  $k = 1, \dots, r$ ,  $\varepsilon \leq 1$ ;  $\beta_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , — строки матрицы  $B$ .

Предположим, что  $\|(U_n^T U_n)_h\|$ ,  $\|U_n^T U_n\| \leq 1$  и выполняются следующие условия аппроксимации:  $\|(U_n^T U_n)_h - U_n^T U_n\| \leq h \leq 1$ ;  $\|(U_n^T Y_n^T)_\delta - U_n^T Y_n^T\| \leq \delta \leq 1$ .

Для итерационной схемы (23) рассматривались различные правила останова итерационного процесса. Приведём один из них:

$$P_0: \mu = a_1 \delta + a_2 h, \quad m = \inf(r \geq 1 : \|b_{i,r} - b_{i,r-1}\| \leq \mu), \quad (24)$$

где  $m$  — момент останова;  $a_1, a_2 > 0$ .

На основе теории итерационных методов решения некорректных задач можно показать [12, 13], что регуляризация для правила останова (24) устанавливается при следующих соотношениях между малыми параметрами:

$$P_0: \varepsilon \leq c(\delta + h)^2, \quad c > 0. \quad (25)$$

При этом для правила останова (25) выполняется следующее предельное соотношение:

$$\lim_{\delta, h \rightarrow 0} I(D_\lambda) \|\tilde{u}_m - u_*\| = 0,$$

где  $D_\lambda = (w : \|W_n\| \leq \lambda \varepsilon n, n = 1, 2, \dots)$ ;  $W_n = \sum_{k=1}^n w_k$ ;  $\lambda \rightarrow \infty$ ;  $u_*$  — квазиразрешение уравнения (8), откуда следует, что  $\lim_{\delta, h \rightarrow 0} I(D_\lambda)(\delta + h)m = 0$ .

Оценки (20) и (21) позволяют использовать метод неопределённых множителей Лагранжа, т. е. находить вектор  $\theta_k^\alpha$ , минимизирующий сглаживающий функционал  $M^\alpha[\theta_k, d_k, G] = \|hG\theta_k - d_k\|^2 + \alpha \|\theta_k\|^2$  [8], а параметр  $\alpha$  — определять из условия

$$\|G\theta_k^\alpha - d_k\| = 2(h\|\theta_k^\alpha\| + \delta) + \mu, \mu = \inf \|\varphi^\top \theta - y\|.$$

Рассмотрим теперь класс моделей с шумами в объекте и управляющем устройстве, широко распространённый в практических задачах. Такой класс систем управления, с шумами в объекте и управляющем устройстве, можно описать уравнениями вида

$$\begin{aligned} y_n &= \sum_{i=1}^p a_i y_{n-i} + \sum_{i=1}^q b_i u_{n-i} + \sigma_1 v_{1n}; \\ u_n &= \sum_{i=1}^m c_i y_{n-i} + \sum_{i=1}^v d_i u_{n-i} + \sigma_2 v_{2n}, \end{aligned} \quad (26)$$

где  $\{u_n\}$ ,  $\{y_n\}$  — наблюдаемые последовательности на входе и выходе объекта соответственно;  $\{v_{1n}\}$ ,  $\{v_{2n}\}$  — гауссовские последовательности с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, совместное распределение гауссовское.

При этом

$$\begin{aligned} M[v_{1k} v_{1j}] &= M[v_{2k} v_{2j}] = \delta_{kj}; \\ M[v_{1n} y_{n-j}] &= M[v_{2n} y_{n-j}] = 0; \\ M[v_{1n} u_{n-j}] &= M[v_{2n} u_{n-j}] = 0. \end{aligned}$$

Задача состоит в оценке параметров объекта  $\{a_j\}$ ,  $\{b_j\}$  и параметров управляющего устройства  $\{c_j\}$ ,  $\{d_j\}$  по результатам наблюдения  $\{u_n\}$ ,  $\{y_n\}$ ,  $n = 0, 1, \dots, N$ . При определённых условиях параметры объекта и управляющего устройства можно вычислять независимо [4]. Эти условия легко выполнимы при решении задач идентификации и управления реальными объектами.

Тогда оценки параметров объекта и управляющего устройства могут вычисляться независимо на основе уравнений

$$[S_1 \ S_2][\theta_1^\top \ \theta_2^\top]^\top = Y_N; \quad [S_1 \ S_3][\theta_3^\top \ \theta_4^\top]^\top = S_N, \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned} \theta_1^\top &= (a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_l); \\ \theta_2^\top &= (a_{k+1}, \dots, a_p, b_{l+1}, \dots, b_q); \\ \theta_3^\top &= (c_1, \dots, c_k, d_1, \dots, d_l); \\ \theta_4^\top &= (c_{k+1}, \dots, c_\mu, d_{l+1}, \dots, d_\nu); \end{aligned}$$

$S_1, S_2, S_3, S_N$  и  $Y_N$  определяются на основе наблюдаемых последовательностей на входе и выходе объекта  $\{u_n\}$ ,  $\{y_n\}$ .

Для удобства дальнейших выкладок введём следующие обозначения:  $[S_1 \ S_2] = S_0$ ,  $[\theta_1^\top \ \theta_2^\top]^\top = \theta_0$ ;  $[S_1 \ S_3] = S_R$ ,  $[\theta_3^\top \ \theta_4^\top]^\top = \theta_R$ . Ниже приводится алгоритм оценивания вектора параметров объекта  $\theta_0$  на основе уравнений (27). Этот же алгоритм можно использовать и для оценивания вектора параметров регулятора  $\theta_R$ .

В соответствии с терминологией алгоритмов динамической фильтрации для оценивания вектора параметров объекта  $\theta_0$  в принятых выше обозначениях запишем уравнения  $\theta_0(t+1) = \theta_0(t) + w_0(t)$ ;  $Y_N(t) = S_0(t)\theta_0(t) + v_0(t)$ , где  $M[w_0(t) w_0^\top(t)] = Q_0(t)$ ,  $M[v_0(t) v_0^\top(t)] = R_0(t)$ .

На основании методов теории оптимальной фильтрации и решения некорректных задач [1, 5, 10, 14] для искомой оценки  $\theta_0^{\alpha, \delta}(k)$  можно записать следующую систему рекуррентных уравнений:

$$\begin{aligned} \theta_0^{\alpha, \delta}(k+1) &= \bar{\theta}_0^{\alpha, \delta}(k+1) + K^{\alpha, \delta}(k+1)[\tilde{Y}_N(k+1) - \\ &\quad - \tilde{S}_0(k+1)\bar{\theta}_0^{\alpha, \delta}(k+1) + \Delta^{\alpha, \delta}(k+1)Y_N^{(0)}(k)]; \\ \bar{\theta}_0^{\alpha, \delta}(k+1) &= (\tilde{S}_0^{(0)\top}(k+1)\tilde{\Xi}^{-1}(k)\tilde{S}_0^{(0)}(k) + \alpha I)^{-1} \times \\ &\quad \times \tilde{S}_0^{(0)\top}(k)\tilde{\Xi}^{-1}(k)\tilde{Y}_N^{(0)}(k); \\ K^{\alpha, \delta}(k+1) &= (M^{\alpha, \delta}(k+1)\tilde{S}_0^\top(k+1) - \\ &\quad - N^{\alpha, \delta}(k+1))(\Sigma^{\alpha, \delta}(k+1))^{-1}; \\ M^{\alpha, \delta}(k+1) &= (\tilde{S}_0^{(0)\top}(k)\tilde{\Xi}^{-1}(k)\tilde{S}_0^{(0)}(k) + \alpha I)^{-1}; \\ N^{\alpha, \delta}(k+1) &= M^{\alpha, \delta}(k+1)\tilde{S}_0^{(0)\top}(k)\tilde{\Xi}_0^{-1}(k)\tilde{K}(k); \\ p^{\alpha, \delta}(k+1) &= M^{\alpha, \delta}(k+1) - K^{\alpha, \delta}(k+1) \times \\ &\quad \times [M^{\alpha, \delta}(k+1)\tilde{S}_0^\top(k+1) - N^{\alpha, \delta}(k+1)]^\top; \\ \Sigma^{\alpha, \delta}(k+1) &= \tilde{\Sigma}^{\alpha, \delta}(k+1) + \Delta \Sigma^{\alpha, \delta}(k+1); \\ \tilde{\Sigma}^{\alpha, \delta}(k+1) &= \tilde{S}_0(k+1) - M^{\alpha, \delta}(k+1)\tilde{S}_0^\top(k+1) + \\ &\quad + \tilde{R}(k+1) - \tilde{S}_0(k+1)N^{\alpha, \delta}(k+1) - \\ &\quad - (\tilde{S}_0(k+1)N^{\alpha, \delta}(k+1))^\top; \\ \Delta \Sigma^{\alpha, \delta}(k+1) &= \Delta^{\alpha, \delta}(k+1)\tilde{K}(k) = \\ &= \tilde{K}^\top(k)(\tilde{\Xi}^{-1}(k)\tilde{S}_0^{(0)}(k)M^{\alpha, \delta}(k+1) \times \\ &\quad \times \tilde{S}_0^{(0)\top}(k)\tilde{\Xi}^{-1}(k) - \tilde{\Xi}^{-1}(k))\tilde{K}(k). \end{aligned}$$

Тогда  $\theta_0^{\alpha, \delta}(k)$  можно задать формулой

$$\theta_0^{\alpha, \delta}(k+1) = [\tilde{S}_0^{\tau(0)}(k)\tilde{W}^{-1}(k)\tilde{S}_0^{(0)}(k) + \alpha I]^{-1} \times \\ \times \tilde{S}_0^{\tau(0)}(k)\tilde{W}^{-1}(k)\tilde{Y}_N^{(0)}(k)$$

и при надлежащем выборе параметра регуляризации  $\alpha$  будет выполняться предельное соотношение вида  $\lim_{\delta \rightarrow 0} \theta_0^{\alpha, \delta} = \hat{\theta}_0(k)$ , где  $\hat{\theta}_0(k)$  — оптимальная в среднеквадратическом оценка  $\theta_0(k)$  при точном знании модели (26).

**Заключение.** Приведённые алгоритмы позволяют эффективно решать задачу идентификации многомерных стохастических систем, описываемых матрицей параметров, когда компоненты вектора наблюдений имеют неизвестные ковариации. Получаемые при этом оценки обладают свойствами равномерной оптимальности при всех возможных значениях неизвестных параметров.

#### Библиографические ссылки

1. **Справочник** по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
2. **Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А.** Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981. 448 с.
3. **Деревицкий Д.П., Фрадков А.Л.** Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления. М.: Наука, 1981. 216 с.
4. **Штейнберг Ш.Е.** Идентификация в системах управления. М.: Энергоатомиздат, 1987. 80 с.
5. **Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Зарипов О.О.** Регулярные методы и алгоритмы синтеза адаптив-

ных систем управления с настраиваемыми моделями. Т.: ТашГТУ, 2014. 160 с.

6. **Igamberdiyev H., Yusupbekov A., Zaripov O., Sevinov J.** Algorithms of adaptive identification of uncertain operated objects in dynamical models // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 120. P. 854—861.

7. **Igamberdiyev H.Z., Sevinov J.U., Yusupbekov A.N., Zaripov O.O.** Sustainable algorithms for synthesis of local-optimal adaptive dynamic object management systems // Chemical Technology, Control and Management. 2018. Iss. 3. Art. 14.

8. **Современные** методы идентификации систем / пер. с англ.; под ред. П. Эйкхоффа. М.: Мир, 1983. 400 с.

9. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.

10. **Морозов В.А.** Регулярные методы решения некорректно поставленных задач. М.: Наука, 1987. 240 с.

11. **Льюнг Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя / пер. с англ.; под. ред. Я.З. Цыпкина. М.: Наука, 1991. 432 с.

12. **Вайникко Г.М., Веретенников А.Ю.** Итерационные процедуры в некорректных задачах. М.: Наука, 1986. 178с.

13. **Бакушинский А.Б., Гончарский А.В.** Итеративные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1989. 128 с.

14. **Фильтрация** и стохастическое управление в динамических системах / под ред. К.Т. Леондеса; пер. с англ. М.: Мир, 1980. 407 с.

#### Ссылка для цитирования

**Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У.** Алгоритмы адаптивной идентификации динамических систем на основе принципа регулярности // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 5. С. 219—224. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-219-224.

#### Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают: межотраслевой научно-технический журнал «Автоматизация. Современные технологии» успешно прошёл аккредитацию в ВАК при Минобрнауки России для публикации работ соискателей учёных степеней по отрасли науки:

**05.02.05** — Роботы, мехатроника и робототехнические системы;

**05.02.11** — Методы контроля и диагностика в машиностроении;

**05.02.22** — Организация производства (по отраслям);

**05.07.02** — Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;

**05.07.07** — Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем;

**05.07.10** — Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности;

**05.13.01** — Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям);

**05.13.05** — Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления;

**05.13.06** — Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям);

**05.13.12** — Системы автоматизации проектирования (по отраслям).

**Напоминаем:** статьи следует подавать в редакцию заблаговременно!

С правилами оформления статей можно ознакомиться на сайте [mashin.ru](http://mashin.ru).





УДК 621.0

**В.А. Елисеев**, д-р техн. наук, проф., **Ю.И. Дегтярёв**, д-р техн. наук, проф.  
(Институт инновационно-технологического менеджмента,  
Экспертно-аналитический центр, г. Москва)

dr.ye@mail.ru; dan-chip@mail.ru

## ПРОЦЕДУРЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИЕЙ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

*Проведён анализ этапных процедур государственного управления реализацией приоритетных направлений развития науки—технологий—техники и критических технологий. Применены элементы системного анализа (принимаемых и ожидаемых решений в инновационной сфере научно-технологического развития), касающиеся направлений, результатов и показателей. Исследование опирается на общенаучный метод (постановка проблемы, информационно-аналитические обобщения, классификация и аналогии, анализ и синтез, индуктивно-дедуктивный подход). Результаты работы заключаются в систематизации базовых принципов государственного управления.*

**Ключевые слова:** процедуры государственного управления; реализация; научно-технологическое развитие; приоритетные направления; критические технологии.

*The analysis of milestone procedures of public administration by the implementation of priority areas for the development of science—technology—technology and critical technologies is carried out. The elements of system analysis (adopted and expected decisions in the innovative sphere of scientific and technological development) are applied, concerning directions, results and indicators. The study is based on a general scientific method (problem statement, information-analytical generalizations, classification and analogies, analysis and synthesis, inductive-deductive approach). The results of the work consist in systematizing the basic principles of public administration.*

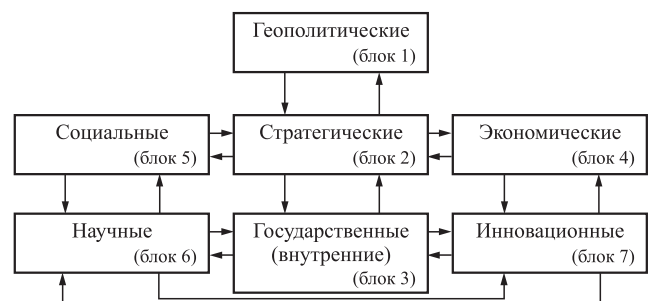
**Keywords:** public administration procedures; implementation; scientific and technological development; priority areas; critical technology.

Хотя в основных положениях отечественной Стратегии научно-технологического развития отражены соответствующие мировым приоритетам ключевые области [1] с атрибутами доминант и детерминант [2, 3], для практической реализации отечественных приоритетных направлений развития науки—технологий—техники и критических технологий [4] Правительством Российской Федерации досрочно прекращено действие госпрограммы «Развитие науки и технологий» (на 2013—2020 гг.) [5] и утверждена госпрограмма «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (до 2030 г.) [6]. Цель статьи — анализ этапных процедур управления реализацией приоритетных направлений развития науки—технологий—техники и критических технологий.

Приоритетные направления развития науки—технологий—техники Российской Федерации и критические технологии ориентируют на модернизацию, технологическое развитие и повышение конкурентоспособности отечественной экономики. На уровне федерального управления организационно введён [4] дуализм (бинарность) в виде системы «при-

оритетные направления — критические технологии», но очевидно, что эта условная «несводимость начал» унитарна для научно-технологического комплекса страны.

При формировании и реализации приоритетных направлений системные признаки и связи могут быть укрупнённо представлены блок-схемой структуризации из 7 блоков (рис. 1), которые содержат порядка 60 позиций с учётом приоритетных направлений технологических платформ ЕС, России и ЕврАзЭС, 8-й рамочной программы ЕС по развитию на-



**Рис. 1.** Блоки системных признаков и связи при формировании приоритетных направлений (блок-схема структуризации) [7]

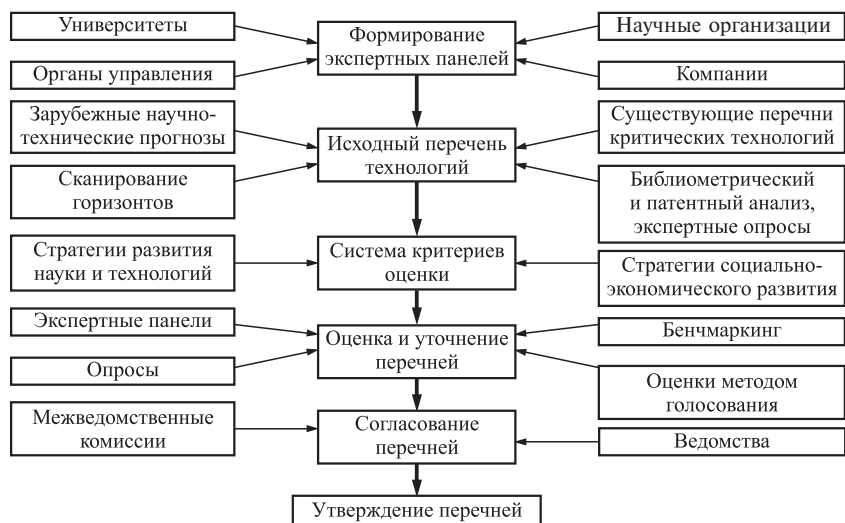


Рис. 2. Общая схема процесса выбора критических технологий на федеральном уровне [8]



Рис. 3. Процедуры уточнения приоритетных направлений и перечня критических технологий Российской Федерации [8]

учных исследований и технологий «Горизонт 2020», объявленного ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» конкурса грантов на 2020 г. и отражения общественного мнения о перспективных направлениях, которые обсуждаются в аналитических изданиях, средствах массовой информации, профессиональных кругах, дискуссиях.

Критические (научоёмкие, высокие) технологии — технологии, подлежащие первоочередной разработке (как имеющие самое важное социально-экономическое или оборонное значение) и связанные с развитием наиболее перспективных направлений фундаментальных научных исследований и наукоёмкими/высоко-

технологичными производствами со значительными затратами интеллектуального труда и ресурсов.

Схема процесса выбора критических технологий на федеральном уровне представлена на рис. 2, а процедуры уточнения приоритетных направлений и перечня критических технологий — на рис. 3. В табл. 1 представлен результат определения системообразующего соответствия между приоритетными направлениями и критическими технологиями, хотя прямая связь не очевидна для двух приоритетных направлений — «Безопасность и противодействие терроризму», «Робототехнические комплексы (системы) военного, специального и двойного назначения».

Установление в указе [4] приоритетных направлений и критических технологий проведено с учётом их определившейся специфики (табл. 2), мировой новизны, отношения к прогрессивным технологическим укладам, технологических потребностей экономики, наличия/создания научно-технического задела, имеющихся ресурсов, социально-экономической эффективности.

Процесс корректировки приоритетных направлений и перечня критических технологий осуществляется по сложившейся схеме (рис. 4).



Рис. 4. Схема процесса корректировки приоритетных направлений и перечня критических технологий России [9]

Таблица 1

**Системообразующая связь приоритетных направлений и критических технологий**

Приоритетные направления (по порядку [4])	Критические технологии (полный перечень [4], приведённый в соответствие приоритетным направлениям)
Безопасность и противодействие терроризму	Прямое соответствие приоритетному направлению не определено (отсутствует)
Индустрия наносистем	Компьютерное моделирование наноматериалов, наноустройств и нанотехнологий. Нано-, био-, информационные, когнитивные технологии. Технологии диагностики наноматериалов и наноустройств. Технологии наноустройств и микросистемной техники. Технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов. Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов
Информационно-телекоммуникационные системы	Технологии доступа к широкополосным мультимедийным услугам. Технологии информационных, управляющих, навигационных систем. Технологии и программное обеспечение распределённых и высокопроизводительных вычислительных систем. Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств
Науки о жизни	Биокаталитические, биосинтетические и биосенсорные технологии. Биомедицинские и ветеринарные технологии. Геномные, протеомные и постгеномные технологии. Клеточные технологии. Технологии биоинженерии. Технологии снижения потерь от социально-значимых заболеваний
Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники	Базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники
Рациональное природопользование	Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации её загрязнения. Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи. Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера
Робототехнические комплексы (системы) военного, специального и двойного назначения	Прямое соответствие приоритетному направлению не определено (отсутствует)
Транспортные и космические системы	Технологии создания высокоскоростных транспортных средств и интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта. Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения
Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика	Базовые технологии силовой электротехники. Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом. Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии. Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе

В табл. 3 представлено констатирующее пролонгацию сопоставление релевантных факторов федерального подхода к реализации досрочно прекратившей действие госпрограммы [4] и утверждённой новой госпрограммы [5] (с характерным для обеих программ установленным 10-летним сроком реализации).

В рамках научно-организационного сопровождения федеральной целевой программы научно-технологического развития «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы» [14] (для реализации госпрограммы [4]) Минобрнауки России организовало получение

экспертной информации о приоритетных направлениях и критических технологиях [15], а экспертные данные после 2020 г. ожидаются уже при выполнении госпрограммы [6]. Структурная схема отраслевого подхода Минобрнауки России к реализации госпрограммы [5] представлена в табл. 4 и, как можно ожидать, этот освоенный подход по аналогии (в основном или полностью) сохранится при исполнении госпрограммы [6].

Из табл. 1—4 очевидно, что базовыми принципами государственных процедур управления реализацией приоритетных направлений развития и критических технологий являются: экономический рост и технологическая безо-

Таблица 2

**Специфика приоритетных направлений и критических технологий Российской Федерации [8—13]**

№ п/п	Приоритетные направления	Критические технологии
1	Тематическое направление межотраслевого (междисциплинарного) значения, способное внести наибольший вклад в ускорение экономического роста, обеспечение безопасности страны, повышение её конкурентоспособности за счёт развития технологической базы экономики и наукоёмких производств	Комплекс межотраслевых (междисциплинарных) технологических решений, создающих предпосылки для развития технологических траекторий, имеющих потенциальный круг конкурентоспособных инновационных приложений в отраслях экономики и вносящих наибольший вклад в реализацию приоритетных направлений... Связаны с развитием наиболее перспективных направлений научных исследований (в первую очередь, фундаментальных), высокотехнологичных (наукоёмких) отраслей промышленности, требуют значительных затрат интеллектуального труда и ресурсов
2	Координация с социально-экономическими стратегиями обосновывает ориентацию научно-технологического прогресса на решение долгосрочных проблем экономики и общества	Основная задача — обеспечение конкурентоспособности на глобальных рынках технологий и капитала в среднесрочной перспективе и выбор важнейших областей науки—технологий—техники
3	Связаны с повышением эффективности научных исследований, модернизацией институциональной структуры науки и нормативно-правовой базы, совершенствованием подготовки кадров, стимулированием инновационной деятельности	Как наиболее важные подлежат первоочередной разработке
4	В научно-технической и инновационной практике (по аналогии с зарубежным опытом) принимаются во внимание: 1) макроприоритеты (производные от политических, экономических и социальных факторов); 2) тематические приоритеты (затрагивающие конкретные области науки—техники—технологий); 3) функциональные приоритеты (относящиеся к научной и инновационной системам в целом); 4) целевые приоритеты (ориентированные на социально-экономические и оборонные цели)	
5	Каноническая (традиционная) схема отбора приоритетных направлений и критических технологий: формирование состава экспертов; определение направлений/технологий; выбор критериев и оценка степени критичности проблемных ситуаций с направлениями/технологиями; оценка технологий по отмеченным критериям; формирование перечней с учётом результатов оценки	
6	Корреспондируется с аналогичными перечнями развитых стран. Выявление и реализация направлений — ответ России на вызовы глобального или национального характера	Ориентированы на достижения устойчивого роста на основе инноваций. Особенность технологий — высокий уровень требований к качеству и эффективности (поэтому наряду с термином «критические технологии» употребляются понятия «высокие» или «наукоёмкие»)
7	При корректировках госорганами управления учитываются: 1) социально-экономическое значение — вклад в ускорение роста ВВП, совершенствование его структуры и повышение конкурентоспособности экономики; 2) обеспечение национальной обороны и безопасности (включая аспекты технологические, экологические, энергетические, продовольственные и информационные)	

Таблица 3

**Релевантные факторы госпрограмм [5] и [6]**

Факторы	Госпрограмма «Развитие науки и технологий» на 2013—2020 гг. [5]	Госпрограмма «Научно-технологическое развитие» [6]
Ответственный исполнитель	Минобрнауки России	Минобрнауки России
Цель	Формирование конкурентоспособного и эффективно функционирующего сектора фундаментальных, поисковых, прикладных исследований и экспериментальных разработок	Развитие интеллектуального потенциала нации; научно-техническое и интеллектуальное обеспечение структурных изменений в экономике; эффективная организация и технологическое обновление научной, научно-технической и инновационной (высокотехнологичной) деятельности

Продолжение табл. 3

Факторы	Госпрограмма «Развитие науки и технологий» на 2013—2020 гг. [5]	Госпрограмма «Научно-технологическое развитие» [6]
Задачи	<p>Развитие конкурентоспособных направлений фундаментальных и поисковых научных исследований;</p> <p>создание и эффективный трансфер результатов прикладных исследований, обеспечивающих развитие и структурные изменения в национальной экономике;</p> <p>институциональное развитие сектора исследований и разработок, совершенствование его структуры и приоритетов развития, системы открытого управления, прозрачного и конкурентного финансирования, интеграции науки и образования, в том числе обеспечение влияния науки на общество;</p> <p>развитие международной кооперации и обеспечение интеграции российского сектора исследований и разработок в международное научно-технологическое пространство;</p> <p>создание условий, необходимых для роста инвестиционной привлекательности научной, научно-технической и инновационной деятельности</p>	<p>Создание условий для выявления и развития талантов и профессионального роста научных, инженерных и предпринимательских кадров;</p> <p>создание условий для повышения уровня капитализации образовательного потенциала населения;</p> <p>получение новых знаний за счёт развития и поддержки фундаментальных исследований, обеспечивающих готовность страны к большим вызовам и своевременной оценке рисков, обусловленных научно-технологическим развитием;</p> <p>поддержка всех стадий «жизненного цикла» знаний за счёт формирования эффективной системы коммуникации в области науки, технологий и инноваций, повышения восприимчивости экономики и общества к инновациям, создания условия для развития наукоёмкого бизнеса;</p> <p>опережающее развитие инфраструктуры научной, научно-технической и инновационной деятельности, включая формирование и реализацию национальных и международных проектов класса «мегасайенс», инфраструктуры информационного обеспечения научной, научно-технической и инновационной высокотехнологичной деятельности с обеспечением беспрепятственного доступа к ней</p>
Ожидаемые результаты реализации	<p>К 2020 г. планируется обеспечение:</p> <p>получения новых фундаментальных знаний, необходимых для долгосрочного развития и основанных на конвергенции различных направлений исследований;</p> <p>реализации научно-технических проектов в рамках приоритетов научно-технологического развития России;</p> <p>формирования целостной системы устойчивого воспроизводства и привлечения кадров для научно-технологического развития страны;</p> <p>создания условий, необходимых для роста инвестиционной привлекательности научной, научно-технической и инновационной деятельности;</p> <p>международной интеграции в области исследований и технологий, позволяющих защитить идентичность российской научной сферы и государственные интересы, а также повышение эффективности российской науки за счёт взаимовыгодного сотрудничества</p>	<p>Сформирована целостная система устойчивого воспроизводства, привлечения и развития научных, инженерных и предпринимательских кадров (интеллектуального потенциала) для научно-технологического развития страны. К 2030 г. планируется:</p> <p>вхождение России в топ-50 международного рейтинга конкурентоспособности талантов;</p> <p>обеспечение высокого престижа научно-технологической деятельности, формирование понимания ценности результатов интеллектуального труда, повышение восприимчивости общества и экономики инновациям;</p> <p>обеспечение устойчивого присутствия российских университетов в глобальных институциональных и предметных (отраслевых) рейтингах;</p> <p>обеспечение подготовки кадров по приоритетным направлениям подготовки и специальностям с учётом запросов реального сектора экономики и мировых научно-технологических трендов;</p> <p>обеспечение широкого внедрения онлайн-технологий в систему высшего образования и непрерывного образования за счёт создания и развития платформенных, сервисных и интеграционных решений;</p> <p>обеспечение развития академической мобильности научно-педагогических кадров и обучающихся;</p> <p>внедрение системы мониторинга трудоустройства выпускников организаций, осуществляющих образовательную деятельность по образовательным программам высшего образования, учитывающей удовлетворённость работодателей качеством подготовки выпускников, с разбивкой по указанным организациям и реализуемым ими образовательным программам, а также соответствии направлений подготовки региональным рынкам труда и отраслевой структуре экономики с учётом сектора самозанятости;</p> <p>увеличение в 2 раза экспортного потенциала системы высшего образования (по количеству иностранных обучающихся);</p> <p>функционирование образовательных организаций высшего образования как центров непрерывного образования;</p> <p>обеспечение доступности высшего образования в соответствии с госгарантиями реализации права на получение на конкурсной основе бесплатного высшего образования (ежегодно не менее 800 студентов на каждые 10 тыс. человек в возрасте от 17 до 30 лет);</p>

Окончание табл. 3

Факторы	Госпрограмма «Развитие науки и технологий» на 2013—2020 гг. [5]	Госпрограмма «Научно-технологическое развитие» [6]
		<p>получение новых фундаментальных результатов, основанных в том числе на конвергенции различных областей (отраслей) науки, включая гуманитарные, необходимые для долгосрочного развития общества и государства, создание устойчивой системы получения таких результатов;</p> <p>вхождение России в пятёрку ведущих стран мира по удельному весу в общем числе статей в областях, определяемых приоритетами научно-технологического развития, в изданиях, индексируемых в международных БД;</p> <p>расширение влияния российской науки в мире и формирование условий для интеграции в новые глобальные рынки знаний и технологий;</p> <p>вхождение России в десятку мировых лидеров по 14 направлениям научной специализации;</p> <p>создание системы эффективного взаимодействия и прозрачного финансирования субъектов научной, научно-технической и высокотехнологичной деятельности;</p> <p>увеличение доли инвестиций в объекты интеллектуальной собственности в общем объёме инвестиций в основные фонды Российской Федерации до 5 %;</p> <p>становление науки и технологий как ключевого ресурса для развития экономики и общества в целом;</p> <p>создание условий для разработки и использования технологий, позволяющих эффективно отвечать на большие вызовы;</p> <p>обеспечение повышения экономической и технологической независимости государства;</p> <p>вхождение России в пятёрку ведущих стран мира по удельному весу в общем числе патентных заявок на изобретения в областях, определяемых приоритетами научно-технологического развития;</p> <p>создание принципиально новых наукоёмких продуктов (товаров, услуг), востребованных на внутреннем и внешнем рынках, в том числе рынках Национальной технологической инициативы, по приоритетам научно-технологического развития;</p> <p>обеспечение перехода к современным формам организации и использованию новых аппаратных и программных инструментов проведения исследований и разработок, принципиально новым способам работы с информацией;</p> <p>повышение индекса доступности и востребованности научной и научно-технической инфраструктуры и информации более чем в 1,5 раза;</p> <p>превышение темпов роста внутренних затрат на исследования и разработки за счёт всех источников над темпом роста валового внутреннего продукта;</p> <p>создание условий и обеспечение роста инвестиций в исследования и разработки, увеличение доли частных инвестиций, включая общественные, до 50 % и более;</p> <p>вхождение России в пятёрку лидеров по объёму внутренних затрат на исследования и разработки среди ведущих стран мира;</p> <p>достижение отношения объёма средств внебюджетных источников, направленных на осуществление научной, научно-технической деятельности, к объёму бюджетных средств, направленных на осуществление научной, научно-технической деятельности, 75 %;</p> <p>обеспечение высоких темпов получения и освоения новых знаний;</p> <p>обеспечение привлекательности жизни, работы и реализации интеллектуального потенциала учёных, инженеров и технологических предпринимателей в России;</p> <p>создание передовой инфраструктуры для фундаментальных и прикладных исследований;</p> <p>реализация 4 крупных международных проектов класса «мегасайенс» на территории России</p>

Таблица 4

## Научно-организационное сопровождение госпрограммы [4, 5, 14—16]

№ п/п	Структурная схема	Содержание сопровождения
1	Общие сведения [15]	<p><i>Госпрограмма</i> — это увязанные по ресурсам и срокам осуществления комплексы научно-исследовательских, опытно-конструкторских, производственных, социально-экономических, организационных и других мероприятий, обеспечивающих решение целевых задач в области государственного, экономического и социального развития России.</p> <p><i>Государственный заказчик и координатор госпрограммы</i> — Минобрнауки России.</p> <p><i>Цель госпрограммы</i> — формирование конкурентоспособного и эффективно функционирующего сектора прикладных научных исследований и разработок.</p> <p><i>Задачи госпрограммы</i>: поддержка прикладных исследований и экспериментальных разработок (в том числе межотраслевого характера), направленных на создание продукции и технологий для модернизации отраслей экономики, и выполняемых по приоритетам развития научно-технологической сферы с использованием результатов фундаментальных и поисковых исследований;</p> <p>обеспечение системного планирования и координации исследований и разработок выстраиванием приоритетов развития научно-технологической сферы, опирающейся на систему технологического прогнозирования и учитывающей конкурентные преимущества в различных областях науки, перспективные задачи социально-экономического развития;</p> <p>обеспечение возможности решения сектором исследований и разработок качественно новых по объёму и сложности научно-технологических задач, повышение результативности исследований и разработок;</p> <p>обеспечение интеграции сектора исследований и разработок в глобальную международную инновационную систему на основе сбалансированного развития научно-технических связей;</p> <p>повышение результативности сектора исследований и разработок за счёт обеспечения единства инфраструктуры, координации направлений развития инфраструктуры с системой приоритетов развития научно-технологической сферы</p>
2	Текст госпрограммы	См. табл. 3 и исследование [15]
3	Программные мероприятия [15]	Совокупность организованных, взаимоувязанных по срокам, ресурсам и результатам действий, направленных на достижение целей и решение задач госпрограммы. Структурно сгруппированы в функциональные блоки: «Проведение прикладных научных исследований и разработок по приоритетам развития научно-технологической сферы», «Международное сотрудничество», «Инфраструктура исследований и разработок», «Материально-техническая база», «Управление реализацией Программы»
4	Приоритеты	См. табл. 1 и указ [4]
5	Научно-техническая экспертиза (независимая, анонимная процедура, в которой эксперт оценивает качество представленных материалов)	«Неотъемлемой составляющей механизма реализации Программы является формирование и использование современной системы экспертизы на всех стадиях..., позволяющей отбирать наиболее перспективные проекты для государственного финансирования, проводить независимую экспертизу конкурсных заявок в целях выявления исполнителей, предложивших лучшие условия исполнения контрактов, и осуществлять... проверку качества полученных результатов. Экспертиза и отбор проектов в структурообразующих блоках Программы имеют сквозной характер и основываются на принципах объективности, компетентности и независимости» [15]. Научно-техническая экспертиза требуется на этапах реализации Программы: при формировании тематики перспективных проектов для государственного финансирования, выявлении исполнителей, предложивших лучшие условия исполнения контрактов и оценке качества полученных результатов. Правовые основы и регламент научно-технической экспертизы см. в исследованиях [14, 16]
6	Проведение экспертизы в рамках госпрограммы [15]	<p><i>Оценка предложений по формированию тематики исследований и проектов.</i> Формирование тематики проектов для государственного финансирования осуществляется директивно или посредством отбора инициативных предложений от научного сообщества. После регистрации предложений по формированию тематики (в информационной системе) проводится их предварительный анализ. Оценка научно-технического уровня предложений, целесообразности выполнения работ по предлагаемой теме и выработка рекомендаций об объёмах финансирования осуществляется экспертными группами Научно-координационного совета госпрограммы (им же принимается решение о создании экспертной группы). В состав экспертной группы входят учёные и специалисты в соответствующих областях, представители предпринимательского сообщества, промышленности, общественных объединений и представители государственного заказчика госпрограммы. Решения, принимаемые на заседаниях экспертной группы, оформляются протоколами. Окончательное решение по отбору тематики перспективных проектов для государственного финансирования принимает Научно-координационный совет.</p>

Окончание табл. 4

№ п/п	Структурная схема	Содержание сопровождения
		<p><i>Оценка и сопоставление конкурсных заявок.</i> Условия каждого конкурса излагаются в конкурсной документации, которая вместе с извещением или объявлением о проведении конкурса публикуется на сайтах госпрограммы, на портале закупок и на сайте Минобрнауки России. Частью этой документации является раздел «Оценка и сопоставление заявок на участие в конкурсе», в котором описаны срок оценки и сопоставления заявок на участие в конкурсе, критерии оценки заявок на участие в конкурсе, их содержание и значимость, порядок оценки и сопоставления заявок на участие в конкурсе.</p> <p>Количество привлекаемых экспертов регулируется Положением об экспертизе при реализации госпрограммы. В сложившейся практике привлекается 3 эксперта для оценки каждой заявки, но в отдельных случаях экспертов может быть больше (с каждым из них заключается договор на оказание услуг по проведению независимой экспертизы, в котором определены права и обязанности сторон). Изучив содержание конкурсных проектов, эксперт в установленный срок и в соответствии с изложенными в конкурсной документации критериями оценки готовит заключение по каждой заявке и сводное заключение по лоту; заключение эксперта по заявке состоит из балльной оценки по каждому из критериев и из обоснований этих оценок: сводное заключение по лоту содержит сопоставительный анализ заявок. Процесс осуществляется в режиме удалённого доступа через веб-интерфейс Системы экспертиз. Члены конкурсной комиссии имеют возможность через Систему экспертиз знакомиться с заявками и с заключениями экспертов (при этом обеспечивается анонимность экспертов). Результаты экспертизы передаются на заседание конкурсной комиссии по подведению итогов конкурса, которая публикует решение-протокол. Участник конкурса имеет право ознакомиться с результатами экспертизы своей заявки.</p> <p><i>Оценка качества полученных результатов.</i> Заказчик (Минобрнауки России) контролирует исполнение контракта с помощью системы мониторинга и экспертизы отчётных материалов, утверждает «Порядок приёмки работ (этапов работ), выполненных по государственным контрактам, заключенным в рамках госпрограммы» (перед рассмотрением отчётных материалов на приёмочной комиссии проводится независимая экспертиза качества результатов работ). Для проведения экспертизы с экспертом заключается определяющий права и обязанности сторон договор на оказание услуг по проведению независимой экспертизы и предоставляется доступ к документам, которые исполнитель передаёт заказчику по окончании этапа выполнения работ. Эксперт знакомится с ТЗ и календарным планом контракта, оценивает качество полученных результатов и их соответствие требованиям. Заключение эксперта (без указания имени) размещается в Системе экспертиз и становится доступным для ознакомления заказчику, исполнителю и монитору</p>
7	Эксперты [15]	<p>Состав экспертов, принимающих участие в работе госпрограммы, и соответствующая БД, которая включает информацию о них (контактные данные, специализацию, место работы, образование, публикации и т. д.) начал формироваться в 2005 г. В настоящее время в списке экспертов госпрограммы состоит около 3000 человек. Этот список актуализируется и в начале каждого календарного года утверждается руководством Минобрнауки России</p>

пасность с концентрацией на задачах технологической модернизации, ориентация на перспективные рынки и потенциальный рыночный спрос, создание инновационной продукции и/или оказание услуг, использование экспертных методов (с формированием состава высококвалифицированных экспертов) [17, 18]. При формировании экспертного состава (см. п. 5 табл. 2 и пп. 5—7 табл. 4) должны учитываться: библиометрические результаты деятельности экспертов (отражающие публикационную активность, индекс цитируемости и др.); предоставленные научными фондами данные об участниках масштабных проектов; рекомендации Минобрнауки России, других органов исполнительной власти и РАН; информация

о ведущих научно-исследовательских центрах, производственных организациях и пр. [11].

Таким образом, процедуры государственного управления реализацией приоритетных направлений и критических технологий характеризуются комплексным подходом: структуризацией, системообразующими связями, спецификой, результатами выбора критических технологий и процессом уточнения их перечня, схемами корректировки приоритетных направлений и перечня критических технологий, релевантными факторами госпрограмм и особенностями их научно-организационного сопровождения. Концентрация на задачах технологической модернизации и на направлениях развития с минимизацией



количества критических технологий предполагает экономический рост, технологическую безопасность, ориентацию на перспективные рынки с потенциальным спросом, проведение высококвалифицированной экспертизы.

### *Библиографические ссылки*

1. **Указ** Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/71551998/> (дата обращения: 11.12.2019).
2. **Елисеев В.А.** Доминанты прогнозирования научно-технологического развития // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 10. С. 461—466.
3. **Елисеев В.А.** Научно-технологические детерминанты стратегии инновационного развития // Интерактивная наука. 2019. Т. 44. № 10. С. 8—23.
4. **Указ** Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» (с изм. и доп.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/55171684/> (дата обращения: 11.12.2019).
5. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 301 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие науки и технологий" на 2013—2020 годы» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/70643478/> (дата обращения: 11.12.2019).
6. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 29 марта 2019 г. № 377 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Научно-технологическое развитие Российской Федерации"» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72116664/> (дата обращения: 11.12.2019).
7. **Дегтярёв Ю.И.** Сравнительная оценка и структуризация приоритетных направлений развития научно-технологического комплекса Российской Федерации // Инноватика и экспертиза. 2011. Вып. 2 (7). С. 67—74.
8. **Соколов А.В.** Метод критических технологий // Форсайт. 2007. № 4 (4). С. 65—75.
9. **Позняк А.Ю., Шашнов С.А.** Научно-технологические приоритеты для модернизации российской экономики // Форсайт. 2011. № 2 (5). С. 48—56.
10. **Harper J.C.** EU Priorities for S&T and Innovation. Presentation at XI International Academic Conference on Economic and Social Development. Moscow, April 6—8, 2010. Moscow: HSE (mimeo).
11. **Кольцов А.В., Октябрьский А.М., Хабарова Т.В.** Критические технологии и приоритетные направления развития науки и техники в рамках реализации ФЦП развития научно-технологического комплекса Российской Федерации // Инноватика и экспертиза. 2016. Вып. 3 (18). С. 31—54.
12. **Белкина Д.И., Селиванов С.Г.** Критические технологии. ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://innovatics-tm.ru/primeg.pdf> (дата обращения: 11.12.2019).
13. **Малинецкий Г.Г., Тимофеев Н.С.** Перспективный метод критических технологий // Препринты Инст. прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. 2014. № 81. 14 с. Режим доступа: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-81> (дата обращения: 11.12.2019).
14. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 21 мая 2013 г. № 426 «О федеральной целевой программе "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы"» (с изм. на 22 октября 2018 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/70385450/> (дата обращения: 11.12.2019).
15. **Министерство** науки и высшего образования Российской Федерации. «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://fcpir.ru/about/documentation/?PAGEN\\_1=4](http://fcpir.ru/about/documentation/?PAGEN_1=4) (дата обращения: 11.12.2019).
16. **Федеральный закон** от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_11507/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_11507/) (дата обращения: 11.12.2019).
17. **Елисеев В.А., Сажин В.А.** Экспертиза в форсайт-исследованиях инновационного развития // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 9. С. 421—431.
18. **Белоусов В.Л., Бондарь В.В., Елисеев В.А., Рыбаков Ю.Л.** Роль государственной научно-технической экспертизы в национальной информационной системе / Матер. 8-й междунар. конф. «Актуальные проблемы информационного обеспечения науки, аналитической и инновационной деятельности». М.: ВИНТИ РАН, 2012. С. 7—9.

### *Ссылка для цитирования*

**Елисеев В.А., Дегтярёв Ю.И.** Процедуры управления реализацией научно-технологического развития // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 5. С. 225—233.

### **Уважаемые читатели!**

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала.

При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 62-503.57

**М.С. Денисов**

(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)

denisovmaxim90@mail.ru

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАЛОЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ЖИДКИЙ И КРИСТАЛЛИЗУЮЩИЙСЯ МЕТАЛЛ**

*Предложен подход к разработке автоматизированной системы управления процессом наложения давления на жидкий и кристаллизующийся металл.*

*Контроль основных параметров и управление процессом предлагается осуществлять с помощью компьютерной системы управления, где пультом оператора является ЭВМ. Автоматизированная система включает блок анализа текущего состояния работы оборудования, блок сравнения данных о текущем состоянии работы оборудования с моделью и блок программного управления технологическим процессом, что позволяет получать изделия методом литья с кристаллизацией под давлением с заданными структурой и высокими механическими свойствами.*

**Ключевые слова:** программное управление; технологический процесс; жидкий и кристаллизующийся металл; давление; гидравлический пресс; ЭВМ.

*An approach to the development of an automated control system for the process of applying pressure on liquid and crystallizing metal is proposed.*

*It is proposed to control the main parameters and process management by using a computer control system, where the operator's board is a computer. The automated system includes a unit for analyzing the current state of the equipment operation, a unit for comparing data on the current state of the equipment operation with the model and a program control unit of the technological process, which makes it possible to obtain products with a given structure and high mechanical properties by injection molding with crystallization under pressure.*

**Keywords:** program management; technological process; liquid and crystallizing metal; pressure; hydraulic press; computer.

**Введение.** Автоматические и автоматизированные системы управления технологическими процессами развиваются в различных направлениях. Значительный научный и практический интерес представляют системы управления объектами, свойства которых неизвестны. Это объекты, состояние и поведение которых предсказать или предугадать не представляется возможным. Так, при производстве металлопродукции методами литья под давлением сталкиваются с проблемой управления формированием структуры и связанных с ней свойств конечной продукции. Во время плавки возникают трудности, которые связаны с тем, что в процессе термовременной и механовременной обработки в жидком состоянии и в процессе кристаллизации компоненты сплава входят в сложные взаимодействия на атомно-электронном уровне. Поэтому возникает необходимость разработки новых подходов к автоматизации и управлению подобными процессами.

Сформированные принципы автоматизации технологических процессов основаны

на работах учёных и специалистов по радиоэлектронике, кибернетике и других отраслей науки и техники и определяют возможности для создания подобных систем.

В настоящее время процессы литья под давлением рассматриваются как системы со скрытыми свойствами. Это обусловлено тем, что недостаточно информации по теории кристаллизации, которая в свою очередь связана с тепловой теорией литья. Перейти к активному управлению сложными динамическими процессами подтолкнули исследования И.И. Новикова [1], который установил взаимосвязь между свойствами металлов, с одной стороны, и условиями формирования кристаллического строения — с другой. Значительное внимание необходимо уделить проблемам управления фазовыми превращениями. Данный процесс представляет большую значимость в создании новых видов материалов с новыми свойствами.

**Основная часть.** Металлопродукцию можно отнести к классу сложных объектов со скрытыми свойствами. Ставится задача автоматизации

зации управления процессом формирования металла на самых ранних стадиях технологического процесса. Для решения поставленной задачи необходимо учитывать информацию о влиянии на объект управления каждого отдельного фактора и всех этих факторов во взаимодействии. Это становится возможным за счёт контроля параметров, обработки информации и оперативного принятия решений для организации управления процессом [2].

Таким образом, требования к системе управления (СУ) процессом литья с кристаллизацией под давлением можно представить в следующем виде:

по характеру программной реализации СУ должна быть гибкой с возможностью предварительной или в режиме реального времени настройкой режимных параметров для гарантированного достижения заданных свойств;

СУ должна включать подсистему информационного обеспечения по таким параметрам процесса, как температура формы и металла, давление в гидросистеме, время выдержки под давлением, скорость наложения давления, перемещение прессующих плунжеров, остаточное давление воздуха в полости формы.

В отличие от традиционных СУ, где на заданном уровне поддерживаются значения параметров на выходе, предлагаемая система должна быть рассчитана на отработку требуемого закона изменения давления, генерируемого СУ. Этот закон должен учитывать сжимаемость расплава, которая напрямую влияет на механические свойства получаемых заготовок.

Необходимо решить следующие основные задачи управления и обработки информации:

поддержание малой динамической ошибки стабилизации и неизменных динамических характеристик замкнутого контура вне зависимости от меняющихся переменных параметров объекта на входе;

программное управление технологическим процессом с возможностью его коррекции в режиме реального времени;

оперативное получение и вывод на экран информации об основных параметрах объекта управления (ОУ).

Выход технологического процесса на заданный режим и его стабилизация — основная задача управления процессом в условиях неопределённости, которая обусловлена отсутствием информации о возмущающих воздействиях на входе. Незнание всех значений параметров на входе в систему приводит к ухудшению пропускной способности канала стабилизации и, как следствие, снижению устойчивости работы контура стабилизации.

Программное управление технологическим процессом с возможностью его коррекции в режиме реального времени позволит осуществлять управление процессом в режимах пуска, остановки и управления на программном уровне различными изменениями переменных технологического процесса на той или иной стадии.

Получение и вывод на экран информации об основных параметрах объекта управления включают в себя целый ряд различных задач. В первую очередь к ним относятся получение и обработка информации, которые зависят от меняющихся характеристик каналов связи. Ещё одной задачей из данной группы является программная идентификация режимов и параметров технологического процесса для вывода справочной информации, её регистрации и функциональной диагностики технологических процессов (ТП).

Для решения задач управления разработано информационное обеспечение, которое включает:

обработку информации с контрольно-измерительных приборов с заданными производительностью, точностью и скоростью, а также визуализация обработанной информации;

анализ работы технологического оборудования на основе результатов информации с контрольно-измерительной системы;

вывод на панель оператора оптимальных рабочих параметров;

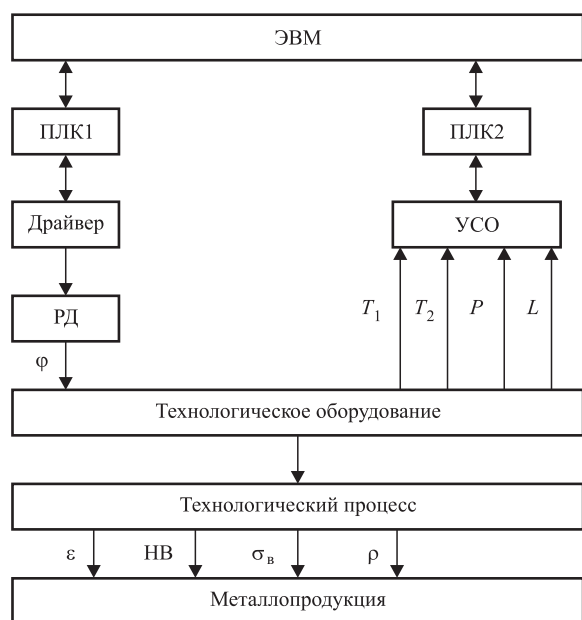
генерацию оптимальных параметров работы системы;

генерацию закона наложения давления; диагностику технологического оборудования; работу в автоматизированном режиме.

В соответствии с данными требованиями разработана структурная схема АСУ ТП (рис. 1).

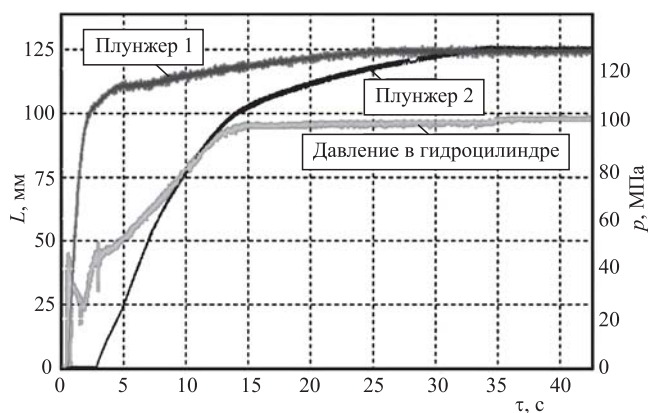
Структурная схема включает в себя возможность отработки заданного закона изменения давления, характеризующегося перемещением прессующих плунжеров в пространстве (рис. 2) при условии, что химический состав обрабатываемого сплава соответствует данным из табл. 1, а необходимыми выходными физико-механическими свойствами получаемых заготовок являются твёрдость и предел прочности.

При включении гидропривода переходный процесс в гидросистеме протекает в течение 15 с, причём в моменты срабатывания клапанов, через которые рабочая жидкость давит на плунжеры 1 и 2, давление в гидросистеме резко падает. Движение плунжеров происходит под влиянием давления, которое на отрезке



**Рис. 1. Структурная схема АСУ ТП:**

$\varphi$  — угол поворота шагового двигателя;  $T_1$  — температура формы;  $T_2$  — температура металла;  $P$  — давление в гидросистеме;  $L$  — перемещение плунжеров;  $\varepsilon$  — сжимаемость;  $HB$  — твёрдость;  $\rho$  — плотность металла;  $\sigma_b$  — предел прочности



**Рис. 2. Зависимости движения плунжеров и роста давления в системе:**

$L$  — перемещение плунжеров;  $P$  — давление в гидросистеме

времени 3...15 с изменяется по зависимости, близкой к линейной.

После анализа структурной схемы спроектирована функциональная схема автоматизации (рис. 3), включающая основные элементы

и их связи. Разработанная функциональная схема обуславливает необходимость анализа всех контролируемых параметров пресса, которые система управления учитывает на программном уровне.

Разработанные структурная и функциональная схемы довольно точно учитывают выбранные элементы АСУ ТП. После этого этапа можно переходить к выбору программных и инструментальных средств реализации АСУ ТП, затем следуют проектирование управляющих и вычислительных алгоритмов, а также их программная реализация. В разрабатываемой системе основная роль отведена программе управления, установленной и функционирующей на ПК, который является пультом оператора, а установленное управляющее программное обеспечение представляет собой связующее звено, которое позволяет обработать всю необходимую информацию и выработать управляющие воздействия.

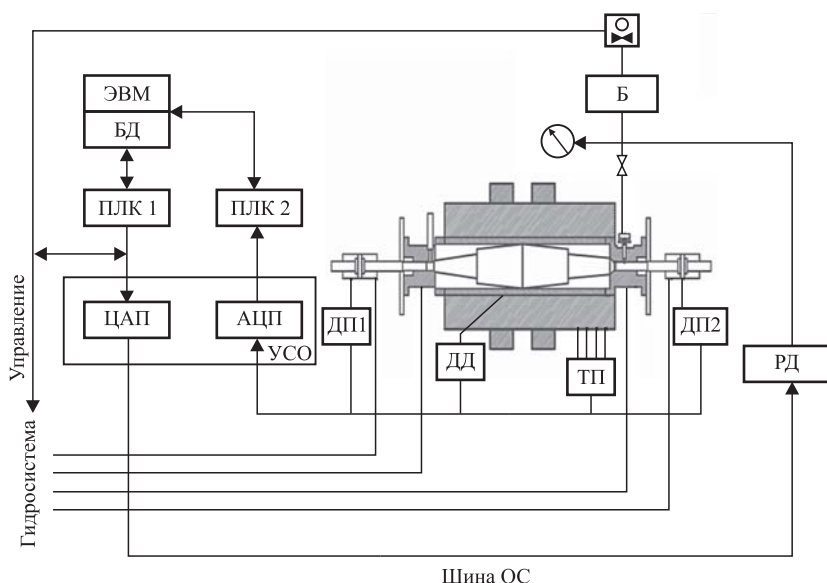
Таким образом, необходимо установить зависимость параметров структуры обрабатываемого металла от закона изменения давления или от положения прессующих плунжеров, тем самым обеспечить программно-корректируемое наложение давления. Такая система позволит приводить динамические свойства гидропривода в соответствие с поведением расплавленного металла под давлением.

В предлагаемой системе управления технологическим процессом (СУТП) имеется два контроллера ПЛК1 и ПЛК2. Основная часть системы управления ориентирована на ПЛК2. В него заложены функции управления и сравнения результатов работы на выходе с параметрами на входе. ПЛК1 предназначен для повышения производительности, функциональности и надёжности системы управления. Это становится возможным за счёт перераспределения задач. Кроме того, ПЛК1 отвечает за управление регулятором давления (РД), который регулирует зазор в проходном сечении гидросистемы. Ещё одной функцией ПЛК1 является формирование отчётов о проделанных технологических операциях и об отправке этих отчётов в базу данных. В ПЛК1 также добавлена функция программной коррекции и обратной связи, что позволяет вносить необ-

Таблица 1

**Химический состав обрабатываемого сплава**

Основные элементы, %						Примеси, %		
Al	Cu	Mg	Mn	Zn	Cr	Fe	Si	Ni
Основа	1,4...2,0	1,8...2,8	0,2...0,6	5,0...7,0	0,1...0,25	0,5	0,5	0,1



**Рис. 3. Функциональная схема процесса литья с кристаллизацией под давлением:**

ДП — датчик положения; ДД — датчик давления; ТП — термопары; РД — регулятор давления; Б — бустер; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; ПЛК — программируемый логический контроллер; БД — база данных; ЭВМ — персональный компьютер

ходимые коррективы в технологический процесс, поддерживать заданный закон управления, проводить запланированную диагностику оборудования и системы управления.

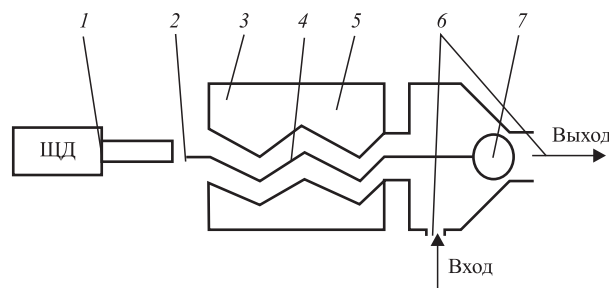
Автоматизация управления формированием свойств металлопродукции осуществляется на основе контроля и стабилизации зависимости относительной сжимаемости расплава от величины накладываемого давления. При этом управление формированием структуры алюминиевых сплавов нацелено на то, чтобы всестороннее давление, накладываемое на жидкий металл, было направлено на формирование заданной неравновесной структуры.

Способ управления процессом кристаллизации алюминиевых сплавов осуществляется следующим образом: на кристаллизующийся металл накладывают давление пресс-плунжерами, движущимися навстречу друг другу, в однофазном режиме и повышают его со скоростью 120...125 МПа/с с интервалами 0,5...0,1 с в течение 4 с до величины 500 МПа, тем самым уплотняя металл на 12,8 %. Подпрессовка металла осуществляется под давлением  $P = 3\sigma_T(t)$ , где  $\sigma_T(t)$  — предел текучести опрессовываемого сплава с учётом температуры, до тех пор, пока металл не охладится до 100...150 °С. Следует отметить, что величина накладываемого давления (500 МПа) и общее время опрессовки (4 с) по 120...125 МПа/с с интервалами 0,5...0,1 с для сплава В95 определены экспериментально [3].

Предлагаемый процесс позволяет накладывать давление с фиксированной скоростью до уровня 500 МПа в однофазном режиме. Это становится возможным, как уже отмечалось, за счёт установки в гидросистему регулятора давления (РД), который управляется шаговым двигателем от автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП). Схема РД и его основные характеристики приведены на рис. 4 и в табл. 2.

По программе, содержащейся в ЭВМ, считываются показания датчиков. Зафиксированные значения сравниваются с заданными. При наличии отклонений с тем или иным знаком вырабатывается команда на включение ШД 1. При этом за счёт смещения винта 2 изменяется расходная характеристика РД, чем и обеспечивается наложение давления по требуемому закону.

Параметры настройки ШД выбираются из условия, что скорость наложения давления превышает требуемую по технологии скорость на 20...25 %. При включении насоса гидросистема поднимает давление, которое начинает превышать требуемое — это фиксируется датчиком давления. По программе, когда давление достигает 100...125 МПа, подаётся команда на отключение гидропривода, давление в системе начинает падать, при этом осуществляется сравнение фактического давления с давлением, которое должно быть в данный момент времени по программе. В момент, когда значения выравниваются, происходит включение насоса через каждые 120...125 МПа, до тех пор, пока давление не поднимется до уровня 500 МПа.



**Рис. 4. Схема регулятора давления:**

1 — привод винта в виде шагового двигателя; 2 — винт; 3 — корпус, в котором выполнены два канала 6, связанные с входами и выходами гнутыми патрубками из нержавеющей стали; 4 — пружины; 5 — регулятор давления; 7 — активный элемент регулятора давления в виде стального шарика

Таблица 2

## Характеристики регулятора давления

Технические характеристики									
Условное давление на входе, МПа	Рабочее давление масла на входе регулятора, МПа	Диапазон настройки давления на выходе, ГПа			Точность поддержания давления, %			Условный проход регулятора, мм	
100	50...100	0,1...1,0			5			20	
Быстродействие активного элемента									
Угол поворота, ф, град	0	45	90	135	180	225	270	315	
Пропускная способность $K_v$ , м <sup>3</sup> /ч	6,0	5,3	4,7	4,0	3,4	2,5	1,8	1,0	
$P_{\text{вых}}$ , МПа	500	440	380	320	260	200	140	70	

Установленное увеличение скорости наложения давления на 20...25 % выбрано с учётом чувствительности датчика и времени срабатывания гидравлических клапанов, которое составляет 0,05...0,1 с.

В предлагаемой системе управления давление используется как термодинамический фактор, который, как и температура, определяет состав фаз в неравновесных условиях и влияет на фазовые превращения и структуру в твёрдом состоянии при изменении скорости наложения давления. То есть наложение давления является фактором воздействия, определяющего множество вариантов сочетания технологических параметров, приводящих к формированию той или иной структуры сплавов.

Формирование заданного состояния может быть достигнуто в условиях сверхбыстрого сжатия при температуре выше температуры начала кристаллизации, когда атомы утрачивают характерную для них диффузионную подвижность и способность формировать равновесные фазы, отличающиеся по составу и строению кристаллической решётки. Такое состояние может быть достигнуто, если такие параметры процесса, как перегрев жидкого металла над температурой ликвидус, скорость нарастания давления, временные интервалы между импульсами, величина давления, накладываемого на жидкий металл, степень сжатия жидкого металла до начала кристаллизации подобраны предварительно опытным путём и обеспечивают необходимое сближение атомов до начала кристаллизации.

Для создания в процессе заливки жидкого металла в полость пресс-формы вакуума 0,1...0,2 атм предусмотрена автономная вакуумная система, представляющая собой вакуумный насос, вакуумный ресивер и дистанционно управляемый клапан. Вакуумирование позволяет не только увеличить скорость заполнения полости формы жидким металлом, но и создаёт условия, при которых жид-

кий металл затекает с заданной скоростью сплошным фронтом без разбрызгивания.

Управление величиной накладываемого давления и перемещением плунжеров происходит таким образом, чтобы достичь заданного уровня механических свойств изделий.

В связи с этим гидропривод, используемый для наложения давления на жидкий металл, помимо статических (развиваемое усилие, жёсткость) и динамических (устойчивость, точность, качество переходного процесса) характеристик должен отвечать таким требованиям, как возможность управления развиваемым усилием и скоростью перемещения. К числу параметров, определяющих усилие и скорость перемещения плунжеров, относятся давление в рабочей полости цилиндров и полости слива, масса движущихся частей, силы трения, площади поршня в напорной и сливной плоскостях.

Скорость наложения давления, интервалы наложения давления и максимальную величину давления выбирают по результатам предварительных исследований, исходя из зависимости давления от времени.

Для высокопрочных алюминиевых сплавов необходимо накладывать давление  $P = 500$  МПа, при котором относительное уменьшение объёма жидкого металла составляет 12,8 %. В этом случае фиксируется качественно новое состояние металла, когда, с одной стороны, перегрев над линией ликвидус составляет ~200 °С, а с другой стороны, атомы теряют подвижность и происходит резкое повышение вязкости расплава. Когда температура в тепловом центре слитка достигает значения ниже 150...200 °С, давление снимается, плунжеры отводятся в исходное положение, форма раскрывается, полученный слиток извлекается и охлаждается до цеховой температуры.

Предлагаемый способ является универсальным для управления процессом кристаллизации алюминиевых сплавов. На рис. 5



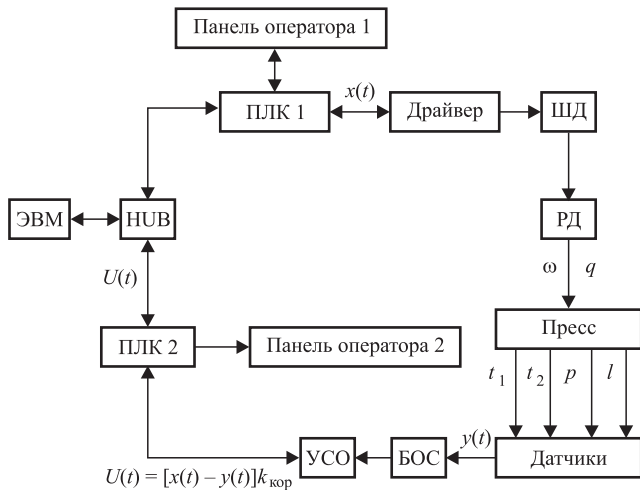


Рис. 5. Общая структура системы управления

представлена разработанная общая структура системы управления.

Во время работы пресса в автоматизированном режиме ПЛК1 выбирает начальные значения  $x(t) = p_0(t)$ ,  $x_0(t)$ ,  $v_0(t)$  из программы, тем самым задаёт частоту вращения двигателя гидронасоса  $\omega$  и расход рабочей жидкости, проходящей через дроссельную заслонку  $q$ . Контрольно-измерительные приборы, установленные на прессе, передают измеряемые параметры на блок регулирования, который их сравнивает с заданными значениями и при необходимости вычисляет корректирующий коэффициент  $k_{кор}$ . При этом используется следующий закон управления: если  $|p_{экср}| < 0,2|p_{мат}|$ , то  $k_{кор} = p_{экср}k_1$ , где  $k_1 < k_{экср}$ , ПЛК2 генерирует управляющий сигнал  $U(t)$  и транслирует его на ЭВМ, после чего обработанный сигнал поступает на ПЛК1.

Новизна системы управления заключается в общем принципе управления по отклонению, когда система управления описывается передаточной функцией разомкнутой системы и уравнением замыкания  $x(t) = g(t) - y(t) \times \text{Woc}(p)$ , а алгоритм работы системы управления стремится свести ошибку  $x(t)$  к нулю.

Достоинством такого подхода является наличие блока обратной связи (БОС), что способствует уменьшению ошибки независимо от внешних возмущений [4].

Программируя скорость движения пресующих плунжеров, следует изменять положение дросселя в магистрали подачи рабочей жидкости в полость гидроцилиндра, а необходимая точность отработки закона наложения давления обеспечивается с помощью определения точных настроек ПИД-регулятора.

В разрабатываемой системе работа ПИД-регулятора реализована на программном

уровне и определена таким образом: разница показаний давления, получаемых во время эксперимента, и показаний, заложенных в программу, умножается на настроечный коэффициент. Полученный показатель (мощность) подаётся на выход исполнительного устройства. Пропорциональная составляющая начинает работу в момент возникновения рассогласования. На объект управления оказывают воздействия внешние возмущения (масса плунжеров, сжимаемость жидкости, трение), поэтому в цепь добавлена интегральная составляющая, компенсирующая внешние возмущения. Такое решение обеспечивает стабилизацию мощности.

Между воздействием и реакцией системы возникают задержки [5], для их компенсации добавлена дифференциальная составляющая. В обычных условиях [6] пропорциональный регулятор выдаёт мощность на постоянной основе, до тех пор, пока давление не выйдет на заданный режим; пропорционально-дифференциальный регулятор начинает снижать подаваемую мощность до того, когда пресующие плунжеры дойдут до заданной точки. В этом случае рассогласование уменьшается, возникает отрицательная производная, уменьшающая воздействие внешних возмущений [7, 8]. Такой подход обеспечивает минимальное давление в системе при длительных переходах и обеспечивает управление процессом на заданном уровне.

Состояние объекта определяется давлением и перемещением. На каждом шаге работы регулятора задаётся текущее положение дроссельной заслонки в регуляторе. Шаговый двигатель управляет величиной зазора щели, т. е. гидравлическим сопротивлением. В итоге можно перейти к такой записи:

$$\begin{aligned} \text{Изменение шага } (t + 1) &= \\ &= \text{Функция } \{\text{Ошибка}(t)\}. \end{aligned}$$

Управление частотой вращения электродвигателя осуществляется в тот момент, когда регулятор давления повернут в крайнее положение. В этой связи увеличивается диапазон и повышается точность управления. Функция, определяющая предельное значение угла поворота шагового двигателя, выглядит таким образом:

$$\text{Предел ШД}(t) = \text{Шаг}(t + 1) - \text{Шаг}(t).$$

Предел шагового двигателя будет равен нулю, когда шаг будет чётко соответствовать требуемому.



Для частоты функция будет выглядеть следующим образом:

$$\text{Частота}(t + 1) = \text{Предел ШД}(t) \text{ Частота}(t) + \text{Функция}\{\text{Ошибка}(t)\}.$$

Для реализации управления процессом предлагается реализовать программное регулирование давлением рабочей жидкости на выходе из гидросистемы пресса по заданному закону. В структуру СУ включен блок АСУ ТП литья с кристаллизацией под давлением, который предназначен для сбора, обработки и передачи информации с датчиков температуры, давления и линейного перемещения пресующих плунжеров. Поэтому проектируемая система принимает информацию по аналоговым и цифровым портам, обеспечивает перевод информации в нормированные значения, сравнивает с заданным законом управления и в случае рассогласования подаётся команда на коррекцию подачи рабочей жидкости в гидросистему.

**Заключение.** Система управления гидравлическим прессом в режиме реального времени получает всю необходимую информацию о технологическом процессе (линейное перемещение пресующих плунжеров, давление в системе, температура металла и формы) с контрольно-измерительной системы. Полученная информация через устройства связи с объектом (УСО) передаётся на ПК, являющейся пультом оператора. ЭВМ обрабатывает информацию и сравнивает её с заданными значениями, находящимися в базе данных. Если в базе данных отсутствуют результаты уже проделанных технологических операций, то система принимает решение на основе данных, занесённых оператором в управляющую программу. Если система распознает рассогласования основных значений технологического процесса от сгенерированного закона

наложения давления, АСУ вносит коррективы в технологические параметры процесса с помощью изменения угла поворота шагового двигателя, который в свою очередь влияет на режимы наложения давления.

#### *Библиографические ссылки*

1. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов: учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1983. 232 с.
2. Petrov P., Konstantinova S., Buchvarov G., Petrov I. Hot isostatic pressing treatment of AlSi7Mg aluminium alloy // J. Mater. Sci. and Technol. 1994. No. 2. P. 26—33.
3. Коростелёв В.Ф., Денисов М.С., Большаков А.Е. Способ управления процессом кристаллизации алюминиевых сплавов при литье под давлением // Патент России № 2657668. 20.05.2016.
4. Денисов М.С., Коростелёв В.Ф. Автоматизация процесса формирования алюминиевых сплавов в условиях наложения давления на кристаллизующийся металл // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. № 4. С. 158—167.
5. Паршева Е.А. Децентрализованное адаптивное управление по выходу многосвязными объектами с запаздыванием по состоянию // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 5. С. 14—22.
6. Krstic M., Wang H.-H. Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems // Automatica. 2000. Vol. 36. P. 595—601.
7. Паршева Е.А., Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектом с запаздывающим управлением со скалярным входом-выходом // Автоматика и телемеханика. 2001. № 1. С. 142—149.
8. Bastin G., Gevers M. Stable adaptive observers for nonlinear time-varying systems // IEEE Trans. on Automatic Control. 1988. Vol. 33. No. 7. P. 650—658.

#### *Ссылка для цитирования*

Денисов М.С. Автоматизированная система программного управления процессом наложения давления на жидкий и кристаллизующийся металл // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 5. С. 234—240.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 27.02.2020.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

Подписано в печать 20.04.2020.

150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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