Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 73

3
2019

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)
Булдакова 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 — **Мымрина 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; 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)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Кондрашов С.Н., Шумихин А.Г., Берсенева Н.И. Разработка системы управления процессом многоступенчатой абсорбции формальдегида . . . 99

Иванов В.К. К решению основной задачи управления автоматизированным мелкосерийным машиностроительным производством . . . 104

Ахмедов М.А., Гусейнзаде Ш.С., Насирова Е.А. Разработка алгоритма автоматизации преобразования конечного автомата в сеть Петри . . . 108

Коноплёв В.И., Анцев В.Ю., Воробьёв А.В. Ленточный конвейер с устройством для разгрузки насыпных липких грузов . . . 113

Мончарж Э.М., Рябкова Т.А. Управление температурным режимом при завершении химической реакции периодического процесса . . . 115

Малышева А.В., Затонский А.В. Исследование перспектив перехода на автоматическое управление процессом флотации калийной руды . . . 119

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Елисеев В.А., Сажин В.А. Методологические аспекты управления форсайт-исследованиями инновационного развития . . . 128

Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Филимонов А.В. Аналитическое представление собственных векторов числовой матрицы . . . 134

Пролетарская В.А. Каскадное использование фильтра Блума при реализации SQL-запроса с коррелированным подзапросом на платформе параллельной обработки данных Spark 2 . . . 138

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов . . . 144

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2019

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 73 3 2019

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., SPbSTI (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., SRU MEI
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., SPbSTI (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)

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Kondrashov S.N., Shumikhin A.G., Berseneva N.I. The control system development of a multi-stage formaldehyde absorption process 99

Ivanov V.K. To the solution of the main task of managing automated small-scale machine-building production 104

Akhmedov M.A., Guseynzade Sh.S., Nasirova E.A. Development of an algorithm for the transformation automation of a finite automatic machine into Petri net 108

Konoplev V.I., Antsev V.Yu., Vorobev A.V. Belt conveyor with a device for unloading bulk adhesive goods 113

Moncharzh E.M., Ryabkova T.A. Temperature conditions control at the end of a chemical reaction periodic process 115

Malysheva A.V., Zatonskiy A.V. Study of the prospects for the transition to automatic control of the potash ore flotation 119

MODERN TECHNOLOGIES

Eliseev V.A., Sazhin V.A. Methodological management aspects of the innovation development foresight-research 128

Mikrin E.A., Zubov N.E., Ryabchenko V.N., Filimonov A.V. Analytical representation of the number matrix own vectors . . . 134

Proletarskaya V.A. Cascading use of the Bloom filter at implementing a SQL query with a correlated subquery on the platform Spark 2 for dates parallel processing 138

REVIEW OF PERIODICAL

On the journal pages 144

© «Innovative Mashinostroenie» Publishers, «Automation. Modern technologies», 2019

УДК 66.012-52

С.Н. Кондрашов, канд. техн. наук, доц., **А.Г. Шумихин,** д-р техн. наук, проф., **Н.И. Берсенева**
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)

Sergej.Kondrashov@pnos.lukoil.com

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ АБСОРБЦИИ ФОРМАЛЬДЕГИДА

На основе математической модели разработан алгоритм управления процессом абсорбции, обеспечивающий заданные степень абсорбции формальдегида и метанола водой, содержание воды в готовом продукте и снижающий энергозатраты на охлаждение жидкости в выносных теплообменниках. С использованием предложенного алгоритма разработана система управления процессом многоступенчатой абсорбции формальдегида для промышленных агрегатов.

Ключевые слова: процесс абсорбции формальдегида; абсорбер; состав формалина; математическая модель; алгоритм управления; эксперимент; регрессионный анализ; оптимизация.

An absorption process control algorithm was developed based on a mathematical model. This algorithm provides the specified degree of absorption of formaldehyde and methanol with water, the water content in the finished product, and also reduces the energy consumption for cooling the liquid in remote heat exchangers. A multi-stage formaldehyde absorption process control system for industrial units using the proposed algorithm has been developed.

Keywords: formaldehyde absorption process; absorber; formalin composition; mathematical model; control algorithm; experiment; regression analysis; optimization.

Абсорбция формальдегида относится к наиболее распространённым в промышленности процессам неизотермической абсорбции с рециркуляцией жидкости через выносной теплообменник и осуществляется последовательно в трёх абсорбционных колоннах. В колоннах происходят экзотермическая абсорбция формальдегида (CH_2O) и метанола (CH_3OH) водой, теплопередача между газовой и жидкой фазами и конденсация паров воды.

В основу имитационного моделирования процесса абсорбции была положена математическая модель, описанная в работе [1]. При моделировании процесса абсорбции формальдегида было принято, что модели всех трёх абсорбционных колонн идентичны.

На основе исходных данных, соответствующих нормальному технологическому режиму стадии абсорбции (табл. 1), и справочных данных с помощью математической модели [1] был выполнен расчёт параметров процесса абсорбции формальдегида. Результаты расчёта представлены в табл. 2.

Из данных, приведённых в табл. 2, следует, что предложенная модель по целевому компоненту — формальдегиду адекватна промышленному процессу абсорбции и может

Таблица 1

Технологические параметры процесса абсорбции

Параметр	Значение	Единица измерения
Расход реакционных газов	7,26	кг/с
Температура реакционных газов	413	К
Высота насадки	2	м
Давление в системе	$16\,425 \cdot 10^{-5}$	Па
Расход жидкости на орошение	18	кг/с
Температура жидкости после теплообменников	293	К

Таблица 2

Мольные доли формальдегида и метанола на входе и выходе математической модели

Абсорбируемый компонент		Вход	Выход математической модели	Выход промышленного агрегата
CH_2O	Газовая фаза	0,1726	0,000834	—
	Жидкая фаза	—	0,277	0,277
CH_3OH	Газовая фаза	0,0374	0,000170	—
	Жидкая фаза	—	0,0374	0,055

быть использована для разработки алгоритма управления этим процессом.

Путём экспертной оценки технологического процесса абсорбции формальдегида и анализа его математической модели установлено, что на содержание воды в готовом формалине в основном влияют температура жидкой фазы в абсорберах, расход орошающей жидкости в абсорберах, температура и расход реакционных газов. Поэтому модель стадии абсорбции по содержанию воды в продукте ищем в виде зависимости

$$Y_1 = f_1(\vec{X}) = \\ = f_1(Q_г; T_г; \Theta_1; \Theta_2; \Theta_3; Q_{ж_1}; Q_{ж_2}; Q_{ж_3}),\ i = \overline{1,8}, \quad (1)$$

где Y_1 — мольная доля воды в продукте, моль/моль; $\vec{X}$ — вектор входных факторов; $Q_г$ — расход реакционных газов, кг/с; $T_г$ — температура реакционных газов, К; Θ_i, $i = \overline{1,3}$ — температура жидкой фазы в абсорберах, К; $Q_{ж_i}$, $i = \overline{1,3}$ — расход орошающей жидкости в абсорберах, кг/с.

Для этого выполняем следующие операции:

1. Все факторы $\vec{X}$, $i = \overline{1,8}$, в выражении (1) кодируем в диапазоне ±1, что составляет ±5 % от значений $X_i(0)$:

$$X_i(-1) = X_i(0) \cdot 0,95;\ i = \overline{1,8};$$
$$X_i(+1) = X_i(0) \cdot 1,05; i = \overline{1,8},$$

где $X_1(0)$ = 7,26 кг/с; $X_2(0)$ = 413 К; $X_3(0)$ = 363 К; $X_4(0)$ = 313 К; $X_5(0)$ = 296 К; $X_6(0)$ = 18 кг/с; $X_7(0)$ = 18 кг/с; $X_8(0)$ = 27 кг/с.

2. Формируем матрицу эксперимента в виде полуреплики ротатабельного плана второго порядка для числа факторов, равного восьми.

3. На математической модели процесса абсорбции [1] проводим вычислительный эксперимент.

4. Проводим регрессионный анализ результатов вычислительного эксперимента, получаем модель для управления процессом абсорбции по критерию Y_1:

$$Y_1 = 1,33 + 4,193 \cdot 10^{-3} X_1 + 5,263 \cdot 10^{-4} X_2 - \\ - 6,547 \cdot 10^{-4} X_3 - 6,329 \cdot 10^{-4} X_4 - \\ - 5,174 \cdot 10^{-4} X_5 - 1,053 \cdot 10^{-2} X_6 - \\ - 1,829 \cdot 10^{-3} X_7 - 1,94 \cdot 10^{-3} X_8 = 5,55\ \%.$$

После удаления малозначимых факторов и пересчёта коэффициентов получим

$$Y_1 = 0,595 + 6,353 \cdot 10^{-3} X_1 + 1,04 \cdot 10^{-4} X_2 - \\ - 1,046 \cdot 10^{-4} X_3 - 2,324 \cdot 10^{-3} X_6 = 0,07\%.$$

Наряду с составом готового формалина важнейшей характеристикой процесса абсорбции формальдегида является остаточное содержание формальдегида и метанола в отходящих абгазах

$$Y_2 = f_2(X_1) = \\ = f_2(Q_г; T_г; \Theta_1; \Theta_2; \Theta_3; Q_{ж_1}; Q_{ж_2}; Q_{ж_3});\ i = \overline{1,8},$$

где Y_2 — суммарная массовая доля формальдегида и метанола в отходящих абгазах.

После нормировки факторов, проведения вычислительного эксперимента по ротатабельному плану второго порядка, удаления малозначимых факторов и пересчёта коэффициентов получим

$$Y_2 = 4,785 \cdot 10^{-2} - 3,216 \cdot 10^{-3} X_1 - \\ - 4,337 \cdot 10^{-5} X_2 - 1,083 \cdot 10^{-4} X_3 - \\ - 1,42 \cdot 10^{-4} X_4 + 1,193 \cdot 10^{-4} X_5 + \\ + 1,98 \cdot 10^{-4} X_1^2 - 2,69 \cdot 10^{-8} X_2^2 + \\ + 3,519 \cdot 10^{-8} X_3^2 - 9,776 \cdot 10^{-8} X_4^2 + \\ + 2,932 \cdot 10^{-8} X_5^2 = 1,03\ \%.$$

Оптимизацию процессов абсорбции с жёсткими ограничениями на составы жидкого продукта и отходящих абгазов проводим в целях минимизации энергозатрат на рециркуляцию и охлаждение жидкой фазы.

Модель оптимизации суммарного расхода охлаждающей воды в выносные теплообменники абсорберов при условии обеспечения заданной степени поглощения формальдегида и метанола имеет вид

$$\{Q_\Sigma = Q_{X_1} + Q_{X_2} + Q_{X_3} = f_1(Q_г, \Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \to \\ \to \min_{\Theta_1\Theta_2\Theta_3} \left| C_\Sigma^г = f_2(Q_г, \Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \leqslant \right. \\ \leqslant C_{\Sigma,зд}^г : Q_г = Q_г^{изм} : \Theta_j \geqslant T_X,\ j = \overline{1,3}\} \to \\ \to \Theta_1^{opt}, \Theta_2^{opt}, \Theta_3^{opt}, \quad (2)$$

где $Q_{X_1}, Q_{X_2}, Q_{X_3}, Q_\Sigma$ — расходы охлаждающей воды на теплообменники первой, второй, третьей ступеней абсорбции и суммарный соответственно; Θ_1, Θ_2, $\Theta_3 \in [-1; 1]$ — нормированные значения температур жидкой фазы в абсорберах первой, второй и третьей ступеней; $Q_г \in [-1; 1]$ — нормированное значение нагрузки стадии абсорбции (первой ступени) по контактному газу; $C_\Sigma^г$ — сумма массовых долей формальдегида и метанола в отходящих абгазах; T_X — нормированное значение температуры охлаждающей воды; индексы «зд», «opt» и «изм» обозначают заданное, оптимальное и измеренное значения параметров соответственно.

Результаты обследования действующего производства показали, что в пределах регламентных значений переменных процесса зависимости в модели (2) суммарного расхода охлаждающей воды и суммы массовых долей формальдегида и метанола в отходящих абгазах от температур жидкой фазы в абсорберах и от нагрузки по газу могут быть аппроксимированы линейными формами вида

$$Q_{\Sigma} = \sum_{j=0}^{4} a_{qj} X_j, X_0 = 1, \quad (3)$$

$$C_{\Sigma}^{\text{г}} = \sum_{j=0}^{4} a_{cj} X_j, X_0 = 1, \quad (4)$$

где $X_1 = \Theta_1$; $X_2 = \Theta_2$; $X_3 = \Theta_3$; $X_4 = Q_{\text{г}}$; a_{qj}, a_{cj} $(j = \overline{1,4})$ — коэффициенты.

Тогда алгоритм оптимального управления процессом абсорбции формальдегида будет выглядеть следующим образом:

1. При измеренном значении расхода контактного газа $Q_{\text{г}}^{\text{изм}}$ по модели оптимизации (2) находятся оптимальные значения температур жидкой фазы по ступеням абсорбции $\Theta_j^{\text{opt}} (j = \overline{1,3})$.

2. Найденные значения $\Theta_j^{\text{opt}} (j = \overline{1,3})$ реализуются в агрегате формалина.

3. По результатам измерения суммы массовых долей формальдегида и метанола в отходящих газах $C_{\Sigma}^{\text{г}}$, суммарного расхода охлаждающей воды Q_{Σ}, расхода контактного газа $Q_{\text{г}}$ и температур жидкой фазы в абсорберах $(\Theta_j, j = \overline{1,3})$ в соответствии со следующим алгоритмом адаптации полиномиальных моделей статики корректируются параметры уравнений (3), (4):

$$C_{[\bar{u}]} = \frac{Q_{\Sigma}[n] - Q_{\Sigma}^{\min}[n]}{1 + (Q_{\text{г}}[n])^2 + (\Theta_1[n])^2 + (\Theta_2[n])^2 + (\Theta_3[n])^2}, \quad (5)$$

$$a_{q0}[n] = a_{q0}[n-1] + c[n], \quad (6)$$

$$a_{q1} = a_{q1}[n-1] + c[n] Q_{\text{г}}[n], \quad (7)$$

$$a_{q2}[n] = a_{q2}[n-1] + c[n] \Theta_1[n], \quad (8)$$

$$a_{q3}[n] = a_{q3}[n-1] + c[n] \Theta_2[n], \quad (9)$$

$$a_{q4}[n] = a_{q4}[n-1] + c[n] \Theta_3[n], \quad (10)$$

$$d[n] = \frac{C_{\Sigma}^{\text{г}}[n] - C_{\Sigma,\text{зд}}^{\text{г}}[n]}{1 + (Q_{\text{г}}[n])^2 + (\Theta_1[n])^2 + (\Theta_2[n])^2 + (\Theta_3[n])^2}, \quad (11)$$

$$a_{c0}[n] = a_{c0}[n-1] + d[n], \quad (12)$$

$$a_{c1}[n] = a_{c1}[n-1] + d[n] Q_{\text{г}}[n], \quad (13)$$

$$a_{c2}[n] = a_{c2}[n-1] + d[n] \Theta_1[n], \quad (14)$$

$$a_{c3}[n] = a_{c3}[n-1] + d[n] \Theta_2[n], \quad (15)$$

$$a_{c4}[n] = a_{c4}[n-1] + c[n] \Theta_3[n]. \quad (16)$$

4. Цикл управления начиная с п. 1 повторяется.

На основе модели оптимизации (2), алгоритма оптимального управления процессом абсорбции формальдегида и результатов обследования промышленных агрегатов с учётом экспертных оценок специалистов был разработан способ управления, обеспечивающий заданные степень абсорбции формальдегида и метанола водой, содержание воды в готовом продукте и снижающий энергозатраты на охлаждение жидкости в выносных теплообменниках.

Общая задача управления была разбита на две частные. Решение одной из них обеспечивает стабилизацию гидродинамического режима абсорберов и повышение точности регулирования содержания воды в формалине за счёт уменьшения запаздывания в контуре его регулирования [2]. На рис. 1 представлена система автоматического управления процессом многоступенчатой абсорбции, реализующая эти функции на промышленном агрегате.

Система компенсирует возмущения по расходу и составу газов, поступающих на абсорбцию, их температуре, а также возмущения по температуре жидкой фазы в различных точках технологической схемы. Ведущим параметром в системе является массовая доля воды в готовом формалине. Управление осуществляют путём регулирования параметров первой ступени абсорбции с одновременной коррекцией режимов работы последующих ступеней. К числу автоматически регулируемых параметров помимо массовой доли воды в формалине относятся перепады давлений на ступенях абсорбции, температуры и уровни в абсорберах. В табл. 3 представлены результаты наблюдения за изменением массовых долей компонентов готового формалина при управлении процессом многоступенчатой абсорбции предложенным способом и при нормальном технологическом режиме.

Из данных, приведённых в табл. 3, следует, что использование предложенного способа управления процессом многоступенчатой абсорбции позволяет уменьшить дисперсию

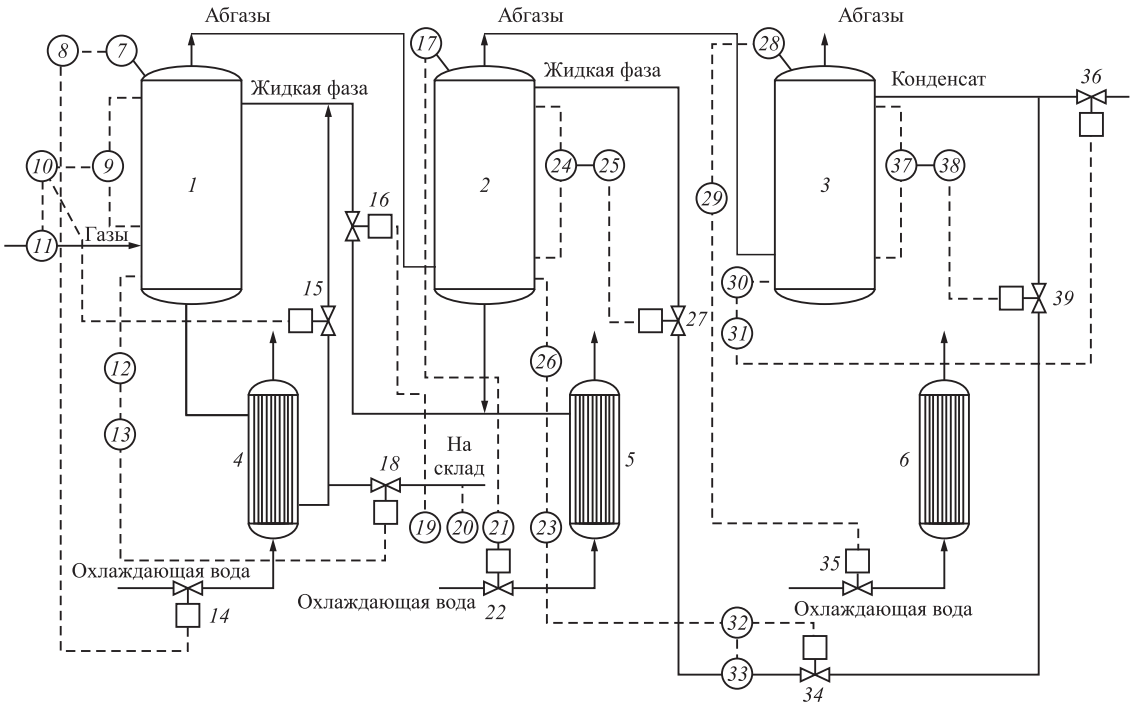

Рис. 1. Система автоматического управления процессом многоступенчатой абсорбции по критерию содержание воды в готовом формалине:
1...3 — абсорбер; *4...6* — холодильник; *7*, *17*, *28* — датчик температуры; *8*, *10*, *13*, *19*, *21*, *23*, *25*, *29*, *31*, *32*, *38* — регулятор; *9*, *24*, *37* — датчик перепада давления; *11*, *33* — датчик расхода; *12*, *26*, *30* — датчик уровня; *14...16*, *18*, *22*, *27*, *34...36*, *39* — исполнительный механизм; *20* — датчик содержания воды в готовом формалине

массовой доли воды в готовом продукте более чем в 2,5 раза. За счёт стабилизации содержания воды стабилизируется содержание и других компонентов в готовом продукте. При этом можно получать формалин с максимально возможным по стандарту содержанием воды, что при постоянном расходе газовой фазы на входе в систему абсорберов приводит к увеличению выпуска готового продукта.

Таблица 3

Результаты вычислительного эксперимента по управлению процессом многоступенчатой абсорбции по критерию массовая доля воды в готовом формалине и при нормальном технологическом режиме

Режим процесса	Время, ч	Массовая доля CH_2O в формалине, %	Массовая доля CH_3O в формалине, %	Массовая доля H_2O в формалине, %	Дисперсия H_2O в формалине, %
Управление по критерию массовая доля воды в готовом формалине	2	36,8	6,7	56,5	0,9
	4	36,8	6,7	56,5	
	6	36,9	7,0	56,1	
	8	37,1	6,5	56,4	
	10	36,9	7,1	56,0	
	12	37,2	6,9	55,9	
	14	37,3	7,1	55,6	
Нормальный технологический режим	2	37,6	7,6	54,8	2,5
	4	36,6	7,2	56,2	
	6	36,3	7,3	56,4	
	8	36,0	6,9	57,1	
	10	35,7	7,4	56,9	
	12	35,6	7,2	57,2	
	14	35,6	7,1	57,3	

Решение второй задачи обеспечивает минимизацию суммарного расхода охлаждающей воды в выносные теплообменники всех ступеней абсорбции при условии обеспечения заданной степени поглощения формальдегида и метанола [3, 4]. Система автоматического управления, реализующая эту функцию, представлена на рис. 2.

Управление процессом многоступенчатой абсорбции осуществляют путём изменения расхода орошающей жидкости в концевой абсорбер в зависимости от состава жидкого формалина и изменения расходов отводимой из абсорберов жидкости в зависимости от уровня в абсорберах. Температуры жидкой фазы в абсорберах регулируют по предложенному в настоящей статье алгоритму в зависимости от расхода и заданной степени поглощения формальдегида и метанола изменением расходов охлаждающей жидкости в выносные теплообменники. При этом в вычислительном устройстве по модели (2) определяют опти-

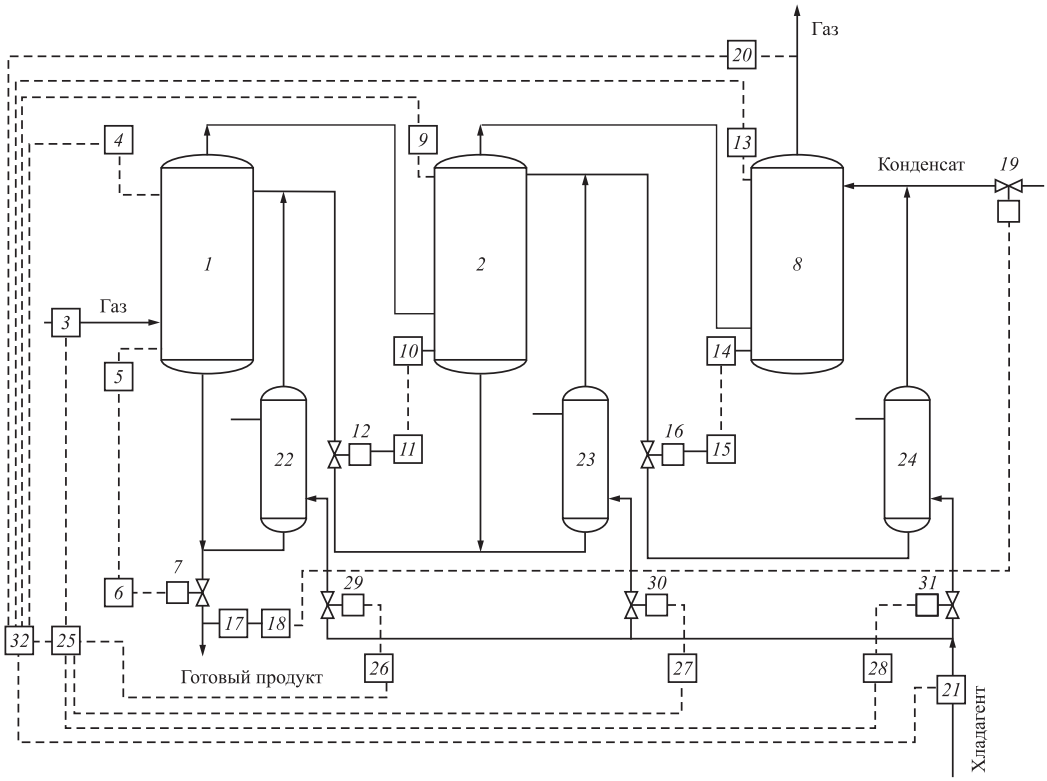

Рис. 2. Система автоматического управления процессом многоступенчатой абсорбции по критерию суммарный расход охлаждающей воды в выносные теплообменники: *1*, *2*, *8* — абсорбер; *22...24* — теплообменник; *4*, *9*, *13* — датчик температуры; *3*, *21* — датчик расхода; *5*, *10*, *14* — датчик уровня; *17* — датчик состава жидкого формалина; *20* — датчик состава отходящих абгазов; *6*, *11*, *15*, *18*, *26...28* — регулятор; *7*, *12*, *16*, *19*, *29*, *30*, *31* — исполнительный механизм; *25* — вычислительное устройство; *32* — блок адаптации

мальные значения температур жидкой фазы в абсорберах, минимизирующие суммарный расход охлаждающей воды в теплообменники. Коэффициенты модели оптимизации корректируют в блоке адаптации по формулам (5)... (16). В табл. 4 представлены основные показатели технологического процесса многоступенчатой абсорбции при управлении процессом по критерию суммарный расход охлаждающей воды в выносные теплообменники и при нормальном технологическом режиме.

Из данных, приведённых в табл. 4, следует, что использование описанного выше способа управления процессом многоступенчатой абсорбции формальдегида позволяет уменьшить суммарный расход хладагента в рециркуляционные теплообменники на 15...20 %. При этом снижение потребления электроэнергии на привод насосов хладагента составит до 20 %.

Предложенный способ управления процессом многоступенчатой абсорбции, обеспечива-

Таблица 4

Результаты вычислительного эксперимента по управлению процессом многоступенчатой абсорбции по критерию суммарный расход хладагента в теплообменники и при нормальном технологическом режиме

Показатель технологического процесса	Управление по критерию суммарный расход хладагента в теплообменники	Нормальный технологический режим
Расход газа на абсорбцию $Q_г^{изм}$, т/ч	8,5	8,5
Температура орошающей жидкости в абсорбере 1 T_1, К	84	75
Температура орошающей жидкости в абсорбере 2 T_2, К	62	60
Температура орошающей жидкости в абсорбере 3 T_3, К	35	35
Заданная степень очистки газа* $\varphi^{зад}$, г/м^3	5,0	5,5
Рассчитанная степень очистки газа φ, г/м^3	5,0	4,8
Состав жидкого формалина, доли массовые:		
формальдегид	0,37	0,37
метанол	0,08	0,08
вода	0,55	0,55
Расход хладагента Q_Σ, т/ч	11,5	13,85

* Суммарное содержание формальдегида и метанола в отходящем газе.

ющий заданные степени абсорбции формальдегида и метанола водой, содержание воды в готовом продукте и снижающий энергозатраты на охлаждение жидкости в выносных теплообменниках, целесообразно использовать на промышленных агрегатах по производству формалина в сочетании с адаптивным методом управления процессом синтеза формальдегида, представленным в работах [5—10].

Библиографические ссылки

1. **Кондрашов С.Н.** Разработка и исследование алгоритмов управления производством формалина: Дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 1994. 150 с.

2. **Меренков В.Г., Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н.** Способ управления процессом многоступенчатой абсорбции // Патент России № 2055633. 1996. Бюл. № 7.

3. **Меренков В.Г., Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н.** Способ управления процессом многоступенчатой абсорбции // Патент России № 2077929. 1997. Бюл. № 12.

4. **Шумихин А.Г., Чарная Е.Б., Кондрашов С.Н.** Управление производством формалина с использованием технико-экономических критериев // Химическая промышленность. 1997. № 1. С. 74—76.

5. **Кондрашов С.Н., Савостина А.С.** Моделирование узла синтеза формальдегида // Вестник ПНИПУ: Химическая технология и биотехнология. 2016. № 1. С. 7—18.

6. **Кондрашов С.Н., Горохова М.Н.** Разработка алгоритма оптимального управления технологическим процессом получения формальдегида // Вестник ПНИПУ: Химическая технология и биотехнология. 2016. № 1. С. 19—28.

7. **Кондрашов С.Н., Бортникова А.С.** Разработка алгоритма управления узлом контактирования производства формалина подачей дополнительного потока воздуха // Вестник ПНИПУ: Химическая технология и биотехнология. 2016. № 4. С. 9—26.

8. **Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н., Майер В.В.** Способ управления процессом получения формалина // Патент России № 1669911. 1991. Бюл. № 30.

9. **Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н., Майер В.В.** и др. Способ автоматического управления процессом получения формалина // Патент России № 2058289. 1996. Бюл. № 11.

10. **Меренков В.Г., Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н.** и др. Способ управления процессом синтеза формальдегида // Патент России № 1807050. 1993. Бюл. № 13.

Ссылка для цитирования

Кондрашов С.Н., Шумихин А.Г., Берсенева Н.И. Разработка системы управления процессом многоступенчатой абсорбции формальдегида // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 3. С. 99—104.

УДК 519.711.3

В.К. Иванов, д-р техн. наук, доц.
(Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола)
*i*vladko1@mail.ru

К РЕШЕНИЮ ОСНОВНОЙ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ МЕЛКОСЕРИЙНЫМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Рассмотрены пути дальнейшего развития и решения основной задачи управления для различных уровней машиностроительного производства.

Ключевые слова: основная задача управления; технологические и эксплуатационные требования; технические условия; целевые критерии; оптимизация; рациональные параметры.

Ways of further development and solving the main control problem for various levels of machine-building production are considered.

Keywords: the main task of management; technological and operational requirements; technical conditions; target criteria; optimization; rational parameters.

Введение. Одной из основных задач при проектировании и управлении производственной системой является определение параметров производственной системы, при которых целевые критерии (критерии качества) системы удовлетворяют заданным техническим условиям. Задача в такой постановке относится к основной задаче управления (ОЗУ) [1, 2]. Доказано, что если решение основной задачи управления существует, то выполняется условие $\Gamma_0 \leqslant 1$.

Цель работы состоит в дальнейшем развитии основной задачи управления на различных уровнях машиностроительного производства (производственный модуль, участок, цех).

Основная часть. При решении основной задачи управления возникают случаи, когда поставленная задача решения не имеет. Это значит, что среди допустимых значений вектора проектных параметров ω нет таких, при которых решение системы уравнений, описывающих поведение производственной системы, обеспечивало бы выполнение технических условий на целевые критерии, т. е. $\Gamma_0 > 1$. В данной работе предложены алгоритм и численный метод, позволяющие практически за конечный промежуток времени определить такой вариант технических условий, технологических и эксплуатационных требований, при которых выполняется условие $\Gamma_0 \leqslant 1$.

Основная идея этого метода заключается в том, что допустимые пределы изменения проектных параметров ω_j (область управлений) и ограничения, наложенные на показатели качества (функционалы I_η), выбираются в качестве компонентов нового вектора управления v_1.

Пусть пределы изменения управляющих параметров представлены в виде

$$c_j \leqslant \omega_j \leqslant C_j,\ j = 1,\ J,$$

где c_j, C_j задаются заранее, исходя из технологических и эксплуатационных требований, а ограничения на показатели качества (технические условия) заданы в виде

$$d_\eta \leqslant I_\eta \leqslant D_\eta,\ \eta = \overline{1,\ \theta}.$$

Тогда вектор управления примет вид

$$v_1 = \{c_j,\ C_j,\ d_\eta,\ D_\eta\}.$$

Причём управляющие параметры в свою очередь могут изменяться только в заранее заданных пределах внутри области допустимых значений V_1 в следующих диапазонах:

$$\begin{aligned} &c'_j \leqslant c_j \leqslant c''_j; \\ &C'_j \leqslant C_j \leqslant C''_j; \\ &d'_\eta \leqslant d_\eta \leqslant d''_\eta; \\ &D'_\eta \leqslant D_\eta \leqslant D''_\eta. \end{aligned} \qquad (1)$$

При этом левые и правые границы диапазонов изменения параметров выбирают с учётом возможностей современного уровня развития техники.

В такой формулировке задача формирования рациональных технических условий, технологических и эксплуатационных требований заключается в определении управляющих параметров v_1 из области (1), при которых выполняется условие

$$\Gamma_1[v_1] = \min_{v_1} \Gamma_0 = \min_{v_1} \min_{\omega} \max_{\eta} \gamma_\eta \leqslant 1. \qquad (2)$$

На рис. 1 и 2 представлена геометрическая интерпретация предлагаемого подхода, где ω — область технологических и эксплуатационных требований (область управлений, область поиска), которой соответствует область Ω в пространстве целевых критериев (функционалов). В этом же пространстве выделена область q заданных технических условий на проектируемую систему, которой в пространстве управлений соответствует область Q.

В том случае, когда $\Gamma_0 > 1$, область ω не пересекается с областью Q, а область Ω — с q, т. е. отсутствует решение основной задачи управления.

Таким образом, задача формирования рациональных технических условий, технологических и эксплуатационных требований заключается в определении такого вектора управлений v_1, при которых происходит пересечение областей ω с Q и Ω с q. В работе [3] представлены алгоритм решения поставленной задачи и примеры решения для двух случаев:

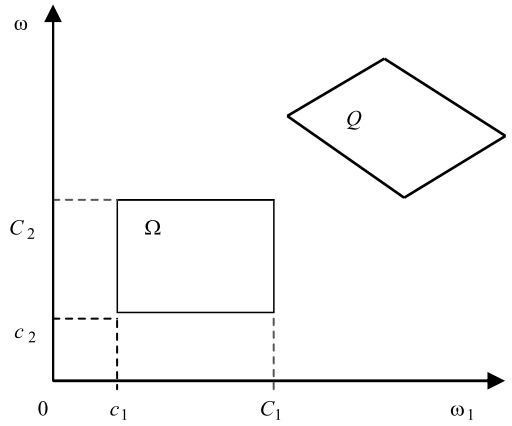

Рис. 1. Область управлений

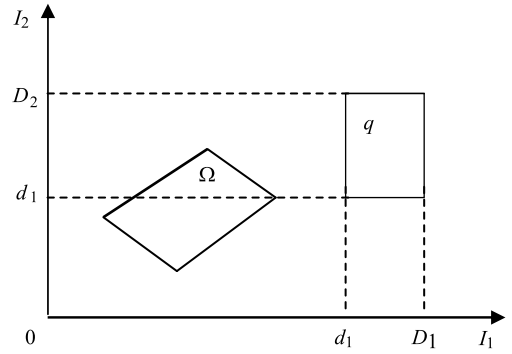

Рис. 2. Область целевых критериев

формирование рациональных технических условий;

формирование рациональных технологических и эксплуатационных требований.

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что при заданных технических условиях основная задача управления будет иметь решение, если компоненты вектора управления (варьируемые параметры) будут изменятся в сторону увеличения (многогранник технологических и эксплуатационных требований — ТЭТ будет перемещаться вправо).

В работе представлено решение ОЗУ для производственного модуля, участка и цеха.

Математические модели производственного модуля включают модели системы управления металлорежущих станков и роботов с ЧПУ, привода робота-манипулятора.

Результаты решения ОЗУ для вариантов, отличающихся техническими условиями, ТЭТ и параметрами метода случайного поиска, приведены в таблице.

Здесь k_1^*, T_1^*, k_5^*, T_5^*, k_6^*, k_7^* — рациональные значения передаточных коэффициентов и постоянных времени, которые удовлетворяют ТЭТ.

Для первых пяти вариантов решена задача выбора рациональных параметров метода случайного поиска. В качестве критерия выбрано число удачных шагов, необходимых для выполнения условия $\Gamma_0 \leqslant 1$, которые взяты за основу для остальных вариантов.

Предлагаемый подход позволяет решать и оптимизационные задачи по одному из выбранных критериев.

Для вариантов, где $\Gamma_0 > 1$, решены задачи формирования рациональных технических условий и ТЭТ в соответствии с представленным алгоритмом.

Результаты решения основной задачи управления

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8
k_1^*	20,00	27,00	29,00	36,00	42,00	22,00	19,00	19,00
T_1^*	0,10	0,14	0,08	0,27	0,32	0,13	0,16	0,22
k_5^*	10,00	18,00	16,00	21,00	29,00	12,00	13,00	23,00
T_5^*	0,05	0,07	0,06	0,11	0,17	0,08	0,10	0,13
k_6^*	0,50	0,38	0,73	1,20	1,60	0,72	1,10	1,40
k_7^*	0,10	0,12	0,31	0,56	1,22	0,41	0,64	0,83
Γ_0	**0,87**	**0,81**	**0,97**	**0,85**	**0,79**	**1,24**	**1,13**	**0,92**

Математическая модель производственного участка включает взаимосвязанные модели технологической, складской и транспортной системы (ТС) [4]. Предполагается, что есть расписание функционирования участка, обеспечивающее в стационарном режиме производительность F изделий в единицу времени в соответствии с плановым заданием (вектор X).

Решена основная задача управления для производственного участка. При этом в качестве выходных параметров, характеризующих качество его функционирования, приняты максимальная производительность $F(k, x_k)$ и полезная загрузка ТС $L_p(k, x_k)$, где k — типы деталей, x_k — размер партии каждого типа деталей. В соответствии с техническими условиями на проектирование к ним предъявляются определённые требования. Например, максимальная производительность производственного участка и полезная загрузка ТС должны находиться в заданных пределах в виде ограничений

$$d_{1p} \leqslant F \leqslant D_{1p};\ d_{2p} \leqslant L_p \leqslant D_{2p}, \qquad (3)$$

где d_{1p}, D_{1p}, d_{2p}, D_{2p} — заданные предельно допустимые значения переменных F и L_p.

Вектор управления $\omega = (k, x_k)$ и область его допустимых значений D_ω определяются неравенствами

$$c_{1p} \leqslant k \leqslant C_{1p};\ c_{2p} \leqslant x_k \leqslant C_{2p}. \qquad (4)$$

Результаты решения ОЗУ представлены на рис. 3 и 4.

Таким образом, можно сформировать рациональное плановое задание для запуска деталей в производство.

Также решена ОЗУ для комплексно-автоматизированного металлообрабатывающего

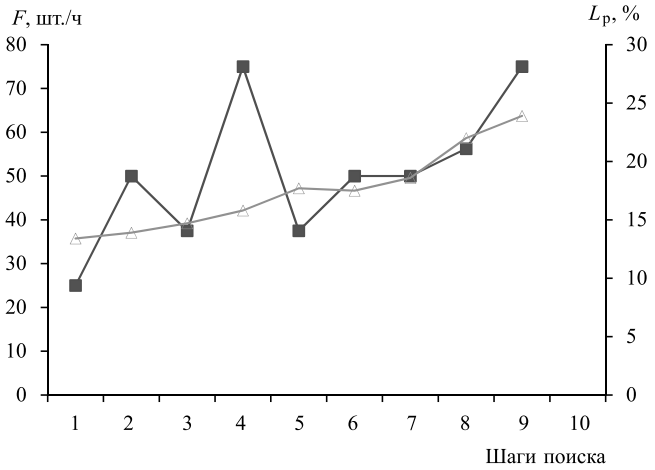

Рис. 3. Изменения максимальной производительности и полезной загрузки ТС

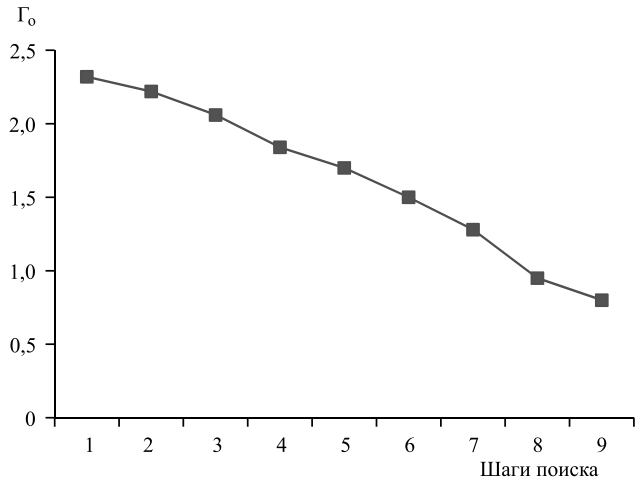

Рис. 4. Изменения величины Γ_0

цеха, который выпускает мелкими сериями корпусные детали, тела вращения, мелкие детали, различные узлы и выполняет сборку.

В работах [5—8] представлены алгоритмы и комплекс средств для решения основной задачи управления, который содержит базу данных по видам и типам оборудования, специалистов и деталей.

Рассмотрены последовательные и параллельные технологические процессы с числом оборудования и специалистов от 2 до 15 и деталей до 9.

При решении ОЗУ в ходе производственного процесса вводятся компоненты вектора управления $\omega = \{S_k, F_k, S_m, L_m, n_k^p, T_k^p, n_m^p, T_m^p\}$, которые выбирают из области, заданной в соответствии с ТЭТ, где S_k, S_m — стоимость работы оборудования и специалистов; F_k, L_m — располагаемое количество оборудования и специалистов; n_k^p, n_m^p — необходимое количество продукции, которое требуется изготовить на оборудовании k-го вида и специалистами m-вида; T_k^p, T_m^p — время изготовления необходимого количества продукции на оборудовании k-го вида и специалистами m-го вида в количестве n штук.

В качестве целевых критериев $I[\omega]$ выбирают суммарную стоимость S изготовления всей партии деталей, время работы оборудования k-го вида T_F^p и специалистов m-го вида T_L^p, а также количество деталей каждого вида N_k^p и N_m^p, которые можно изготовить за заданное время. На них также наложены ограничения, которые представляют собой технические условия.

В качестве примера приведено решение основной задачи управления для технологического процесса, состоящего из пяти деталей.

Вектор управления включает две компоненты $\omega = \{F_2, n_3^5\}$, которые выбирают из области ω ($1 \leqslant F_2 \leqslant 5$; $1 \leqslant n_3^5 \leqslant 10$) (рис. 5), а технические условия заданы в виде области q ($0{,}5 \leqslant T_{F2} \leqslant 1{,}1$; $5 \leqslant N_3^5 \leqslant 12$) (рис. 6), где F_2 — располагаемое количество фрезерных станков типа Ф-1; n_3^5 — количество корпусных деталей типа К-1; T_{F2} — время, необходимое для изготовления деталей типа К-11, ч; N_3^5 — количество корпусных деталей типа К-1, которое можно изготовить за заданное время.

Заштрихованная область на рис. 5 соответствует области решения ОЗУ, в каждой точке которой удовлетворяются заданные технические условия.

Для рассмотренных задач получены рациональные значения количества оборудования, специалистов и деталей каждого вида, суммарное время и общая стоимость выпуска всей партии деталей. Установлено влияние количества оборудования и численности специалистов на характеристики производственной системы.

Выводы. Разработан алгоритм и программный комплекс автоматизации производства на

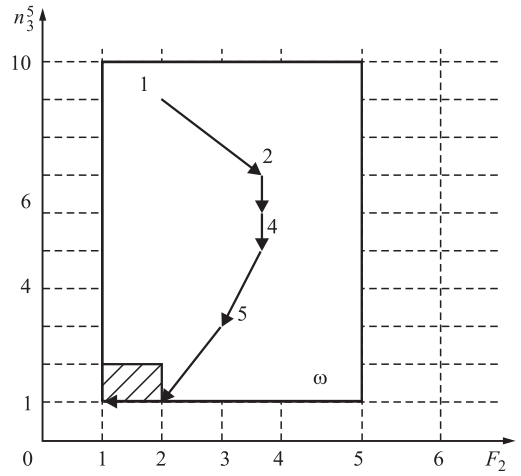

Рис. 5. Область поиска

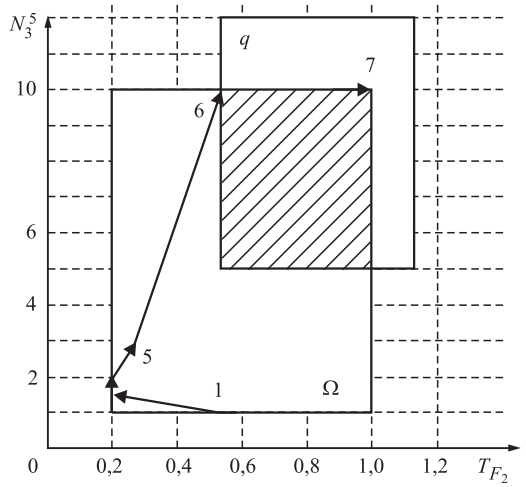

Рис. 6. Область целевых критериев

основе развития основной задачи управления производственной системой, который позволяет решать задачу прогнозирования, т. е. определяя направление изменения технологических и эксплуатационных требований (область поиска параметров) для выполнения заданных технических условий по показателям качества системы (целевые критерии). В результате дальнейшей работы решена основная задача управления для подсистем производственной системы (модуля, участка, цеха). Получены рациональные значения параметров подсистем, при которых удовлетворяются заданные технические условия на целевые критерии.

Библиографические ссылки

1. **Сиразетдинов Т.К.** Методы решения многокритериальных задач синтеза технических систем. М.: Машиностроение, 1988. 160 с.

2. **Сиразетдинов Т.К.** Динамическое моделирование экономических объектов. Казань: ФЭН, 1996. 224 с.

3. **Иванов В.К.** К решению основной задачи управления технологической подготовкой производства // Вестник Поволжского гос. техн. ун-та. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2017. № 2. С. 81—86.

4. **Робототехника** и гибкие автоматизированные производства. Кн. 5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств. М.: Высш. школа, 1986. 175 с.

5. **Иванов В.К.** К задаче аналитического проектирования элементов гибких производственных систем // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2010. № 1. С. 93—96.

6. **Иванов В.К.** Автоматизация выбора рациональных параметров производственной системы // Автоматизация и современные технологии. 2010. № 9. С. 26—29.

7. **Иванов В.К.** Автоматизация моделирования возможностей гибких производственных систем // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2010. № 4. С. 142—144.

8. **Иванов В.К.** Интегрированная система моделирования и управления возможностями предприятия // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 7. С. 34—39.

Ссылка для цитирования

Иванов В.К. К решению основной задачи управления автоматизированным мелкосерийным машиностроительным производством // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 3. С. 104—108.

УДК 519.95

М.А. Ахмедов, д-р техн. наук, проф., **Ш.С. Гусейнзаде,** канд. техн. наук, доц., **Е.А. Насирова**
(Сумгаитский государственный университет, Азербайджанская Республика)

shahla.huseynzade@gmail.com

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОНЕЧНОГО АВТОМАТА В СЕТЬ ПЕТРИ

Рассмотрена задача автоматизации преобразования конечного автомата (КА) в сети Петри (СП). Разработан алгоритм преобразования таблиц переходов и выходов КА в матрицу входных и выходных инциденций СП.

Продемонстрировано функционирование алгоритма на основе простого примера модели транспортной системы (ТС) гибкого автоматизированного участка (ГАУ). На основе матрицы инцидентностей, полученной в результате функционирования алгоритма, построена модель СП в виде графа, имитирующего КА.

Ключевые слова: сеть Петри; конечный автомат; преобразование конечного автомата; матрица инцидентностей; таблицы переходов и выходов; множество входных сигналов; выходной алфавит автомата; внутренние состояния автомата; функция переходов автомата; функция инцидентности позиций и переходов.

The transformation automation task of a finite automatic machine (FAM) into the Petri net (PN) is considered. The algorithm of the tables transformation for FAM transition and outlet into a matrix of the PN input and output incidents is developed. The functioning of the algorithm is demonstrated on a simple example of a transport system (TS) model for a flexible automated area (FAA). The PN model in the form of a graph simulating a FAM is constructed on the basis of the incidence matrix, obtained as a result of the algorithm functioning.

Keywords: Petri net; finite automatic machine; transformation of the finite automatic machine; incidence matrix; transition and outlet tables; many input signals; output alphabet automatic machine; internal states of the automatic machine; transition function of the automatic machine; incidence function for positions and transitions.

Введение. Мощным инструментом для изучения поведения технических и экономических объектов является аппарат имитационного моделирования сети Петри (СП). Для многих объектов и процессов традиционно используются автоматные представления. Описательная способность класса СП больше, чем у класса конечных автоматов [1].

Моделирование сложных динамических систем (ДС) можно рассматривать на нескольких уровнях, и СП могут моделировать каждый из этих уровней. На низком уровне модули системы часто описываются конечными автоматами (КА). Аппарат КА предназначен прежде всего для моделирования отдельных процессов. При моделировании же сложных ДС необходимо учитывать не только сами процессы, но и их взаимодействие. Частично эту проблему позволяют решать сети КА, т. е. схемы, которые получаются в результате присоединения выходов одних автоматов к входам других [2]. На высоком уровне более удобны модели, построенные на СП. Для анализа и формальной верификации системы при моделировании сложных динамических систем необходимо использовать достаточно мощный формальный аппарат как СП [3]. При этом часто возникает задача преобразования конечного автомата в СП.

СП лучше всего подходят для описания любых асинхронных систем, тогда как КА — для последовательных систем. Наглядность динамики и композиционные возможности СП выше, чем у КА [4].

Правила построения корректных схем и необходимость использования единого алфавита накладывают существенные ограничения на процесс разработки моделей при использовании сетей КА в качестве моделей сложных ДС [5].

Поэтому представляет интерес методика построения СП по автоматному представлению. Имеются некоторые общие подходы к решению этой задачи. Но конкретные решения задачи и их автоматизация в литературе не встречаются.

В работе представлена методика построения структурных элементов и матриц инцидентностей СП, которая моделирует КА, описываемый таблицами переходов и выходов.

Теоретический анализ задачи преобразования конечного автомата в СП. Классический КА связан с понятиями алгоритма и последовательной алгоритмической системы, для которых характерен последовательный способ функционирования: система (автомат) последовательно переходит из одного состояния в другое в соответствии с заданной функцией перехода и осуществляет очередной (последовательный) шаг алгоритма. Обычный автомат имеет функции переходов и выходов, которые явно не зависят от времени [5].

Абстрактный автомат A задаётся совокупностью шести объектов [6]: $A = (X, U, Y, x_0, \varphi, \psi)$, где $U = (u_1, u_2, ..., u_m)$ — конечное множество входных сигналов, называемое входным алфавитом автомата; $Y = (y_1, y_2, ..., y_g)$ — конечное множество выходных сигналов, называемое выходным алфавитом автомата; $X = (x_1, x_2, ..., x_z)$ — произвольное множество, называемое множеством внутренних состояний автомата; x_0 — элемент из множества X, называемый начальным состоянием автомата; $\varphi:(x, u)$ и $\psi:(x, u)$ — две функции, задающие однозначные отображения множества пар (x, u), где $u \in U$ и $x \in X$, в множества X и Y. Функция $\varphi:(x, u)$ называется функцией переходов автомата, а функция $\psi:(x, u)$ — функцией выходов:

$$\varphi:(X \times U) \to X; \ \psi:(X \times U) \to Y.$$

КА может быть задан в виде графа, таблиц переходов и выходов и аналитическими способами. Функции переходов и выходов автомата $\varphi:(x, u)$ и $\psi:(x, u)$ могут быть представлены табличным способом.

Сеть Петри формально представляется как набор вида $N = (P, T, F, H, \mu^0)$, где $P = \{p_1, p_2, ..., p_n\}$, $n > 0$ — конечное непустое множество позиций (иначе состояний или мест); $T = \{t_1, t_2, ..., t_m\}$, $m > 0$ — конечное непустое множество переходов (событий); $F:P \times T \to \{0, 1, 2, ...\}$ и $H:P \times T \to \{0, 1, 2, ...\}$ — функции входных и выходных инциденций соответственно, а отображение $\mu^0:P \to \{0, 1, 2, ...\}$ — начальная маркировка (разметка каждой позиции) [7].

Графическим изображением сети Петри является двудольный ориентированный граф с двумя типами вершин. Вершины $p \in P$ изображаются кружками, а вершины $t \in T$ — чёрточками (барьерами). Дуги соответствуют функциям инцидентности позиций и переходов [7].

Топология СП, имитирующей КА, определяется следующим образом: входному и выходному сигналам автомата ставятся в соответствие свои позиции, каждому состоянию автомата ставятся в соответствие позиция и переход. Обязательным условием, обеспечивающим детерминированность автомата,

является наличие в любой момент времени в позициях состояний только одного маркера, отмечающего нахождение моделируемого автомата в соответствующем состоянии [8]. Каждый переход связан входной дугой с позицией соответствующего состояния и двунаправленными дугами — с входной и выходной позициями. Выходные дуги перехода связаны с позициями новых состояний автомата, отличных от прежнего.

Для КА $A = (X, U, Y, x_0, \varphi, \psi)$ определена СП $N = (P, T, F, H, \mu^0)$ следующим образом: $P = U \cup X \cup Y$, $T = \{t_x, x/x \in X$ и $u \in U\}$, $I(t_x, u) = \{x, u\}$, $O(t_x, u) = \{\varphi(x, u), \psi(x, u)\}$. Полученная СП является моделью конечного автомата [6].

На основе заданной топологии представляется определение структурных элементов СП — переходов и позиций по следующим правилам: для каждой пары (состояние и входной символ) определяется переход; объединение множеств входных сигналов $U = \{u_1, u_2, ..., u_m\}$, выходных сигналов $Y = \{y_1, y_2, ..., y_g\}$, внутренних состояний $X = \{x_1, x_2, ..., x_z\}$ автомата составляет множество позиций СП. Переходы и позиции СП определяются как $T = \{t_1, t_2, ..., t_m\}$, $P = \{p_1, p_2, ..., p_n\}$, где $n = m + z + g$.

Предлагается методика построения СП по автоматному представлению, основанная на преобразовании таблиц переходов и выходов КА в матрицу инцидентностей СП.

Алгоритм преобразования таблиц переходов и выходов КА в матрицы входных и выходных инциденций СП.

Начало алгоритма.

Шаг 1. Создание матрицы переходов $C = \{c_{j,i}\}$ на основе таблицы переходов:

$$c_{j,i} = \begin{cases} k, \text{ если } \varphi:(x_i, u_j) \to x_k; \\ 0, \text{ если } \varphi:(x_i, u_j) \to \varepsilon, \end{cases}$$

где $i = \overline{1,z}$; $k = \overline{1,z}$; $j = \overline{1,m}$; ε — пустой элемент.

Шаг 2. Создание матрицы выходов $B = \{b_{j,i}\}$ на основе таблицы выходов:

$$b_{j,i} = \begin{cases} k, \text{ если } \psi:(x_i, u_j) \to y_k; \\ 0, \text{ если } \psi:(x_i, u_j) \to \varepsilon, \end{cases}$$

где $i = \overline{1,z}$; $k = \overline{1,g}$; $j = \overline{1,m}$.

Шаг 3. Определение матрицы входных инциденций СП $F = \{f_{j,i}\}$, где $i = \overline{1,n}$; $j = \overline{1,m}$; $n = m + z + g$ (n — число позиций, m — число переходов). Элемент f_{ij} равен числу дуг от i-й позиции к j-му переходу:

$$f_{i,j} = \begin{cases} 1, \text{ если } p_i \in {}^{\bullet}t_j; \\ 0 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 4. Определение матрицы выходных инциденций СП $H = \{h_{j,i}\}$, где $i = \overline{1,n}$; $j = \overline{1,m}$. Элемент $h_{j,i}$ равен числу дуг от j-го перехода к i-й позиции:

$$h_{j,i} = \begin{cases} 1, \text{ если } p_i \in t_j^{\bullet}; \\ 0 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 5. Формирование элементов матрицы входных инциденций СП $F = \{f_{i,j}\}$:

обнуление всех элементов матрицы $f_{i,j} = 0$, где $i = \overline{1,n}$; $j = \overline{1,m}$;

если $c_{j,i} \neq 0$, тогда $f_{j,j} = 1$ и $f_{m+i,j} = 1$, где $i = \overline{1,z}$; $j = \overline{1,m}$.

Шаг 6. Формирование элементов матрицы выходных инциденций СП $H = \{h_{j,i}\}$:

обнуление всех элементов матрицы $h_{j,i} = 0$, где $j = \overline{1,m}$; $i = \overline{1,n}$;

если $c_{j,i} \neq 0$, тогда $h_{j,m+l} = 1$, где $j = \overline{1,m}$; $i = \overline{1,z}$; $l = c_{j,i}$;

если $b_{j,i} \neq 0$, тогда $h_{j,m+z+l} = 1$, где $j = \overline{1,m}$; $i = \overline{1,z}$; $l = b_{j,i}$.

Шаг 7. Формирование элементов матрицы инциденций СП $D = \{d_{j,i}\}$:

так как $D = F - H^T$, то $d_{i,j} = f_{i,j} - h_{j,i}$, где $j = \overline{1,m}$; $i = \overline{1,n}$.

Конец алгоритма.

Для проверки достоверности продемонстрировано функционирование алгоритма на основе простого примера.

Демонстрация функционирования алгоритма на основе примера. В работе представлено решение этой задачи на конкретном примере. Здесь рассматривается модель функционирования транспортной системы (ТС) гибкого автоматизированного участка (ГАУ). ТС может находиться в одном из двух состояний $X = (x_1, x_2)$: x_1 — отключено, x_2 — включено (число внутренних состояний $z = 2$). Переход от одного состояния к другому осуществляется управляющими воздействиями $U = (u_1, u_2)$: u_1 — отключение, u_2 — включение ТС (число входных сигналов $m = 2$). Функции перехода и выхода задаются следующими преобразованиями:

$$\begin{aligned} &\varphi:(x_2, u_1) \to x_1; \\ &\varphi:(x_1, u_2) \to x_2, \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &\psi:(x_2, u_1) \to y_1; \\ &\psi:(x_1, u_2) \to y_2. \end{aligned} \tag{2}$$

Внешние состояния ТС определяются выходным алфавитом $Y = (y_1, y_2)$: y_1 — ТС находится в отключенном состоянии, y_2 — ТС находится во включенном состоянии (число выходных сигналов $g = 2$). Следовательно, для управления ТС необходимо определить внутренние состояния X на основе информации U с соответствующих датчиков и выработать управляющие сигналы Y в соответствии с функцией перехода. Графовое представление этого автомата задано на рис. 1. Таблицы переходов и выходов автомата, заданного функциями перехода (1) и выхода (2), представлены на рис. 2, *а* и *б*.

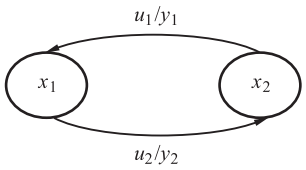

Рис. 1. Граф — представление автомата, заданного функциями перехода (1) и выхода (2)

	x_1	x_2
u_1		x_1
u_2	x_2	

а)

	x_1	x_2
u_1		y_1
u_2	y_2	

б)

Рис. 2. Таблицы переходов (*а*) и выходов (*б*) автомата, заданного функциями перехода (1) и выхода (2)

Теперь для определения переходов из одного состояния в другое можно ввести переходы сети следующим образом. Для каждой пары (состояние и входной символ) определяем переход, входные позиции которого соответствуют состоянию и входному символу, а выходные — следующему состоянию и выходу.

Таким образом, определяются переходы $T = \{t_1, t_2\}$ СП (число переходов $m = 2$).

Позиции СП определяются по следующему правилу (число позиций $n = m + z + g = 2 + 2 + 2 = 6$):

$$P = U \cup X \cup Y =$$
$$= \{u_1, u_2, x_1, x_2, y_1, y_2\} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\}.$$

Начало выполнения алгоритма.

Шаг 1. Создание матрицы переходов $C(m, z) = C(2, 2) = \{c_{j,i}\}$, где $i = \overline{1,2}$; $k = \overline{1,2}$; $j = \overline{1,2}$; на основе таблицы переходов (см. рис. 2, *а*):

$$c_{1,1} = 0, \text{ так как } \varphi{:}(x_1, u_1) \to \varepsilon;$$
$$c_{1,2} = 1, \text{ так как } \varphi{:}(x_2, u_1) \to x_1;$$
$$c_{2,1} = 2, \text{ так как } \varphi{:}(x_1, u_2) \to x_2;$$
$$c_{2,2} = 0, \text{ так как } \varphi{:}(x_2, u_2) \to \varepsilon.$$

В результате получается матрица переходов

$$C(2,2) = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 0 \end{vmatrix}.$$

Шаг 2. Создание матрицы выходов $B(m, z) = B(2, 2) = \{b_{j,i}\}$, где $i = \overline{1,2}$; $k = \overline{1,2}$; $j = \overline{1,2}$; на основе таблицы выходов (см. рис. 2, *б*):

$$b_{1,1} = 0, \text{ так как } \psi{:}(x_1, u_1) \to \varepsilon;$$
$$b_{1,2} = 1, \text{ так как } \psi{:}(x_2, u_1) \to x_1;$$
$$b_{2,1} = 2, \text{ так как } \psi{:}(x_1, u_2) \to x_2;$$
$$b_{2,2} = 0, \text{ так как } \psi{:}(x_2, u_2) \to \varepsilon.$$

В результате получается матрица выходов

$$B(2,2) = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 0 \end{vmatrix}.$$

Шаг 3. Определение матрицы входных инциденций СП $F(n, m) = F(6, 2) = \{f_{i,j}\}$, где $i = \overline{1,6}$; $j = \overline{1,2}$; $n = m + z + g = 6$ (n — число позиций, m — число переходов).

Шаг 4. Определение матрицы выходных инциденций СП $H(m, n) = H(2, 6) = \{h_{j,i}\}$, где $i = \overline{1,6}$; $j = \overline{1,2}$.

Шаг 5. Формирование элементов матрицы входных инциденций СП $F(6, 2) = \{f_{i,j}\}$:

обнуление всех элементов матрицы $f_{i,j} = 0$, где $i = \overline{1,6}$; $j = \overline{1,2}$;

если $c_{j,i} \neq 0$, тогда $f_{j,j} = 1$ и $f_{2+i,j} = 1$, где $i = \overline{1,2}$; $j = \overline{1,2}$:

так как $c_{1,2} \neq 0$, получается $f_{j,j} = f_{1,1} = 1$, $f_{2+i,j} = f_{2+2,1} = f_{4,1} = 1$;

так как $c_{2,1} \neq 0$, получается $f_{j,j} = f_{2,2} = 1$, $f_{2+i,j} = f_{2+1,2} = f_{3,2} = 1$;

$$F(6,2) = \begin{vmatrix} 1\,0 \\ 0\,1 \\ 0\,1 \\ 1\,0 \\ 0\,0 \\ 0\,0 \end{vmatrix}.$$

Шаг 6. Формирование элементов матрицы выходных инциденций СП $H(2, 6) = \{h_{j,i}\}$:

обнуление всех элементов матрицы $h_{j,i} = 0$, где $j = \overline{1,2}$; $i = \overline{1,6}$;

если $c_{j,\,i} \neq 0$, тогда $h_{j,\,m+l} = h_{j,\,2+l} = 1$, где $j = \overline{1,2}$; $i = \overline{1,2}$; $l = c_{j,\,i}$:

так как $c_{1,2} \neq 0$, получается $h_{j,\,m+l} = h_{1,2+1} = h_{1,3} = 1$ ($l = c_{j,\,i} = c_{1,2} = 1$);

так как $c_{2,1} \neq 0$, получается $h_{j,\,m+l} = h_{2,2+2} = h_{2,4} = 1$ ($l = c_{j,\,i} = c_{2,\,1} = 1$);

если $b_{j,\,i} \neq 0$, тогда $h_{j,\,m+z+l} = h_{j,\,2+2+l} = 1$, где $j = \overline{1,2}$; $i = \overline{1,2}$; $l = b_{j,\,i}$:

так как $b_{1,2} \neq 0$, получается $h_{j,\,m+z+l} = h_{1,2+2+1} = h_{1,5} = 1$ ($l = b_{j,\,i} = b_{1,2} = 1$);

так как $b_{2,\,1} \neq 0$, получается $h_{j,\,m+z+l} = h_{2,2+2+2} = h_{2,6} = 1$ ($l = b_{j,\,i} = b_{2,1} = 2$);

$$H(2,6) = \begin{vmatrix} 0\,0\,1\,0\,1\,0 \\ 0\,0\,0\,1\,0\,1 \end{vmatrix}.$$

Шаг 7. Формирование элементов матрицы инциденций СП $D(n, m) = D(6, 2) = \{d_{i,\,j}\}$:

так как $D = F - H^T$, то $d_{i,\,j} = f_{i,\,j} - h_{j,\,i}$, где $j = \overline{1,2}$; $i = \overline{1,6}$;

$$D(6,2) = F(6,2) - H^T(2,6) = \\ = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 1 \\ 1 & -1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}.$$

Конец алгоритма.

Используя полученные результаты при функционировании алгоритма, можно построить граф СП, имитирующий КА, заданного функциями перехода (1) и выхода (2) (рис. 3). Граф построен в системе CPN Tools [9].

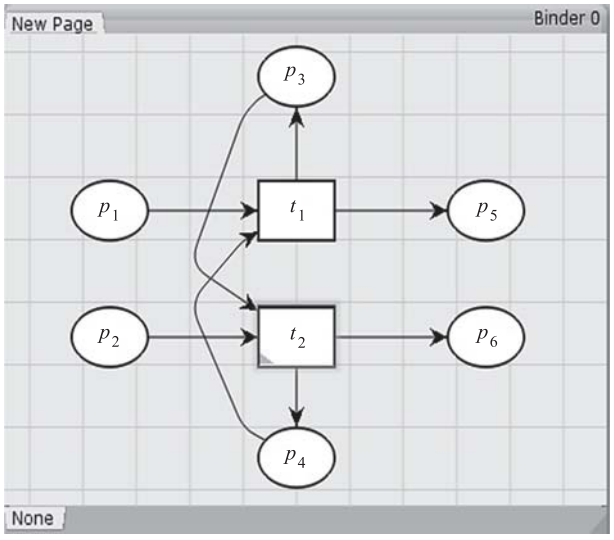

Рис. 3. Граф СП, имитирующий КА, заданного функциями перехода (1) и выхода (2)

На основе алгоритма разработано программное обеспечение, произведены компьютерные эксперименты и получены достоверные результаты.

Заключение. Разработан алгоритм преобразования таблиц переходов и выходов КА в матрицу входных и выходных инциденций СП. Продемонстрировано функционирование алгоритма на основе примера. По результатам функционирования алгоритма построена модель СП в виде графа, имитирующего КА. Разработанная методика может явно и строго определить преобразование КА в СП. Предложенный алгоритм может быть особенно полезен при больших размерностях множеств входных, выходных сигналов и внутренних состояний автомата.

Библиографические ссылки

1. **Jensen K., Kristensen L.M.** Coloured Petri Nets: modelling and validation of concurrent systems // Springer. 2009. № 11. P. 384.

2. **Кузнецов О.П., Адельсон-Вельский Г.М.** Дискретная математика для инженера. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988. 480 с.

3. **Ломазова И.А.** Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой. М.: Научный мир, 2004. 208 с.

4. **Мальков М.В., Малыгина С.Н.** Сети Петри и моделирование // Труды Кольского научного центра РАН. 2010. № 3. С. 35—40.

5. **Королёв Ю.И.** Методы и программные средства моделирования сложных динамических систем на основе темпоральной модификации раскрашенных сетей Петри: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 146 с.

6. **Захаров Н.Г., Рогов В.Н.** Синтез цифровых автоматов. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 135 с.

7. **Питерсон Дж.** Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.

8. **Механов В.Б., Кизилов Е.А., Коннов Н.Н.** Моделирование конечного автомата в системе моделирования CPN Tools // Сб. статей X Междунар. науч.-метод. конф. «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономики и технике». Пенза: ПДЗ, 2010. С. 283—287.

9. **Aalst W., Stahl C.** Modeling Business Processes — A Petri Net — Oriented Approarx. Cambridge MA: MIT Press, 2011. 400 p.

Ссылка для цитирования

Ахмедов М.А., Гусейнзаде Ш.С., Насирова Е.А. Разработка алгоритма автоматизации преобразования конечного автомата в сеть Петри // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 3. С. 108—112.

УДК 621.867.212.3

В.И. Коноплёв, канд. техн. наук, доц., **В.Ю. Анцев,** д-р техн. наук, проф., **А.В. Воробьёв**
(Тульский государственный университет)

93100@mail.ru

ЛЕНТОЧНЫЙ КОНВЕЙЕР С УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ РАЗГРУЗКИ НАСЫПНЫХ ЛИПКИХ ГРУЗОВ

Предложен ленточный конвейер с устройством для разгрузки насыпных липких грузов (например, бетонной смеси) путём приведения прилипшей фракции к рабочему органу во взвешенное состояние под действием потока сжатого воздуха. Одновременно с этим сжатый воздух сдувает частицы песка и цемента и осушает ленту.

Ключевые слова: ленточный конвейер; липкость; плужковый сбрасыватель; сжатый воздух; пневматическое оборудование; форсунка.

A belt conveyor with a device for unloading bulk adhesive goods (for example, a concrete mix) through the use of bringing the adhered fraction to the working organ in a suspended state under the action of a stream of compressed air is proposed. At the same time, compressed air blows away sand and cement particles and drains the belt.

Keywords: belt conveyor; adhesiveness; plow dumper; compressed air; pneumatic equipment; nozzle.

Трудности при разгрузке ленточных конвейеров, транспортирующих насыпные грузы, обладающие способностью прилипать к твёрдым телам, обусловливают необходимость в эффективных разгрузочных и очистных устройствах. Транспортируемые материалы (например, бетонные смеси) часто прилипают к твёрдым телам, в том числе к ленте конвейера. При разгрузке ленточного конвейера плужковым сбрасывателем [1] или через концевой барабан прилипшая часть мелкой фракции бетонной смеси остаётся на ленте и способствует дальнейшему нарастанию слоя бетонной смеси. Это вызывает необходимость очистки ленты в процессе разгрузки.

Предлагаемый ленточный конвейер с устройством [2] позволяет решить проблему эффективной очистки ленты от частиц песка и цемента и осушить её.

Ленточный конвейер с устройством для разгрузки насыпных липких грузов (см. рисунок) содержит гибкую ленту *1*, приводной *2* и натяжной *3* барабаны, плужковый сбрасыватель *4*. Плужковый сбрасыватель выполнен в виде плиты *5*, которая установлена в раме *6* в направляющих *7* и связана гайкой *8* с винтом *9* и маховиком *10*. За плужковым сбрасывателем закреплена форсунка *11* с наконечником *12* для подвода сжатого воздуха. Форсунка закреплена на раме с помощью шарниров *13*, кулис *14* и выполнена в виде короба *15* трапециевид-

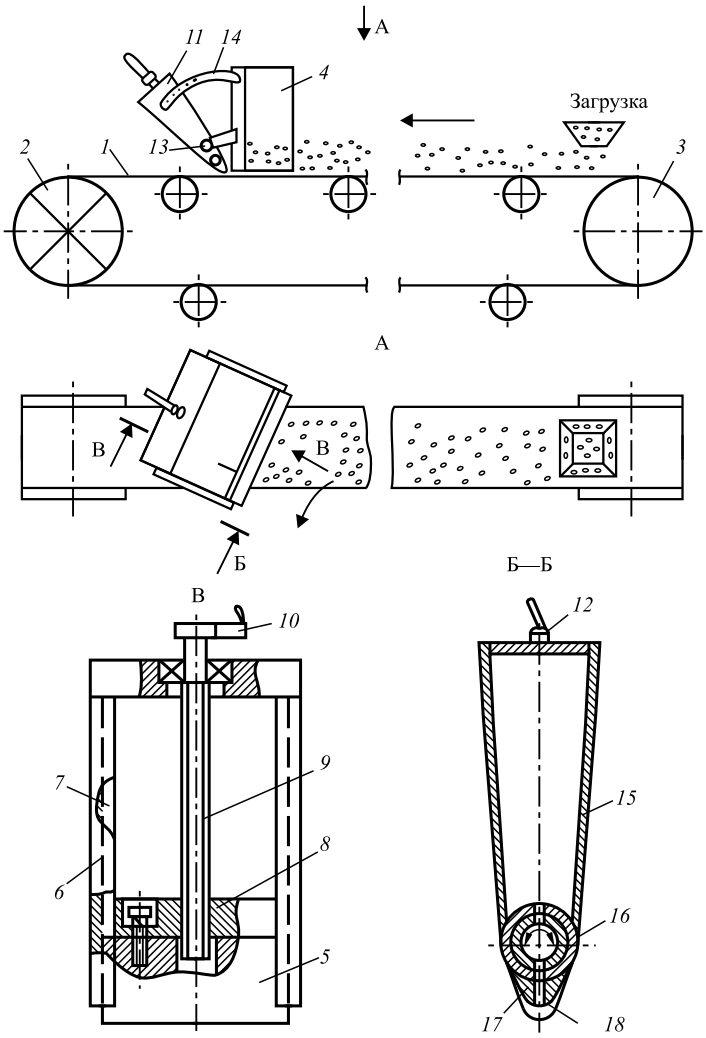

Схема ленточного конвейера с устройством для разгрузки насыпных липких грузов

ного сечения с расположенными со стороны меньшего основания по оси его симметрии золотником *16* и эластичной насадкой *17* V-образной формы с продольным пазом *18*.

При разгрузке ленточного конвейера регулируют положения плужкового сбрасывателя и форсунки. Вращением маховика перемещают плиту плужкового сбрасывателя по направляющим рамы к ленте с помощью винта и гайки. Кроме того, регулируют величину зазора между плитой и лентой. Положение плиты фиксируется. Угол наклона форсунки относительного плужкового сбрасывателя регулируется вращением форсунки относительно шарниров и фиксируетя кулисами. Золотник ставится в положение «Открыто». В короб через наконечник подаётся сжатый воздух, который далее проходит через золотник и продольный паз эластичной насадки и поступает в зазор между плитой плужкового сбрасывателя и гибкой лентой. Затем включают привод конвейера. Приводной и натяжной барабаны вместе с гибкой лентой приводятся в движение. Бетонная смесь подаётся на ленту. При достижении бетонной смесью плужкового сбрасывателя она изменяет направление движения, а остатки частиц песка и цемента в зазоре между плитой и лентой удаляются воздушным потоком за счёт аэродинамической силы [3].

Транспортирование частиц песка и цемента, остающихся в зазоре между лентой и плитой плужкового сбрасывателя, происходит за счёт энергии, сообщаемой воздушному потоку форсункой. В качестве энергоносителя используется воздух, с которым механически смешиваются частицы цементной смеси и песка. При достижении определённой скорости возникают аэродинамические силы, достаточные для отрыва цементной смеси и песка от ленты и перемещения их во взвешенном состоянии в потоке воздуха. Витание частиц шаровой формы d (м) наступает, когда вес частицы G уравновешивается аэродинамической силой T при $G = T$.

Аэродинамическая сила воздушного потока, уравновешивающая силу тяжести частицы G, определяется по формуле

$$T = c\gamma_{\text{в}} F \upsilon_{\text{вит}}^2,$$

где c — аэродинамический коэффициент обтекания частицы шаровой формы, $c = 0{,}23$; $\gamma_{\text{в}}$ — плотность воздуха для нагнетательных установок, $\gamma_{\text{в}} = 1{,}2$ кг/м^3; F — площадь миделева сечения частицы (теневая площадь), м^2; $\upsilon_{\text{вит}}$ — скорость витания частицы цементной смеси, м/с.

При весе частицы шаровой формы

$$G = \frac{\pi d^3}{6} g\gamma_{\text{м}},$$

где d — диаметр частицы шаровой формы, м; g — ускорение силы тяжести, м/с^2; $\gamma_{\text{м}}$ — плотность материала насыпного груза, кг/м^3,

получим

$$\frac{\pi d^3}{6} g\gamma_{\text{м}} = 0{,}23 \frac{\gamma_{\text{в}}}{g} \frac{\pi d^2}{4} \upsilon_{\text{вит}}^2.$$

Скорость витания частицы определим по формуле

$$\upsilon_{\text{вит}} = 5{,}53\sqrt{d\frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{в}}}}.$$

Для комочков цемента и песчинок размером 0,4 мм скорость витания составит $\upsilon_{\text{вит}} = 5{,}35$ м/с.

В заключение необходимо отметить, что предлагаемый ленточный конвейер с устройством позволяет решить проблему эффективной очистки ленты от частиц песка и цемента и осушить её. Предложенная методика расчёта аэродинамической силы позволяет подобрать скорость витания частиц песка и цемента и необходимое пневматическое оборудование.

Библиографические ссылки

1. **Спиваковский А.О., Дьячков В.К.** Транспортирующие машины: учеб. пособие для машиностроительных вузов. 3-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1983. 487 с.

2. **Коноплёв В.И., Елисеев А.Н., Шестаков В.А., Конов А.Г.** Устройство для разгрузки материала с ленточного конвейера // Авт. св-во СССР № 1754594. 1992. Бюл. № 30.

3. **Базанов А.Ф.** Подъёмно-транспортные машины: учебник для студентов вузов по спец. «Производство строительных изделий и конструкций». М.: Изд-во литературы по строительству, 1969. 312 с.

Ссылка для цитирования

Коноплёв В.И., Анцев В.Ю., Воробьёв А.В. Ленточный конвейер с устройством для разгрузки насыпных липких грузов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 3. С. 113—114.

УДК 62-5

Э.М. Мончарж, канд. хим. наук, **Т.А. Рябкова,** канд. техн. наук
(Дзержинский политехнический институт, Нижегородская обл.)

Moncharzh@yandex. ru

УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ПРИ ЗАВЕРШЕНИИ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Рассмотрен метод регулирования температуры реакционной смеси в период, близкий к завершению химической реакции, когда вследствие малой скорости реакции тепловыделение или теплопоглощение реакционной смесью очень малы и регулирующий клапан находится в закрытом состоянии.

Ключевые слова: регулирование; температура процесса; метод; искусственное возмущающее воздействие.

The temperature adjustment method of the reaction mixture in the period close to the completion of the chemical reaction is considered, when due to the low reaction rate the heat release or heat absorption by the reaction mixture is very small and the control valve is in the closed state.

Keywords: adjustment; process temperature; method; artificial disturbance.

На стадии периодического процесса, когда протекает химическая реакция, требующая стабилизации температуры реакционной смеси, возникают трудности в обеспечении требуемого качества регулирования температуры на этапе завершения химического превращения [1]. Длительность процесса при завершении реакции связана с обеспечением качества продукции, которое снижает присутствие исходных веществ в реакционной смеси. В процессе экзотермической или эндотермической химической реакции устанавливается равновесие между тепловыми потоками реакции и отводимой или подводимой тепловой энергии в случае стабилизации температуры.

Если химическое превращение близко к завершению, то скорость реакции и расход отводимой или подводимой тепловой энергии стремятся к нулю, что соответствует почти полному закрытию регулирующего клапана. В такой ситуации регулирование температуры затруднено. Для преодоления трудности регулирования температуры в реакторе предлагается использовать метод «искусственного возмущающего воздействия», который состоит в том, что при устойчивом во времени закрытии регулирующего клапана в контуре управления температурным режимом реактора в теплообменник подаётся дополнительный энергетический поток, противоположный основному по назначению. Дополнительный поток создаёт для управляемого объекта «искусственное возмущающее воздействие», которое вызывает компенсирующую реакцию регулятора температуры, состоящую в увеличении степени открытия регулирующего клапана, что восстанавливает способность регулятора температуры стабилизировать её значение.

Функциональная схема автоматического регулирования температуры реакционной смеси с использованием «искусственного возмущающего воздействия» представлена на рис. 1.

Необходимость в применении для стабилизации температуры в реакторе рассматриваемого процесса получения поливинилформальэтилаля связана с тем, что он протекает в течение первых трёх часов при температуре T = 69 °С по экзотермическому типу и в течение последующих трёх часов при температуре T = 4 °С по эндотермическому типу. При этом возникают трудности в регулировании температуры реакционной смеси в период завершения каждой из этих реакций. Если в реакторе протекает экзотермическая реакция взаимодействия формалина с поливиниловым спиртом, то для снятия теплоты реакции в холодильник реактора через отсечной клапан ОК-3 и регулирующий клапан РК-2 подаётся охлаждённый рассол в течение всей стадии процесса. После полного закрытия клапана РК-2 из-за значительного снижения скорости экзотермической реакции к моменту её завершения по сигналу дискретного датчика А-10 состояния регулирующего клапана и счётчика интервала времени, в течение которого клапан полностью закрыт, открывается дополнительный отсечной клапан ОК-2.

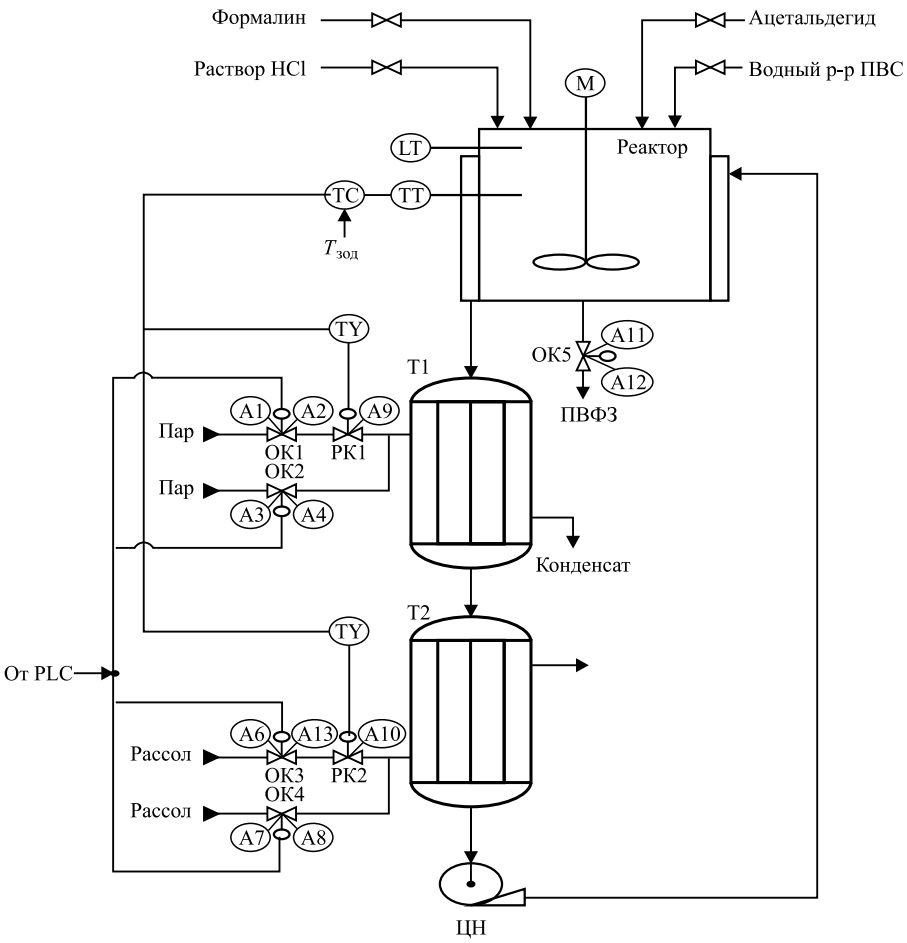

Рис. 1. Функциональная схема системы управления температурным режимом

Отсечной клапан ОК-2 обеспечивает подачу малого количества пара в рубашку нагревателя реактора, который вызывает в порядке компенсации этого притока тепловой энергии увеличение степени открытия регулирующего клапана РК-2 подачи охлаждённого рассола в холодильник регулятором температуры.

В результате увеличения степени открытия клапана РК-2 восстанавливается возможность регулирования температуры реакционной смеси на протяжении всей экзотермической стадии. Если в реакторе протекает эндотермическая реакция взаимодействия смеси с ацетальдегидом, то открывается отсечной клапан подачи в рубашку нагревателя пара, расход которого изменяется регулирующим клапаном РК-1. В завершении процесса после полного закрытия регулятором температуры клапана РК-1 из-за значительного снижения скорости эндотермической реакции по сигналу дискретного датчика А-9 закрытого состояния регулирующего клапана РК-1 и счётчика интервала времени, в течение которого клапан полностью закрыт, контроллер открывает отсечной клапан ОК-4 подачи в холодильник реактора малого потока охлаждённого рассола. Регулятор температуры, компенсируя отвод тепловой энергии рассолом, увеличивает степень открытия регулирующего клапана РК-1, что обеспечивает возможность регулирования температуры до завершения стадии, на которой проводится эндотермическая реакция.

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма логического управления периодическим процессом получения поливинилформальэтилаля (ПВФЭ) с использованием метода «искусственного возмущающего воздействия». Этот алгоритм соответствует реальному времени [2], поэтому он периодически вызывается с заданным интервалом дискретности $\Delta\tau$ и на каждой стадии процесса он проводится до её завершения, после чего номер исполняемой стадии изменяется. При каждом вызове алгоритм получает для работы квант времени, которое не должно превышать интервала дискретности $\Delta\tau$. При завершении любой стадии меняется номер стадии (НС), который сохраняется до её завершения. Каждая ветка алгоритма принадлежит конкретной стадии процесса и служит для идентификации условий её завершения, а также выполнения единовременных действий, связанных с завершением этой стадии. Алгоритм управления данным периодическим процессом включает управление стадиями загрузки исходных веществ, необходимых для проведения первой реакции: поливинилового спирта по показаниям уровнемера реактора, формалина по показаниям интегратора массового расходомера [3] и катализатора (соляная кислота) также по показаниям интегратора массового расходомера. Фрагменты блок-схемы алгоритма управления, относящиеся к стадиям загрузки в реактор исходных веществ, не детализируются до отдельных логических команд, поскольку эти стадии не имеют прямого отношения к управлению температурным режимом.

На пятой стадии выполняется нагрев реакционной смеси до определённого технологиче-

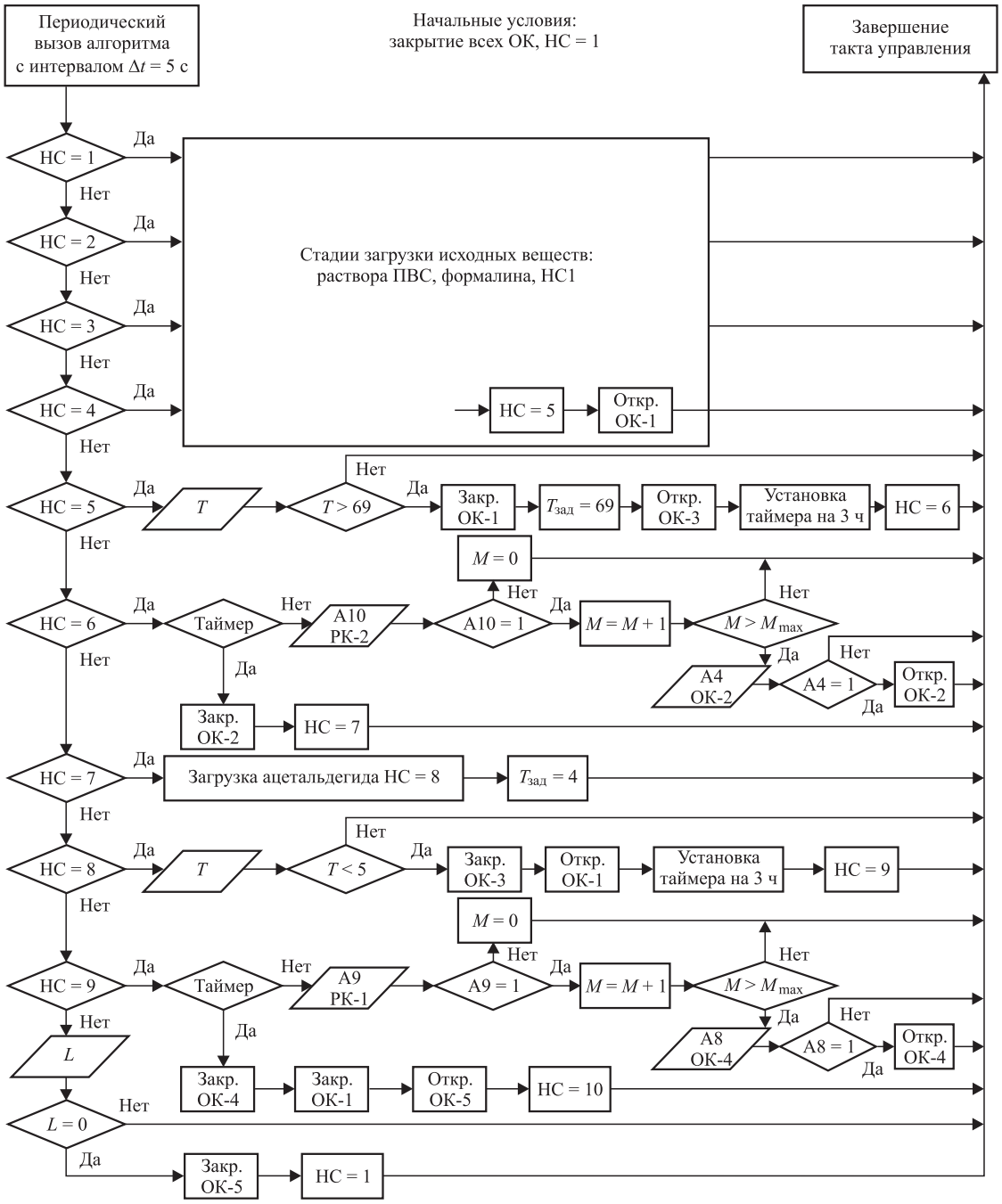

Рис. 2. Блок-схема алгоритма логического управления периодическим процессом получения ПВФЭ

ским регламентом значения температуры $T = 69$ °С с последующим поддержанием заданного значения регулятором температуры. На шестой стадии проведения процесса выполняется контроль протекания экзотермической реакции. Если по сигналу таймера реакция не завершилась, то проверяется, закрыт ли устойчиво регулирующий клапан подачи в холодильник реактора хладагента, что свидетельствует о значительном снижении скорости экзотермической реакции по сравнению с начальным значением. Если регулирующий клапан действительно закрыт, то открывается отсечной клапан ОК-2 подачи в подогреватель реактора небольшого количества греющего пара.

Это приводит (из-за компенсации регулятором температуры подвода тепловой энергии к реакционной смеси) к увеличению степени открытия регулирующего клапана РК-2 и восстановлению возможности регулирования температуры реакционной смеси до конца стадии.

После завершения шестой стадии процесса выполняется подготовка к проведению эндотермической реакции. Для этого в реактор

загружается заданное количество ацетальдегида по показанию интегратора массового расходомера, и реакционная смесь охлаждается до температуры $T = 5$ °С, после чего регулятору температуры устанавливается задание $T_{зад} = 4$ °С. Регулятор температуры стабилизирует температуру реакционной смеси путём изменения подачи греющего пара клапаном РК-1 в нагреватель реактора. На девятой стадии процесса контролируется проведение эндотермической реакции. Если по сигналу таймера интервал времени (3 ч), отведённый на проведение этой реакции, не закончен, то проверяется, не закрыт ли устойчиво регулирующий клапан РК-1, что свидетельствует о низкой скорости эндотермической реакции. Если клапан РК-1 действительно закрыт по сигналу дискретного датчика А-9 и значению счетчика времени закрытого состояния клапана, то автоматически открывается отсечной клапан ОК-4 подачи хладагента в холодильник реактора. Подача хладагента в холодильник снижает значение температуры реакционной смеси. Для компенсации снижения температуры реакционной смеси регулятор температуры увеличивает степень открытия регулирующего клапана РК-1, подающего греющий пар в нагреватель реактора. При этом возможность регулирования температуры реакционной смеси восстанавливается до окончания девятой стадии процесса.

На десятой стадии выполняется выгрузка из реактора реакционной смеси на переработку до достижения нулевого уровня с допустимой погрешностью, после чего отсечной клапан выгрузки смеси ОК-5 закрывается и устанавливается номер начальной стадии процесса НС = 1, относящейся к следующей операции периодического процесса.

На рис. 3 представлены графики изменения температуры реакционной смеси во времени от начала стадии с № 6 или с № 9 в течение проведения экзотермической и эндотермической реакций получения поливинилформальэтилаля продолжительностью по три часа каждая при регулировании температуры реакционной смеси без использования «искусственного возмущающего воздействия». При таком регулировании температуры реакционной смеси в случае проведения экзотермической реакции характерно снижение значения регулируемой температуры на $\Delta T = 2$ °С после 100-й мин от начала реакции. В случае проведения эндотермической реакции характерно повышение температуры реакционной

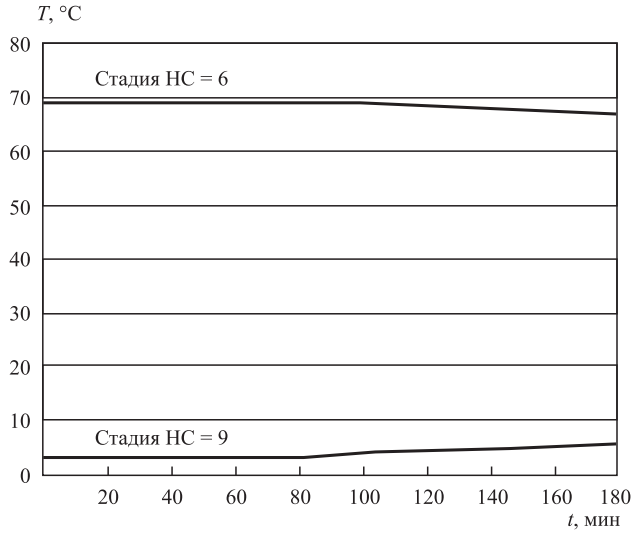

Рис. 3. Управление температурным режимом реактора без использования «искусственного возмущающего воздействия»

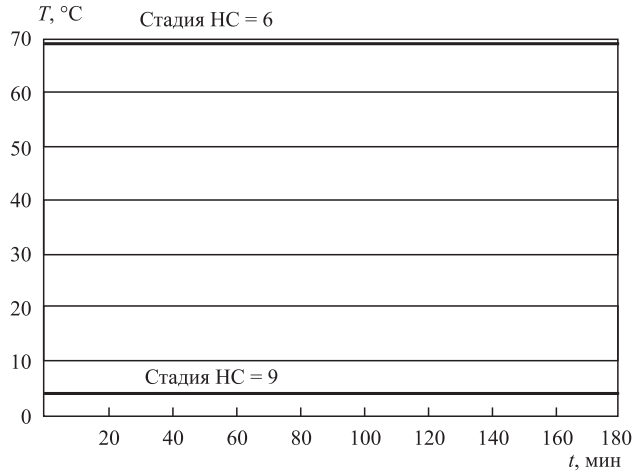

Рис. 4. Управление температурой процесса при использовании «искусственного возмущающего воздействия»

смеси на величину $\Delta T = 1{,}5$ °С, начиная со 120-й мин от начала реакции.

Снижение температуры реакционной смеси при экзотермической реакции и возрастание температуры реакционной смеси при эндотермической реакции связаны с влиянием температуры окружающей среды, а не с неполным закрытием регулирующих клапанов, поскольку в системе управления использовались регулирующие отсечные клапаны.

На рис. 4 показаны графики изменения температуры реакционной смеси во времени при проведении экзотермической и эндотермической реакций получения поливинилформальэтилаля в случае использования «искусственного возмущения».

Как показало экспериментальное испытание работоспособности системы управления

температурным режимом реактора при использовании «искусственного возмущающего воздействия» на протяжении трёхчасового интервала проведения как экзотермической, так и эндотермической реакции регулирование температуры выполнялось без заметного отклонения от заданных значений температуры.

Таким образом, использование метода «искусственного возмущающего воздействия» обеспечивает достаточно высокое качество регулирования температуры процесса на протяжении заданного интервала времени, превышающего продолжительность химической реакции и выбираемого из технологических соображений, связанных с обеспечением требуемых значений показателей качества продукции при проведении периодического процесса.

Библиографические ссылки

1. **Солнышкова В.К., Карузина И.А.** Химия полимеров и полимерных композиций. Павлодар: Кереку, 2011. 71 с.

2. **Мончарж Э.М., Прокопчук Е.Л.** Автоматизация периодических технологических процессов. Н. Новгород: НГТУ, 2012. 112 с.

3. **Фёдоров Ю.Н.** Основы построения АСУТП. В 2 т. Т. 1. М.: Синтег, 2006. 620 с.

Ссылка для цитирования

Мончарж Э.М., Рябкова Т.А. Управление температурным режимом при завершении химической реакции периодического процесса // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 3. С. 115—119.

УДК 658.562.3:004.9

А.В. Малышева, А.В. Затонский, д-р техн. наук, проф.
(Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета)

akchim@mail.ru, zxenon@narod.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ПЕРЕХОДА НА АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ФЛОТАЦИИ КАЛИЙНОЙ РУДЫ

Модифицирована стохастическая модель флотационной машины калийной руды в целях исследования влияния человеческого фактора на процесс управления флотацией при появлении возмущений в составе исходной руды. Показано существование оптимальных значений параметров оператора при управлении объектами с большим запаздыванием, а также возможность роста качества управления флотационной машиной не менее 7,66 % при переходе к автоматическому регулированию процесса флотации калийной руды.

Ключевые слова: калийная руда; флотация; автоматическое регулирование; человеческий фактор; оптимизация.

The stochastic model of the potassium ore flotation machine is modified in order to study the influence of the human factor on the flotation control process when disturbances appear in the composition of the original ore. The existence of optimal values of operator parameters at facilities control with a large delay, as well as the possibility of increasing the quality of flotation control by at least 7.66 % during the transition to automatic control of the potassium ore flotation process, is shown.

Keywords: potassium ore; flotation; automatic regulation; human factor; optimization.

Введение. В России калийные удобрения производит ПАО «Уралкалий» в г. Березники Пермского края. Для обогащения калийных руд на предприятии применяют пенную шламовую и сильвиновую флотацию. При этом управление флотационной машиной (ФМ) осуществляет оператор (флотатор). Он визуально оценивает качество процессов в ячейках ФМ и принимает решения по изменению подачи реагентов или воздуха. Цвет, плотность, количество и размер пузырьков в пене являются информацией для принятия таких решений. Поэтому задача преодоления влияния человеческого фактора при контроле вида пены представляется актуальной.

Постановка задачи. В опубликованных ранее статьях [1—3] авторами построен ряд моделей ФМ. В том числе уточнена реализованная в MatLAB модель, созданная на основе хорошо зарекомендовавшей себя модели, приведённой в статье [4]. Основным путём уточнения модели стал учёт стохастического изменения состава руды. Эта проблема будет очень актуальна для руд с участка ООО «Еврохим — Усольский калийный комбинат», на котором скоро начнутся их добыча и переработка. Руды этого участка имеют большой разброс по содержанию нерастворимого остатка и хлорида калия, что делает затруднительным выравнивание их состава перед переработкой (в том числе флотацией). Кроме того, в ходе предыдущих работ улучшены алгоритмы распознавания пузырьков в пенном слое. В этих целях выполнена экспериментальная видеосъёмка на ФМ действующего производства и лабораторной ФМ, видеоматериал обработан с использованием разработанного авторами статьи метода. Показана его эффективность даже при использовании камеры сравнительно низкого разрешения и в плохих условиях съёмки.

Задачами данной статьи являются исследование ФМ, работающей в условиях случайных изменений состава руды, оценка важности параметров оператора, определение зависимостей характеристик готового продукта и качества управления ФМ от её стохастических свойств.

Модификация модели ФМ. Внесём в модель ФМ, приведённую в работе [1], изменения, заменив значения постоянных времени T моделей из [1, 4] на значения, полученные в ходе обработки видеопотоков. Заменим постоянные времени $T = 7{,}6$ с на $T = 8{,}6$ с для 1-й камеры ФМ и $T = 8{,}3$ с для 3-й камеры (рис. 1, фрагмент «А»). Для остальных камер будем предполагать линейное прямо пропорциональное изменение постоянной времени по индукции. Объяснение уменьшения постоянной времени с продвижением пульпы от 1-й камеры ФМ до 6-й простое — в последних камерах, где происходит дофлотация, пены меньше, значит, она легче и быстрее смахивается в лоток. Решатель реализованной в MatLAB модели в соответствии с рекомендациями, приведёнными в работе [5], заменим на ode23tb.

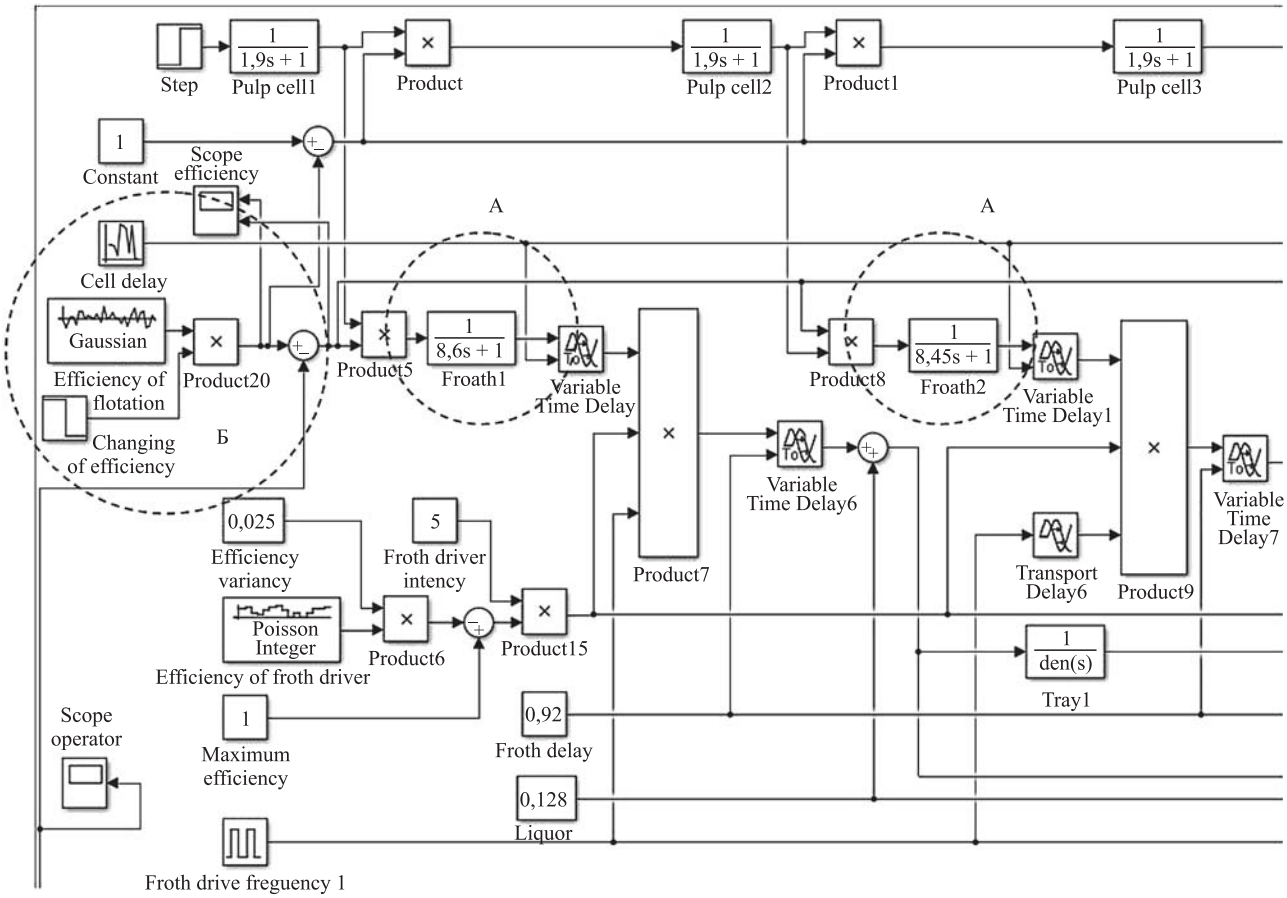

Рис. 1. Фрагмент MatLAB-модели с изменениями постоянных времени (А) и блоком изменения эффективности флотации (Б)

Предположим, что в процессе флотации по какой-то причине её эффективность упадёт на 10 %. Для моделирования этого включаем в модель блок Changing of efficiency (изменение эффективности) и устанавливаем в нём скачок значения с 1 до 0,9, на это значение умножаем выход существующего генератора случайной эффективности флотации. Эффективность может упасть, например, из-за изменения состава входного продукта. Флотатор (или автоматический регулятор, получающий сигнал от видеосистемы распознавания пены) добивается её восстановления путём изменения подачи реагентов (отрицательная обратная связь, в модели реализована в виде стрелки снизу на рис. 1, фрагмент Б).

Предположим, что мы сумели реализовать распознавание пены методами, приведёнными в работах [1—3], и это стало возможно использовать для управления. Охватим модель ФМ обратной связью и добавим ПИ-регулятор. Так как он осуществляет изменение очень небольшого по модулю фактора (математическое ожидание выходного параметра в блоке Gaussian модели равно 0,046), коэффициенты настройки регулятора тоже должны быть невелики. Ведь на вход регулятора поступает рассогласование между 100 %-ным потоком готового продукта (в нормированных значениях он равен 1) и его изменением вследствие уменьшения эффективности флотации примерно на 0,1. Подобрать параметры регулятора при помощи надстройки PID Tuner система MatLAB не может из-за сложности модели. Запустим модель без изменений на входе (установим задержку изменения на 1000 с) и при коэффициентах $K_п = 0{,}02$, $K_и = 0{,}012$ получим тренд, показанный на рис. 2.

Начальная часть тренда отражает «разгон» модели, переходные процессы от нуля до статического состояния. Изменения эффективности флотации будут изменять *установившееся* состояние, а не накладываться на процессы пуска ФМ. Видно, что установившееся состояние наступает примерно через 300 с. Поэтому в дальнейшем все измерения эффективности управления будем вести начиная с этого времени, а скачок эффективности установим на 400-ю с.

Нас интересуют не столько переходные процессы, сколько отклонение выхода продукта от 100 %-ного. Для его вычисления проинтегрируем модуль рассогласования между выходом готового продукта и 1 (100 %-ным) следующим образом:

$$Dev = \int_{300}^{1000} \left|1 - y(t)\right| dt, \qquad (1)$$

где $y(t)$ — относительный выход готового продукта, рассчитанный моделью.

Блок расчёта по формуле (1) приведён на рис. 3. Результат расчёта отражается в блоке Deviance (отклонение).

Сравнивать показания, отображённые в блоке Deviance, со значением выхода готового продукта, полученным в отсутствие изменения эффективности флотации (см. рис. 2) с 300-й до 1000-й с. Для этого установим в блоке Sum delay скачок выходного значения с 0 до 1 на 300-ю с. Кроме того, из-за стохастичности модели значение интеграла Dev_0, вычисленное по формуле (1) без изменения эффектив-

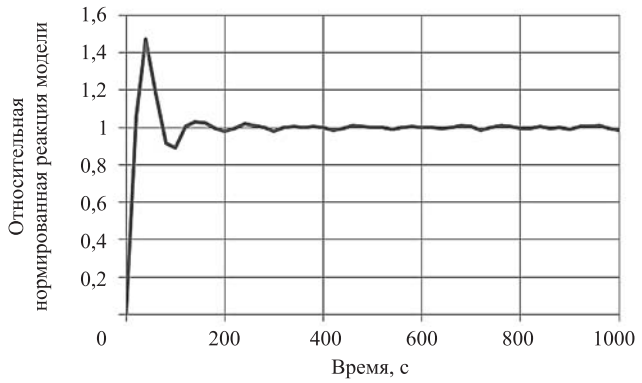

Рис. 2. Переходный процесс при запуске MatLAB-модели

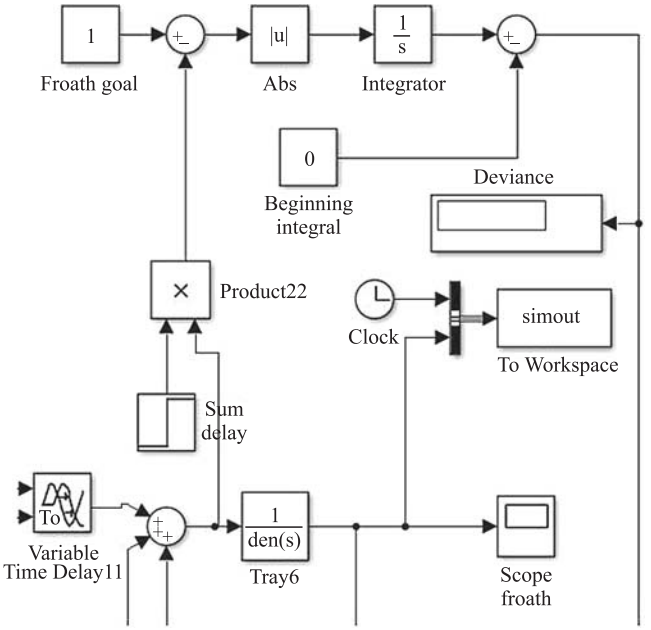

Рис. 3. Блоки расчёта рассогласования с исключением начального периода

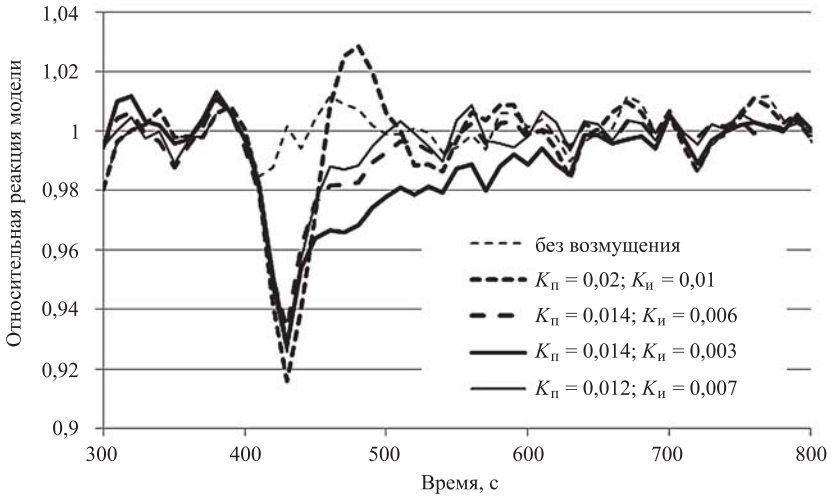

Рис. 4. Переходные процессы при подаче возмущения в модель

Таблица 1

Пошаговая оптимизация настроек ПИ-регулятора

№	$K_п$	$K_и$	Dev_1
1	0,02	0,01	6,092
2	0,022	0,01	5,88
3	0,024	0,01	5,77
4	0,03	0,01	5,413
5	0,04	0,01	4,745
6	0,05	0,01	4,2211
7	0,06	0,01	3,8606
8	0,1	0,01	2,697
9	0,13	0,01	2,079
10	**0,14**	**0,01**	**2,022**
11	0,15	0,01	2,117
12	0,16	0,01	2,452
13	0,2	0,01	4,641
14	0,14	0,012	3,902
15	0,14	0,008	0,3137
16	0,14	0,009	1,175
17	0,14	0,007	−0,3076
18	0,14	0,006	−1,269
19	0,14	0,005	−1,925
20	0,14	0,004	−2,674
21	0,14	0,003	−3,438
22	0,15	0,007	−0,3822
23	0,13	0,007	−0,4694
24	**0,12**	**0,007**	**−0,5439**
25	0,11	0,007	−0,5257
26	0,1	0,007	−0,3362

ности флотации, будет ненулевым. Запустив модель, определим, что Dev_0 = 73,64 и, установив это значение в источнике блока Beginning integral (начальное значение интеграла ошибки), перейдем к расчёту критерия эффективности управления

$$Dev_1 = \int_{300}^{1000} \left|1 - y(t)\right| dt - Dev_0. \quad (2)$$

Синтез оптимального регулирования. Подберём вручную параметры ПИ-регулятора. Для этого включим возмущение на 400-й с и сначала установим произвольные параметры настройки регулятора, обеспечивающие устойчивость системы автоматического регулирования.

На рис. 4 видно (линия $K_п$ = 0,02; $K_и$ = 0,01), что даже при достаточно случайно подобранных значениях $K_п$ и $K_и$ регулятор вполне справляется с возмущением примерно за 150 с. Будем изменять настройки ПИ-регулятора, реализуя случайный поиск (строки 1...21 в табл. 1).

Отрицательные значения ошибки Dev_1 показывают, что при изменении настроек регулятора меняется также интеграл ошибки в условиях отсутствия возмущений Dev_0, уточним его значение позже. Видно, что при чрезмерном уменьшении $K_и$, как это и должно быть, растёт время переходного процесса. Поэтому остановимся на $K_и$ = 0,007 и продолжим поиск $K_п$ (строки 22...26 табл. 1). Вероятно, на $K_п$ = 0,12; $K_и$ = 0,007 можно остановиться, переходный процесс почти такой же, как при $K_п$ = 0,14; $K_и$ = 0,006. При этом интеграл ошибки Dev_0 без изменения эффективности составил 19,47, ошибка при выключенном регуляторе Dev_1 = 67,01, а при включенном регуляторе Dev_1 = 2,736.

Полученный регулятор не является оптимальным, но, как видно на рис. 4, точно не худший. Можно предположить, что «идеальный» оператор ФМ мог бы изменять параметры процесса аналогично. Однако у оператора есть некоторые «человеческие» свойства, которые необходимо учитывать:

реальный оператор не может изменять подачу веществ непрерывно, а будет делать это с какой-то периодичностью;

реальный оператор не может изменить подачу на бесконечно малую величину, а может только «немножко» добавить или «немножко» убавить, при существенных отклонениях под-

ключаются другие алгоритмы управления. Иначе говоря, оператор осуществляет трёхпозиционное управление, при этом величина «немножко» является параметром настройки;

реальный оператор обладает транспортным запаздыванием (например, юридически принимаемое время реакции водителя с момента обнаружения препятствия и до того, как он начинает нажимать педаль тормоза, равно 0,8 с; вряд ли у флотатора оно будет меньше).

Исследование «человеческих» свойств оператора. Рассмотрим качество управления с учётом человеческого фактора на примере более простой системы. Возьмём объект с существенным запаздыванием: передаточная функция по каналу положение клапана на линии аммиака — pH раствора аммиачной селитры в аппарате нейтрализации азотной кислоты аммиаком (ОАО «Азот») $W_5(s) \approx \dfrac{6}{6974s^2 + 152s + 1} e^{-25s}$ (дипломный проект, автор А.С. Сычев, 2010, руководитель Н.В. Бильфельд [4]). Подготовим модель, в которой используем ПИД-регулятор, релейное и трёхпозиционное управления (рис. 5).

На рис. 5 блок Regime selector (выбор режима) служит для выбора одного из следующих видов управляющего воздействия:

отсутствует (контакт 0 в селекторе);

ПИД (1);

релейное управление (2);

трёхпозиционное управление с запаздыванием (3).

Для такой системы надстройка PID Tuner легко находит оптимальные настройки: $K_п$ = 0,3460; $K_и$ = 0,0020677; $K_д$ = 11,45; K_N = = 0,07916 (последнее — значение коэффициента фильтрации k_N в формуле регулятора $W(s) = k_p + k_i \dfrac{1}{s} + k_d \dfrac{k_N}{1 + k_N \dfrac{1}{s}}$). Блок Step (ступенчатый сигнал) вносит возмущения на 800-й с при общем периоде расчёта 2000 с. Блок Delay600 (запаздывание) необходим для того, чтобы регулятор включился только после выхода объекта управления на статический режим: до истечения 600-й с он умножает рассогласование на нуль. Иначе в системе возникают колебания, связанные не с её природой, а с природой регулятора.

Исследуем качество управления (интеграл модуля ошибки *Dev*, рассчитываемый по формуле, аналогичной (1), и отображаемый на блоке визуализации значений Display) при изменении типа и параметров системы управления.

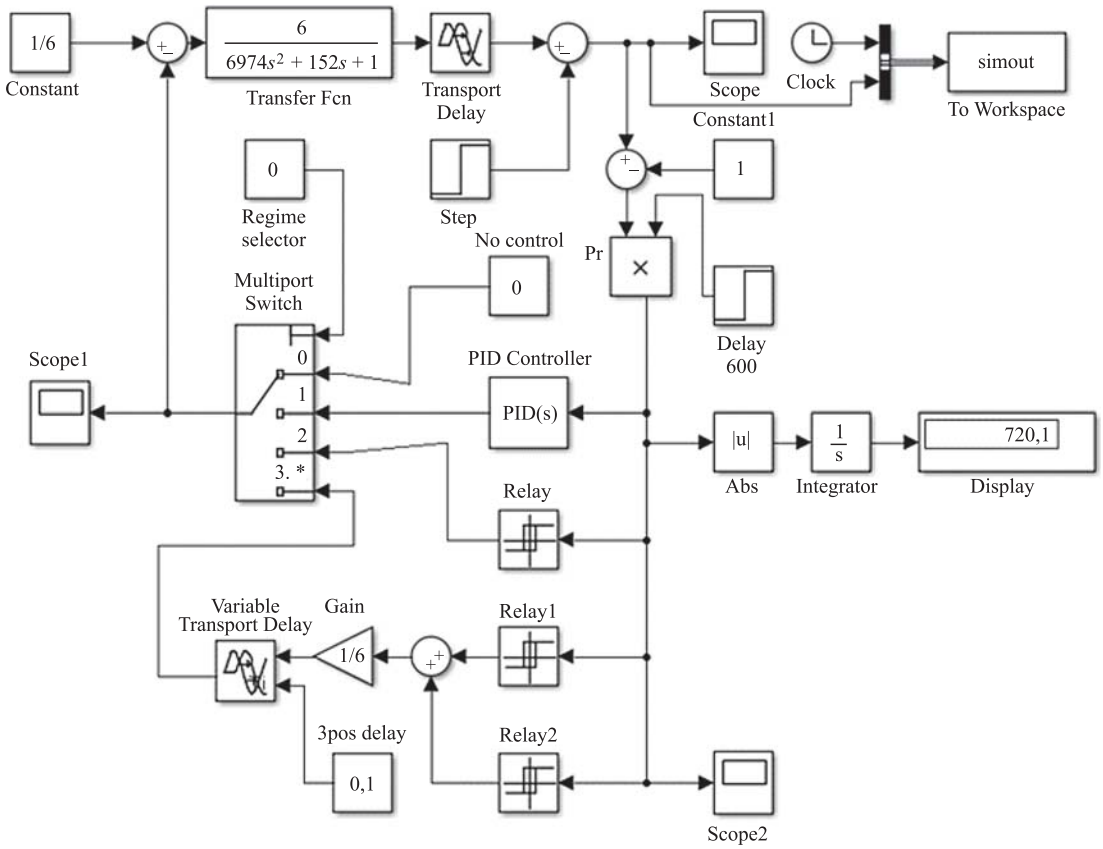

Рис. 5. Модель для исследования влияния «человеческих» свойств оператора на объект с большим запаздыванием

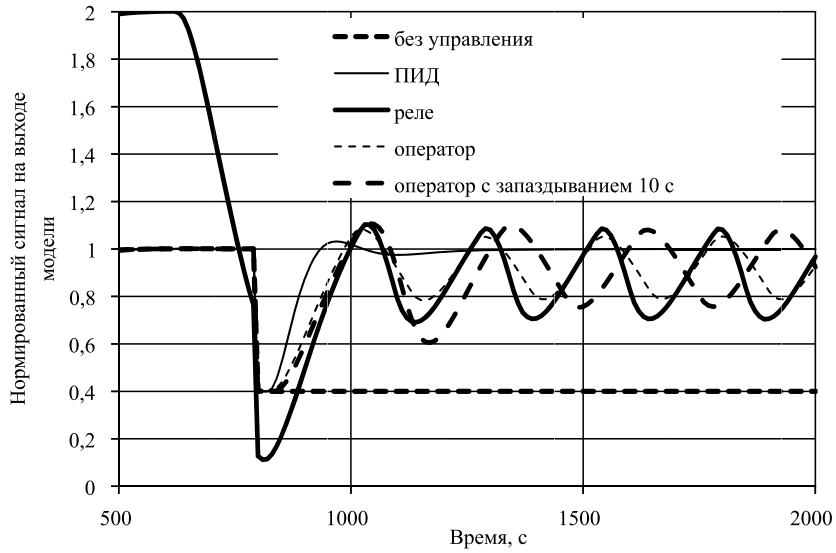

Рис. 6. Переходные процессы в модели с большим запаздыванием при разных вариантах управления

По переходным процессам (рис. 6) видно, что качество управления у оператора лучше, чем при использовании реле, однако оно ухудшается с появлением запаздывания. Количественные показатели качества управления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели качества переходных процессов при разных режимах регулирования в модели с большим запаздыванием

Режим регулирования	Интегральная ошибка *Dev*
Без управления	720,1
ПИД	52,22
Реле с выходом ±1/6	357,8
Оператор с выходом −1/6, 0, +1/6	172,4
Тот же оператор с запаздыванием 10 с	204,1
Тот же оператор с запаздыванием 20 с	303,9
Тот же оператор с запаздыванием 30 с	338,5

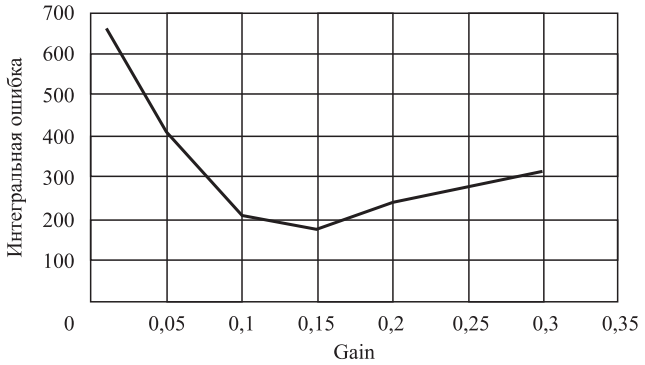

Рис. 7. Зависимость интегральной ошибки от Gain к обоснованию наличия оптимального коэффициента усиления

Параметр Gain модели, моделирующий величину воздействия оператора, должен иметь какое-то оптимальное значение, поскольку при малом его значении не хватит ресурса управления, а при слишком большом получится существенное перерегулирование. Если исключить запаздывание, получим зависимость интегральной ошибки *Dev* от Gain, приведённую на рис. 7.

Улучшение управления ФМ при переходе к системе автоматического регулирования. Вероятно примерно такой же, как приведённая выше, зависимости качества управления от человеческих свойств можно ожидать и в более сложных объектах, в том числе при управлении ФМ. Добавим в модель ФМ необходимые блоки, реализующие «человеческие» особенности оператора дополнительно к блокам, реализующим трёхпозиционное управление (рис. 8).

Блоки Relay+ (реле, выдающее положительную часть трёхпозиционного воздействия) и Relay− (реле, выдающее отрицательную часть трёхпозиционного воздействия) вместе реализуют трёхпозиционное управление. В Relay+ одинаковые положительные значения чувствительности оператора устанавливаются для параметров блоков switch on point и switch off point, сигналы на выходе 1 при включенном реле и 0 при выключенном. В Relay− значения чувствительности те же самые, но отрицательные, соответствующие сигналы на выходе 0 и −1. Блок Influence (воздействие) будет определять величину воздействия оператора. Блок Initial Delay (начальная задержка) «выключает» оператора до тех пор, пока система не придёт в стационарное состояние (выше установлено, что это 300 с).

Исследуем изменение качества управления (Dev_1) при изменении запаздывания (устанавливается в блоке Transport Delay) и периодичности изменения (устанавливается в блоке дискретизации Zero-Order Hold). Для получения модели «идеального» флотатора определим величину воздействия оператора, обеспечивающую минимальное значение Dev_1 в случае, когда оператор имеет запаздывание 0,01 с и может изменять подачу каждые 0,01 с. При таком малом запаздывании в блоке Transport Delay необходимо устанавливать для порядка аппроксимирующего ряда Падэ значение не менее 4 [6]. Порог переключения в блоках

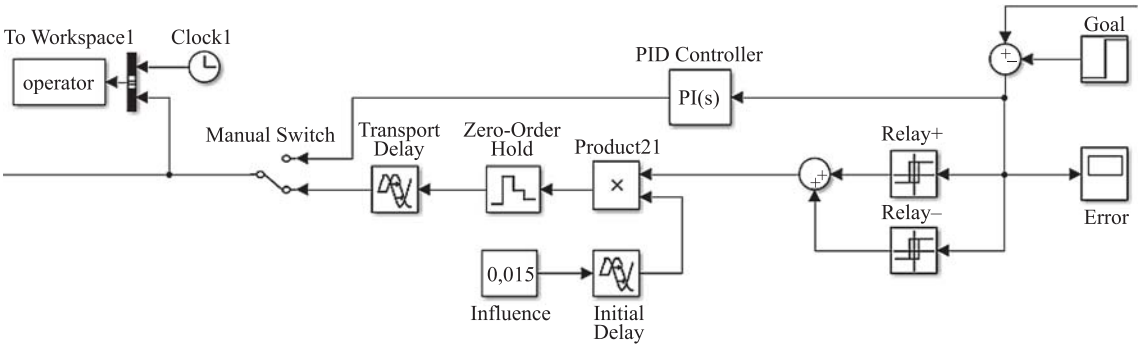

Рис. 8. Фрагмент модели ФМ, реализующий «человеческие» особенности оператора

Relay± установим пока равным ±0,005. Получим зависимость, приведённую на рис. 9.

Видно, что при управлении оператором и оптимальном значении воздействия, равном 0,014...0,015, происходит рост относительной ошибки примерно на 20 % (табл. 3, режимы 1...4) по сравнению с использованием системы автоматического регулирования.

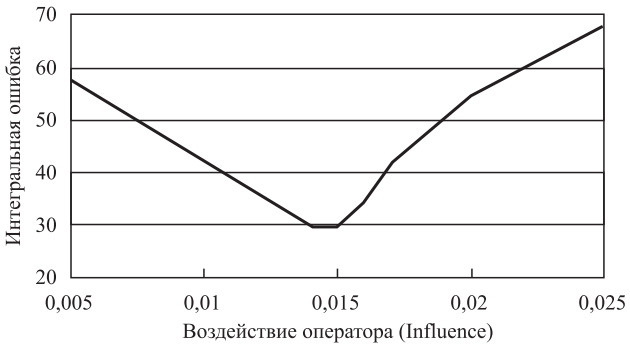

Рис. 9. Зависимость интегральной ошибки от порога воздействия оператора при чувствительности (switch on/off point), равной 0,005

Таблица 3

Показатели качества переходных процессов в модели ФМ в разных режимах управления

Номер режима	Режим	Интегральная ошибка	Относительная ошибка, %
1	Без изменения эффективности и управления	19,46	0
2	С изменением эффективности на 300-й с и без управления	75,2	286,43
3	С ПИ-регулятором	25,69	32,01
4	С оператором без запаздывания, его воздействием 0,0145 и чувствительностью 0,005	29,52	51,70
5	С оператором без запаздывания, его воздействием 0,0147 и чувствительностью 0,003	27,18	39,67
6	С оператором, включая периодичность изменения и запаздывание	≈41	110,69

Переходные процессы при этом выглядят похожими, однако при управлении оператором наблюдается интегральная ошибка, обычная для систем пропорционального управления (рис. 10).

Исследуем, есть ли оптимальное сочетание между чувствительностью оператора (параметрами блоков Relay±) и порогом его воздействия (параметром блока Influence). Чувствительности выключения (switch off) и включения обоих реле (switch on) установим одинаковыми по модулю. При воздействии оператора 0,0145 получили зависимость интегральной ошибки от чувствительности оператора, приведённую на рис. 11.

Видно, что при снижении чувствительности оператора ниже некоторого значения

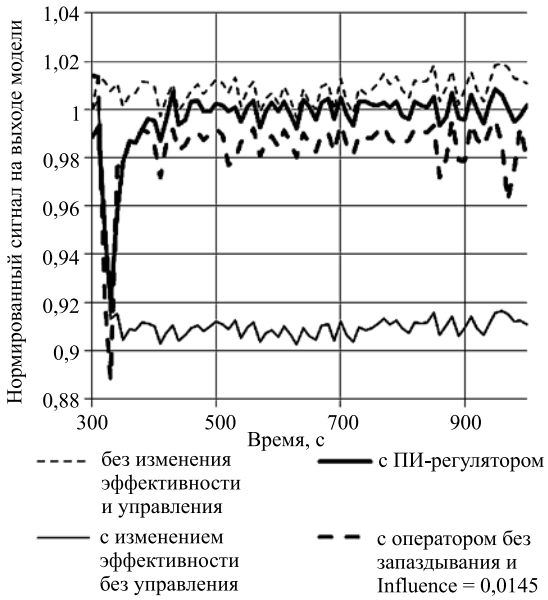

Рис. 10. Переходные процессы в стохастической модели ФМ после подачи возмущения в разных режимах регулирования

(примерно 0,0035) интегральная ошибка перестаёт изменяться. При совместном изменении чувствительности (Relay) и воздействия оператора (Influence) получили зависимости, приведённые на рис. 12.

По мере повышения чувствительности (уменьшения параметра блока Relay) становится возможным всё больший порог воздействия оператора. Регрессионный коэффициент связи Influence ≈ −0,25Relay + C с коэффициентом корреляции $R^2 \approx 0{,}8$.

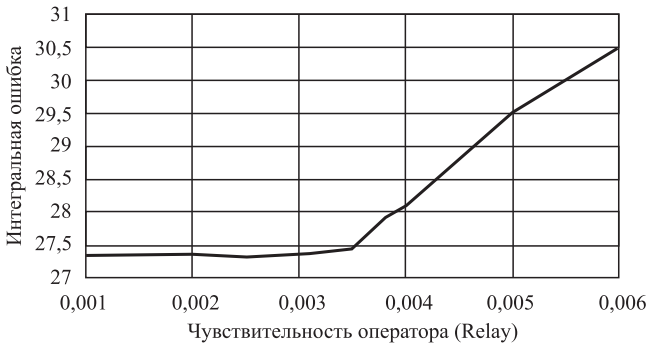

Рис. 11. Зависимость интегральной ошибки Dev_1 от чувствительности оператора при воздействии, равном 0,0145

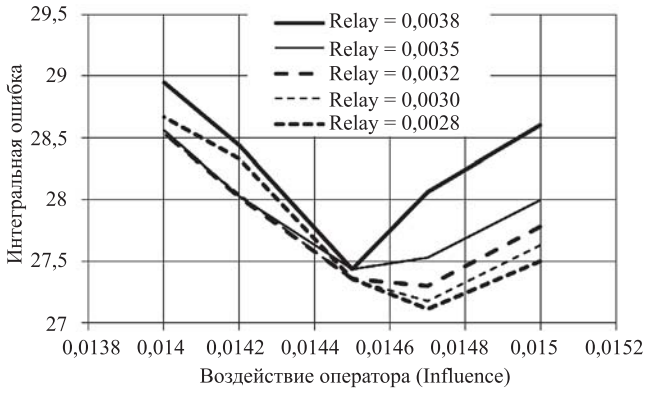

Рис. 12. Зависимость интегральной ошибки Dev_1 от воздействия оператора

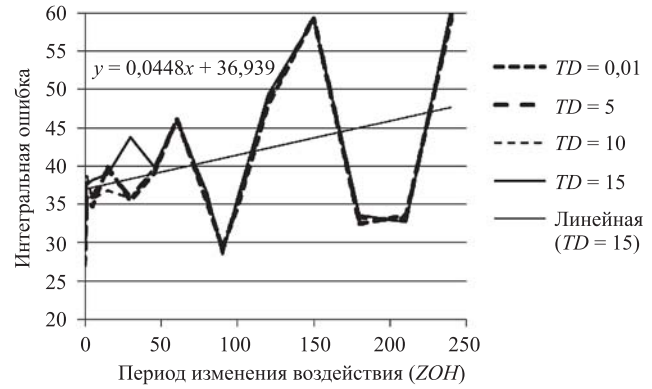

Рис. 13. Зависимость интегральной ошибки Dev_1 от совместного изменения периода воздействия оператора и запаздывания в принятии решений *TD*

Остановимся на значении параметра блока Relay = 0,003 и соответствующем ему оптимальном значении параметра блока Influence = = 0,0147 и исследуем влияние человеческого фактора — запаздывания в принятии решения *TD* и периодичности изменения воздействия *ZOH* (рис. 13).

При задержке в принятии решения, существенно меньшей периодичности изменения воздействия, первая не оказывает влияния на качество переходного процесса. Это в целом соответствует выводам авторов других работ, например [7]. В среднем интегральная ошибка сначала резко растёт при появлении периодичности, что отображено на рис. 14. Он повторяет рис. 13, но шкала периодичности ограничена 30 с, чтобы начальный участок лучше читался.

Затем интегральная ошибка растёт очень медленно (с коэффициентом порядка 0,05) по мере роста *ZOH*. При *ZOH* ≈ 0 запаздывание в принятии решения вызывает рост интегральной ошибки (рис. 15).

Заключение. В целом можно считать, что «человеческие» свойства в совокупности в среднем вызывают рост ошибки со значений около 27 до 37...42 (см. табл. 3, режимы 5 и 6). То есть

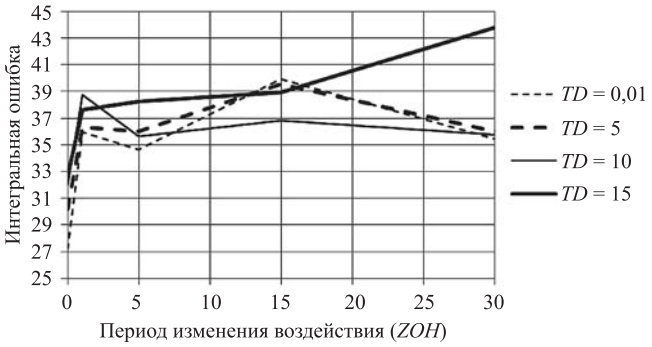

Рис. 14. Зависимость интегральной ошибки Dev_1 от совместного изменения малых значений периода воздействия оператора и запаздывания в принятии решений *TD*

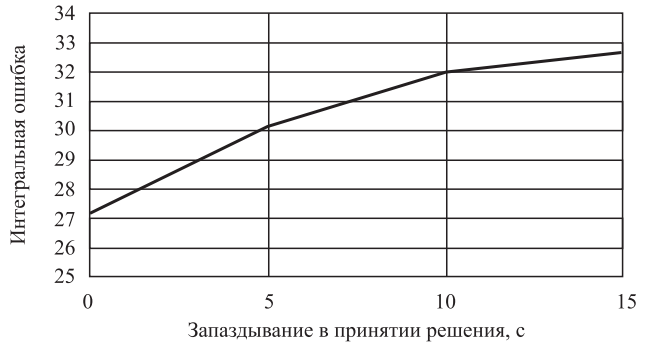

Рис. 15. Зависимость интегральной ошибки Dev_1 от запаздывания в принятии решений *TD* при бесконечно малом периоде изменения воздействия оператора

переход от «идеального» оператора к использованию ПИ-регулирования даёт уменьшение относительной ошибки с 39,67 до 32,01 % (на 7,66 %), что достаточно существенно.

Замена оператора на ПИ-регулятор, на вход которого подаётся результат распознавания пузырьков в видеопотоке, может снизить относительную ошибку с 110,69 до 32,01 % (на 78,67 %). К данному результату, вероятно, следует относиться с осторожностью, так как «человеческие» свойства оператора выбирались и моделировались достаточно произвольно.

Таким образом, переход от ручного к автоматическому управлению даёт выигрыш в качестве управления не менее 7,66 %, а при определённых сочетаниях стохастических значений параметров и человеческого фактора рост качества управления может достигать 70...80 %.

Библиографические ссылки

1. **Затонский А.В., Варламова С.А., Малышева А.В., Мясников А.А.** Использование видеографической информации для уточнения динамической стохастической модели процесса флотации калийной руды // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. № 2(39). С. 87.

2. **Затонский А.В., Варламова С.А.** Использование бликовых отражений для автоматического распознавания параметров пены при флотации калийных руд // Обогащение руд. 2016. № 2 (362). С. 49—56.

3. **Малышева А.В.** Усовершенствованный алгоритм распознавания бликов бинаризованного изображения пены // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2018. № 5. С. 110—116.

4. **Беккер В.Ф.** Решение технологических проблем действующего производства средствами автоматизации. В 3 т. Т. 1. Производство калийных удобрений. Пермь, БФ ПНИПУ, 2012. 312 с.

5. **Затонский А.В.** Программные средства глобальной оптимизации систем автоматического регулирования. М.: ИНФРА-М, ИЦ РИОР, 2013. 136 с.

6. **Бильфельд Н.В.** Идентификация нестационарных объектов управления средствами пассивного эксперимента // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 85—90.

7. **Ерыпалова М.Н., Беккер В.Ф., Затонский А.В., Кирин Ю.П.** Влияние нестационарности объекта управления на параметры установившихся автоколебаний // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2008. № 4 (8). С. 50—57.

Ссылка для цитирования

Малышева А.В., Затонский А.В. Исследование перспектив перехода на автоматическое управление процессом флотации калийной руды // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 3. С. 119—127.

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., страницы — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом http://translit.ru/

УДК 002.8

В.А. Елисеев, д-р техн. наук, проф., **В.А. Сажин,** канд. экон. наук
(Институт инновационно-технологического менеджмента, г. Москва)

dr.ye@mail.ru, vsazhin@yahoo.com

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРСАЙТ-ИССЛЕДОВАНИЯМИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ

Отмечается, что в соответствии с мировыми тенденциями для выбора ориентиров и приоритетов отечественного инновационного развития, а также для долгосрочного управления этим развитием в перспективе после 2020 г. целесообразно использовать методологию форсайт-исследований. Рассмотрены методологические аспекты управления форсайт-исследованиями. Представлены направления, варианты и особенности реализации методологии.

Ключевые слова: методология; управление; форсайт; инновационное развитие.

The utilization advisability of the foresight-research methodology is noted in accordance with global trends for the selection of guidelines and priorities for domestic innovation development, as well as for long-term management of this development in the perspective after 2020. The methodological aspects of the management of foresight-research are considered. The directions, versions and features of the implementation of the methodology are represented.

Keywords: methodology; control; foresight; innovative development.

Введение. Инновационное развитие находится в фокусе деятельности не только различных организаций и институтов (в том числе международных), но главное — органов государственного управления. Именно с инновационным развитием связаны экономический рост и преодоление кризисных ситуаций, хотя одновременно инновационные процессы — одна из наиболее проблемных сфер управления: они усложняют глобальный контекст развития и привносят комплекс различных факторов, которые могут даже сдерживать реализацию части инновационных стратегий (например, получение новых результатов наукоёмких исследований требует значительных затрат на научное приборостроение, контрольно-измерительное и технологическое оборудование, на подготовку специалистов). Поэтому практически невозможно проведение масштабных исследований по всем направлениям, а для поддержания и установления передовых позиций в перспективных областях науки, техники и технологий необходимо определять приоритеты инновационного развития страны.

Профессионально выбранные приоритеты и действенная стратегия их практической реализации способствуют достижению даже геополитических эффектов, но в то же время возрастает цена ошибок выбора: ошибки приводят к таким негативным последствиям, как потеря конкурентных преимуществ, технологическое и технико-экономическое отставание. Кроме того, избирательность приоритетов осуществляется в условиях бюджетных ограничений, когда требуется перегруппировка ресурсов и поиск дополнительных источников финансирования.

В качестве цели статьи представляется целесообразным рассмотреть те методологические аспекты государственного управления форсайтом инновационного развития, которые предстоит учесть при разработке приоритетных направлений развития научно-технологического комплекса страны на долгосрочный период после 2020 г., включая критические технологии и перечни технологических платформ.

Управление инновационным развитием страны. Инновационная модель развития страны, технологическая модернизация отечественной экономики, возрастание цены возможных управленческих ошибок, реструктуризация пространства принятия решений, а также отнесение науки и инноваций к сфере политического регулирования привели к тому, что в 2004—2005 гг. бывшее Министерство образования и науки Российской Федерации прове-

ло работу по пересмотру перечня приоритетов инновационного развития на модифицированной методологической базе. Во-первых, в основу экспертного анализа были положены критерии опережающего экономического роста и обеспечения технологической безопасности. При этом эксперты сначала определяли группы товаров и услуг, которые могли бы производиться на основе отечественных технологий и быть конкурентоспособными на внутреннем и мировом рынках. Эти товары и услуги обсуждались на экспертных фокус-группах, а потом отбирались технологии, обладающие наибольшим потенциалом для разработки. Таким образом были выбраны технологии, первоочередная поддержка которых способствовала росту конкурентоспособности российской промышленности. Во-вторых, был значительно расширен арсенал используемых методов: в их число вошли интервью с руководителями крупных организаций, экспертные панели, тематические фокус-группы, а также серии экспертных опросов. Комбинация разнообразных подходов позволила на отдельных этапах работы задействовать лучшие качества экспертов, выстроить обсуждения в фокус-группах практических аспектов использования технологий и в значительной степени избежать лоббирования со стороны отдельных научных школ [1].

Однако в 2020 г. заканчиваются сроки исследований и разработок по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники (научно-технологического комплекса), государственной программы по развитию науки и технологий, а также установленный срок действия перечня технологических платформ. Кроме того, может потребоваться соответствующая корректировка перечня критических технологий Российской Федерации [2—5]. То есть с учётом приобретённого отечественного опыта и зарубежных данных возникает необходимость пересмотра отмеченных и формирования новых программ с установлением, корректировкой, дополнением, изменением и/или подтверждением приоритетных направлений развития на будущее (на период после 2020 г.), включая перечни технологических платформ и критические технологии. При этом современным средством инновационного развития является методология форсайта, как системного подхода к долгосрочному «проектированию будущего» с установлением причинно-следственных связей, а государственное управление форсайт-исследованиями может быть закреплено за нынешним Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

В основном форсайт-исследования проводятся по заказу государственных органов управления, так как разработка стратегии инновационного развития страны зависит от её национальных особенностей. Поэтому основным конечным продуктом форсайт-проектов является выработка рекомендаций для государственных органов управления, разработка сценариев и трендов, определение приоритетов НИОКТР. При этом комплексный характер, концептуальные основы, ключевые принципы, прагматизм и практическое применение форсайт-исследований превращают их в инструмент стратегического планирования и научно-технической политики, ориентированной на долгосрочную перспективу, способствуя сбору необходимой для принятия решений информации о состоянии и направлениях НИОКТР с государственным финансированием, а также созданию системы взаимодействия между акторами (участниками преобразований); определению необходимых ресурсов.

Методологические аспекты управления форсайт-исследованиями. Форсайт в основном осуществляется на основе интерактивности индивидуальных оценок экспертов, а сами экспертные процедуры разрабатываются как система методов экспертной оценки долгосрочных перспектив инновационного развития с выявлением технологических прорывов и конкурентных преимуществ. Эти методы направлены на планово-организационную работу по дополняющим друг друга сценариям поэтапно-многоаспектного пассивного (выжидательного) и/или активного взаимодействия экспертных групп (хотя в отдельных случаях для форсайта может использоваться интервьюирование). Форсайт опирается на разнообразные информационные ресурсы и средства их анализа, создавая основу не только для усиления взаимодействия между основными стейкхолдерами (стейкхолдер — причастная сторона [6]), но и для конвергенции экспертной базы, которая охватывает сегменты инновационного развития. Усиливающаяся роль и растущее количество форсайт-исследований за рубежом обусловили необходимость их мониторинга для анализа всех стадий форсайт-процесса, систематизации накопленного опыта, повышения в дальнейшем эффективности подобных работ и их имплементации.

Форсайт-мероприятия ориентированы на повышение результативности инноваций с

консенсусным формированием приоритетов, создание сетей и определение согласованных ориентиров, а проработка спорных и противоречивых идей-проектов может оказаться важной при выборе инновационных альтернатив. То есть консенсусная направленность форсайта и исследование многообразия его возможностей комплементарны (взаимодополняемы) и необходимы для повышения эффективности инновационного развития (особенно в условиях наблюдающегося «размывания» границ между форсайтом и стратегическим планированием).

Форсайт-проекты характеризуются высокими ресурсоёмкостью и стоимостью. При подборе соответствующих подходов, методов и инструментов оценку результатов форсайт-исследований затрудняет сложность причинно-следственных связей, которые полностью не укладываются в упрощённые модели, используемые для практического осмысления форсайт-проектов. Кроме того, хотя за организационным персоналом форсайта закреплены обработка результатов (например, экспертизы) и их реализация, полученными результатами пользуются разные акторы. Поэтому могут оказаться затруднительными их попытки учесть эти результаты в полном объёме (особенно при выявлении «окон возможностей», рисков и угроз, при бенчмаркинге — сравнении с эталоном, лучшим мировым уровнем, при анализе переменных и индикаторов, например, «слабых сигналов» и «событий-джокеров»). К тому же, форсайту свойственно использование такого множества качественных и количественных методов, что доминирующие паттерны (шаблоны) отсутствуют, и заведомо усложнена разработка стандартизованных процедур оценки полученных результатов. Тем не менее в структуре управленческих подходов в форсайт-исследованиях инновационного развития можно различить следующие методологические аспекты (таблица):

задачу научно-технической политики;

возможные сценарии отечественной научно-технической политики;

Структура управленческих подходов в форсайт-исследованиях инновационного развития

Методологические аспекты	Направления, варианты и особенности реализации методологии
Задача научно-технической политики в инновационной сфере	Установление спектра балансов между эффективностью общегосударственного и регионального инновационного развития, стабильностью и динамизмом этого развития, долгосрочными и краткосрочными приоритетами, поддержанием рационального уровня конкуренции и сотрудничества, концентрацией и междисциплинарностью
Возможные сценарии отечественной научно-технической политики	Прогрессорский; инерционный; умеренный
Цели и задачи программ форсайта инновационного развития	Выбор и приоритезация направлений финансирования; создание новых сетей и связей (в том числе на основе предварительных представлений о будущем); углубление знаний и представлений о будущем; привлечение к стратегическим дебатам новых участников (акторов, экспертов); совершенствование процесса разработки научно-технической политики и формирования стратегий в областях, в которых эта деятельность существенна
Основные принципы форсайта	Концентрация на долговременном периоде; прогнозирование динамики процесса; системность процесса, основанная на использовании экспертами имеющейся информации; формирование «образа желаемого будущего», прогнозирование развития технологий; достижение консенсуса акторов в разработанных специалистами сценариях развития; принятие системы мер по реализации «образа будущего», признанного отвечающим интересам государства (посредством формирования программ развития); учёт долгосрочных интересов государства в текущей научно-технической политике
Преимущества форсайт-мониторинга	Выявление ключевых «игроков» и их компетенций; оценка потенциала и ограничений применения тех или иных технологий/методов и их комбинаций; актуализация футурологических исследований и увеличение спроса на них; повышение качества рекомендаций по инновационному развитию; развитие исследований будущего и профессионализма сетевых сообществ

Продолжение таблицы

Методологические аспекты	Направления, варианты и особенности реализации методологии
Составляющие методологии форсайт-исследований (ромб форсайта)	Экспертиза с технологиями обработки неструктурированной информации — извлечение экспертного знания; взаимодействие; креативность; доказательность
Условия, при которых могут осуществиться варианты возможного будущего	Определение сценариев развития; консенсус при выборе желательного сценария (особое внимание уделяется консенсусу основных «игроков» по важнейшим стратегическим направлениям развития путём организации их диалога в рамках различных форм взаимодействия); принятие мер по реализации форсайта
Основные факторы, определяющие выбор технологий (методов и форм) форсайт-исследований	Временные и ресурсные ограничения (сроки реализации, объёмы финансирования и др.); ожидаемые/требуемые результаты; исследуемые предметные области и имеющиеся представления о будущих тенденциях и проблемах их развития, подходах к их пониманию; наличие и обеспечение эффективной работы высококвалифицированных экспертов; доступ к информационным источникам; целевой спонсор — государство (при наличии технологического и исследовательского секторов различных форм собственности); управленческие предпочтения форсайтов (имея в виду, что государственные форсайты финансируются правительственными структурами)
Основные факторы, формирующие рыночный спрос и благоприятный инновационный климат	Конкуренция; налоговый режим; охрана интеллектуальной собственности; наличие предпринимательской культуры; финансовое обеспечение и др.
Популярные в мировой практике форсайта качественные и количественные методы (включая анализ эмпирических данных) с возможностью их комбинированного (гибридного) применения *(по алфавиту, а не по частоте применения)*	Анализ (SWOT-анализ), многокритериальный анализ, ситуационный анализ; анализ взаимных воздействий (анализ взаимного влияния); анализ статистических индикаторов, метод анализа по индикаторам (в том числе анализ с использованием нейронных сетей); анкетирование/обследование; библиографический анализ, библиометрическая информация; выделение ключевых технологий; «деревья» соответствий; испытания; интервьюирование; картирование стейкхолдеров; картирование технологий (дорожные карты, технологические дорожные карты); критические технологии; метод Дельфи; методы анализа «больших данных», мегатренды; моделирование (в том числе имитационное с использованием аппарата теории игр — игровое моделирование) для исследования пространства неопределённостей и оценки робастности стратегических решений; мозговой штурм; морфологический анализ; мультикритериальный анализ; наблюдения за окружающей средой; обзор источников/литературы; обратные сценарии (обратное сценирование); общественные панели; патентный анализ, патентная статистика; ролевые игры; ситуационный анализ; сканирование горизонтов (стратегическая разведка, стратегическое прогнозирование); сканирование источников; сценирование (разработка сценариев); «фьючерсные» семинары; экспертные панели; экстраполяция (экстраполяция трендов, в том числе глобальных); эссе

Окончание таблицы

Методологические аспекты	Направления, варианты и особенности реализации методологии
Приёмы формирования БД об экспертах и экспертных группах	Формулирование «концепции эксперта», отражающей качество будущих результатов экспертизы; использование библиометрического анализа (количественного анализа публикационной активности, анализа индекса цитирования и патентного анализа предполагаемых экспертов), изучение информационных БД научных фондов о специалистах научных центров, вузов, промышленных организаций, об участниках конференций, симпозиумов, круглых столах и других научных мероприятиях; мотивация участия экспертов в форсайт-исследованиях и обеспечение атмосферы доверия; формулирование тем экспертизы и экспертных вопросов, разработка процедур анкетирования экспертов; обеспечение теоретической и/или эмпирической валидности (достоверности) результатов форсайта путём применения адекватных средств методологии и исследовательских инструментов, обоснования по критериям и показателям (в том числе по качеству экспертного сообщества); регулярное взаимодействие оператора проведения форсайта с экспертами (от крупномасштабных до малых групп)

цели и задачи программ форсайта инновационного развития;

основные принципы форсайта;

преимущества форсайт-мониторинга;

составляющие методологии форсайт-исследований (ромб форсайта);

условия, при которых могут осуществляться варианты возможного будущего;

основные факторы, определяющие выбор технологий (методов и форм) форсайт-исследований;

основные факторы, формирующие рыночный спрос и благоприятный инновационный климат;

популярные в форсайте качественные и количественные методы (включая анализ эмпирических данных) с возможностью их комбинированного (гибридного) применения;

приёмы формирования БД об экспертах и экспертных группах.

Направления, варианты и особенности реализации методологии форсайт-исследований инновационного развития. Задача научно-технической политики заключается в установлении спектра балансов между эффективностью общегосударственного и регионального инновационного развития, стабильностью и динамизмом этого развития, долгосрочными и краткосрочными приоритетами, поддержанием рационального уровня конкуренции и сотрудничества, концентрацией и междисциплинарностью. Возможны три прогрессивных сценария научно-технической политики: прогрессорский, инерционный и умеренный [7]. При этом целями и задачами программ форсайта инновационного развития являются: выбор и приоритезация направлений финансирования; создание новых сетей и связей (в том числе на основе предварительных представлений о будущем); углубление знаний и представлений о будущем; привлечение к стратегическим дебатам новых участников (акторов и экспертов); совершенствование процесса разработки научно-технической политики и формирования стратегий в областях, в которых эта деятельность играет существенную роль. Основные принципы форсайта: концентрация на долговременном периоде; прогнозирование динамики процесса; системность процесса, основанная на использовании экспертами имеющейся информации; формирование «образа желаемого будущего», прогнозирование развития технологий; достижение консенсуса акторов в разработанных специалистами сценариях развития; принятие системы мер по реализации «образа будущего», признанного отвечающим интересам государства (посредством формирования программ развития); учёт долгосрочных интересов государства в текущей научно-технической политике. К преимуществам форсайт-мониторинга относятся: выявление ключевых игроков и их компетенций; оценка потенциала и ограничений применения тех или иных технологий/методов и их комбинаций; актуализация футурологических исследований и увеличение спроса на них; повышение качества рекомендаций по инновационному развитию; развитие исследований будущего и профессионализма сетевых сообществ (см. таблицу).

Различают четыре составляющих методологии форсайт-исследований (так называемый ромб форсайта): экспертиза (экспертиза с технологиями обработки неструктурированной информации — извлечение экспертного знания), взаимодействие, креативность и доказательность. При выполнении условий осуществления вариантов возможного будущего основными факторами, которые определяют выбор технологий (методов и форм) форсайт-исследований, являются: временные и ресурсные ограничения (сроки реализации, объёмы финансирования и др.), ожидаемые/требуемые результаты, исследуемые предметные области и имеющиеся представления о будущих тенденциях и проблемах их развития, подходах к их пониманию, наличие и обеспечение эффективной работы высококвалифицированных экспертов, доступ к информационным источникам, целевой спонсор — государство (при наличии технологического и исследовательского секторов разных форм собственности), управленческие предпочтения форсайтов (имея в виду, что государственные форсайты финансируются правительственными структурами). Основные факторы, формирующие рыночный спрос и благоприятный инновационный климат: конкуренция, налоговые режимы, охрана интеллектуальной собственности, наличие предпринимательской культуры, финансовое обеспечение и др. Мировой практикой, во-первых, ограничено количество популярных качественных и количественных методов форсайта, включая их комбинированное (гибридное) применение (с учётом различных факторов, например, временных и ресурсных ограничений, возможности доступа к информативным источникам, наличия достаточного количества квалифицированных экспертов и пр.), а во-вторых, отработаны приёмы формирования БД об экспертах и экспертных группах, имея в виду, что ключевое условие результативности форсайта — обеспечение эффективной работы привлекаемых экспертов (см. таблицу).

К методу моделирования (см. таблицу) относится комплексное моделирование «i5» — постадийная реализация форсайта (сбор информации, создание образов, интеграция, интерпретация и действия с соответствующими функциями, процедурами и методами) канадской компанией [8] (в другом подходе комплексное моделирование рассматривается как скрининг робастных портфельных моделей — некий коллаборативный метод, предусматривающий генерацию, предварительное рассмотрение, многокритериальную оценку и портфельный анализ новых идей [9]). Что касается корпоративного форсайта с коллаборативно-экспертными формами и социально-психологической интерпретацией [10], то уровень его партисипативности (вовлеченности) пока невысок: он проходит апробацию в ряде российских компаний, ещё не ориентирован на уровень государственно-отраслевого управления и поэтому не отмечен в таблице.

Заключение. При разработке приоритетных направлений развития научно-технологического комплекса страны на долгосрочный период после 2020 г., включая критические технологии и перечни технологических платформ, предстоит воспользоваться методологией управления форсайт-исследованиями инновационного развития.

Аспекты этой методологии включают структуру подходов от задачи и сценария отечественной научно-технической политики (по реализации форсайт-исследований) до приёмов формирования БД об экспертах и экспертных группах, а также учитывают направления, варианты и особенности реализации методологии.

Так как форсайт способен оказать решающее управляющее воздействие на инновационное развитие страны, можно предположить, что в органах государственного управления России уже сейчас находится в стадии принятия решение о проведении очередного раунда форсайт-исследований.

Библиографические ссылки

1. **Научно-технологические** ориентиры в России. История формирования приоритетных направлений науки и технологий в России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://studref.com/313063/ekonomika/nauchno_tehnologicheskie_orientiry_rossii (дата обращения: 07.12.2018).

2. **Указ** Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899 (ред. от 16 декабря 2015 г.) «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации».

3. **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»».

4. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 301 (ред. от 29 марта

2018 г.) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013—2020 годы».

5. **Перечень** технологических платформ (утвержден решениями Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 1 апреля 2011 г., протокол № 2 от 5 июля 2011 г., протокол № 3, решением президиума Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 21 февраля 2012 г., протокол № 2).

6. **ГОСТ Р 51897—2011.** Менеджмент риска. Термины и определения.

7. **Гохберг Л.М., Кузнецова Т.Е.** Стратегия-2020: новые контуры российской инновационной политики // Форсайт. Т. 5. № 4. 2011. С. 8—29.

8. **Технологические** платформы, долгосрочное научно-технологическое прогнозирование и форсайт-исследования: неделя международных семинаров (доклад Д. Смита, Канада) // Форсайт. Т. 6. № 1. 2012. С. 74—85.

9. **Бруммер В., Коннола Т., Сало А.** Многообразие в форсайт-исследованиях: практика отбора инновационных идей // Форсайт. Т. 4. № 4. 2010. С. 56—68.

10. **Нестик Т.** Психологические аспекты корпоративного Форсайта // Форсайт. Т. 12. № 2. 2018. С. 78—90.

Ссылка для цитирования

Елисеев В.А., Сажин В.А. Методологические аспекты управления форсайт-исследованиями инновационного развития // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 3. С. 128—134.

УДК 512.643

Е.А. Микрин, Н.Е. Зубов, В.Н. Рябченко, А.В. Филимонов
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, АО «Пространственные системы информации»)

NikolayZubov@rsce.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ВЕКТОРОВ ЧИСЛОВОЙ МАТРИЦЫ

Рассмотрено новое представление собственных векторов числовой матрицы. В основе лежат аналитические выражения для собственных векторов, полученные на основе теоремы Гамильтона—Кэли. Доказаны теоремы об аналитических представлениях левых и правых собственных векторов. Приведены условия нормировки собственных векторов. На основе соответствующих теорем сформулирован подход к аналитическому построению левых и правых делителей нуля (аннуляторов) числовых матриц. Описаны примеры нахождения аналитических представлений собственных векторов.

Ключевые слова: матрицы; собственные вектора; делители нуля; аналитические формулы.

A new representation of the number matrix own vectors is considered. It is substantiated by analytic expressions for own vectors derived from the Hamilton-Cayley theorem. Theorems on analytic representations of left and right own vectors are proved. The normalization conditions for own vectors are given. An approach to the analytical construction of left and right zero dividers (annihilators) of numerical matrices is formulated from the corresponding theorems. Examples of finding analytic representations of own vectors are described.

Keywords: matrices; own vectors; zero divisors; analytical formulas.

Введение. Одним из современных направлений синтеза управлений динамическими объектами является применение аналитических решений, которые существенно расширяют возможности управления нелинейными объектами с использованием современного модального управления для линейных систем [1—10]. Одним из ограничений для осуществления такого аналитического синтеза законов управления является отсутствие аналитических методов вычисления правых и левых собственных векторов и делителей нулей, в том числе и для числовых матриц, что затрудняет разработку бортового программного обеспечения для авиационных и космических летательных аппаратов.

В предлагаемой статье представлены аналитические соотношения для представления собственных векторов числовой матрицы. Приведены новые формулы для собственных векторов, носящих аналитический характер. Одним из приложений этих формул являются соотношения для построения делителей нуля (аннуляторов) числовых матриц.

Аналитические представления собственных векторов. Рассмотрим числовую квадратную матрицу $\boldsymbol{A}$ размером $n \times n$, заданную над полем действительных чисел $\mathbb{R}$ ($\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$). Пусть минимальный полином этой матрицы совпадает с характеристическим полиномом

$$\det(\lambda \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}) = \lambda^n + \alpha_{n-1}\lambda^{n-1} + \cdots + \alpha_1\lambda + \alpha_0, \quad (1)$$

где $\lambda \in \mathbb{C}$; $\alpha_{n-1}, \ldots, \alpha_0 \in \mathbb{R}$; $\boldsymbol{I}_n$ — единичная матрица порядка n; $\mathbb{C}$ — поле комплексных чисел.

Согласно теореме Гамильтона—Кэли каждая матрица $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ является корнем своего характеристического полинома (1) [11, 12], удовлетворяя тождеству

$$\boldsymbol{A}^n + \alpha_{n-1}\boldsymbol{A}^{n-1} + \cdots + \alpha_1\boldsymbol{A} + \alpha_0\boldsymbol{I}_n = 0.$$

Это утверждение справедливо как для действительных (заданных над $\mathbb{R}$), так и для комплексных (заданных над $\mathbb{C}$) матриц. Пусть $\boldsymbol{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ и имеет характеристический полином

$$\det(\lambda \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}) = \lambda^n + \alpha_{n-1}\lambda^{n-1} + \cdots + \alpha_1\lambda + \alpha_0,$$
$$\alpha_{n-1}, \ldots, \alpha_0 \in \mathbb{C},$$

тогда справедливо тождество

$$\boldsymbol{A}^n + \alpha_{n-1}\boldsymbol{A}^{n-1} + \cdots + \alpha_1\boldsymbol{A} + \alpha_0\boldsymbol{I}_n = 0.$$

Хорошо известно, что каждая матрица $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ имеет ровно n собственных значений $\lambda_i \in \mathbb{C}$ ($i = 1, \ldots, n$), также являющихся корнями характеристического полинома (1), т. е.

$$\det(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}) = 0.$$

Аналогичное утверждение справедливо для $\boldsymbol{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$.

Собственные значения (собственные числа) $\lambda_i \in \mathbb{C}$, $i = 1, \ldots, n$, являются элементами решения стандартной задачи на собственные значения (SEP — Standard Eigenvalue Problem [13])

$$(\lambda \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})x = 0. \quad (2)$$

При этом пары «число—вектор» (λ_i, x_i) называются собственными парами, где x_i — правый собственный вектор, отвечающий собственному значению λ_i.

Сформулируем и докажем теоремы, в которых представлены аналитические соотношения для собственных векторов матрицы.

Теорема 1. Правый собственный вектор x_i матрицы $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, отвечающий собственному значению λ_i, является вектором Крылова и выражается формулой

$$x_i = (\beta_n(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-1} + \beta_{n-1}(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-2} + \cdots + \beta_1 \boldsymbol{I}_n)b = \sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1}(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-j-1} b, \quad (3)$$

где $\beta_n = 1$, $\beta_{n-1}, \ldots, \beta_1 \in \mathbb{C}$ — коэффициенты характеристического полинома матрицы $\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}$, т. е.

$$\det(\lambda \boldsymbol{I}_n - \lambda_i \boldsymbol{I}_n + \boldsymbol{A}) = \det((\lambda - \lambda_i)\boldsymbol{I}_n + \boldsymbol{A}) = \lambda^n + \beta_{n-1}\lambda^{n-1} + \cdots + \beta_1\lambda = (\lambda - \lambda_i)^n + \alpha_{n-1}(\lambda - \lambda_i)^{n-1} + \cdots + \alpha_1(\lambda - \lambda_i); \quad (4)$$

$b \in \mathbb{R}^n$ — произвольный вектор из подпространства, ортогонального ядру матрицы Крылова

$$\boldsymbol{K} = \sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1}(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-j-1},$$

т. е.

$$b \notin \boldsymbol{K}^{\perp}. \quad (5)$$

Здесь

$$\boldsymbol{F}^{\perp} = \ker \boldsymbol{K}.$$

Доказательство теоремы 1. Известно [11, 12], что собственный вектор x_i матрицы $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, отвечающий собственному значению λ_i, является единственным с точностью до некоторого ненулевого множителя. Поэтому для доказательства справедливости формул (3), (5) достаточно, подставив (3) в формулу (2), показать нетривиальность полученного решения:

$$(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})x_i = (\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})((\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-1} + (\alpha_{n-1} + \lambda_i)(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-2} + \cdots + (\alpha_1 + \lambda_i)I_n)b = ((\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^n + (\alpha_{n-1} + \lambda_i)(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-1} + \cdots + (\alpha_1 + \lambda_i)(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}))b.$$

Поскольку $(\alpha_{n-1} - \lambda_i), \ldots, (\alpha_1 - \lambda_i)$ — коэффициенты характеристического полинома вырожденной (по определению) матрицы $\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}$

$$\det(\lambda \boldsymbol{I}_n - (\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})) = \det((\lambda - \lambda_i)\boldsymbol{I}_n + \boldsymbol{A}),$$

имеющего в свою очередь вид [11, 12]

$$\det((\lambda - \lambda_i)\boldsymbol{I}_n + \boldsymbol{A}) = \lambda^n + (\alpha_{n-1} - \lambda_i)\lambda^{n-1} + \cdots + (\alpha_1 - \lambda_i)\lambda,$$

то

$$(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^n + (\alpha_{n-1} + \lambda_i)(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-1} + \cdots$$
$$\cdots + (\alpha_1 + \lambda_i)(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}) = 0.$$

При этом условие (5) [1] гарантирует

$$((\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-1} + (\alpha_{n-1} - \lambda_i)(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-2} + \cdots$$
$$\cdots + (\alpha_1 - \lambda_i)\boldsymbol{I}_n)b \neq 0.$$

Это и требовалось показать. Доказательство закончено.

Отметим, что для получения собственных векторов, удовлетворяющих условию нормировки [1, 12]

$$x_i^* x = 1, \tag{6}$$

вместо формулы (3) достаточно использовать формулу

$$x_i = \frac{1}{\left\| \sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1} (\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-j-1} b \right\|} \times$$
$$\times \sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1} \left(\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}\right)^{n-j-1} b. \tag{7}$$

В этом случае, очевидно, всегда будет выполняться условие (6).

Справедлива дуальная теорема.

Теорема 2. Левый собственный вектор y_i матрицы $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, отвечающий собственному значению λ_i, т. е.

$$y_i^* (\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}) = 0,$$

является вектором Крылова и выражается формулой

$$y_i = c^{\mathrm{T}} \sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1} (\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-j-1}, \tag{8}$$

где $c \in \mathbb{R}^n$ — произвольный вектор из подпространства, ортогонального коядру матрицы Крылова

$$\boldsymbol{K} = \sum_{j=1}^{n-1} \beta_{n-j+1} (\lambda_i \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A})^{n-j-1},$$

т. е.

$$c \notin \boldsymbol{K}^{\mathrm{T}\perp}. \tag{9}$$

Здесь $\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}\perp} = \operatorname{coker} \boldsymbol{K}$; * — символ операции эрмитова сопряжения.

Из приведённых теорем очевидно следует, что при действительном собственном значении λ_i собственные векторы также являются действительными, а при комплексном λ_i — комплексными. При этом, например, правый сопряжённый собственный вектор

$$\bar{x}_i = ((\bar{\lambda}_i I_n - A)^{n-1} + (\alpha_{n-1} - \bar{\lambda}_i)(\bar{\lambda}_i I_n - A)^{n-2} + \cdots$$
$$\cdots + (\alpha_1 - \bar{\lambda}_i) I_n)b.$$

Числовой пример. Пусть задана матрица $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$

$$\boldsymbol{A} = \left(\begin{array}{c|c|c} -3 & 4 & 0 \\ \hline 0 & 1 & -2 \\ \hline -4 & 4 & 1 \end{array}\right). \tag{10}$$

Эта матрица имеет следующие собственные значения:

$$\operatorname{eig}\boldsymbol{A} = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} = \{-1 + 2i, -1 - 2i, 1\}. \tag{11}$$

Найдём по формулам (3), (5) собственный вектор, отвечающий собственному значению $\lambda_2 = -1 - 2i$. Для этого вычислим характеристические полиномы:

$$\det(\lambda \boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}) =$$
$$= \det\left(\lambda I_3 - \left(\begin{array}{c|c|c} -3 & 4 & 0 \\ \hline 0 & 1 & -2 \\ \hline -4 & 4 & 1 \end{array}\right)\right) = \lambda^3 + \lambda^2 + 3\lambda - 5; \tag{12}$$

$$\det((\lambda - \lambda_2)\boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}) =$$
$$= \det\left((\lambda - \lambda_2)\boldsymbol{I}_3 - \left(\begin{array}{c|c|c} -3 & 4 & 0 \\ \hline 0 & 1 & -2 \\ \hline -4 & 4 & 1 \end{array}\right)\right) =$$
$$= (\lambda - 1 - 2i)^3 + (\lambda - 1 - 2i)^2 +$$
$$+ 3(\lambda - 1 - 2i) - 5 = \lambda^3 + (2 + 6i)\lambda^2 + (-8 + 8i)\lambda \tag{13}$$

и получим

$$x_2 = \left(\left(\begin{array}{c|c|c} 2-2i & -4 & 0 \\ \hline 0 & -2-2i & -2 \\ \hline 4 & -4 & -2-2i \end{array}\right)^2 + \right.$$
$$+ (2 + 6i)\left(\begin{array}{c|c|c} 2-2i & -4 & 0 \\ \hline 0 & -2-2i & -2 \\ \hline 4 & -4 & -2-2i \end{array}\right) +$$
$$\left. + (-8 + 8i)\left(\begin{array}{c|c|c} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array}\right)\right) b.$$

Так, при $b = (0,6787 \mid 0,7577 \mid 0,7431)^{\mathrm{T}}$ имеем

$$x_2 = \begin{pmatrix} -6,5771- & -3,6046+ & -6,5771- \\ -0,632i & +2,9725i & -0,632i \end{pmatrix}^{\mathrm{T}},$$

а при $b = (1,125 \mid 0 \mid 0)^{\mathrm{T}}$ —

$$x_2 = (1+i \mid 1 \mid 1+i)^{\mathrm{T}}.$$

Таким образом, с помощью формул (3), (5) может быть параметризовано все множество правых собственных векторов матрицы.

Аналитические представления делителей нуля матриц. Полученные теоремы позволяют построить аналитические представления, точнее, формулы делителей нуля матриц (аннуляторов) [12]. Покажем это сначала на примере квадратной матрицы.

Напомним, что матрица $\boldsymbol{A}_L^{\perp}$ является левым делителем нуля максимального ранга (левым аннулятором) некоторой матрицы $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ранга r, если одновременно выполняются условия

$$\boldsymbol{A}_L^{\perp}\boldsymbol{A} = 0;\ \operatorname{rank}\boldsymbol{A}_L^{\perp} = n - r.$$

Симметрично матрица $\boldsymbol{A}_R^{\perp}$ является правым делителем нуля максимального ранга (правым аннулятором) некоторой матрицы $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ранга r, если одновременно выполняются условия

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}_R^{\perp} = 0;\ \operatorname{rank}\boldsymbol{A}_R^{\perp} = m - r.$$

Пусть заданы числовая матрица $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ранга $n - 1$ и её минимальный характеристический полином

$$\det(\lambda I_n - \boldsymbol{A}) = \lambda^n + \alpha_{n-1}\lambda^{n-1} + \cdots + \alpha_1\lambda + \alpha_0. \quad (14)$$

Здесь $\alpha_0 = \det\boldsymbol{A} = 0$. Тогда по определению правый делитель нуля совпадает с правым собственным вектором, отвечающим нулевому собственному значению, и будет иметь вид

$$\boldsymbol{A}_R^{\perp} = (\boldsymbol{A}^{n-1} + \alpha_{n-1}\boldsymbol{A}^{n-2} + \cdots + \alpha_1\boldsymbol{I}_n)b, \quad (15)$$

где $b \in \mathbb{R}^n$ и

$$b \notin \boldsymbol{K}^{\perp};\ \boldsymbol{K} = \boldsymbol{A}^{n-1} + \alpha_{n-1}\boldsymbol{A}^{n-2} + \cdots + \alpha_1 I_n. \quad (16)$$

С практической точки зрения в качестве вектора $b \in \mathbb{R}^n$ первоначально можно выбрать произвольный вектор, например, с помощью генератора псевдослучайных чисел *randomize*.

Симметрично левый делитель нуля матрица $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ранга $n - 1$ совпадает с левым собственным вектором, отвечающим нулевому собственному значению, и будет иметь вид

$$\boldsymbol{A}_L^{\perp} = c^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}^{n-1} + \alpha_{n-1}\boldsymbol{A}^{n-2} + \cdots + \alpha_1\boldsymbol{I}_n), \quad (17)$$

где $c \in \mathbb{R}^n$ и

$$c \notin \boldsymbol{K}^{\mathrm{T}\perp}. \quad (18)$$

Пусть далее задана прямоугольная матрица $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ полного ранга по строкам, где $m > n$, тогда левый делитель нуля максимального ранга может быть вычислен по формуле

$$\boldsymbol{A}_L^{\perp} = \boldsymbol{C}\left(\left(\frac{\boldsymbol{A}}{0_{(m-n)\times m}}\right)^{m-1} + \right.$$
$$\left. + \alpha_{n-1}\left(\frac{\boldsymbol{A}}{0_{(m-n)\times m}}\right)^{m-2} + \cdots + \alpha_1 I_m\right), \quad (19)$$

где

$$\det\left(\lambda\boldsymbol{I}_m - \left(\frac{\boldsymbol{A}}{0_{(m-n)\times m}}\right)\right) = \lambda^m + \alpha_{m-1}\lambda^{m-1} + \cdots + \alpha_{m-n}\lambda,$$

$\boldsymbol{C} \in \mathbb{R}^{(m-n)\times m}$ и

$$b \notin \boldsymbol{K}^{\perp};\ \boldsymbol{K} = \left(\frac{\boldsymbol{A}}{0_{(m-n)\times m}}\right)^{m-1} + \alpha_{n-1}\left(\frac{\boldsymbol{A}}{0_{(m-n)\times m}}\right)^{m-2} + \cdots + \alpha_{m-n}\boldsymbol{I}_m.$$

Наконец, пусть далее задана прямоугольная матрица $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ полного ранга по столбцам, где $m < n$, тогда правый делитель нуля максимального ранга может быть вычислен по формуле

$$A_R^{\perp} = ((\boldsymbol{A} \mid 0_{(n-m)\times n})^{n-1} +$$
$$+ \alpha_{n-1}(\boldsymbol{A} \mid 0_{(n-m)\times n})^{n-2} + \cdots + \alpha_{n-m}I_n)\boldsymbol{B}, \quad (20)$$

где $\boldsymbol{B} \in \mathbb{R}^{n \times (n-m)}$ и

$$b \notin \boldsymbol{K}^{\perp};\ \boldsymbol{K} = \left(\frac{\boldsymbol{A}}{0_{(m-n)\times m}}\right)^{n-1} + \alpha_{n-1}\left(\frac{\boldsymbol{A}}{0_{(m-n)\times m}}\right)^{n-2} + \cdots + \alpha_{n-m}\boldsymbol{I}_m.$$

В заключение отметим, что описанные в статье представления собственных векторов, несмотря на хорошо известную теорему и тождество Гамильтона—Кэли, авторами ранее не встречались в литературе по матричному исчислению и существенным образом упростят процедуру синтеза бортовых алгоритмов систем управления движением и навигацией авиационных и космических летательных аппаратов.

Библиографические ссылки

1. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** Матричные методы в теории и практике систем автоматического управления летательных аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 666 с.
2. **Мисриханов М.Ш.** Инвариантное управление многомерными системами. Алгебраический подход. М.: Наука, 2007. 284 с.
3. **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.
4. **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.
5. **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.
6. **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.
7. **Буков В.Н., Рябченко В.Н., Зубов Н.Е.** Вложение и оптимизация линейных систем // Автоматика и телемеханика. 2002. № 5. С. 12—23.
8. **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.
9. **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.
10. **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.
11. **Bernstein D.S.** Matrix Mathematics. Princeton Univ. Press, 2009. 1184 p.
12. **Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А.** Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984. 320 с.
13. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Квадратическая проблема собственных значений в электроэнергетических системах // АиТ. 2006. № 5. С. 24—47.

Ссылка для цитирования

Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Филимонов А.В. Аналитическое представление собственных векторов числовой матрицы // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 3. С. 134—138.

УДК 004.657

В.А. Пролетарская

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

vilka2000@mail.ru

КАСКАДНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЛЬТРА БЛУМА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ SQL-ЗАПРОСА С КОРРЕЛИРОВАННЫМ ПОДЗАПРОСОМ НА ПЛАТФОРМЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ SPARK 2

На примере SQL-запроса Q17 теста TPC-H выполнено сравнение двух методов доступа к хранилищу данных: разработанного метода с каскадным использованием фильтра Блума (КИФБ) и Hive. В этих целях проведены натурные эксперименты в среде кластера из семи узлов на платформе распределённых параллельных вычислений Apache Spark 2. Результаты экспериментов подтвердили преимущества разработанного метода КИФБ.

Ключевые слова: обработка данных; большие данные; Spark SQL; Bloom filter; TPC-H; Q17 Query; MapReduce; Date Warehouse.

Two methods of accessing the data storage is performed as an example of the SQL query Q17 of the TPC-H test: the developed method with the cascaded usage of the Bloom filter (CUBF) and Hive. For this purpose, full-scale experiments in a cluster medium of seven nodes on the platform of distributed parallel computing Apache Spark 2 are conducted. The results of the experiments confirm the advantages of the developed CUBF method.

Keywords: data processing; big data; Spark SQL; Bloom filter; TPC-H; Q17 Query; MapReduce; Date Warehouse.

Введение. Платформа MapReduce произвела революцию в технологии обработки огромных наборов данных. В ней реализована простая модель написания программ, которые могут выполняться параллельно на сотнях — тысячах машин. Программная платформа

MapReduce обеспечивает практически линейную масштабируемость и высокую отказоустойчивость, а также позволяет обрабатывать очень большие объёмы данных (Big Data). Популярность данного подхода и последующее расширение исследований в области обработки больших данных породили целую экосистему технологий и систем, развивающих подход MapReduce. К одной из таких технологий относится Spark.

Apache Spark сохраняет линейную масштабируемость и высокую отказоустойчивость и вдобавок расширяет эти свойства в четырёх важных направлениях:

представление запроса в виде ациклического графа (Directed Acyclic Graph, DAG);

ориентация на разработчиков и применение потокового API (Application Programming Interface);

расширение возможности обработки в оперативной памяти (ОП);

обеспечение высокой производительности и предоставление развитых методов анализа больших данных (ad-hoc-аналитика) [1].

Указанные возможности открывают путь к новым сценариям распределённой обработки данных.

В работах [2, 3] предложен новый метод параллельной обработки на платформе Spark запросов к хранилищу данных (ХД) с произвольной структурой, который был назван каскадное использование фильтра Блума (КИФБ). Он опирается на применение фильтра Блума [4] для хранилищ со схемой «снежинка».

В статье [3] рассмотрена серия натурных экспериментов на кластере, состоящем из семи рабочих узлов, реализованном в облачной архитектуре, в целях сравнения метода КИФБ и метода без использования фильтра Блума (БИФБ) при реализации запроса Q3 соединения трёх таблиц к ХД (из теста TPC-H) [5]. Метод КИФБ показал лучшую производительность по сравнению с БИФБ при больших значениях коэффициента масштабирования SF.

В работе [2] отмечено, что запрос Q17 с коррелированным подзапросом для схемы ХД из теста TPC-H (рис. 1) не может быть выполнен с помощью метода Hive (SQLContext), а с помощью КИФБ — может. Однако так как Hadoop является бурно развивающейся технологией, уже менее чем через полгода для данной технологии вышло обновление, позволяющее выполнять коррелированные подзапросы, правда, с некоторыми ограничениями [6, 7]. В связи с этим целью данной работы является анализ и сравнение подходов к выполнению SQL-запросов с коррелированным подзапросом с использованием методов КИФБ и Hive.

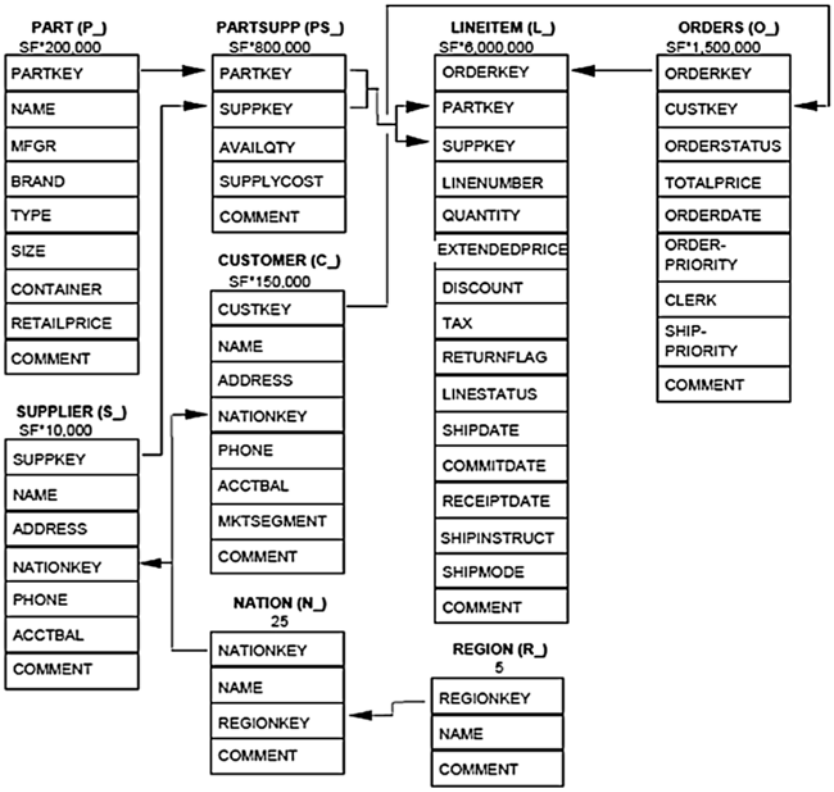

Рис. 1. Схема ХД из теста TPC-H

Для проведения экспериментального сравнения был развернут виртуальный кластер. Кластер состоит из восьми узлов, на одном из которых инсталлированы управляющие службы HDFS, Hive, Spark, Yarn. Основные характеристики каждого виртуального узла: процессор — один, два ядра; оперативная память — 8Гб; диск — 200 Гб SSD; операционная система — Ubuntu 14.16.

Особенности выполнения запросов SQL по технологии MapReduce (Hive) и на основе Spark. Hive — система управления базами данных на основе платформы Hadoop. Hive управляет данными, хранимыми в файловой системе HDFS, и предоставляет язык запросов на базе SQL, которые преобразуются в последовательность заданий ядром времени выполнения. Hive поддерживает различные форматы хранения данных, а также может работать напрямую с HDFS и Apache HBase [7].

Таким образом, Hive представляет из себя программную платформу, которая превращает SQL-запросы в цепочки MapReduce-задач. Она включает в себя следующие последовательные компоненты:

HiveQL — поддерживает язык запросов Hive Query Language, который основан на языке SQL;

Parser — разбирает входящие SQL-запросы (логический план выполнения запроса);

Optimizer — оптимизирует запрос для достижения большей эффективности;

Planner — планирует задачи на выполнение;

Executor — запускает задачи на фреймворке MapReduce.

Spark. Ключевым в работе с данными для Spark является набор RDD (Resilient Distributed Dataset), который представляет собой надёжную распределённую таблицу, но может быть и произвольным набором данных. RDD может быть полностью виртуальным и иметь инструкции по своему созданию, чтобы в случае сбоя узла была возможность восстановления RDD, или материализованным — распределённой таблицей (в памяти или на диске). Внутри набор RDD разбит на партиции, которые могут быть параллельно обработаны рабочими узлами [8, 9].

Пользователи могут создавать RDD двумя способами: загружая внешние наборы данных или распределяя коллекции объектов (например, списки или множества) с помощью программы-драйвера. После создания RDD появляется возможность выполнять два вида операций: преобразования (transformations) и действия (actions) (рис. 2). Преобразования создают новые наборы RDD на основе существующих. Примером типичного преобразования может служить фильтрация данных по заданному условию. Действия, напротив, вычисляют результат, не создавая новых наборов RDD, и возвращают его программе-драйверу или сохраняют во внешнем хранилище (например, в HDFS) [1].

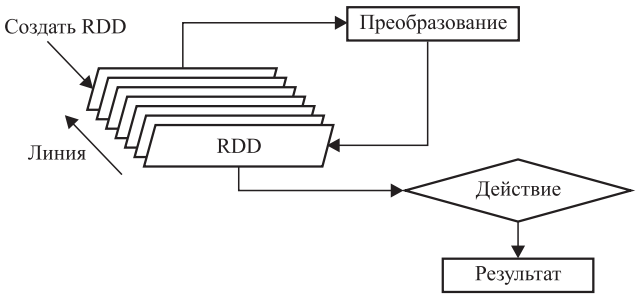

Рис. 2. Операции над структурами RDD в Spark

Алгоритм выполнения запроса Q17 с коррелированным подзапросом методом КИФБ. Разработанный метод КИФБ включает следующие шаги:

1. Представление исходного запроса в виде нескольких подзапросов. Каждый подзапрос выполняет поиск в одной таблице.

2. Разработка графа соединения и преобразования подзапросов. Определение соединений, где необходимо использовать фильтры Блума.

3. Представление графа на языке Spark.

Ниже рассмотрено использование этого метода при реализации достаточно сложного запроса Q17 из теста TCP-H, включающего коррелированный подзапрос select (табл. 1, 1-й столбец).

Таблица 1

Представление запроса Q17 в виде RDD

SQL	Spark RDD
select sum(l_extendedprice)/7.0 as avg_yearly **from** lineitem, part **where** p_partkey = l_partkey and p_brand = ‘[BRAND]’ and p_container = ‘[CONTAINER]’ and l_quantity < (**select** 0.2 * avg(l_quantity) **from** lineitem, part **where** l_partkey = p_partkey);	*Подзапрос P1:* **select** p_partkey as pr1 **from** part **where** p_brand = ‘[BRAND]’ **and** p_container = ‘[CONTAINER]’; Создание фильтра Блума BF1 для P1.pr1; *Подзапрос L1:* **select** l_partkey **as** pr1, l_extendedprice **as** e1, l_quantity **as** q1 **from** lineitem **filter** L1.pr1 = BF1; *Соединение L2:* **select** L1.pr1,L1.e1,L1.q1 **from** L1, P1 **where** L1.pr1 = P1.pr1; Создание фильтра Блума BF2 для L2.pr1; *Подзапрос A1:* **Select** L2.pr1, 0.2*avg(L2.q1) **as** a1 **from** L2 **group by** L2.pr1 **filter** A1.pr1 = BF2 *Соединение A2:* **Select sum**(L2.e1)/7.0 **from** L2,A1 **where** L2. q1<A1.a1 **and** L2. pr1 = A1.pr1

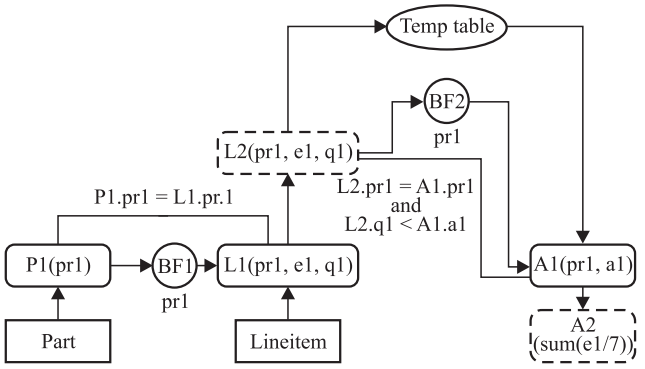

Рис. 3. Граф соединения и преобразования подзапросов для Q17

На основании описания запроса Q17 (табл. 1, 1-й столбец) были сформированы подзапросы P1, L1, A1 и соединения L2 и A2, которые представлены в табл. 1 (2-й столбец). На рис. 3 приведён граф соединения и преобразования подзапросов. Здесь приняты следующие обозначения: прямоугольниками обозначены исходные таблицы; прямоугольниками со скруглёнными углами — таблицы (RDD), которые формирует Spark после выполнения подзапросов P1, L1, A1; штриховыми прямоугольниками со скруглёнными углами (L2, A2) — результаты соединений (это также таблицы RDD); линиями со стрелками — исходные данные для формирования таблиц или выполнения операций; линиями без стрелок — условия соединений соответствующих таблиц; кружками — фильтры Блума (под ними указаны атрибуты, для которых строятся эти фильтры).

Выполнение подзапроса P1 позволяет уменьшить мощность атрибута pr1, поэтому использование здесь фильтров Блума BF1 и BF2 целесообразно. Набор RDD L2 был оформлен в виде временной таблицы (Temp table), и реализация подзапроса A1 позволила существенно уменьшить время выполнения запроса.

Здесь используются два куста в виде (таблица измерений, таблица фактов): (part, lineitem), (L2, A1). Из описания последовательности выполнения исходного запроса Q17 понятно, что по сети пересылаются компактные фильтры Блума, а не таблицы измерений. При этом соединение с таблицами фактов выполняется уже после применения к ним фильтров Блума, т. е. с уменьшенными по объёму таблицами.

Выполнение запроса Q17 с коррелированным подзапросом с помощью метода КИФБ. Сначала рассмотрим процесс выполнения запроса с помощью метода КИФБ при параметре теста TPC-H SF = 500, что соответствует объёму несжатых данных около 470 Гб и около 3000 млн записей в таблице фактов Lineitem.

На рис. 4 приведены стадии (stage) выполнения запроса с использованием КИФБ и время их реализации в Spark.

Время выполнения запроса составляет 18 + 0,3 + 438 + 10 + 8 + 8 = 482 с. Его бóльшая часть приходится на чтение таблицы LineItem.

На рис. 5 приведены объёмы данных, читаемых из файловой системы HDFS (Input), сохраняемых на локальном диске перед «перетасовкой» (Shuffle Write) и передаваемых по виртуальной сети на этапе «перетасовки» при выполнении задач reduce (Shuffle Read).

В связи с тем что кластер для эксперимента был развёрнут в виртуальной среде, время выполнения запроса может различаться от эксперимента к эксперименту, тогда как объ-

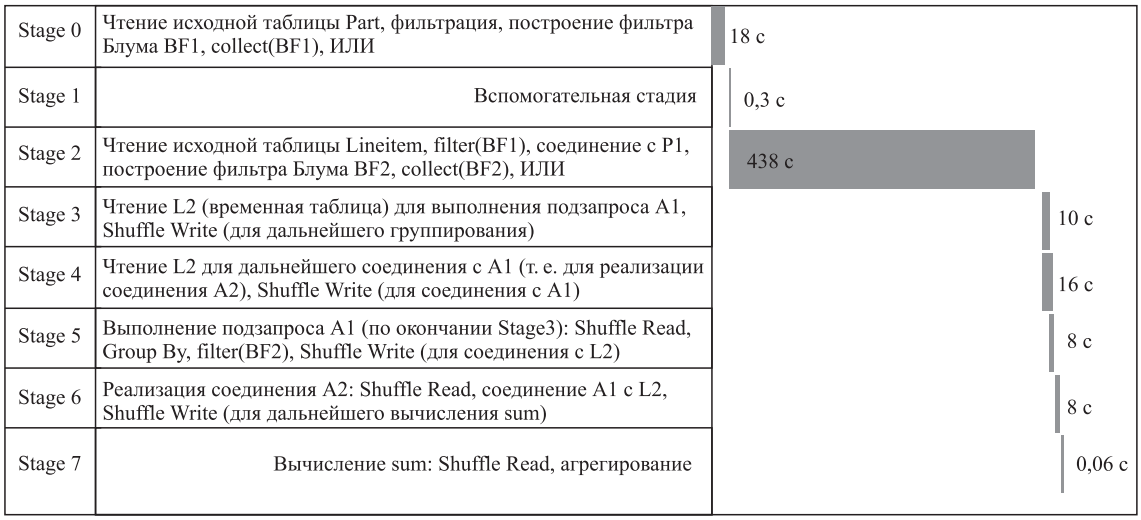

Рис. 4. Стадии и время, с, выполнения коррелированного запроса с использованием КИФБ

Stage	SF = 10			SF = 50			SF = 100			SF = 250			SF = 500		
	Input	Shuffle Read	Shuffle Write	Input	Shuffle Read	Shuffle Write	Input	Shuffle Read	Shuffle Write	Input	Shuffle Read	Shuffle Write	Input	Shuffle Read	Shuffle Write
0	6,3 Мб			31,9 Мб			64,6 Мб			178 Мб			356,3 Мб		
1	16 кб			79,2 кб			158 кб			395 кб			782,8 кб		
2	554 Мб			2,7 Гб			5,5 Гб			13,8 Гб			28,0 Гб		
3	1490 кб			9,2 Мб			18,5 Мб		7,4 Мб	46 Мб		19 Мб	91,7 Мб		37,6 Мб
4	1490 кб		378 кб	9,2 Мб		3,3 Мб		7,4 Мб	292 кб	46 Мб		33 Мб	91,7 Мб		66,4 Мб
5		378 кб	12 кб		3,3 Мб	12 кб	18,5 Мб		13,1 Мб		19 Мб	695 кб		37,6 Мб	1344 кб
6		12 кб			12 кб			13,4 Мб	12 кб		33,9 Мб	12 кб		67,7 Мб	12 кб
7								12 кб			12 кб			12 кб	

Рис. 5. Объёмы передаваемых данных для КИФБ

ёмы передаваемых данных зависят только от объёма параметра SF сконфигурированной схемы. Так, например, объём несжатой таблицы Lineitem для SF = 500 равен 500·6001215 (число записей для SF = 1)·112 (средняя длина записи в байтах) = 313 Гб (таблица распределена по семи узлам). Но на стадии 2 был получен объём таблицы 28 Гб (см. рис. 5, SF = 500). Это связано с тем, что атрибуты (колонки) исходных таблиц хранятся в формате RCFile в сжатом виде. На стадии 2 читаются все блоки таблицы Lineitem, и из них выделяются значения атрибутов (в сжатом виде), которые участвуют в подзапросе L1. Их объём и составляет 28 Гб.

Выполнение запроса Q17 с коррелированным подзапросом в Hive. Выполнение запроса Q17 состоит и трёх последовательных заданий (Stage N):

1. Выполнение внутреннего подзапроса (Stage 1):

```
SELECT      l_partkey AS agg_partkey,
            0.2 * avg(l_quantity) AS avg_quantity
FROM        lineitem, partkey
WHERE       l_partkey = p_partkey
GROUP BY    l_partkey;
```

2. Выполнение внешнего подзапроса без агрегации (Stage 2):

```
SELECT      l_extendedprice
FROM        lineitem
JOIN        part
ON          p_partkey = l_partkey
JOIN        (Stage 1)
ON          agg_partkey = l_partkey
WHERE       p_brand = 'Brand#52'
            and p_container = 'LG CAN'
            and l_quantity < avg_quantity;
```

3. Итоговая агрегация (Stage 3):

```
SELECT      sum(l_extendedprice) / 7.0 as avg_yearly
FROM        (Stage 2).
```

Эти задания оптимизатор Hive генерирует автоматически. На первом этапе выполняется агрегация (Stage 1), связанная с внутренним коррелированным подзапросом исходного запроса. В рамках второго этапа реализуются соединение таблиц Part и Lineitem, их фильтрация и фильтрация по условию коррелированного подзапроса. На последнем этапе (Stage 3) происходит итоговое вычисление агрегата sum().

Сравнение методов КИФБ и Hive. В табл. 2 показаны зависимость времени выполнения запроса Q17 от объёма хранилища данных для КИФБ и его распределение по стадиям. Видно, что доли стадий 3...7 во времени выполнения запроса незначительны для больших

Таблица 2

Распределение времени выполнения запроса Q17 по стадиям и его зависимость от объёма ХД для КИФБ

Стадия выполнения запроса	SF = 10	SF = 50	SF = 100	SF = 250	SF = 500
Stage 0	9 %	11 %	9 %	5 %	4 %
Stage 1	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Stage 2	57 %	79 %	74 %	84,5 %	88 %
Stage 3	1 %	1 %	2 %	2 %	2 %
Stage 4	2 %	3 %	4 %	4 %	4 %
Stage 5	30 %	5 %	7 %	3 %	1 %
Stage 6	0,5 %	0,5 %	4 %	1 %	1 %
Stage 7	0,5 %	0,5 %	0 %	0,5 %	0 %
Время выполнения запроса, с	39	63	113	283	482

Таблица 3

Распределение времени выполнения запроса Q17 по стадиям и его зависимость от объёма ХД для Hive

Стадия выполнения запроса	SF = 10	SF = 50	SF = 100	SF = 250	SF = 500
Stage 1	47,5 %	49 %	49 %	49 %	49 %
Stage 2	52 %	51 %	51 %	51 %	51 %
Stage 3	0,5 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Время выполнения запроса, с	198	434	736	2056	4110

Таблица 4

Временные характеристики методов Hive и КИФБ при выполнении запроса

Метод	Время выполнения запроса Q17, с				
	SF = 10	SF = 50	SF = 100	SF = 250	SF = 500
Hive	198	434	736	2056	4110
КИФБ	39	63	113	283	482
Преимущество КИФБ, раз	5,13	6,89	6,51	7,26	8,53

объёмов обрабатываемых данных. Это объясняется тем, что на этих этапах обрабатывается лишь небольшая доля записей, остальные были отфильтрованы на предыдущих этапах.

Запрос Q17 был также выполнен с помощью Hive (табл. 3). Видно, что у Hive доли стадий Stage 1 и Stage 2 в общем времени практически совпадают и размеры этих долей не изменяются с увеличением SF.

Выигрыш во времени метода КИФБ перед Hive представлен в табл. 4. Видно, что преимущество КИФБ перед Hive становится более ощутимым при увеличении объёма обрабатываемых данных.

Заключение. Разработаны программы драйвера на языке Scala, реализующие SQL-запрос Q17 с коррелированным подзапросом из теста TPC-H в среде Spark 2.

Проведена серия натурных экспериментов на кластере, состоящем из семи рабочих узлов, реализованном в облачной архитектуре, в целях сравнения методов КИФБ и Hive доступа к хранилищу данных на примере запроса Q17.

Результаты натурных экспериментов подтвердили преимущество разработанного метода КИФБ по сравнению с методом Hive. Для кластерной конфигурации предложенный метод обеспечивает более высокую скорость доступа к ХД, чем Hive (в 8,53 раза при объёме несжатых данных 470 Гб для SF = 500), так как при использовании метода КИФБ намного меньше объём промежуточных данных, сохраняемых на диске и передаваемых по сети. Это достигается благодаря возможности более гибкой декомпозиции исходного запроса на подзапросы и каскадного использования фильтра Блума (см. рис. 3).

В дальнейшем планируется разработка стоимостной модели предложенного метода КИФБ в целях поиска граничных условий его применимости.

Библиографические ссылки

1. **Spark** для профессионалов: современные паттерны обработки больших данных / С. Риза, У. Лезерсон, Ш. Оуэн, Д. Уиллс. СПб.: Питер, 2016. 272 с.

2. **Григорьев Ю.А., Пролетарская В.А., Ермаков Е.Ю.** Метод доступа к хранилищу данных по технологии Spark с каскадным использованием фильтра Блума // Информатика и системы управления. 2017. № 1. С. 3—14.

3. **Григорьев Ю.А., Пролетарская В.А., Ермаков Е.Ю.** Экспериментальная проверка эффективности метода доступа к хранилищу данных на платформе Spark с каскадным использованием фильтра Блума // Информатика и системы управления. 2017. № 3. С. 3—16.

4. **Теория** и практика анализа параллельных систем баз данных / Ю.А. Григорьев, А.Д. Плутенко, В.Л. Плужников и др. Владивосток: Дальнаука, 2015. 336 с.

5. **Документация** TPC-H // http://www.tpc.org/tpc_documents_current_versions/pdf/tpc-h_v2.17.2.pdf (Дата обращения 01.08.2018).

6. **Документация** Hive // https://cwiki.apache.org/confluence/display/Hive/Subqueries + in + SELECT (Дата обращения 01.08.2018).

7. **https:**//issues.apache.org/jira/browse/HIVE-15456 (Дата обращения 01.08.2018).

8. **Уайт Т.** Hadoop. Подробное руководство. СПб.: Питер, 2013. 672 с.

9. **Изучаем** Spark: молниеносный анализ данных / Х. Карау, Э. Конвински, П. Венделл, М. Захария. М.: ДМК Пресс, 2015. 304 с.

Ссылка для цитирования

Пролетарская В.А. Каскадное использование фильтра Блума при реализации SQL-запроса с коррелированным подзапросом на платформе параллельной обработки данных Spark 2 // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 3. С. 138—143.

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Модульное проектирование станочного оборудования как киберфизических систем на основе искусственного интеллекта и облачных технологий для цифровых производств. *Вестник машиностроения.* 2019. № 1.

Предложено модульное многоэтапное проектирование станочного оборудования как киберфизических систем с использованием искусственного интеллекта и облачных технологий.

Моделирование параметров загрузки технологических единиц рабочих центров. *Вестник машиностроения.* 2019. № 1.

Рассмотрен алгоритм оптимизации загрузки идентичного технологического оборудования в рабочих центрах механообрабатывающих цехов с целью минимизации простоев станков и обеспечения заданных сроков выпуска продукции. Алгоритм состоит из пошаговой коррекции планов загрузки станков методом перебора, число вариантов в котором существенно меньше, чем в случае полного перебора.

Математическое описание рабочего процесса механизма прессования для литья под давлением. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2019. Т. 17. № 1.

Задача исследований — разработка математической модели и программных средств, позволяющих моделировать рабочий процесс механизма прессования с дифференциальным подводом рабочей жидкости при различных конструктивных и технологических параметрах механизма прессования и пресс-формы для литья под давлением. Модель учитывает основные конструктивные особенности машин для литья под давлением, разрабатываемых Тираспольским заводом литейных машин.

Экспериментальные исследования влияния схем технологического силового воздействия на прочность сварного соединения. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2019. Т. 17. № 1.

Приведено описание методики экспериментальных исследований влияния схем технологического силового воздействия на прочность сварного соединения заготовок из титана.

Термическая обработка неперетачиваемых пластин из твёрдого сплава Т15К6 непрерывным лазерным излучением. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2019. Т. 15. № 1.

Одним из методов повышения эксплуатационных характеристик твёрдых сплавов (преимущественно двухкарбидных) является лазерное упрочнение. Отмечена перспективность применения в машиностроении лазерного упрочнения. Вместе с тем лазерное упрочнение твёрдых сплавов не получило пока широкого применения в инструментальном производстве. Это объясняется недостаточной изученностью общих закономерностей изменения свойств твёрдых сплавов в зависимости от способа лазерной обработки, а также неоднозначностью данных.

Повышение надёжности цилиндровых втулок тяжёлых дизелей нанесением плазменных покрытий. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2019. Т. 15. № 1.

Разработаны технология и оборудование для упрочнения цилиндровых втулок тяжёлых дизелей нанесением покрытий для защиты от износа. Приведены результаты исследования эффективности нанесения газотермических порошковых покрытий сверхзвуковым генератором плазмы и сокращения времени между подготовительной операцией пескоструйной обработки и напылением. Показано, что длительность всего технологического цикла нанесения покрытий сокращается, а качество покрытий по критерию износостойкости значительно улучшается.

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 25.12.2018.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 07.03.2019.	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