

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Тверской государственный технический университет»**  
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК**  
**ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО**  
**ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал**  
**№ 2 (18), 2023**

**Print ISSN 2658-5030**  
**Online ISSN 2687-0029**

Тверь 2023

**Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»**

**Главный редактор:** Болотов А.Н., д.т.н., профессор ТвГТУ

**Заместители главного редактора:**

Измайлов В.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Яблонев А.Л., д.т.н., доцент ТвГТУ

Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ

**Ответственный секретарь:** Афанасьева Л.Е., к.ф.-м.н., доцент ТвГТУ

**Члены редакционной коллегии:**

*По направлению «Машиностроение и машиноведение»*

Гершман И.С., д.т.н., профессор ВНИИЖТ

Горохов Д.Б., д.т.н., доцент БрГУ

Горячева И.Г., академик РАН, д.ф.-м.н., профессор ИПМех РАН

Иванов А.С., д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Матлин М.М., д.т.н., профессор ВолгГТУ

Мигранов М.Ш., д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН»

Солдатенков И.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ

Шоркин В.С., д.ф.-м.н., профессор ОГУ имени И.С. Тургенева

*По направлению «Транспортное, горное и строительное машиностроение»*

Березовский Н.И., д.т.н., профессор БНТУ, Республика Беларусь

Валиев Н.Г., д.т.н., профессор УГГУ

Головин К.А., д.т.н., профессор ТулГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Кантович Л.И., д.т.н., профессор НИТУ «МИСиС»

Керопян А.М., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник ООО «МНИПИИТИ»

Кондратьев А.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Рахутин М.Г., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

*По направлению «Информатика, вычислительная техника и управление»*

Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

Голенков В.В., д.т.н., профессор БГУИР, Республика Беларусь

Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева

Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ

Язенин А.В., д.ф.-м.н., профессор ТвГУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.

E-mail: [vestnik\\_tstu\\_tekh@mail.ru](mailto:vestnik_tstu_tekh@mail.ru)

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по разделам «Машиностроение и машиноведение», «Транспортное, горное и строительное машиностроение», «Информатика, вычислительная техника и управление». Журнал выходит четыре раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям:

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации;

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

2.5.3. Трение и износ в машинах;

2.8.8. Геотехнология, горные машины.

© ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Измайлов В.В., Митюрев А.А.</i> К расчету проводимости электроконтактных соединений с промежуточной жидкометаллической средой.....	5
<i>Архаров А.П.</i> Патрон цанговый для автоматической переустановки тонкостенной заготовки.....	16

### ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Яблонев А.Л., Жуков Н.М.</i> Экспериментальное обоснование угла установки фрезы торфяного бровкореза.....	21
<i>Рябко К.А., Арефьев Е.М.</i> Оценка прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов.....	31

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Илясов Л.В.</i> Исследования полупроводникового керамического преобразователя концентрации газов.....	44
<i>Баркалов С.А., Буркова И.В., Курочка П.Н., Серебрякова Е.А.</i> Моделирование инновационного развития фирмы.....	49
<i>Приходько Д.И., Мокряков А.В., Горшков В.В.</i> Моделирование информационных систем и серийного ряда гибридным жизненным циклом.....	65
<i>Шаховской А.В., Власова В.Н., Ротанов Е.Г.</i> Автоматизация производственных линий при процессе перенастройки оборудования.....	72
<i>Егоров А.Ф., Лопатин А.Г., Брыков Б.А.</i> Разработка систем управления периодическим реактором суспензионной полимеризации с учетом взаимного влияния каналов регулирования.....	78
<i>Казаков Г.В., Коробов П.В., Сидоров А.В.</i> О методической погрешности пошаговой оптимизации программы управления движением летательного аппарата на участке доведения полезных грузов.....	87
<i>Бурдо Г.Б., Болотов А.Н.</i> Оценка решений при подготовке производства.....	94
<i>Кемайкин В.К., Полыгаев А.С.</i> Архитектура глубокой нейронной сети в задаче прогнозирования координат движущейся цели.....	101
<i>Бойкова А.В.</i> Методика технико-экономического обоснования варианта переоснащения воздушно-космических сил современными образцами радиотехнических средств на основе нейросетевых технологий.....	113

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Izmailov V.V., Mityurev A.A.</i> On the calculation of conductivity of electrical contact joints with intermediate liquid metallic medium.....	5
<i>Arkharov A.P.</i> Collet chuck for thin-walled workpiece automatic reinstallation .....	16

### TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Yablonev A.L., Zhukov N.M.</i> Experimental substantiation of the grip angle of the peat edge cutter .....	21
<i>Ryabko K.A., Arefyev E.M.</i> Evaluation of strength characteristics of batteries of mine electric locomotives.....	31

### INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Ilyasov L.V.</i> Investigation of a semiconductor ceramic gas concentration converter.....	44
<i>Barkalov S.A., Burkova I.V., Kurochka P.N., Serebryakova E.A.</i> Modeling the innovative development of the firm.....	49
<i>Prikhodko D.I., Mokryakov A.V., Gorshkov V.V.</i> Modeling of information systems and series hybrid lifecycle.....	65
<i>Shakhovskoy A.V., Vlasova V.N., Rotanov E.G.</i> Automation of production lines during the process of equipment reconfiguration.....	72
<i>Egorov A.F., Lopatin A.G., Brykov B.A.</i> Development of control systems for a suspension polymerization batch reactor within the mutual influence of control channels.....	78
<i>Kazakov G.V., Korobov P.V., Sidorov A.V.</i> On the methodological error of step-by-step optimization of the aircraft motion control program in the payload adjustment section...	87
<i>Burdo G.B., Bolotov A.N.</i> Evaluation of solutions during pre-production.....	94
<i>Kemaykin V.K., Polygaev A.S.</i> Architecture of a deep neural network in the problem of predicting the coordinates of a moving target.....	101
<i>Boykova A.V.</i> Methodology for a feasibility study of the option of re-equipping the aerospace forces with modern samples of radio equipment based on neural network technologies.....	113

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 537.311.4

## К РАСЧЕТУ ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, А.А. МИТЮРЕВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22; e-mail: and.mit@westa69.ru

© Измайлов В.В., Митюрёв А.А., 2023

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования контактного взаимодействия контакт-деталей электрических аппаратов через промежуточную жидкометаллическую (ЖМ) среду на основе галлия и его эвтектических сплавов. Исследованы ЖМ-среды, предназначенные для неподвижных и скользящих электрических контактов и имеющие следующие составы (в % по массе): GaIn (77,5 % Ga / 22,5 % In); GaInSn (62 % Ga / 25 % In / 13 % Sn). Получена формула для расчета контактного сопротивления жидкометаллических контактов (ЖМК) с учетом параметров микрогеометрии шероховатой поверхности контакт-деталей и номинального контактного давления для пластического и упругого контактов. Дано описание конструкции установки для исследования электрической проводимости контакта шероховатых поверхностей через промежуточную ЖМ-среду. Сравнение теоретических и экспериментальных величин электрического сопротивления ЖМК показало их удовлетворительное соответствие.

*Ключевые слова:* микрогеометрия поверхности, параметры шероховатости, электрический контакт, жидкометаллический контакт, контактное электрическое сопротивление.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-5-15**

### ВВЕДЕНИЕ

Жидкометаллические композиционные сплавы – многофункциональные материалы, обладающие уникальными физико-химическими свойствами и имеющие перспективы широкого применения, включая робототехнику, аэрокосмическую и атомную технику, установки по электролизу и электрохимии, ускорители элементарных частиц, сверхпроводящие системы, мощные коммутационные аппараты и пр.

Одно из перспективных направлений применения таких материалов – электроконтактные устройства различного назначения. Через коммутационные электротехнические устройства (неподвижные и скользящие электрические контакты) проходит существенная доля используемой в мире электроэнергии. Даже незначительное снижение уровня электрических и механических потерь в данных устройствах эквивалентно огромной экономии энергоресурсов. Кроме того, от надежности электроконтактных устройств в значительной степени зависит надежность электротехнического оборудования и всей энергосистемы в целом.

Создание новых композиционных и легкоплавких материалов, разработка и совершенствование теории и практики использования жидкометаллических

*Вестник Тверского государственного технического университета.*

*Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

контактных устройств позволяют существенно расширить их применение. Жидкометаллические контакты (ЖМК) обладают очень малым и стабильным переходным электрическим сопротивлением, хорошими возможностями охлаждения электроконтактных узлов, не подвержены свариванию и залипанию, влиянию вибрации, могут работать при высоких температурах и в высоком вакууме. Малое контактное нажатие позволяет упростить приводные механизмы и снизить износ контакт-деталей.

Очевидные эксплуатационные достоинства ЖМК обусловили возродившийся в последнее время после некоторого спада научный и практический интерес к таким устройствам [1–5]. Тем не менее необходимы комплексные теоретические и экспериментальные исследования фрикционных и электрических характеристик ЖМК как элементов трибосистем, к которым относятся скользящие и статические электроконтактные соединения.

Цель данной работы – теоретический и экспериментальный анализ факторов, определяющих одну из основных эксплуатационных характеристик, обеспечивающих качество и надежность ЖМК, а именно контактное электросопротивление. Теоретические зависимости для расчета контактного электросопротивления позволяют выделить ключевые факторы и наметить пути достижения оптимальных эксплуатационных характеристик ЖМК.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Процессы контактного взаимодействия, в том числе трение, изнашивание и контактная проводимость, в значительной степени зависят от микрогеометрии контактирующих поверхностей [6, 7].

Одной из важных характеристик микрогеометрии шероховатой поверхности является кривая коэффициента смятия профиля, или кривая Эбботта – Файрстоуна (ГОСТ Р ИСО 4287-2014), которую часто называют опорной кривой профиля. Она характеризует распределение материала по высоте шероховатого слоя. В случае электрического контакта с промежуточной жидкометаллической (ЖМ) средой опорная кривая профиля характеризует, наряду с распределением материала шероховатого слоя твердой контакт-детали, распределение жидкого металла в объеме межконтактного пространства (рис. 1).

Участок опорной кривой до средней линии профиля можно аппроксимировать уравнением Н.Б. Демкина [8]:

$$\frac{A_r}{A_n} = \alpha \cdot t_m \cdot \left(\frac{y}{R_p}\right)^{\nu}, \quad (1)$$

где  $A_r$  и  $A_n$  – фактическая и номинальная площади контакта;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от характера контактной деформации (принимают равным 1 для пластического контакта и 0,5 – для упругого контакта; для упругопластического контакта  $0 < \alpha < 1$ );  $t_m$  – коэффициент смятия профиля (относительная опорная длина профиля) на уровне средней линии;  $y$  – координата, отсчитанная от линии выступов профиля (рис. 1а);  $R_p$  – максимальная высота выступа (пика) профиля;  $\nu$  – эмпирический показатель степени опорной кривой.

Воспользовавшись понятием эквивалентной шероховатости [8], далее будем рассматривать контакт шероховатой поверхности с гладкой (рис. 2а). Межконтактный зазор заполнен жидким металлом.

При отсутствии контактного нажатия (нормальной силы), согласно определению средней плоскости шероховатости, объем межконтактного зазора и, соответственно, жидкого металла можно найти по выражению

$$V_1 = A_n \cdot R_p.$$

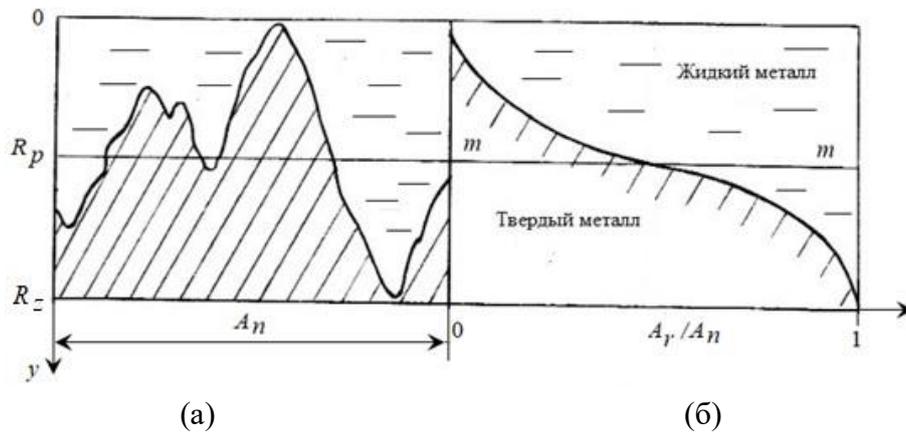


Рис. 1. Профилосограмма (а) и опорная кривая (б) шероховатой поверхности с промежуточной ЖМ-средой:  $m-m$  – средняя линия шероховатости

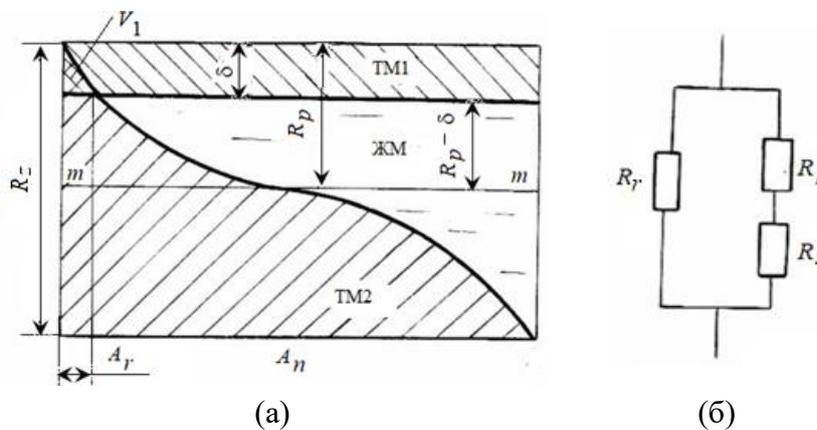


Рис. 2. Схема контакта шероховатых поверхностей с ЖМ-средой (а) и его электрическая схема замещения (б):  
 ТМ1 и ТМ2 – материал твердометаллических контакт-деталей;  
 ЖМ – жидкометаллическая среда;  $R_r$  – эквивалентное сопротивление площадок фактического контакта выступов (пиков) шероховатости;  
 $R_l$  – омическое сопротивление промежуточной ЖМ-среды;  
 $R_s$  – омическое сопротивление твердометаллических контакт-деталей в шероховатом слое

Под влиянием приложенной к контакту нормальной нагрузки выступы (пики) микронеровностей деформируются и твердые поверхности сближаются на величину  $\delta$  (см. рис. 2а). При этом объем твердого металла, вовлеченного в деформацию шероховатого слоя, равен  $V_1$  (см. рис. 2а). При пластическом контакте  $V_1 = 0$ , так как сплошная среда считается несжимаемой. При упругом контакте объем деформированного материала (твердого металла) найдется интегрированием уравнения (1):

$$V_1 = \int_0^\delta A_r(y) dy = \frac{\alpha \cdot t_m \cdot A_n \cdot R_p}{(v+1)} \cdot \left(\frac{\delta}{R_p}\right)^{v+1}.$$

Как показывают расчеты, типичная величина  $V_1$  для реальных контактных соединений составляет порядка 1 % от объема зазора, поэтому на основании рис. 2а для

оценки величины межконтактного зазора, заполненного жидким металлом, можно записать приближенное выражение

$$V_l = A_n \cdot R_p \cdot (1 - \varepsilon), \quad (2)$$

где  $\varepsilon = \delta / R_p$  – относительная деформация контакта.

Общий объем шероховатого слоя – от дна самой глубокой впадины профиля до вершины самого высокого выступа (пики) шероховатости – составляет

$$V = A_n \cdot R_z,$$

где  $R_z$  – максимальная высота профиля по ГОСТ Р ИСО 4287-2014.

Тогда объем, занятый твердометаллическим материалом:

$$V_l = V - V_l = A_n \cdot R_z - A_n \cdot R_p \cdot (1 - \varepsilon) = A_n \cdot R_z \cdot (1 - \beta + \beta \cdot \varepsilon), \quad (3)$$

где  $\beta = R_p / R_z$ .

Учитывая, что проводимость площадок контакта выступов шероховатости много меньше проводимости сплошной среды, т. е. считая  $R_r \gg R_l + R_s$  (см. рис. 2б), можно принять переходное сопротивление контакта  $R_{пер}$  равным сумме сопротивлений жидкого металла  $R_l$  в межконтактном зазоре и твердометаллического материала шероховатого слоя  $R_s$ :

$$R_{пер} = R_l + R_s, \quad (4)$$

где  $R_l \approx \frac{\rho_2 \cdot V_l}{A_n^2}$ , а  $R_s \approx \frac{\rho_1 \cdot V_s}{A_n^2}$  ( $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельные сопротивления твердого и жидкого металлов соответственно).

Из уравнений (2)–(4) получаем

$$R_{пер} = \frac{\rho_1 \cdot R_z}{A_n} \cdot [1 - \beta + \beta \cdot \varepsilon + k \cdot \beta \cdot (1 - \varepsilon)], \quad (5)$$

где  $k = \rho_2 / \rho_1$ .

Введя обозначения  $R_0 = \frac{\rho_1 \cdot R_z}{A_n}$  и  $\Phi = [1 - \beta + \beta \cdot \varepsilon + k \cdot \beta \cdot (1 - \varepsilon)]$ , уравнению (5) придадим простой вид:

$$R_{пер} = R_0 \cdot \Phi, \quad (6)$$

где  $R_0$  – сопротивление монолитного слоя толщиной  $R_z$  твердометаллического материала с номинальной площадью контакта  $A_n$  и с удельным сопротивлением  $\rho_1$ .

Величина относительного сближения контактирующих поверхностей  $\varepsilon$  зависит от номинального контактного давления [8]:

$$\varepsilon = \left( \frac{p_n}{\alpha \cdot t_m \cdot p_r} \right)^{\frac{1}{v}},$$

где  $p_n$  и  $p_r$  – номинальное и фактическое контактные давления соответственно.

При пластическом контакте фактическое давление постоянно и равно микротвердости  $p_r = H$ . При упругом контакте фактическое давление зависит от номинального, однако эта зависимость незначительна, поэтому и при упругом контакте величину фактического давления можно считать постоянной и рассчитывать по формуле [9, 10]

$$p_r \approx 0,3 \cdot E^* \cdot \sqrt{\frac{R_a}{r}}, \quad (7)$$

где  $E^*$  – эквивалентный модуль упругости материалов контактной пары;  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля по ГОСТ Р ИСО 4287-2014;  $r$  – средний радиус кривизны выступов (пиков) профиля шероховатости.

Расчитанную по формуле (7) величину фактического давления  $p_r$  иногда называют упругой твердостью.

Критерием характера контактной деформации (упругая или пластическая) служит безразмерная величина [8]

$$\Psi = \frac{E^*}{H} \cdot \sqrt{\frac{R_a}{r}}$$

При  $\Psi < 1,2$  контакт считается преимущественно упругим, при  $\Psi > 35$  – преимущественно пластическим, в остальных случаях – упругопластическим. Отметим, что величина относительного номинального давления  $p_n / p_r = A_r / A_n$  – не что иное, как относительная площадь фактического контакта твердометаллических компонентов контактной пары.

Характерный вид зависимости параметра  $\Phi$  от относительного номинального давления показан на рис. 3 для пластического и упругого характеров контакта шероховатых поверхностей с жидкометаллической межконтактной средой. Представленные зависимости соответствуют следующим параметрам контакта:  $\nu = 3$ ;  $\beta = 0,5$ ;  $k = 5$ .

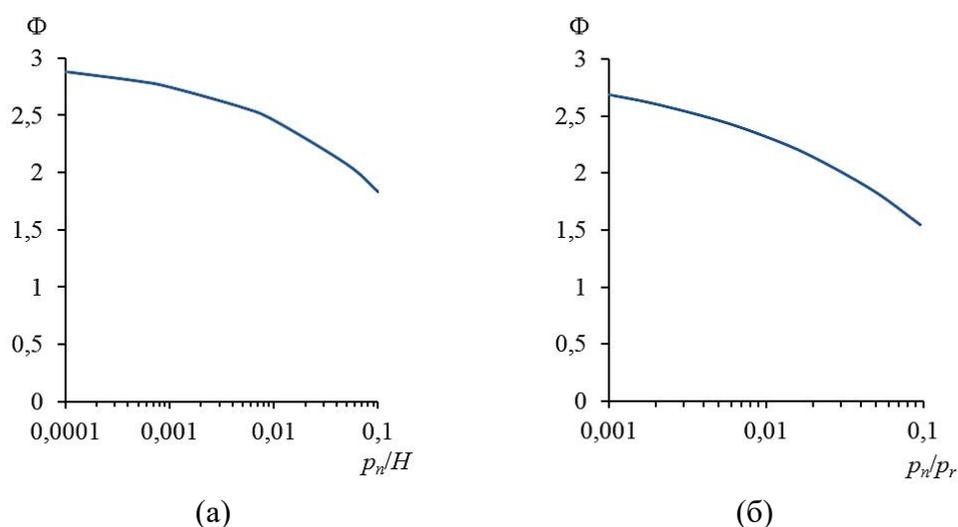


Рис. 3. Характерный вид зависимости параметра  $\Phi$  от относительного номинального давления: пластический контакт (а); упругий контакт (б)

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования электрической проводимости контакта шероховатых поверхностей через промежуточную ЖМ-среду выполняли на экспериментальной установке (рис. 4).

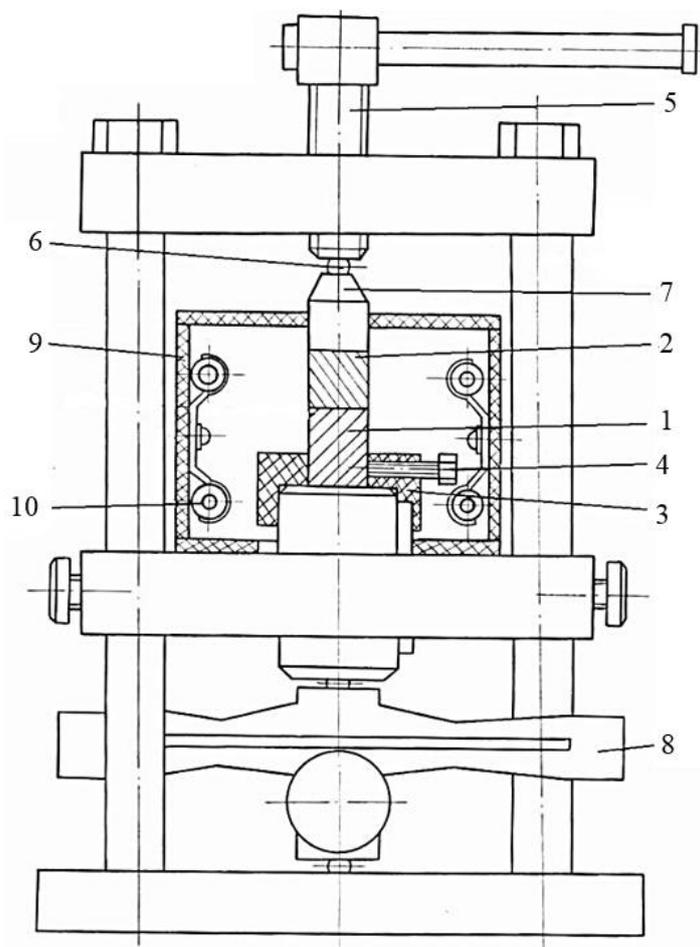


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Нижний образец 1 установлен на слюдяной прокладке в диэлектрической обойме 3 и зафиксирован винтом 4 (см. рис. 4). Нормальная нагрузка прикладывается к верхнему образцу 2 с помощью винта 5 через стальной шарик 6 и закаленный цилиндр 7 с шлифованным торцом, значение нагрузки фиксируется динамометром 8. Образцы 1 и 2 расположены внутри нагревательной камеры 9, снабженной электрическим нагревателем 10. Электрическое сопротивление контакта измеряли по четырехпроводной схеме по методу вольтметра-амперметра. Потенциальные электроды для измерения контактного падения напряжения закреплены в образцах 1 и 2 на расстоянии 3...5 мм от контактных поверхностей.

Температура образцов 1 и 2 в экспериментах изменялась в диапазоне  $T = 30...180\text{ }^{\circ}\text{C}$  в соответствии с требованиями нормативных документов на температуру частей электрических аппаратов и контролировалась термопарой. Для компенсации термо-ЭДС измерения электрического сопротивления контакта проводились при двух противоположных направлениях тока.

Исследуемые образцы 1 и 2 были изготовлены из меди, никеля и латуни ЛС59-1, широко применяемых в электротехнике при изготовлении электрических аппаратов (табл. 1). Образцы представляли собой цилиндры высотой и диаметром 20 мм. Для обеспечения плоскостности и одинаковой шероховатости рабочих поверхностей образцов в одной серии их обработку проводили в дисковом приспособлении для одновременной подготовки на токарном станке шести пар образцов. Резцом наносилась необходимая шероховатость, типичная для торцевого точения или фрезерования.

Таблица 1. Характеристики экспериментальных образцов

Материал твердометаллических контакт-деталей	Микротвердость $H$ , МПа	Модуль упругости $E^*$ , ГПа	Шероховатость $R_z$ , мкм
Медь М1	1 020	55	70...140
Никель НП2	1 950	100	70...100
Латунь ЛС59-1	1 650	55	35...130

В качестве промежуточных ЖМ-сред использовались эвтектика GaIn (77,5 масс. % Ga / 22,5 масс. % In;  $T_{пл} = 15,8$  °С) с удельным электросопротивлением  $\rho = 30,4$  мкОм·см (при 30 °С) и эвтектика GaInSn (62 масс. % Ga / 25 масс. % In / 13 масс. % Sn;  $T_{пл} = 10,3$  °С) с удельным электросопротивлением  $\rho = 33,6$  мкОм·см (при 30 °С).

Нанесение жидкого металла на шероховатые поверхности осуществлялось двумя методами: непосредственным смачиванием поверхности образцов жидким металлом и смачиванием предварительно нанесенного на поверхность образцов тонкого слоя металла-посредника (олова), хорошо взаимодействующего с галлием.

В первом случае рабочие поверхности обработанных торцевым точением образцов последовательно промывались бензином, ацетоном, этиловым техническим спиртом и протирались х/б тканью; удаление окисных пленок осуществлялось под слоем нагретого до кипения флюса (30 % канифоли, 70 % технического спирта).

Во втором случае предварительное лужение проводили с очисткой поверхности по вышеописанной методике, после образования покрытия олова толщиной 0,2...0,3 мм (определялось по привесу образцов) наносили жидкий металл. После получения жидкометаллического покрытия образцы под слоем жидкого металла нагревались до температуры  $T = 250$  °С для лучшей адгезии ЖМ-покрытия и промывались в чистом жидком металле для удаления окисных пленок с ЖМ.

Измерение микротвердости материалов твердометаллических контакт-деталей проводили на микротвердомере ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450-76 (в редакции от 1993 г.).

Очевидно, что измеренная на экспериментальной установке по четырехпроводной схеме величина сопротивления контакта  $R_z$  включает две составляющие:

$$R_z = R_{пер} + R', \quad (8)$$

где  $R_{пер}$  – переходное сопротивление контакта (определяемое, согласно ГОСТ 14312-79, эффективной площадью контактирования и равное отношению падения напряжения на контактном переходе к току через этот переход);  $R'$  – омическое сопротивление участков твердометаллических контакт-деталей между потенциальными проводами.

Значение  $R'$  для цилиндрических экспериментальных образцов находили из выражения

$$R' = \frac{4 \cdot \rho_1 \cdot l}{\pi \cdot d^2},$$

где  $\rho_1$  – удельное электрическое сопротивление материала образца;  $l$  – расстояние между потенциальными проводами;  $d$  – диаметр образца.

Понятие переходного сопротивления  $R_{\text{пер}}$  для контакта с промежуточной ЖМ-средой носит, в отличие от твердометаллического электрического контакта, несколько иной смысл и определяется сопротивлением непосредственно шероховатого слоя и жидкого металла в межконтактном зазоре, что и выражается формулой (6). При этом декларируемая ГОСТ 14312-79 трактовка величины  $R_{\text{пер}}$  как отношения падения напряжения на контактом переходе к току через этот переход, безусловно, применима и к ЖМК.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типичные зависимости сопротивления контакта от номинального контактного давления представлены на рис. 5 на примере твердометаллических контакт-деталей из латуни и никеля (см. табл. 1). Жидкометаллической промежуточной средой в первом случае служила эвтектика GaIn, во втором – GaInSn. Температура контакта в первом случае 65 °С, во втором – 20 °С.

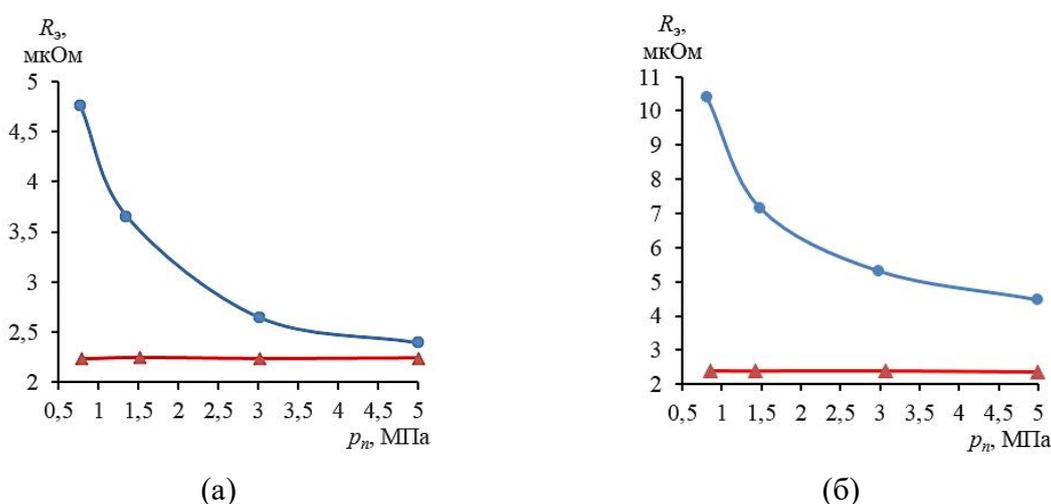


Рис. 5. Зависимость контактного электросопротивления от номинального контактного давления:

материал контакт-деталей: латунь ЛС59-1 (а); никель НИ2 (б);

● – контакт без ЖМ-среды; ▲ – контакт с промежуточной ЖМ-средой

Обращает на себя внимание принципиальное отличие представленных на рис. 5 зависимостей контактного электросопротивления от нагрузки для контактов с ЖМ-средой и без нее. Во-первых, сопротивление контакта с промежуточной ЖМ-средой существенно меньше, чем без ЖМ-среды. Во-вторых, для ЖМК оно практически не зависит от усилия нажатия.

Теоретические значения сопротивления  $R_{\text{пер}}$  рассчитаны по формуле (6), при этом значения  $R_0$  рассчитаны для диапазона значений параметров шероховатости  $R_z$  из табл. 1 и соответствующих значений удельного сопротивления твердометаллических контакт-деталей  $\rho_1$ . Значения параметра  $\Phi$  рассчитаны в соответствии с формулой (5) и представлены в табл. 2. Как видно из табл. 2, в диапазоне номинальных контактных давлений  $p_n = 0,5...5$  МПа величина параметра  $\Phi$  меняется незначительно, что отмечалось ранее (см. рис. 3). Состав исследованных ЖМ-сред также мало влияет на величину параметра  $\Phi$  из-за близких значений удельных сопротивлений эвтектик GaIn и GaInSn.

Таблица 2. Значения параметра  $\Phi$

Материал твердометаллических контакт-деталей	ЖМ-среда	Номинальное контактное давление $p_n$ , МПа	Параметр $\Phi$
Медь М1	GaIn	0,5	9,2
		5	8,6
	GaInSn	0,5	10,2
		5	9,6
Латунь ЛС 59-1	GaIn	0,5	2,8
		5	2,7
	GaInSn	0,5	3,0
		5	2,9
Никель НП2	GaIn	0,5	2,6
		5	2,5
	GaInSn	0,5	2,9
		5	2,8

Сравнение теоретических и экспериментальных значений сопротивления ЖМК представлено в табл. 3.

Поскольку экспериментально измеренные значения контактного электросопротивления  $R_3$  включают в себя омическое сопротивление образцов между потенциальными проводниками  $R_0$  (см. формулу (8)), значения  $R_{пер}$  в табл. 3 рассчитаны по формуле

$$R_{пер} = R_3 - R_0.$$

Эксперименты подтвердили сделанный выше на основании теоретического анализа вывод о том, что контакты с промежуточной ЖМ-средой по сравнению с традиционными твердометаллическими контактами обладают меньшим сопротивлением, которое при этом практически не зависит от номинального давления  $p_n$  и, соответственно, от контактного нажатия.

Сравнение теоретических и экспериментальных значений электрического сопротивления контактов с промежуточной ЖМ-средой, представленных в табл. 3, показывает их вполне удовлетворительное соответствие. Тем не менее соответствующие экспериментальные значения электрического сопротивления в целом больше теоретических значений на 14...17 %. Наиболее вероятная причина такого превышения – дополнительное поверхностное сопротивление границы раздела жидкой и твердых фаз, не учтенное в формуле (6). Источником такого сопротивления могут быть как пленки потускнения, так и интерметаллические соединения металлов твердых контакт-деталей с жидкометаллической средой.

Таблица 3. Теоретические и экспериментальные значения электрического сопротивления ЖМК

Материал контакт- деталей / ЖМ-среда	$R_{пер}$ , нОм	
	Теоретические значения по формуле (6)	Экспериментальные значения
Медь М1 / GaIn	32,7...70,0	41,2...62,4
Медь М1 / GaInSn	36,5...77,5	37,8...53,7
Латунь ЛС 59-1 / GaIn	20,0...75,3	42,3...128,1
Латунь ЛС 59-1 / GaInSn	21,5...82,0	52,0...90,4
Никель НП2 / GaIn	39,0...58,0	23,6...79,0
Никель НП2 / GaInSn	43,2...63,8	23,7...86,9

В подтверждение вышесказанного можно привести результаты статьи [11]. Так, например, на границе медной контакт-детали с жидким галлием поверхностное сопротивление  $\chi = 0,12 \cdot 10^{-10}$  Ом·м<sup>2</sup>; на границе латунной контакт-детали с жидким галлием  $\chi = 0,04 \cdot 10^{-10}$  Ом·м<sup>2</sup>. При номинальной площади контакта  $A_n = 314$  мм<sup>2</sup> значения сопротивления граничных слоев  $R_{гр} = \chi / A_n$  равны 38 и 12,7 нОм соответственно, что сравнимо с величинами  $R_{пер}$ .

Поверхностное сопротивление на межфазной границе жидкого и твердого металлов компонентов контактной пары свидетельствует о наличии резерва для снижения контактного сопротивления ЖМК путем его уменьшения или полного устранения. С этой точки зрения выражение (6) следует рассматривать как минимальную достижимую оценку электрической проводимости контакта с промежуточной ЖМ-средой, к которой следует стремиться при технологической операции подготовки поверхности твердых контакт-деталей электрических аппаратов. Пример такой операции приводится в статье [11].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механические и физические процессы контактного взаимодействия в ЖМК обладают определенными особенностями по сравнению с традиционными контактными соединениями двух твердометаллических контакт-деталей без промежуточной жидкометаллической среды. Наличие проводящей среды, заполняющей межконтактный зазор, меняет природу контактного электросопротивления: вместо стягивания линий тока к малым площадкам фактического контакта, составляющим в сумме не более нескольких процентов от номинальной площади контакта, сопротивление ЖМК в основном обусловлено омическим сопротивлением компонентов ЖМК – как твердометаллических, так и жидкометаллических. Другим фактором, влияющим на проводимость жидкометаллического контактного соединения, является состояние поверхности контакт-деталей, а именно наличие поверхностных пленок потускнения. Сведение к минимуму поверхностного сопротивления межфазной границы жидкого и твердого металлических компонентов ЖМК позволяет снизить сопротивление жидкометаллического контактного соединения по сравнению с традиционными твердометаллическими контактными парами на порядок и более.

В целом ЖМК демонстрируют положительные качества, присущие неразъемным контактными соединениям – сварным и паяным, сохраняя при этом возможность разборки соединения и относительного перемещения контакт-деталей (скользящий контакт). Экспериментально и теоретически показана слабая зависимость сопротивления контактных соединений с промежуточной ЖМ-средой от номинального давления. Этот результат дает основание уменьшить величину контактных нажатий в скользящих ЖМК (по сравнению с традиционными токопроводящими фрикционными соединениями) без ущерба для их электрической проводимости. При этом существенно снижается трение и изнашивание твердых контакт-деталей, упрощается конструкция электроконтактного узла и увеличивается его срок службы. Кроме того, малая величина контактного сопротивления устраняет перегрев контактного соединения, значительно снижая пожароопасность электрооборудования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. СПб.: Лань. 2021. 592 с.
2. State-of-the-Art of extreme pressure lubrication realized with the high thermal diffusivity of liquid metal / H.J. Li [et al.] // *ACS applied materials & interfaces*. 2017. V. 9. № 6. P. 5638–5644.

*Вестник Тверского государственного технического университета.*

*Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

3. Liquid metal as novel lubricant in a wide temperature range from  $-10$  to  $800$  °C / Y. Li [et al.] // *Materials Letters*. 2018. V. 215. P. 140–143.
4. Ga-based liquid metal: A novel current-carrying lubricant / J. Guo [et al.] // *Tribology International*. 2019. V. 135. P. 457–462.
5. Extreme pressure lubrication between ceramic and bearing steel with liquid metal / A. Xu [et al.] // *Tribology International*. 2022. V. 174. P. 107797.
6. Григорьев А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей. Минск: Беларуская навука. 2016. 247 с.
7. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Интеллект. 2009. 472 с.
8. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография. Тверь: ТГТУ. 2010. 112 с.
9. Измайлов В.В., Курова М.С. Применение бета-распределения для расчета характеристик контакта твердых тел // *Трение и износ*. 1983. Т. IV. № 6. С. 983–990.
10. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2013. 352 с.
11. Митюрёв А.А. Исследование электрической проводимости промежуточной жидкометаллической среды скользящих электрических контактов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 5–10.

**Для цитирования:** Измайлов В.В., Митюрёв А.А. К расчету проводимости электроконтактных соединений с промежуточной жидкометаллической средой // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 5–15.

## ON THE CALCULATION OF CONDUCTIVITY OF ELECTRICAL CONTACT JOINTS WITH INTERMEDIATE LIQUID METALLIC MEDIUM

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., A.A. MITYUREV, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation; e-mail: and.mit@westa69.ru

The results of a theoretical and experimental study of the contact interaction of solid contact parts of electrical devices through an intermediate liquid metal (LM) medium based on gallium and its eutectic alloys are presented. LM-media intended for fixed and sliding electrical contacts and having the following compositions (% by mass are indicated): GaIn (77.5 % Ga / 22.5 % In); GaInSn (62 % Ga / 25 % In / 13 % Sn). A formula for calculating the contact resistance of liquid metal contacts (LMC) is obtained, taking into account the parameters of the microgeometry of the rough surface of the contact parts and the nominal contact pressure for plastic and elastic contacts. A description is given of the design of an installation for studying the electrical conductivity of rough surfaces through an intermediate LM-medium. Comparison of the theoretical and experimental values of the electrical resistance of the LMC showed their satisfactory agreement.

*Keywords:* surface microgeometry, roughness parameters, electrical contact, liquid metal contact, electrical contact resistance.

Поступила в редакцию/received: 10.01.2023; после рецензирования/revised: 27.01.2023;  
принята/accepted: 03.02.2023

## ПАТРОН ЦАНГОВЫЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПЕРЕУСТАНОВКИ ТОНКОСТЕННОЙ ЗАГОТОВКИ

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22; e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

© Архаров А.П., 2023

Проанализированы конструкции известных механизированных патронов для переустановки тонкостенных заготовок. Дана схема цангового патрона с переменным движением лепестков цанги. Проведено сравнение его конструкции с другими патронами по существенным признакам. Отражены оригинальность разработки, достигаемый технический результат и область использования разработанного патрона.

*Ключевые слова:* патрон, цанга, переменное движение, механизированный, тонкостенная заготовка, закрепление, переустановка.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-16-20**

### ВВЕДЕНИЕ

При обработке заготовок в виде тел вращения на металлорежущих станках используют обрабатывающие центры с числовым программным управлением (ЧПУ) и двумя шпинделями: основным и контршпинделем. Для установки заготовок на таком оборудовании применяют трехкулачковые самоцентрирующие патроны [1], принцип действия которых основан на одновременном перемещении кулачков патрона с помощью осевого движения втулки, имеющей клиновые выступы, сопряженные с клиновыми пазами на ползунах. Привод патронов обеспечивает кулачкам неизменный характер движения при самоцентрировании и закреплении переустанавливаемой заготовки. Данные патроны обладают высокой надежностью закрепления, поскольку выполняют закрепление в трех местах поверхности заготовки [2]. Однако они предназначены для заготовок, подвижных в радиальном направлении в момент закрепления. Их использование для переустановки на контршпиндель заготовки, закрепленной в основном шпинделе, приводит к ее деформациям. Это вызвано возможными погрешностями формы поверхности, за которую заготовка закрепляется патроном контршпинделя, и отклонением ее от соосности относительно рабочей поверхности кулачков упомянутого патрона.

Устранить отмеченные недостатки можно за счет применения трехкулачкового клинового механизированного патрона с переменным движением кулачков [3]. Такой характер движения обеспечивает кулачкам вначале прижатие к закрепляемой поверхности заготовки, а затем, после прижатия всех кулачков, ее одновременное закрепление.

Проблема переустановки усложняется в случае закрепления тонкостенной заготовки из-за ее деформации кулачками ввиду ограниченной площади контакта кулачков с закрепляемой поверхностью. Чтобы уменьшить деформацию тонкостенных заготовок в патронах, применяют наладки кулачков для закрепления по поверхности с большой дугой охвата [4]. Однако при этом не удается устранить деформацию заготовки из-за неодновременного начала закрепления последней кулачками.

Для установки тонкостенных заготовок на токарных станках с ЧПУ применяют автоматический цанговый патрон, нажимной конус которого выполнен на подвижной тяге с возможностью взаимодействия с коническими участками цанги [5]. При этом лепестки цанги деформируются нажимным конусом и зажимают заготовку. Известны также цанговые оправки, содержащие в своем составе сборную тягу и конус [6, 7]. Такие оправки, как и вышеупомянутый патрон, закрепляют заготовку за отверстие. Заготовка при закреплении обладает подвижностью в радиальном направлении. При переустановке с одного шпинделя на другой тонкостенная заготовка не имеет такой подвижности, что приводит к ее деформации из-за одновременного начала закрепления лепестками цанги.

Для обеспечения равномерности закрепления тонкостенной заготовки всеми лепестками используется цанговый патрон, в котором цанга закреплена на корпусе, а нажимной конус, взаимодействующий с лепестками, установлен на тяге с возможностью радиального смещения относительно оси тяги [8]. Такое выравнивание давления повышает точность переустановки заготовки с закреплением за ее отверстия. В то же время область применения этого патрона ограничена чистовыми операциями, поскольку подвижность нажимного конуса в радиальном направлении увеличивает податливость технологической системы при последующей механической обработке. Указанный недостаток можно устранить переустановкой тонкостенной заготовки в механизированный цанговый патрон [9]. Однако для этого необходим цанговый патрон, в котором на каждый лепесток цанги будет воздействовать отдельный нажимной элемент. Разработке такого патрона посвящена данная работа.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

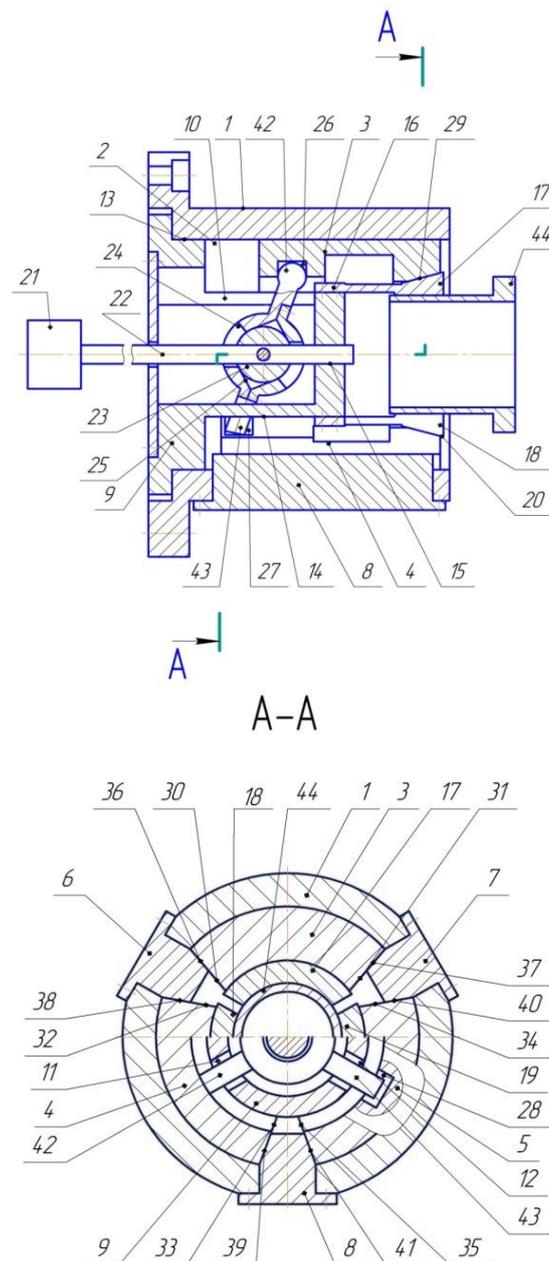
В работе применен структурный анализ известных кулачковых и цанговых механизированных патронов, а также цанговых оправок для установки заготовок на металлорежущих станках. При разработке нового патрона использовался синтез конструктивных элементов и их связей, в совокупности обеспечивающих новые свойства патрона.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Решением поставленной проблемы является спроектированный патрон, основу которого составляет трехкулачковый механизированный патрон (рисунок) [3].

Патрон цанговый механизированный содержит корпус 1 с отверстием 2, толкатель в виде трех секторов 3, 4 и 5, три направляющие 6, 7 и 8 с клиновыми частями, стакан 9 с продольными пазами 10, 11 и 12, центрирующим пояском 13, шейкой 14 и центральным отверстием 15, цангу 16 с тремя лепестками 17, 18 и 19 и наружным конусом 20 на лепестках, привод 21 со штоком 22, сферическую опору 23, закрепленную на штоке 22, и трехплечий рычаг 24 с коническим отверстием 25. На каждом из секторов 3, 4 и 5 выполнены соответственно гнезда 26, 27 и 28, внутренняя коническая поверхность 29 и боковые плоскости 30 и 31, 32 и 33, 34 и 35 соответственно. На корпусе 1 выполнены три паза, в которых закреплены направляющие 6, 7 и 8 с выходом своих клиновых частей в отверстие 2 корпуса 1. Сектор 3 сопряжен боковой плоскостью 30 с плоскостью 36 клиновой части направляющей 6, а боковой плоскостью 31 – с плоскостью 37 клиновой части направляющей 7. Сектор 4 сопряжен боковой поверхностью 32 с плоскостью 38 клиновой части направляющей 6, а боковой плоскостью 33 – с плоскостью 39 клиновой части направляющей 8. Сектор 5 сопряжен боковой плоскостью 34 с плоскостью 40 клиновой части направляющей 7, а боковой плоскостью 35 – с плоскостью 41 клиновой

части направляющей 8. Секторы 3, 4 и 5 сопряжены внутренней конической поверхностью 29 с наружным конусом 20 и размещены в отверстии 2 с возможностью осевого перемещения. Стакан 9 установлен центрирующим пояском 13 в отверстии 2. Цанга 16 закреплена на шейке 14 стакана 9. Трехплечий рычаг 24 установлен коническим отверстием 25 на сферической опоре 23 с возможностью поворота на упомянутой опоре вокруг двух координатных осей. Шток 22 расположен между секторами 3, 4 и 5 и сопряжен с центральным отверстием 15 стакана 9 с возможностью осевого перемещения. Плечи 41, 42 и 43 трехплечевого рычага 24 выполнены и расположены в продольных пазах 10, 11 и 12 соответственно, размещены своими концами соответственно в гнездах 26, 27 и 28 с возможностью взаимодействия с секторами 3, 4 и 5.



Чертеж цангового механизированного патрона

Патрон работает следующим образом. Закрепляемую заготовку 44 размещают в цанге 16 (см. рисунок). Шток 22 с помощью привода 21 перемещают вправо. Движение штока 22 плечами 41, 42 и 43 трехплечего рычага 24 через гнезда 26, 27 и 28 передается секторам 3, 4 и 5, которые перемещаются по направляющим 6, 7 и 8 в отверстиях 2 вдоль оси патрона. При этом внутренняя коническая поверхность 29, воздействуя на наружный конус 20, деформирует лепестки 17, 18 и 19. Упомянутые лепестки сближаются с заготовкой 44. В момент касания одного из лепестков заготовки 44 его движение прерывается за счет того, что сектор 3 останавливается. Трехплечий рычаг 24 поворачивается на сферической опоре 23, не прерывая при этом передачу движения через плечи 42 и 43 секторам 4 и 5 и, соответственно, лепесткам 18 и 19. Движение коснувшегося лепестка возобновляется после касания двух других лепестков закрепляемой заготовки 44. Дальнейшее совместное движение секторов 3, 4 и 5 приводит к одновременным деформациям лепестков 17, 18 и 19. При этом происходит закрепление упомянутой заготовки. Ее открепление происходит при движении штока 22 влево.

Зажимные элементы в виде лепестков цанги позволяют распределить силу закрепления на большую площадь их контакта с закрепляемой поверхностью. Это уменьшает деформацию закрепляемой заготовки.

Конструкция трех секторов с характерными для них функциями нажимных элементов дает возможность преобразовать их переменные перемещения в переменные сближения лепестков с закрепляемой поверхностью. Такой характер движения позволяет лепесткам вначале коснуться закрепляемой поверхности даже в том случае, если она имеет погрешность формы и располагается с отклонением от соосности относительно рабочей поверхности лепестков, а затем закрепить заготовку одновременно всеми лепестками. Это сокращает деформации тонкостенной заготовки, не имеющей подвижности в радиальном направлении при переустановке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ существующих конструкций кулачковых и цанговых механизированных патронов, а также цанговых оправок позволил выявить их технологические возможности, достоинства и недостатки при переустановке заготовок, не обладающих подвижностью в радиальном направлении. Разработанная конструкция цангового патрона дает возможность сообщать переменный характер движения всем его лепесткам цанги и тем самым повышать надежность и точность переустановки. Патрон может быть использован на машиностроительных предприятиях при автоматической загрузке, разгрузке и переустановке тонкостенных заготовок на технологическом оборудовании.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 24351-80. Патроны токарные самоцентрирующие трех- и двухкулачковые клиновые и рычажно-клиновые. М.: Издательство стандартов. 1993. 10 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / А.М. Дальский [и др.]. 5-е изд., испр. М.: Машиностроение-1. 2003. Т. 1. 912 с.
3. Патент РФ 2768636. *Патрон трехкулачковый клиновой механизированный* // Архаров А.П.; Заявл. 05.10.2021. Оpubл. 24.03.2022. Бюл. № 9.
4. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1985. Т. 2. 496 с.
5. Патент РФ 170965. *Автоматический цанговый патрон* // Курилов И.Н., Чуприков А.О., Никитин И.В.; Заявл. 29.12.2015. Оpubл. 16.05.2017. Бюл. № 14.

6. Патент SU 1808495. *Оправка* // Каганер А.М.; Заявл. 09.01.1991. Оpubл. 15.04.1993. Бюл. № 14.

7. ГОСТ 31.1066.02-85. Приспособления к металлорежущим станкам. Оправки с разрезными цангами для точных работ. Основные параметры и размеры. М.: Стандартиформ. 2005. 17 с.

8. Архаров А.П., Козлов А.И. Патрон цанговый механизированный // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 1 (5). С. 27–31.

9. Архаров А.П. Автоматическая переустановка тонкостенной заготовки на технологическом оборудовании // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 3 (15). С. 45–49.

**Для цитирования:** Архаров А.П. Патрон цанговый для автоматической переустановки тонкостенной заготовки // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 16–20.

## COLLET CHUCK FOR THIN-WALLED WORKPIECE AUTOMATIC REINSTALLATION

A.P. ARKHAROV, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation; e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

The relevance of the research topic is noted. Analysis of the mechanized chucks for thin-walled workpiece reinstallation on technological equipment is done. Scheme of collet petal variable motion is given below. A comparative analysis of the developed chuck and known designs is carried out. The development originality, scope of use and the achieved technical result are reflected in this work.

*Keywords:* chuck, collet, variable motion, mechanized, thin-walled workpiece, fixing, reinstallation.

Поступила в редакцию/received: 03.12.2022; после рецензирования/revised: 27.01.2023;  
принята/accepted: 03.02.2023

# ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331.002.5

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ УГЛА УСТАНОВКИ ФРЕЗЫ ТОРФЯНОГО БРОВКОРЕЗА

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, Н.М. ЖУКОВ, асп.

Тверской государственной технической университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22; e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., Жуков Н.М., 2023

Эффективность добычи фрезерного торфа во многом определяется качеством поверхности полей добычи – торфяных карт. При работе технологического оборудования вследствие выработки центральной части карты по краям образуются приканальные бровки – участки с возвышенным рельефом шириной 25–50 см. Они затрудняют удаление дождевых и талых вод, негативно влияют на производительность технологического оборудования. В ТвГТУ ведется разработка высокопроизводительного бровкореза, который за один проход мог бы срезать обе приканальные бровки в отличие от финского прототипа PRF-240, обрабатывающего за один проход лишь одну бровку. Одним из основных вопросов при создании бровкореза является нахождение оптимального угла установки фрез в поперечной плоскости, поскольку машина не должна производить забрасывание картовых каналов торфяной крошкой. Для обоснования угла установки фрез проведен комплексный лабораторный эксперимент, показавший, что оптимальным является угол установки фрез 20°.

*Ключевые слова:* торфяная карта, профилировщик краев, бровкорез, штифтовые ножи, косоугольное фрезерование, торфяная крошка, картовый канал.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-21-30**

### ВВЕДЕНИЕ

При фрезерном способе добычи торфа происходит постепенная (послойная) сработка торфяных полей (карт) [1, 2]. Однако приканальная часть площадок карт шириной 0,25–0,5 м не вырабатывается, так как это места повышенной влажности залежи и пониженной ее несущей способности [3], сильно осложняющие работу технологического оборудования. Образуются так называемые бровки, затрудняющие процесс добычи торфа и нарушающие ранее созданный выпуклый поперечный рельеф торфяных карт, необходимый для беспрепятственного удаления дождевых и вешних вод.

Поскольку поддержание ровного выпуклого рельефа является актуальной задачей, от качественного решения которой зависит весь последующий технологический процесс добычи торфа [4], то либо полностью профилируют поверхность карт заново большими шнековыми профилировщиками, либо срезают образовавшиеся бровки специальными машинами – бровкорезами. Полное

профилирование поверхности – весьма энергозатратная операция [5], требующая большого количества времени и средств. Поэтому выполнение полного профилирования поверхности карты после 4–5 циклов добычи весьма неэффективно. Менее энергозатратны различные бровкорезы, среди которых наибольшее распространение получила финская машина PRF-240 (рис. 1) [6].



Рис. 1. Фрезерный бровкорез PRF-240

Машина весьма компактная, мобильная (может быть доставлена к месту работы даже на прицепе легкового автомобиля), однако обрабатывает за один проход только один край карты (одну бровку).

Программа по импортозамещению требует налаживания производства отечественной высокопроизводительной техники. С этой целью нами проведены исследования по обоснованию параметров навесного бровкореза, способного обрабатывать за один проход оба края картового поля, которые примыкают к одному картовому каналу.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Одним из основных вопросов при исследовании было обоснование угла установки фрезы бровкореза по отношению к поперечной оси машины [7, 8]. С одной стороны, этот угол должен быть небольшим, чтобы предотвратить интенсивный рост энергоемкости процесса фрезерования бровок [9–11], значительное уменьшение ширины захвата машины и уменьшение боковых усилий, передающихся на ходовую часть машины, с другой – достаточным для того, чтобы при движении не происходило забрасывание торфяной крошкой прилегающего картового канала. Решение этого вопроса сопровождалось проведением серии лабораторных экспериментальных исследований. Значительно модернизирована фрезерная лабораторная установка [12], принадлежащая кафедре «Технологические машины и оборудование» ТвГТУ, оснащенная цифровым тензометрическим оборудованием ZetLab и имеющая возможность поворота фрезы на определенный угол, т. е. проведения исследований по косоугольному фрезерованию [13].

Схема лабораторной установки представлена на рис. 2. Основой установки является вертикальная колонна 3, жестко заделанная в пол. Перемещение плиты 6 по колонне осуществляется винтом 1 со штурвалом 2, один оборот которого равен перемещению на 4 мм вверх или вниз. На плите смонтирован электродвигатель

*Вестник Тверского государственного технического университета.*

*Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

постоянного тока 7, приводящий во вращение фрезу 16 через муфту 8 и промежуточный вал 9. Плита с установленным на ней оборудованием имеет возможность поворачиваться вокруг колонны на угол  $\pm 45^\circ$ . Рядом с колонной проходит рельсовый путь 10, по которому перемещается тележка 17 с закрепленным на ней монолитом торфа 4. Тележка приводится в движение лебедкой 15 с тросом 5 от электродвигателя 11 (частота вращения ротора 950 об/мин) через две коробки передач 12 и 13 с нейтральными передачами и редуктор 14 с передаточным отношением  $i = 3,75$ , имеет благодаря этому восемь скоростей – от 0,111 до 0,571 м/с. Система тиристорного электропривода позволяет изменять частоту вращения фрезы от 0 до 2 500 об/мин.

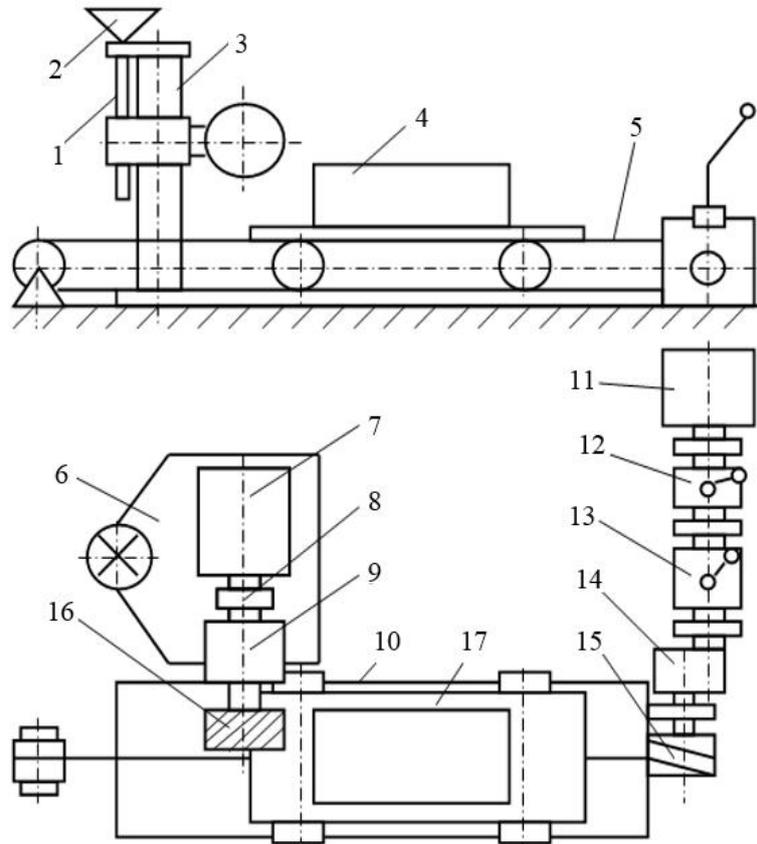


Рис. 2. Схема лабораторной установки для исследования косоугольного фрезерования

Установка оснащена пусковой и регулирующей аппаратурой, тахометром для измерения частоты вращения фрезы, S-образным тензодатчиком PST Loadcell, тензостанцией-анализатором Zet 017-T8, которая может применяться в широком диапазоне исследований и позволяет проводить фиксацию и анализ сигналов различных частот в реальном масштабе времени и сигналов, взятых из записей; измерять постоянную и переменную составляющие сигналов, переписывать их в файл с временной привязкой; регистрировать сигналы (вводить в память оцифрованные значения сигнала с последующей записью на накопитель) [14].

Фреза 1 установки (рис. 3) соединена с валом 2 ротора электродвигателя 3. Статор электродвигателя 4 установлен на балансирных опорах 5.

Момент сил сопротивления фрезерованию  $M_{\phi}$  преодолевается электромагнитным моментом, действующим на ротор со стороны статора  $M_p$ :

$$M_{\phi} = M_p.$$

Реактивный электромагнитный момент стремится повернуть статор в направлении, противоположном направлению вращения ротора. Статор удерживается от поворота силой упругости S-образного тензодатчика PST 7, рассчитанного на измерение силы растяжения – сжатия. Один конец тензодатчика через тягу шарнирно закреплен к плите, а другой шарнирно связан с жестко прикрепленным к статору двигателя двухплечим рычагом 6 (рис. 3). Второй (свободный) конец двухплечего рычага используется для тарирования устройства в случае необходимости. Таким образом, на тензостанцию Zet 017-T8 передается изменяющееся вследствие деформации S-образного тензодатчика напряжение.

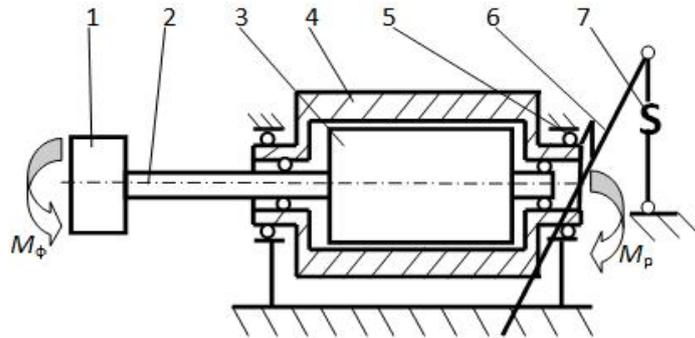


Рис. 3. Схема фиксации момента сопротивления фрезерованию

Реактивный момент на статоре двигателя  $M_p$  определяется по формуле

$$M_p = LF, \quad (1)$$

где  $L$  – длина плеча двухплечего рычага;  $F$  – упругое усилие, возникающее в тензодатчике, фиксируемое с помощью тензостанции Zet 017-T8.

Удельный расход энергии на фрезерование  $A$ , Дж/м<sup>3</sup>, высчитывается как соотношение мощности  $N_{\phi}$ , Вт, и секундной производительности аппарата  $Q_{\phi}$ , м<sup>3</sup>/с:

$$A = N_{\phi} / Q_{\phi} = \frac{M_{\phi} \omega}{B_A H w} \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения фрезы, с<sup>-1</sup>;  $B_A$  – активная ширина захвата фрезы, м;  $H$  – глубина фрезерования, м;  $w$  – скорость движения тележки с монолитом, м/с.

Угловая скорость вращения фрезы, с<sup>-1</sup>, находится по числу оборотов в минуту  $n$ , фиксируемому тахометром:

$$\omega = \pi n / 30. \quad (3)$$

Геометрическими параметрами фрезерования являются средняя толщина срезаемой стружки, подача фрезы на нож и угол контакта фрезы с торфяной залежью.

Средняя толщина срезаемой стружки  $\delta_{cp}$ , м, вычисляется по формуле

$$\delta_{cp} = \frac{cH}{R\varphi_0} \quad (4)$$

где  $c$  – подача фрезы на один нож, м;  $R$  – радиус фрезы по концам ножей, м;  $\varphi_0$  – угол контакта фрезы с залежью, рад.

Подача на нож зависит от скорости поступательного движения тележки  $w$ , м/с, числа оборотов фрезы в минуту  $n$ , об/мин, и числа ножей в плоскости резания  $z$ , шт.:

$$c = 60w/nz.$$

Угол контакта фрезы с залежью  $\varphi_0$ , °, определяется по формуле

$$\varphi_0 = \arccos \frac{R-H}{R} + \arcsin \frac{c}{2R}. \quad (5)$$

Следует отметить, что угол контакта фрезы с залежью из выражения (5), определяемый в градусах, в формулу (4) подставляется в радианах.

Возможность изменения различных параметров, таких как скорость вращения фрезы, скорость поступательного движения тележки с монолитом, а также наличие быстромонтируемых моделей фрез с ножами разных форм, позволяет выполнять опыты в значительных диапазонах изменяющихся параметров.

Для определения траектории движения фрезерной крошки проведен эксперимент на лабораторной фрезерной установке с фиксацией следов крошки на специальном экране. В ходе эксперимента из верхового торфа со степенью разложения 25–30 % был подготовлен торфяной монолит с заранее выполненной ручной сепарацией древесных включений, установлен экран. В дальнейшем монолит для формирования структурной прочности был заморожен при температуре от  $-5$  до  $-3$  °С (рис. 4).



Рис. 4. Подготовленный торфяной монолит

Экран для фиксации траектории полета крошки выполнен из полотна, закрепленного сзади фрезерной установки. Для наглядности и удобства фиксации следов крошки на экране после каждого опыта устанавливались чистые белые листы формата А1. На полотне установлена деревянная планка, условно изображающая край картового канала, совпадающий с торцовым краем фрезы (рис. 5).

Фрезерование осуществлялось при частоте вращения штифтовой фрезы 1 000 об/мин, совпадающей с частотой вращения фрезы профилировщика краев PRF-240, и скорости поступательного движения тележки 0,381 м/с. Угол поворота фрезы изменялся от 0 до 40° с шагом 5° при глубине фрезерования 8 мм.

Поскольку в ходе эксперимента угол установки фрезы изменялся, происходило и изменение активной ширины захвата фрезы. Это одно из негативных проявлений углового расположения фрезы, оценивать его предлагается коэффициентом

использования ширины фрезы  $K_b$ , который определяется как отношение активной ширины захвата фрезы  $B_A$  к общей ширине фрезы  $B$  [15, 16].

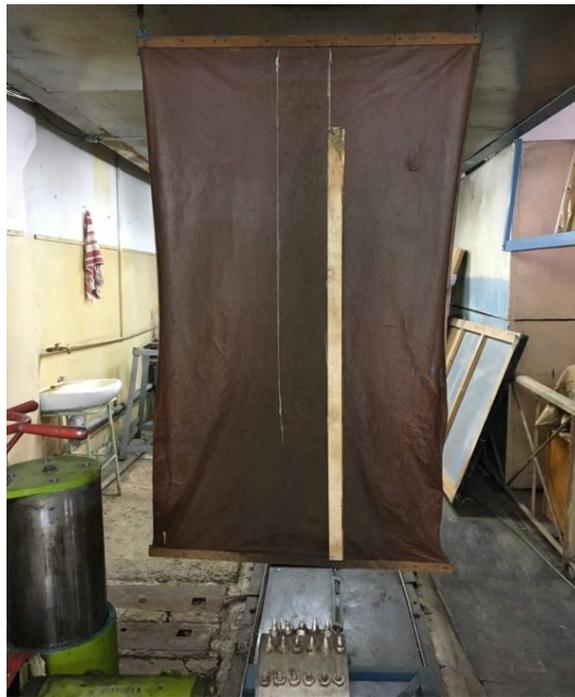


Рис. 5. Экран для фиксации траектории полета фрезерной крошки

Активная ширина фрезы  $B_A$  может быть найдена по упрощенной формуле

$$B_A = B \cdot \cos \varphi, \quad (6)$$

где  $B$  – общая ширина фрезы, мм;  $\varphi$  – угол установки фрезы в плане.

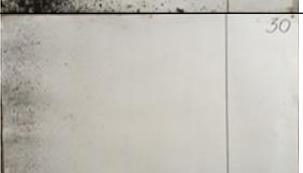
Определение энергоемкости фрезерования осуществлялось по графикам нагрузки  $F$ , снятым с помощью тензостанции Zet 017-T8 при девяти положениях фрезы с пятикратной повторяемостью опытов. При этом с целью исключения случайных составляющих производилось первое полировочное фрезерование для выравнивания монолита, после чего уже выполнялась основная серия экспериментов. Момент сил сопротивления фрезерованию определялся по формуле (1), угловая скорость вращения фрезы – по формуле (3), активная ширина захвата фрезы – по формуле (6), а удельная энергоемкость – по формуле (2).

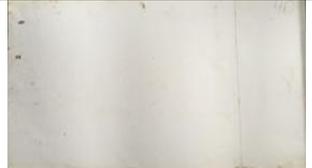
### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментов по оценке траектории полета торфяной крошки, коэффициента использования ширины захвата и средней удельной энергоемкости фрезерования при установке фрезы под углами от 0 до 40° представлены в таблице.

Как следует из анализа таблицы, уже при угле установки фрезы 20° на экране отсутствуют следы торфяной крошки, залетающей за черту (имитируемый край картового канала). Следовательно, по условию отсутствия забрасывания картового канала фрезерной крошкой угол установки фрезы  $\varphi = 20^\circ$  к поперечной плоскости машины можно считать достаточным.

Результаты исследования косоугольного фрезерования торфяного монолита

Номер серии опытов	Угол установки фрезы $\varphi$ , °	Фотография экрана	Коэффициент использования ширины фрезы $K_b$	Средняя удельная энергоёмкость фрезерования $A$ , кДж/м <sup>3</sup>
1	0		1,0	1,29
2	5		0,996	3,54
3	10		0,985	4,20
4	15		0,966	4,53
5	20		0,940	6,40
6	25		0,907	8,32
7	30		0,867	12,55
8	35		0,819	12,68

9	40		0,766	19,13
---	----	---	-------	-------

Зависимость коэффициента использования ширины фрезы от угла ее установки, полученная на основании данных таблицы, представлена на рис. 6.

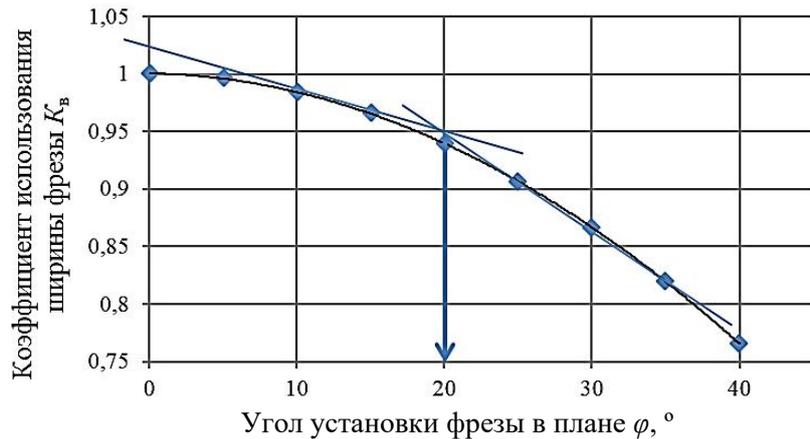


Рис. 6. Зависимость коэффициента использования ширины фрезы от угла ее установки

Как видно из рис. 6, при увеличении угла установки фрезы более  $20^\circ$  начинается более интенсивное уменьшение активной ширины захвата, что может негативно сказаться на производительности фрезерующего агрегата.

Зависимость удельной энергоёмкости фрезерования торфяного монолита от угла установки фрезы, построенная на основании данных таблицы, представлена на рис. 7.

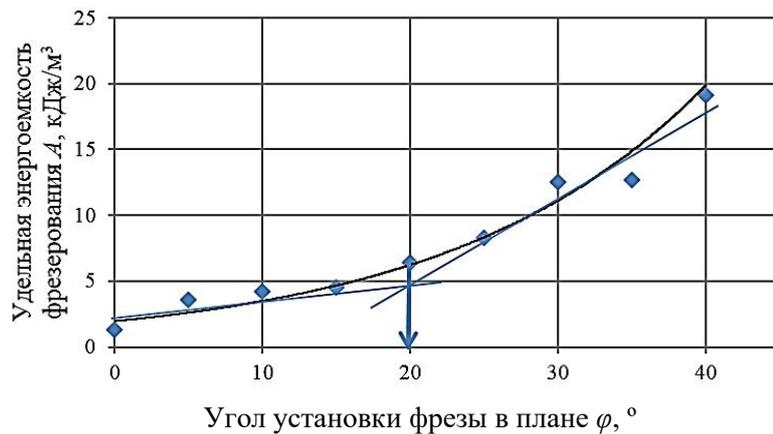


Рис. 7. Зависимость удельной энергоёмкости фрезерования от угла установки фрезы

Как видно из рис. 7, при увеличении угла установки фрезы более 20° начинается более интенсивное увеличение удельной энергоёмкости фрезерования, что также может негативно сказаться на всем производственном процессе.

Аппроксимация опытных данных позволила получить математическую модель, описывающую зависимость удельной энергоёмкости фрезерования от угла установки фрезы относительно поперечной оси при коэффициенте детерминации  $R^2 = 0,936$ :

$$A = 1,95e^{0,058\varphi}.$$

Таким образом, сразу по нескольким критериям угол установки фрезы торфяного бровкореза 20° может считаться оптимальным – по отсутствию забрасывания торфяной крошкой прилегающего картового канала, по интенсивности уменьшения активной ширины захвата фрезы и по интенсивности роста удельной энергоёмкости фрезерования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальное исследование дало возможность обосновать оптимальный угол установки фрезы торфяного бровкореза, который по критериям отсутствия забрасывания торфяной крошкой прилегающего картового канала, интенсивностям уменьшения активной ширины захвата фрезы и роста удельной энергоёмкости фрезерования составляет 20°.

Полученные результаты позволили обосновать конструкцию торфяного бровкореза, обрабатывающего за один проход обе бровки, прилегающие к картовому каналу. При этом в конструкции используются только стандартные детали и узлы, а поворот фрез на угол 20° осуществляется с помощью карданных шарниров [17].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мисников О.С., Копенкина Л.В. Возникновение торфяного дела в России // *Горный журнал*. 2020. № 2. С. 95–99.
2. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра. 1985. 211 с.
3. Framing the Peat: The Political Ecology of Finnish Mire Policies and Law / O. Ratamäki [et al.] // *Mires and Peat*. 2019. V. 24 (17). P. 1–12.
4. Kozulin A., Tanovitskaya N., Minchenko N. Developing a National Strategy for the Conservation and Sustainable Use of Peatlands in the Republic of Belarus // *Mires and Peat*. 2018. V. 21. № 5. P. 1–17.
5. Zembrowski K., Dubowski A.P. Testing the Three-phase Technology for Harvesting Biomass from Wetlands // *Mires and Peat*. 2019. V. 25. № 2. P. 1–10.
6. MERIPEAT. URL: <https://www.meripeat.com/ru/products-ru/milled-peat-production-ru> (дата обращения: 02.11.2022).
7. Cheluszka P., Jagieła-Zajac A. Determining the Position of Pick Holders on the Side Surface of the Working Unit of the Cutting Machine in the Robotic Technology of their Assembly // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. № 261. P. 012003.
8. Medolago A., Melzi S. A Flexible Multi-body Model of a Surface Miner for Analyzing the Interaction between Rock-cutting Forces and Chassis Vibrations // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021. V. 31. Is. 3. P. 365–375.
9. Фомин К.В. Методика оценки спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Записки горного института*. 2020. Т. 241. С. 58–67.

10. Фомин К.В., Рахутин М.Г. Моделирование повреждающих воздействий на режущих элементах рабочего органа фрезерующего агрегата при взаимодействии с торфом // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2019. № S39. С. 36–46.

11. Фомин К.В. Моделирование нагрузок на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата с учетом погрешности расстановки режущих элементов // *Горные науки и технологии*. 2022. Т. 7. № 2. С. 161–169.

12. Мисников О.С., Копенкина Л.В., Зюзин Б.Ф. Научные школы Московского торфяного института и их развитие в Тверском государственном техническом университете // *Горный журнал*. 2022. № 5. С. 9–22.

13. Патент РФ № 2755779. *Лабораторный стенд для исследования прямоугольного и косоугольного резания фрезой торфяных монолитов* / Яблонев А.Л., Гусева А.М., Жуков Н.М.; Заявл. 30.12.2020. Оpubл. 21.09.2021. Бюл. № 27.

14. Яблонев А.Л. Цифровое тензометрирование при лабораторном исследовании процесса фрезерования торфяной залежи // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2018. № 1. С. 182–189.

15. Яблонев А.Л., Жуков Н.М. Расчет момента сопротивления фрезерованию торфяной залежи при попадании фрезы на пень и определение активной ширины рабочего органа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 51–61.

16. Yablonev A.L., Misnikov O.S., Zhukov N.M. Analytical Calculation of the Coefficient of Increasing the Moment of Resistance to Milling the Ground when the Cutter Hits the Stump // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. № 2176. P. 012054.

17. Патент РФ на полезную модель № 180545. *Профилировщик краев торфяных карт* / Яблонев А.Л., Жуков Н.М., Гусева А.М.; Заявл. 12.03.2018. Оpubл. 18.06.2018. Бюл. № 17.

**Для цитирования:** Яблонев А.Л., Жуков Н.М. Экспериментальное обоснование угла установки фрезы торфяного бровкореза // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 21–30.

## **EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE GRIP ANGLE OF THE PEAT EDGE CUTTER**

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., N.M. ZHUKOV, postgraduate

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation; e-mail: alvovich@mail.ru

The efficiency of milled peat extraction is largely determined by the quality of the surface of the extraction fields – peat production fields. During the operation of technological equipment, due to the development of the central part of the field, near-channel edges are formed along the edges – areas with an elevated relief 25–50 cm wide. They make it difficult to remove rain and melt water, and negatively affect the performance of technological equipment. In TvSTU, work is underway to develop a high-performance edge cutter that could cut both channel edges in one pass, unlike the Finnish prototype PRF-240, which processes only one edge in one pass. One of the main issues when creating a brow cutter is to find the optimal angle of installation of the cutters in the transverse plane, since the machine should not throw peat chips into the peat production field channels. To justify the installation

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

angle of the cutters, a complex laboratory experiment was carried out, which showed that the optimal installation angle of the cutters is 20°.

*Keywords:* peat production field, edge profiler, brow cutter, pin knives, oblique milling, peat chips, peat map field channel.

Поступила в редакцию/received: 11.12.2022; после рецензирования/revised: 18.12.2022;  
принята/accepted: 25.12.2022

УДК 622.62+629.435.4

## **ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ**

К.А. РЯБКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Е.М. АРЕФЬЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения (филиал в г. Воронеже)  
394026, Воронеж, ул. Урицкого, 75а; e-mail: railroader@yandex.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)  
190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 24-26/49 литера А; e-mail: elcross@mail.ru

© Рябко К.А., Арефьев Е.М., 2023

Представлена методика оценки прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов, позволяющая определить расчетные напряжения в боковых вертикальных и горизонтальных поверхностях корпуса аккумулятора, выполненного из ударопрочных термопластов, при воздействии горизонтальных или вертикальных ударных нагрузок. Установлено, что напряжения, возникающие в боковых стенках корпуса аккумулятора с толщиной менее 12,5 мм, при критических горизонтальных ударных воздействиях превышают допускаемые значения напряжения на изгиб. Толщина стенок аккумуляторной батареи шахтного электровоза, выполненных из блок-сополимера пропилен с этиленом, должна составлять не менее 18 мм, в данном случае коэффициент запаса прочности будет составлять 1,5. Соотношение размеров сторон корпуса аккумулятора оказывает непосредственное влияние на напряжения в стенках при критических горизонтальных ударных нагрузках.

*Ключевые слова:* шахтный электровоз, аккумуляторная батарея, механические воздействия, ударопрочность, схема нагружения, расчетные напряжения, полипропилен ударопрочный.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-31-43**

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в качестве тяговых единиц вспомогательного транспорта горных предприятий все более широкое применение находят напочвенные и подвесные монорельсовые локомотивы на аккумуляторной тяге. Безопасность их эксплуатации в значительной степени зависит от качества оценки и обоснования прочностных характеристик аккумуляторных батарей.

Современные электрохимические системы шахтных напочвенных и подвесных монорельсовых локомотивов в процессе эксплуатации непрерывно подвергаются

*Вестник Тверского государственного технического университета.*

*Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

знакопеременным механическим воздействиям. Механические воздействия на аккумулятор обусловлены весом самой электрохимической системы, ее габаритами, режимами работы локомотива, профилем пути и скоростями движения. Величину и характер нагрузок на аккумуляторную батарею целесообразно определять перед вводом в эксплуатацию той или иной электрохимической системы.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

В наши дни в качестве тяговых аккумуляторных батарей шахтных электровозов находят широкое применение как жидкостные, так и безжидкостные герметичные электрохимические системы: кислотные аккумуляторные батареи с жидким или гелевым электролитом, щелочные, литий-ионные, фторид-ионные, полимерные и другие аккумуляторные батареи [1, 2]. Общим условием для применения всех типов аккумуляторных батарей является их ударопрочность, так как от целостности корпуса аккумулятора зависит его пожаровзрывобезопасность [3–5]. Особый интерес у ученых вызывает самонагрев активной массы литий-ионных аккумуляторов, который может развиваться в тепловой разгон, приводящий к быстрому повышению давления и температуры в ячейке с последующим воспламенением батареи [6]. Как известно, тепловой разгон литий-ионных аккумуляторов при эксплуатации возникает в первую очередь из-за механических повреждений или коротких замыканий элементов [7, 8]. Тепловой разгон литий-ионного аккумулятора шахтных электровозов является серьезной проблемой, поскольку воспламенение аккумуляторов может вызвать взрыв и пожар в горной выработке.

Как показал анализ публикаций, модели оценки прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов либо отсутствуют, либо дают косвенное представление о прочностных параметрах корпуса аккумулятора [9, 10]. Применяемые методы построения имитационных моделей оценки прочностных характеристик как конструкций шахтных монорельсовых локомотивов, так и их аккумуляторных батарей требуют значительных затрат времени, вычислительных мощностей и труда высококвалифицированных разработчиков электрохимических систем и программистов. В связи с этим выполненные разработки и НИОКР при проектировании шахтных электровозов на аккумуляторной тяге, как правило, недоступны широкому кругу ученых и в большинстве случаев используются для решения инженерного круга задач в рамках конкретной разработки. Поэтому оценка прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов является весьма актуальной задачей.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Шахтные аккумуляторные локомотивы в исполнении РП (рудничные повышенной надежности) применяются:

- в откаточных выработках шахт I и II категорий по газу или опасных по пыли;
- откаточных выработках со свежей струей воздуха шахт III категории и сверхкатегорийных по газу;
- откаточных выработках со свежей струей воздуха на неопасных по внезапным выбросам пластах и опасных по внезапным выбросам шахтах.

Шахтные аккумуляторные локомотивы в исполнении РВ (рудничные взрывобезопасные) эксплуатируются:

- в откаточных выработках шахт, опасных по газу или пыли;
- выработках шахт с исходящей струей воздуха и тупиковых, проветриваемых вентиляторами местного проветривания;

на шахтах III категории, сверхкатегорийных по газу и опасных по внезапным выбросам.

Все электрооборудование аккумуляторных электровозов, кроме аккумуляторных батарей, имеет взрывозащищенное исполнение, что определяется сборником документов «Безопасность горнотранспортного оборудования, электроустановок и электрооборудования угольных шахт и разрезов» [11], и должно соответствовать указанным в этих документах требованиям.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод об актуальности исследований, направленных на оценку прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполним оценку требований по прочности, предъявляемых к аккумуляторным батареям для шахтных аккумуляторных локомотивов в исполнении РП и РВ:

1) конструкция батарейных ящиков и аккумуляторных батарей должна выдерживать испытания, а также отвечать требованиям действующей нормативно-технической документации;

2) в некоторых случаях допускается в отсеках батарейных ящиков напряжение свыше 40 В, если приняты дополнительные меры по обеспечению высокого сопротивления изоляции аккумуляторных батарей относительно корпуса ящика;

3) батарейные ящики должны изготавливаться с учетом возможности снятия их с локомотива;

4) сборка элементов в батарею должна выполняться с помощью гибких изолированных перемычек, которые не должны испытывать внешние механические нагрузки.

В требованиях, предъявляемых к аккумуляторным батареям автономных шахтных электровозов в исполнении РП и РВ, не оговариваются требования по прочности самих аккумуляторных батарей, а требования к ящикам весьма поверхностные и не регламентируют количественных параметров ударопрочности аккумуляторного ящика и самого аккумулятора [11].

Вне зависимости от схемы компоновки или электрохимической системы механические нагрузки, воздействующие на аккумуляторный ящик, передаются на элементы аккумуляторной батареи [12].

В процессе эксплуатации шахтных электровозов возникают статические и динамические механические воздействия. К статическим нагрузкам можно отнести вес аккумуляторной батареи и усилия, возникающие в местах ее крепления к батарейному отсеку. Динамические усилия возникают преимущественно в процессе движения или аварийной ситуации, к ним можно отнести силы инерции, вибрации и ударные поперечные или продольные усилия. С точки зрения взрывобезопасности и надежности работы источников питания шахтных подвесных монорельсовых и напочвенных аккумуляторных локомотивов наибольшее влияние оказывают ударные механические воздействия.

Так как воздействия ударных усилий на аккумуляторный ящик имеют случайный характер, методика оценки прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов не может быть типовой. Разработка сложных аналитических зависимостей определения ударных динамических нагрузок на аккумулятор шахтного электровоза нецелесообразна, поскольку условия эксплуатации, а также возможность возникновения аварийных ситуаций оказывают существенное влияние на исходные данные. Оценка прочностных характеристик аккумуляторных

батарей шахтных электровозов целесообразно проводить с помощью приближенной методики, которая будет учитывать только влияние ударных нагрузок на электрохимическую систему и корпус аккумуляторного элемента.

Выполним оценку ударпрочности корпуса аккумулятора, изготовленного из полимерной композиции. Принимаем, что корпус аккумулятора – это пространственный полый прямоугольный параллелепипед. При данной конструкции корпуса аккумуляторного элемента можно использовать методику приближенного расчета. Отношение длины боковых продольных стенок к торцевым поперечным в большинстве конструкций тяговых аккумуляторов шахтных локомотивов составляет 2:1, что позволяет применить методику расчета цилиндрического изгиба стенки. В данном случае расчет прочности при горизонтальном ударе сводится к оценке действия горизонтальных усилий на замкнутую рамку, которая образована двумя горизонтальными секущими плоскостями.

При горизонтальных ударных нагрузках, направленных вдоль оси аккумулятора, передача усилия на корпус будет происходить по продольным стенкам. Составим расчетную схему нагружения замкнутой рамки (рис. 1).

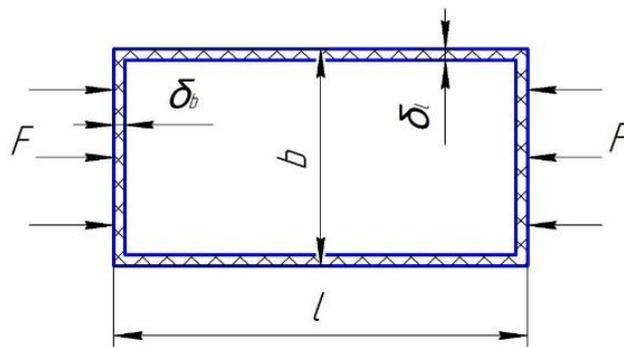


Рис. 1. Расчетная схема нагружения замкнутой рамки корпуса аккумулятора шахтного локомотива при воздействии горизонтальных ударных воздействий

Рассмотрим боковую поверхность корпуса аккумулятора. Для этого выделим из расчетной схемы боковую стенку прямоугольника с размером  $l$ . Данный элемент расчетной схемы расположен параллельно действию ударных нагрузок  $F$ , выбранный расчетный элемент представим в виде балки.

Тогда расчетное напряжение по центру данной балки с длиной  $l$  и толщиной  $\delta_l$  можно записать в виде

$$\sigma_1 = \frac{6 F h}{\delta_l^2 (1 + K)} \frac{1}{\cos \frac{l}{2} \sqrt{\frac{12 F}{E \delta_l^3}}},$$

где  $F = \frac{K_{\text{дин}} Q_{\text{АБ}} n}{2H + 2b}$  – интенсивность горизонтальных ударных нагрузок по высоте стенки корпуса ( $K_{\text{дин}}$  – коэффициент динамичности;  $Q_{\text{АБ}}$  – вес аккумуляторного элемента или батареи;  $n$  – коэффициент перегрузки;  $H$  – высота корпуса аккумулятора);  
 $h$  – плечо горизонтальных ударных нагрузок;  
 $\delta_l$  – толщина продольной стенки корпуса аккумулятора;

$K$  – коэффициент, учитывающий геометрические параметры корпуса аккумулятора,  $K = \frac{l\delta_b^3}{b\delta_l^3}$  ( $\delta_b$  – толщина поперечной стенки корпуса аккумулятора);

$E$  – модуль упругости.

Прогиб балки с длиной  $l$  и толщиной  $\delta_l$  по ее поперечной оси можно записать в виде

$$f_l = \frac{3F h l^2}{4E \delta_l^3 (1+K)} \varphi_0(u),$$

где  $\varphi_0(u)$  – функции изгиба.

Определим расчетное напряжение поперечной балки, расположенной перпендикулярно действию ударных нагрузок  $F$ , т. е. фактически данная сторона корпуса аккумулятора воспринимает динамические ударные нагрузки, при этом напряжения по центру балки и в месте сопряжения с продольной балкой будут различные.

По центру балки

$$\sigma_2 = \frac{6F h K}{\delta_b^2 (1+K)}.$$

В месте сопряжения с продольной балкой

$$\sigma_{\text{сопр}} = \frac{6F h}{\delta_b^2 (1+K)}.$$

Прогиб поперечной балки с длиной  $b$  может быть представлен выражением

$$f_b = \frac{3}{2} \frac{F b^2}{E \delta_b^3} \frac{K}{1+K}.$$

При этом критические нагрузки на вертикальные стенки корпуса аккумулятора могут быть записаны в следующем виде:

$$F_{\text{кр}l} = \frac{\pi^2 E \delta_l^2}{12l^2}; F_{\text{кр}b} = \frac{\pi^2 E \delta_b^2}{12b^2}.$$

Горизонтальные ударные воздействия на аккумуляторные батареи шахтных автономных электровозов возникают достаточно часто: при трогании с места или торможении, сцепках тяговой единицы с составом или аварийных ситуациях.

При штатных режимах работы шахтных монорельсовых подвесных или напеченных локомотивов критические вертикальные ударные нагрузки возникают достаточно редко, так как батарейный отсек практически не испытывает ударов в вертикальной плоскости, однако нагрузки, которые могут возникнуть при аварийных ситуациях, представляют наибольшую опасность для целостности корпуса батареи. Такие нагрузки могут появиться при падении тяжелых предметов на аккумуляторный отсек или падении самого аккумуляторного отсека при сходе состава с рельсов.

Рассмотрим воздействие вертикальных ударных нагрузок на горизонтальные плоскости корпуса аккумулятора. Днище и боковые стенки корпуса аккумулятора при вертикальном ударе будут испытывать распределенную ударную нагрузку от электролита и пластин с активной массой в случае жидкостной электрохимической системы и распределенную ударную нагрузку от активной массы с электродами при применении герметичных литий-ионных аккумуляторов. При этом наиболее подвержены повреждению области, расположенные в средней части боковых поверхностей корпуса аккумулятора шахтного электровоза.

Составим расчетную схему распределения нагрузок при вертикальном динамическом воздействии (рис. 2).

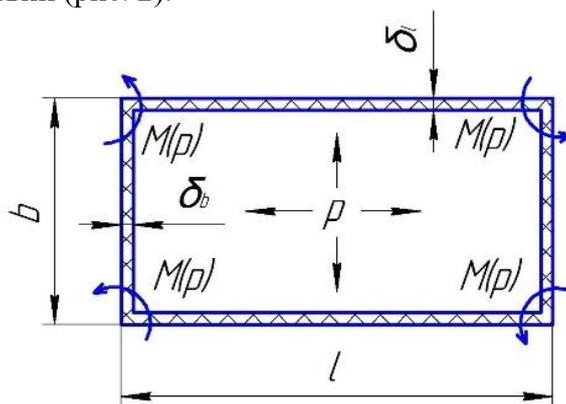


Рис. 2. Расчетная схема распределения нагрузок при вертикальном динамическом воздействии

Изгибающий момент от действия распределенной нагрузки  $p$  при вертикальном динамическом воздействии в сопрягаемых узлах боковых стенок корпуса аккумулятора может быть записан в виде

$$M_F = \frac{pb^2}{12} \frac{1+K}{1+K} \frac{l^2}{b^2},$$

где  $p$  – равномерно распределенная нагрузка динамического воздействия по длине стенки аккумулятора.

Запишем изгибающие моменты, действующие на боковые и торцевые стенки корпуса аккумулятора при вертикальных динамических воздействиях:

$$M_{изгл} = \frac{pb^2}{12(1+K)} \frac{l^2}{b^2} (1,5 + 0,5K) - 1 ;$$

$$M_{изгб} = \frac{pb^2}{12(1+K)} 0,5 + K \left( 1,5 - \frac{l^2}{b^2} \right) .$$

Осевые усилия в боковых стенках, которые возникают при ударных нагрузках на корпус аккумулятора, можно записать в виде

$$P_{ол} = \frac{pl}{2}; P_{об} = \frac{pb}{2}.$$

Соответственно, напряжения в боковых стенках корпуса аккумулятора:

$$\sigma_l = \frac{P_{ob}}{\delta_l^2} + \frac{6M_{изгл}}{\delta_l^3}; \quad \sigma_b = \frac{P_{ol}}{\delta_b^2} + \frac{6M_{изгб}}{\delta_b^3}.$$

Выполним оценку прочностных характеристик корпусов аккумуляторных батарей шахтных электровозов, выполненных из различных термопластов. Наиболее распространенными материалами для изготовления корпуса как жидкостных, гелевых, так и литий-ионных аккумуляторных батарей являются ударопрочный полипропилен (смесь гомополипропилена и этилен-пропиленового каучука или другого эластомера) и блок-сополимер пропилена с этиленом.

Ударопрочный полипропилен обладает следующими свойствами: химической стойкостью, морозостойкостью, стойкостью к ударным нагрузкам, повышенной эластичностью и устойчивостью к знакопеременным нагрузкам. Область применения ударопрочного полипропилена достаточно обширна: изготовление элементов узлов и агрегатов машин и механизмов, некоторых конструктивных элементов автомобилей и специального транспорта, элементов конструкций летательных аппаратов; в качестве конструкционного материала в электротехнике, приборостроении и др. [13].

Блок-сополимер пропилена с этиленом представляет собой модифицированный полимер пропилена с внесенным в его молекулярную цепочку в процессе синтеза этиленом. В результате такой модификации полимер приобретает улучшенные дополнительные свойства [14].

Основные свойства блок-сополимера пропилена с этиленом: огнестойкость; повышенная прочность при ударных нагрузках; устойчивость к знакопеременным механическим воздействиям; высокая стабильность и эластичность; улучшенные прочностные характеристики как на сжатие, излом, так и на растяжение; достаточно высокая устойчивость к длительному температурному влиянию (постоянная температура рабочей среды до 140 °С); высокая устойчивость к воздействию агрессивных химических веществ (электролитов); повышенные электроизоляционные качества; долговечность. Данный полимер в меньшей степени подвержен механическому износу при знакопеременных нагрузках по сравнению с обычным полипропиленом [14].

Результаты анализа свойств ударопрочного полипропилена и блок-сополимера пропилена с этиленом обуславливают целесообразность применения последнего в качестве конструкционного материала аккумуляторных батарей шахтного подземного транспорта. Основные технические характеристики полимеров, учитываемые при оценке прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов, приведены в таблице.

Основные технические характеристики полимеров  
для корпусов аккумуляторных батарей

Параметр	Материал	
	Полипропилен ударопрочный	Блок-сополимер пропилена с этиленом
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,94...0,97	0,90...0,92
Модуль упругости при изгибе, МПа, не менее	1 190	1 100
Допускаемое напряжение при изгибе, МПа	34,8	36

По приведенным зависимостям  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  для боковых поверхностей корпуса аккумулятора получены значения расчетных напряжений для данных элементов расчетной схемы (см. рис. 1), выполненных из ударопрочного полипропилена (рис. 3а) и блок-сополимера пропилена с этиленом (рис. 3б), при воздействии горизонтальных ударных нагрузок. На рис. 3, 4, 6 цифрами обозначено: 1 – напряжения в продольной стенке аккумулятора, на расчетной схеме элемент с длиной  $l$ ; 2 – напряжения в торцевой стенке аккумулятора, на расчетной схеме элемент с длиной  $b$ ; 3 – допускаемое значение напряжения на изгиб.

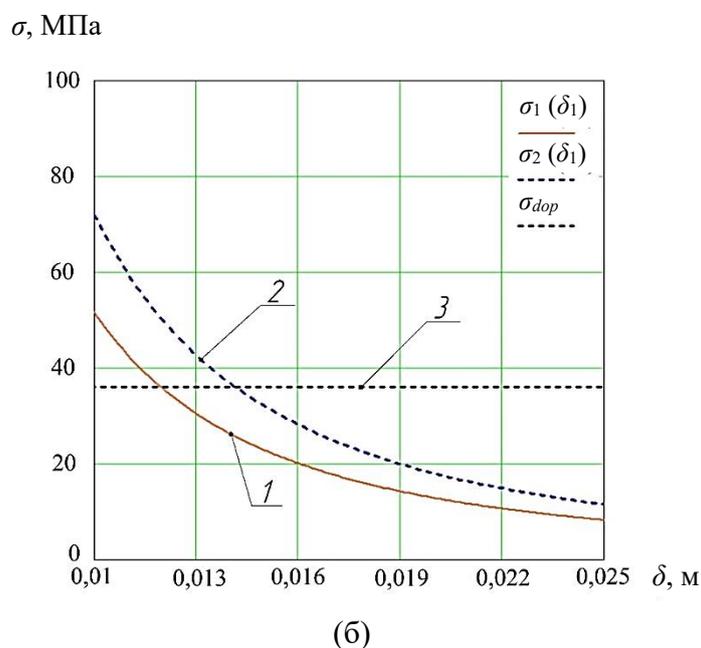
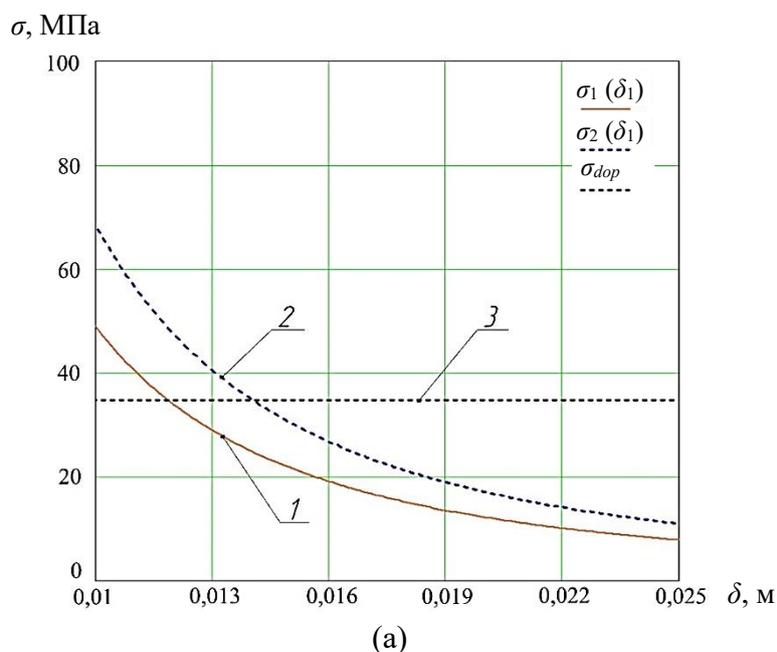
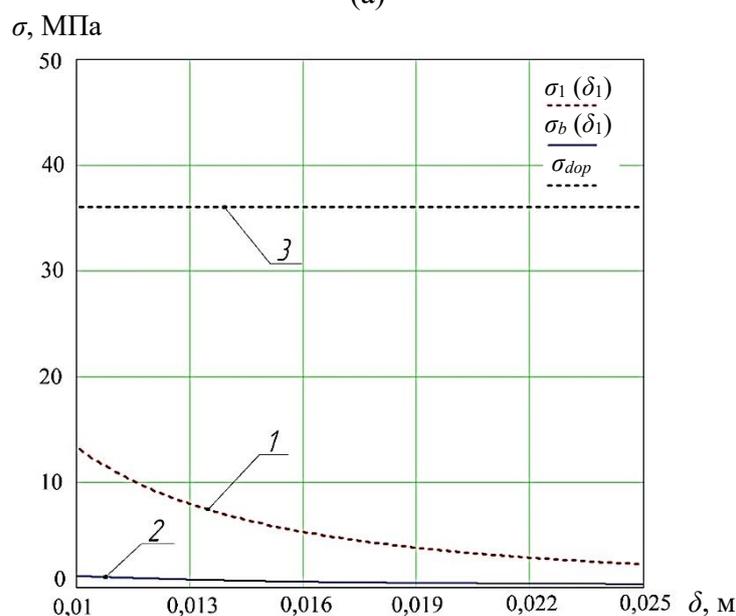
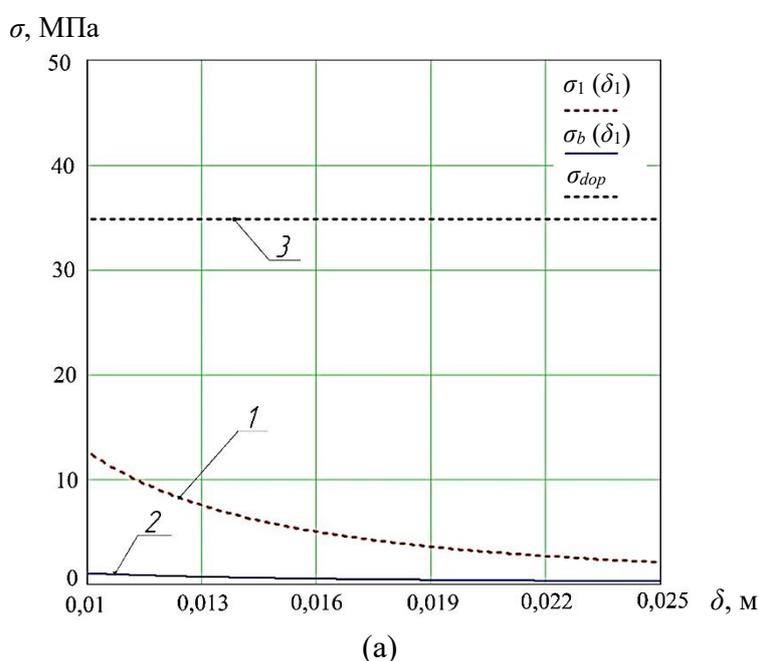


Рис. 3. Расчетные напряжения в боковых поверхностях корпуса аккумулятора шахтного электровоза, выполненного из ударопрочного полипропилена (а) и блок-сополимера пропилена с этиленом (б), при воздействии горизонтальных ударных нагрузок

По приведенным зависимостям  $\sigma_l$  и  $\sigma_b$  для боковых поверхностей корпуса аккумулятора получены значения расчетных напряжений для данных элементов расчетной схемы (см. рис. 2), выполненных из ударпрочного полипропилена (рис. 4а) и блок-сополимера пропилена с этиленом (рис. 4б), при вертикальном динамическом воздействии.

На основании полученных зависимостей можно сделать вывод, что корпус аккумуляторной батареи шахтного электровоза, выполненный из блок-сополимера пропилена с этиленом, имеет лучшие эксплуатационные и прочностные характеристики. Продольные или поперечные ударные нагрузки оказывают непосредственное воздействие на боковые стенки корпуса и определяют его ударпрочность. Это является решающим фактором при выборе толщины стенки корпуса аккумулятора шахтного электровоза для обеспечения его взрывобезопасности и соблюдения требований надежности при критических нагрузках.



(б)

Рис. 4. Расчетные напряжения в боковых поверхностях корпуса аккумулятора шахтного электровоза, выполненного из ударопрочного полипропилена (а) и блок-сополимера пропилена с этиленом (б), при вертикальном динамическом воздействии

Напряжения, возникающие в боковых стенках корпуса аккумулятора, при горизонтальных ударных воздействиях при толщине стенок менее 12,5 мм превышают допустимые значения напряжения на изгиб, что приводит к необходимости предъявлять особые требования к монтажу батареи в аккумуляторном ящике и обеспечивать ее надежное крепление в силовом каркасе.

Ударные нагрузки, воздействующие сверху на корпус батареи, определяющего влияния на толщину стенок не оказывают. Напряжения, возникающие в продольной и торцевой стенках аккумулятора, при вертикальных ударных воздействиях на горизонтальные поверхности корпуса значительно ниже допустимых значений напряжения на изгиб.

Ударопрочность будет считаться удовлетворительной при коэффициенте запаса прочности не менее 1,5, соответственно, при минимальных требованиях к силовому каркасу толщина стенок, выполненных из блок-сополимера пропилена с этиленом или ударопрочного полипропилена, должна составлять не менее 18 мм.

Можно предположить, что соотношение размеров сторон корпуса аккумулятора шахтного электровоза оказывает существенное влияние на его ударопрочность. Для проверки данной гипотезы была выполнена оценка влияния соотношения размеров сторон на напряжения в стенках, выполненных из блок-сополимера пропилена с этиленом, при фиксированном значении  $\delta_{ij} = 12,5$  мм и критических горизонтальных ударных нагрузках (рис. 5).

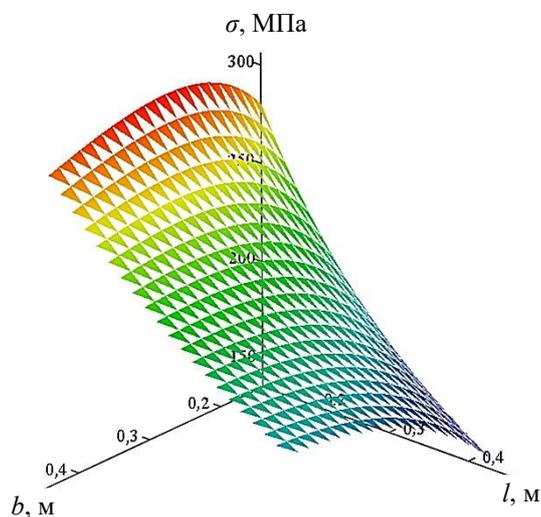


Рис. 5. Расчетные напряжения в боковых поверхностях корпуса аккумулятора шахтного электровоза, выполненного из блок-сополимера пропилена, в зависимости от соотношения боковых сторон корпуса

Направлением снижения ударных нагрузок в стенках корпуса аккумуляторных батарей шахтных электровозов может быть применение силового демпфирующего каркаса между батареями. В данном случае демпфирующий каркас воспринимает и

равномерно распределяет ударные нагрузки, вследствие этого толщину стенок корпуса аккумуляторной батареи можно снизить. Для подтверждения актуальности применения демпфирующего каркаса выполнен расчет напряжений в боковых стенках корпуса аккумуляторной батареи в зависимости от величины ударных нагрузок при фиксированном значении  $\delta_{ij} = 12,5$  мм (рис. 6). Оценка расчетных напряжений в боковых стенках корпуса аккумуляторной батареи в зависимости от величины ударных нагрузок выполнена для веса аккумуляторной батареи 20 кН. При этом следует отметить, что применение демпфирующего каркаса различных конструкций позволит снизить активный вес, участвующий в ударных нагрузках, до 1 кН.

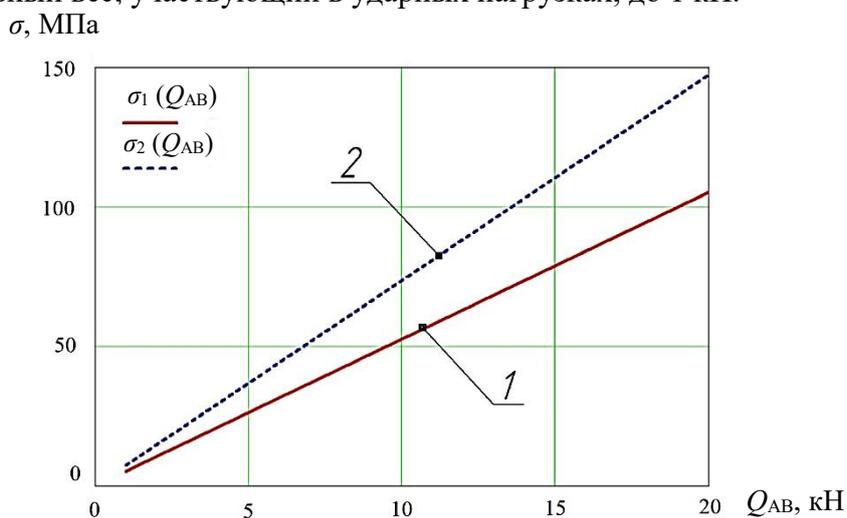


Рис. 6. Расчетные напряжения в боковых стенках корпуса аккумуляторной батареи в зависимости от величины ударных нагрузок

На основании полученных зависимостей расчетных напряжений в боковых стенках корпуса аккумуляторной батареи и с учетом величины ударных нагрузок можно сделать вывод о целесообразности применения демпфирующего каркаса аккумуляторного отсека с целью снижения значений напряжений. Однако данный вопрос требует конкретизации и уточнений, поэтому будет рассмотрен дополнительно в дальнейших исследованиях с учетом конструктивных особенностей корпуса батарей и различных электрохимических систем.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценку прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов целесообразно проводить с помощью приближенной методики, которая будет учитывать только влияние ударных нагрузок на электрохимическую систему и корпус аккумуляторного элемента.

Рассмотрены воздействия вертикальных ударных нагрузок на вертикальные и горизонтальные плоскости корпуса аккумулятора. Днище и боковые стенки корпуса аккумулятора при вертикальном ударе испытывают распределенную ударную нагрузку от электролита и пластин с активной массой в случае жидкостной электрохимической системы и распределенную ударную нагрузку от активной массы с электродами при применении герметичных гелевых или литий-ионных аккумуляторов. При этом наиболее подверженными повреждению являются области, расположенные в средней части боковых поверхностей стенок корпуса аккумулятора шахтного электровоза.

На основании анализа свойств современных конструкционных материалов корпусов аккумуляторных батарей можно сделать вывод о целесообразности

применения блок-сополимера пропилена с этиленом в качестве конструкционного материала корпусов аккумуляторных элементов шахтного подземного транспорта. Установлено, что корпус аккумуляторной батареи шахтных электровозов, выполненный из блок-сополимера пропилена с этиленом, имеет лучшие эксплуатационные и прочностные характеристики. Продольные или поперечные ударные нагрузки оказывают непосредственное воздействие на боковые стенки корпуса и определяют их ударопрочность, что является решающим фактором при выборе толщины стенок корпуса аккумулятора шахтного электровоза с целью обеспечения его взрывобезопасности и соблюдения требований надежности при критических нагрузках.

Выполненные расчеты свидетельствуют, что минимально допустимая толщина боковых стенок корпуса аккумулятора, выполненного из блок-сополимера пропилена с этиленом или ударопрочного полипропилена, при горизонтальных нагрузках должна составлять не менее 12,5 мм. При этом напряжения на изгиб не превышают допустимых значений. При вертикальных ударных воздействиях напряжения в продольной и торцевой стенках аккумулятора не превышают допустимых значений.

Установлено, что при минимальных требованиях к силовому каркасу толщина стенок аккумуляторной батареи шахтного электровоза, выполненных из блок-сополимера пропилена с этиленом или ударопрочного полипропилена, должна составлять не менее 18 мм. В данном случае ударопрочность будет считаться удовлетворительной и коэффициент запаса прочности корпуса аккумуляторного элемента будет составлять 1,5. Соотношение размеров сторон корпуса боковых стенок определяет величину напряжения в стенках. Для снижения ударных нагрузок в стенках корпуса аккумуляторных батарей шахтных электровозов может устанавливаться силовой демпфирующий каркас между батареями, который позволит снизить напряжения, возникающие вследствие ударных нагрузок, а также уменьшить толщину корпуса аккумуляторного элемента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор конструкций тяговых аккумуляторных батарей, применяемых на шахтных электровозах / В.О. Гутаревич [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020. № 2. С. 109–118.
2. Рябко К.А. Исследование процесса заряда аккумуляторных батарей шахтных подвесных монорельсовых локомотивов // *Горная механика и машиностроение*. 2022. № 2. С. 30–36.
3. Ryabko K.A. Explosion protection of batteries for mining suspended monorail locomotives // *Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции*. Кемерово: КузГТУ. 2021. С. 126.
4. ГОСТ Р 52083-2003. Аккумуляторы никель-железные открытые призматические. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов. 2003. 20 с.
5. ГОСТ Р МЭК 62485-1-2020. Батареи аккумуляторные и аккумуляторные установки. Требования безопасности. Часть 1. Общие требования безопасности. М.: Стандартинформ. 2020. 16 с.
6. Язвинская Н.Н. Исследование теплового разгона в литий-ионных аккумуляторах // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2020. № 2 (206). С. 89–95.
7. A review of lithium-ion battery thermal runaway modeling and diagnosis approaches / М.К. Tran [et al.] // *Processes*. 2022. V. 10. № 6. P. 1192.

8. Multi-field Interpretation of Internal Short Circuit and Thermal Runaway Behavior for Lithium-ion Batteries under Mechanical Abuse / H. Li [et al.] // *Energy*. 2023. V. 263. P. 126027.

9. Szlązak N., Korzec M., Cheng J. Using Battery-Powered Suspended Monorails in Underground Hard Coal Mines to Improve Working Conditions in the Roadway // *Energies*. 2022. V. 15. № 20. P. 7527.

10. An Innovative CA-190 Monorail Battery Locomotive Powered by a VOLTER Lithium Battery / T. Budniok [et al.] // *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*. 2021. V. 59. P. 63–68.

11. Безопасность горнотранспортного оборудования, электроустановок и электрооборудования угольных шахт и разрезов: сборник документов / отв. сост.-разраб. А.И. Субботин. М.: Пром. безопасность. 2008. 158 с.

12. Малахова В.В., Малахов О.В. К вопросу выбора узлов автомобиля, подлежащих модернизации, с учетом критерия повышения надежности автомобиля // *Вестник Луганского национального университета им. В. Даля*. 2019. № 6 (24). С. 171–175.

13. Рыжикова И.Г., Волков А.М., Бауман Н.А., Казаков Ю.М., Вольфсон С.И. Исследование физико-механических свойств смесей ПП/СКЭПТ, модифицированных пероксидом и системой пероксид/ТМПА // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 10. С. 134–137.

14. Реутов А.И. Надежность изделий из полимерных композиционных материалов с учетом статистической изменчивости их характеристик // *Известия Томского политехнического университета*. 2010. Т. 317. № 2. С. 58–62.

**Для цитирования:** Рябко К.А., Арефьев Е.М. Оценка прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 31–43.

## EVALUATION OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF BATTERIES OF MINE ELECTRIC LOCOMOTIVES

К.А. RYABKO<sup>1</sup>, Cand. Sc., Е.М. AREFYEV<sup>2</sup>, Cand. Sc.

<sup>1</sup> Rostov State Transport University (branch in Voronezh)  
75a, st. Uritsky, Voronezh, 394026, Russian Federation; e-mail: railroader@yandex.ru

<sup>2</sup> St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)  
24-26/49 letter A, Moskovsky prospect, St. Petersburg, 190013, Russian Federation;  
e-mail: elcross@mail.ru

The method for assessing the strength characteristics of batteries of mine electric locomotives presented in the article makes it possible to determine the calculated stresses in the lateral vertical and horizontal surfaces of the battery case made of impact-resistant thermoplastics under the influence of horizontal or vertical shock loads. It has been established that the stresses arising in the side walls of the battery case with a thickness of less than 12.5 mm, under critical horizontal impacts, exceed the allowable values of the bending stress. The thickness of the walls of the storage battery of a mine electric locomotive, made of a block copolymer of propylene with ethylene, must be at least 18 mm, in this case, the safety factor will be 1.5. The aspect ratio of the battery case has a direct effect on the stresses in the walls under critical horizontal shock loads.

*Keywords:* mining electric locomotive, storage battery, mechanical effects, impact resistance, loading scheme, design stresses, shock-resistant polypropylene.

Поступила в редакцию/received: 16.12.2022; после рецензирования/ revised: 18.12.2022;  
принята/accepted: 25.12.2022

## **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

УДК 681.5.08

### **ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КЕРАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВ**

Л.В. ИЛЯСОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22; e-mail: lvi450714@mail.ru

© Илясов Л.В., 2023

Приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на выявление принципа действия полупроводниковых керамических преобразователей концентрации газов. В инструкциях на преобразователи, выпускаемые под марками ПП-1 и ДМП-1, утверждается, что принцип их действия основан на увеличении электропроводности полупроводниковой керамики, находящейся при температуре 400–500 °С в присутствии восстанавливающих газов, в частности метана или пропана. Описаны экспериментальная установка, включающая в себя термохимический пеллисторный детектор, и методика исследования, основанная на использовании импульсного метода ввода проб таких газов, как водород, метан и пропан. Методика позволила установить, что в полупроводниковом керамическом преобразователе происходит каталитическое сгорание названных газов, вызывающее увеличение температуры и электропроводности керамики. Получены зависимости степени каталитического сгорания газа от напряжения электропитания, подводимого к чувствительному элементу полупроводникового преобразователя. Доказано, что этот чувствительный элемент может изменять свою электропроводность в зависимости от теплопроводности негорючих газов, таких как азот, гелий, диоксид углерода. Установлено, что чувствительность полупроводникового преобразователя концентрации горючих газов превосходит чувствительность широко применяемых в настоящее время пеллисторных детекторов горючих газов.

*Ключевые слова:* полупроводниковый керамический преобразователь, газ, электропроводность, каталитическое сгорание.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-44-49**

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в развитых странах мира проводятся интенсивные исследования и разработки, направленные на создание новых и совершенствование известных средств контроля концентрации газообразных и жидких сред [1–7]. Относительно новым средством измерения концентрации газов являются полупроводниковые преобразователи типа ПП-1 и полупроводниковые датчики метана типа ДМП-1, предназначенные для обнаружения взрывоопасных концентраций газов на газопроводах, в системах газоснабжения, различных помещениях, а также подземных строениях и шахтах. В инструкциях на эти средства измерения (и в работе [8]) данные преобразователи относят к термосорбционным, принцип действия которых заключается в изменении (увеличении) электропроводности полупроводниковой керамики при сорбции в ней различных газов. Анализ условий работы преобразователей концентрации (а именно подача к преобразователю смеси горючего газа с воздухом, наличие керамики и ее нагревание до температуры 400–450 °С) позволяет предположить, что принцип действия этих устройств более сложен, а формирование сигнала преобразователя связано с поверхностным сгоранием газа [9], возникающим в непосредственной близости от поверхности нагретой керамики, и повышением температуры последней за счет выделяющейся при сгорании теплоты, что приводит к увеличению электропроводности керамики, являющейся полупроводником. Процесс поверхностного сгорания углеводородных газов широко используется в промышленности в беспламенных горелках [10] и, по-видимому, является процессом каталитического окисления горючих газов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом приведенных выше факторов были проведены экспериментальные исследования, направленные на выявление принципа действия полупроводниковых преобразователей концентрации газов.

Первоначально для проверки предположения о том, что на чувствительном элементе полупроводникового преобразователя концентрации имеет место процесс каталитического сгорания анализируемых газов, была создана экспериментальная установка (рис. 1).

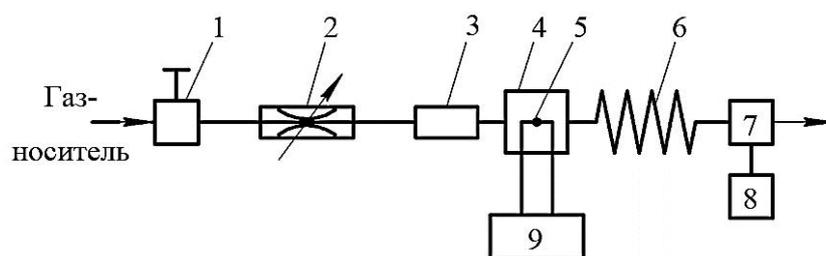


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования сгорания газов на чувствительном элементе полупроводникового преобразователя концентрации газов:

- 1 – стабилизатор давления и расхода воздуха-носителя;
- 2 – переменный дроссель;
- 3 – устройство ввода проб газов;
- 4 – проточная камера;
- 5 – чувствительный элемент полупроводникового преобразователя концентрации;
- 6 – колодка;
- 7 – пеллисторный термохимический детектор газов;
- 8 – электронный потенциометр;
- 9 – стабилизированный источник электропитания

При исследованиях использовался импульсный метод ввода пробы газов в детектор [11], обеспечивающий простоту экспериментов и не требующий большого

количества чистых газов. Экспериментальная установка состояла из стабилизатора давления и расхода газа-носителя (воздуха); переменного дросселя для настройки расхода последнего; проточной камеры, в которой размещался чувствительный элемент полупроводникового преобразователя концентрации; устройства для ввода проб анализируемых газов, размещенного по потоку газа-носителя перед проточной камерой; колонки, представляющей собой трубку из нержавеющей стали внутренним диаметром 3 мм и длиной 1 000 мм; термохимического пеллисторного детектора и электронного потенциометра. Колонка, используемая в установке, необходима для создания интервала времени между моментом ввода пробы анализируемого газа и ее поступлением в детектор, так как в момент ввода пробы за счет изменения расхода газа-носителя возможны колебания начального уровня сигнала детектора. Нагревание платиновых спиралей чувствительного элемента полупроводникового преобразователя осуществлялось током стабилизированного источника электропитания.

При проведении опытов постоянные по объему пробы водорода и пропана вводились в поток газа-носителя при различных значениях напряжения, подаваемого к чувствительному элементу от стабилизированного источника электропитания. После регистрации сигналов, вызванных введенными пробами газов, измерялась амплитуда  $U$  импульсного сигнала. Объем проб газов составлял 1 мкл. После этого источник электропитания отключался от чувствительного элемента и осуществлялись измерения амплитуд  $U_0$  возникающих импульсных сигналов. По полученным импульсным сигналам  $U$  и  $U_0$  рассчитывалась доля (степень) сгорания анализируемого газа на чувствительном элементе полупроводникового преобразователя по формуле

$$\varphi = \frac{U_0 - U}{U_0} \cdot 100.$$

Результаты опытов представлены на рис. 2.

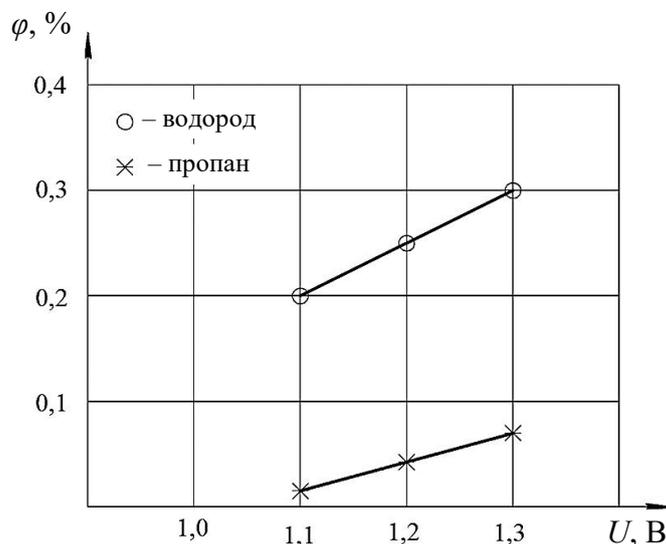


Рис. 2. Зависимости доли сгорания газов от напряжения питания нити накала

Как видно из рис. 2, максимальная степень сгорания для всех газов наблюдается при напряжении электропитания чувствительного элемента 1,3 В (максимально допустимом) и составляет для водорода 30 %, а для пропана – 7 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при работе полупроводниковых преобразователей концентрации газов происходит каталитическое

сгорание горючих веществ. Это подтверждается также двумя эффектами: увеличением инфракрасного излучения нагреваемых элементов преобразователя при обтекании их горючими газами и появлением положительных заряженных частиц при контакте названных элементов с углеводородами (метаном, пропаном, парами гексана и бензола).

Для определения формы сигналов полупроводниковых преобразователей, возникающих при измерении концентраций горючих и негорючих газов, была разработана экспериментальная установка (рис. 3).

Полупроводниковый преобразователь размещался в проточной камере и включался в схему неуравновешенного электрического моста. При работе установки через проточную камеру непрерывно прокачивался поток воздуха-носителя из последовательно включенных стабилизатора давления и расхода, переменного дросселя и колонки. В поток вводились пробы горючих (водорода, метана и пропана) и негорючих газов (азота, диоксида углерода и гелия). При этом объем проб горючих газов составлял 1 мкл, а негорючих – 0,1 мл.

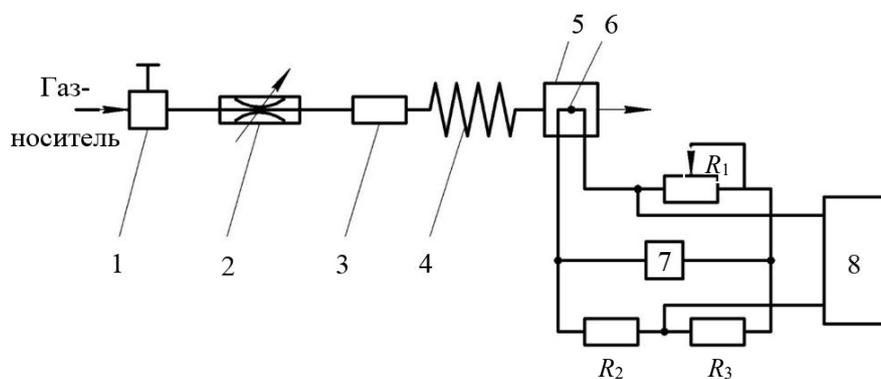


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования сигналов полупроводникового преобразователя концентрации газов: 1 – стабилизатор давления и расхода воздуха-носителя; 2 – переменный дроссель; 3 – устройство ввода проб газов; 4 – колонка; 5 – проточная камера; 6 – чувствительный элемент полупроводникового преобразователя концентрации газов; 7 – стабилизированный источник электропитания; 8 – электронный потенциометр

На рис. 4 приведены импульсные сигналы полупроводникового преобразователя концентрации газов, полученные при расходе воздуха-носителя 2 л/ч, напряжении питания неуравновешенного моста 2,6 В и при температуре 20 °С.

Диоксида углерода

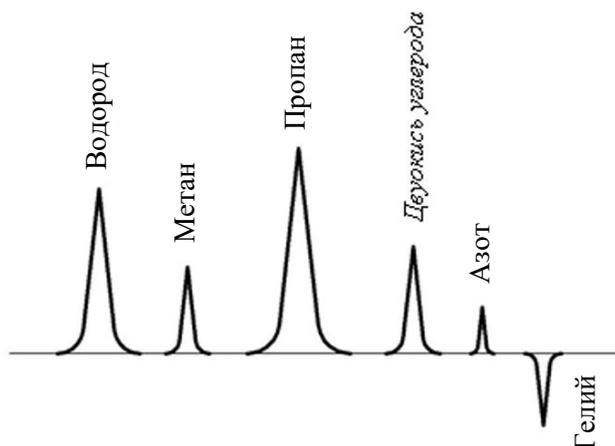


Рис. 4. Сигналы полупроводникового преобразователя концентрации для различных газов

Как видно из рис. 4, сигналы полупроводникового преобразователя концентрации для горючих газов имеют положительную полярность, для диоксида углерода и азота – также положительную полярность, а для гелия – отрицательную. Положительные сигналы горючих газов при малых объемах проб значительно превосходят сигналы негорючих газов при больших объемах. При этом диоксид углерода и азот вызывают положительные сигналы, а гелий – отрицательный. Данный факт можно объяснить тем, что по сравнению с воздухом диоксид углерода и азот имеют меньшую теплопроводность, а гелий – большую. Вследствие этого при поступлении в проточную камеру диоксида углерода и азота уменьшается теплоотвод от чувствительного элемента полупроводникового преобразователя, что вызывает сигнал, соответствующий повышению температуры чувствительного элемента полупроводникового преобразователя. При протекании через камеру гелия теплоотвод от чувствительного элемента увеличивается, что вызывает отрицательный сигнал неуравновешенного моста. Последнее происходит из-за того, что при детектировании негорючих газов полупроводниковый преобразователь работает как термокондуктометрический детектор.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье результаты экспериментальных исследований полупроводникового преобразователя типа ПП-1 позволили установить, что принцип его действия идентичен принципу действия термохимического детектора газов и заключается в каталитическом сгорании горючих веществ на поверхности полупроводниковой керамики, при котором увеличиваются ее температура и электропроводность. Установлено, что чувствительность этих преобразователей превосходит чувствительность термохимического пеллисторного детектора. Такой вывод говорит о целесообразности проведения исследований, направленных на определение возможностей использования полупроводниковых преобразователей в газовой хроматографии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера. 2005. 592 с.
2. Эггинс Б. Химические и биологические сенсоры. М.: Техносфера. 2005. 366 с.
3. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера. 2007. 384 с.
4. Волоконно-оптические датчики / под ред. Э. Удд. М.: Техносфера. 2008. 520 с.

*Вестник Тверского государственного технического университета.*

*Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

5. Сажин С.Г. Приборы контроля состава и качества технологических сред: учебное пособие. СПб.: Лань. 2012. 431 с.
6. Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях / И.А. Мясников [и др.]. М.: Наука. 1991. 327 с.
7. Керамические материалы на основе диоксида циркония / под общ. ред. Ю.И. Головина. М.: Техносфера. 2018. 358 с.
8. Тарасевич В.И. Металлические терморезисторные преобразователи горючих газов. Киев: Наук. думка. 1988. 284 с.
9. Бахшян Ц.А. Трубчатые печи с излучающими стенками топки. М.: ГосИНТИ. 1960. 192 с.
10. Горелочные устройства промышленных печей и топок (конструкции и технические характеристики): справочник / А.А. Винтовкин [и др.]. М.: Интермет Инжиниринг. 1999. 580 с.
11. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В. Импульсный ввод анализируемого газа в автоматических газоанализаторах // *Измерительная техника*. 1971. № 4. С. 34–38.

**Для цитирования:** Илясов Л.В. Исследования полупроводникового керамического преобразователя концентрации газов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 44–49.

## INVESTIGATION OF A SEMICONDUCTOR CERAMIC GAS CONCENTRATION CONVERTER

L.V. ILYASOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation; e-mail: lvi450714@mail.ru

The results of experimental studies aimed at revealing the operating principle of semiconductor ceramic gas concentration transducers are presented. The instructions for these converters (PP-1 and DMP-1) state that their principle of operation is based on an increase of the electrical conductivity of semiconductor ceramics at a temperature of 400–500 °C in the presence of reducing gases, in particular methane or propane. An experimental setup with a thermochemical pellistor detector and a research technique based on the use of a pulse method for entering samples of gases such as hydrogen, methane and propane, which made it possible to establish that catalytic combustion of these gases occurs in a semiconductor ceramic converter, and this causes an increase in the temperature of ceramics and its electrical conductivity are described. The dependences of the degree of catalytic combustion of gas on the sensing element of the semiconductor converter power supply voltage are obtained. It is proved that this sensitive element can change its electrical conductivity depending on the thermal conductivity of non-combustible gases such as nitrogen, helium, carbon dioxide. It is established that the sensitivity of the semiconductor converter of the concentration of combustible gases exceeds the sensitivity of the currently widely used pellistor detectors of combustible gases.

*Keywords:* semiconductor, ceramic, converter, gas, electrical conductivity, catalytic combustion.

Поступила в редакцию/received: 12.01.2023; после рецензирования/revised: 26.01.2023;  
принята/accepted: 02.02.2023

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ФИРМЫ

С.А. БАРКАЛОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, И.В. БУРКОВА<sup>2</sup>, д-р техн. наук,  
П.Н. КУРОЧКА<sup>1</sup>, д-р техн. наук, Е.А. СЕРЕБРЯКОВА<sup>1</sup>, канд. экон. наук

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет  
394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84; e-mail: kpn55@ Rambler.ru

<sup>2</sup> Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65

© Баркалов С.А., Буркова И.В.,  
Курочка П.Н., Серебрякова Е.А., 2023

В статье рассматриваются вопросы, связанные с инновационным развитием фирмы. Подчеркивается, что период существования любого новшества определяется его жизненным циклом, на протяжении которого от предприятия требуются различные действия: на стадии инициации и разработки – вложение средств, на остальных стадиях при успешной реализации инновации происходит возврат вложенных средств и прибыль. Возникает ситуация, когда большинство предприятий одновременно реализуют несколько новшеств. Вследствие этого максимальные вложения могут потребоваться в нескольких проектах, причем практически одновременно, что может привести предприятие к финансовым затруднениям. Во избежание данной ситуации необходимо на стадии планирования как можно точнее определять временные сроки начала и окончания этапов реализации процесса внедрения инновации. На примере внедрения инновационных ограждающих конструкций при строительстве жилых зданий повышенной этажности рассматривается задача определения временных параметров по стадиям реализации процесса внедрения разрабатываемого новшества.

*Ключевые слова:* инновационное развитие фирмы, поколение развития инновации, жизненный цикл инновации, ограждающие конструкции, модели поколений инноваций, прогноз продолжительности жизненного цикла инновации.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-49-64**

### ВВЕДЕНИЕ

Функционирование любого предприятия представляет собой последовательность реализуемых проектов. Общепринятым считается, что жизненный цикл любого проекта в общем случае состоит из этапов инициации, планирования, исполнения, контроля и завершения.

Если рассматривать деятельность традиционной производственной фирмы, усилия которой направлены на создание нового вида продукции или услуг, то следует признать, что более характерным в этом случае станет использование понятия жизненного цикла изделия. Цикл состоит из стадий научных исследований, проектирования, производства, эксплуатации и утилизации [1, 2]. Выделение этапов жизненного цикла изделия помогает понять, как будут распределяться финансовые потоки на всем протяжении создания и использования продукта или услуги. Естественно, что на начальных фазах требуются значительные финансовые вложения для выведения изделия на стадию эксплуатации. Только через определенное время,

которое может быть спрогнозировано достаточно приблизительно, предприятие начнет получать доход от этого изделия, позволяющий погасить обязательства. Руководству предприятия необходимо добиться того, чтобы запускаемое в производство изделие как можно раньше вышло на самоокупаемость. Другой задачей является отслеживание жизненного цикла продукта, чтобы не пропустить стадию, когда изделие нужно снять с производства.

Большинство фирм, как правило, являются многопродуктовыми, т. е. выпускают не единственный вид продукции, и у каждого изделия имеется свой жизненный цикл. Таким образом, основной задачей менеджмента предприятия является формирование производственной программы предприятия с учетом того, чтобы выпускаемые изделия находились на различных стадиях своего жизненного цикла. Это обеспечивает равномерное получение предприятием прибыли на всем временном отрезке планирования.

Трудно отыскать компанию, которая полностью придерживается одной стратегии, чаще всего используются различные виды. В строительной сфере большинство предприятий в области инноваций реализуют имитационную стратегию, т. е. в лучшем случае осуществляют внедрение уже апробированных результатов. Основная проблема, возникающая при этом, – отбор возможных вариантов инновационного развития предприятия, обеспечивающих сохранение положения на рынке и развитие (желательно опережающими темпами).

Следует отметить одно основное противоречие: новшество (новая технология) для наиболее эффективного использования должно быть внедрено в полном объеме, при этом необходимо, чтобы отдача от новшества стала поступать как можно быстрее – это усиливает конкурентные преимущества предприятия. Возникает закономерный вопрос: а что же делать? Здесь в качестве примера может быть использована идея поэтапного строительства крупных промышленных комплексов. Дело в том, что крупное промышленное предприятие также должно как можно быстрее начать сдавать продукцию, пусть и не в проектом объеме. Для этого предприятия проектируют и строят очередями. Очередь – это часть строящегося предприятия, которая уже может давать продукцию [3, 4].

При внедрении новшеств также появились вопросы: что надо сделать, чтобы какая-то часть уже внедренного начала использоваться в ходе работы предприятия, т. е. стала приносить доход? Таковую очередь, реализованную по отношению к инновации, назвали поколением инновации.

Разделение новшества на поколения, которые подлежат последовательной реализации, создает спектр проблем, связанных с определением временных сроков и интенсивности финансирования на каждой стадии внедрения конкретного поколения инновации в ходе развития предприятия. Данные проблемы требуют соответствующего модельного обеспечения процесса планирования внедрения новшеств на конкретном предприятии.

Условно все множество показателей, характеризующих инновацию, можно разбить на три группы: функциональные ( $f_i$ ), конструктивные ( $c_i$ ) и технологические ( $t_i$ ). Все эти показатели являются взаимозависимыми, взаимообусловленными и зависящими от времени. Каждое новое поколение инновации имеет свойства предыдущих поколений и обладает собственными.

Модель может служить генератором целей и необходимых решений для создания продукции прогнозируемого научно-технического уровня и перехода к следующему поколению. Она является основой для формирования задач строительного предприятия с целью своевременного обеспечения необходимого научно-технического

уровня создаваемой продукции и с целью обеспечения доминирования предприятия в конкретной сфере строительной отрасли.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим возможный способ моделирования этапов инновационного развития предприятия. Каждый этап будет характеризоваться функциональными, конструктивными и технологическими особенностями, которые будут описываться своим набором показателей, обозначенных через  $f = \{f_1, f_2, \dots, f_p\}$  – множество параметров, характеризующих функциональные различия;  $c = \{c_1, c_2, \dots, c_g\}$  – конструктивные;  $t = \{t_1, t_2, \dots, t_s\}$  – технологические.

В данном случае функциональные показатели поколения будут обеспечиваться за счет того, что конструктивные и технологические достигнут определенных значений. В то же время получение новых технологических параметров дает возможность влиять на конструктивные и функциональные. В этом и заключается взаимозависимость и взаимообусловленность критериев.

Следовательно, существует причинно-следственная связь между критериями, описывающими  $v$ -е поколение инновационного развития фирмы, которую можно записать в виде

$$\Phi = (f^v, c^v, t^v) = 0. \quad (1)$$

Если соотношение (1) выполняется, то набор  $f^v, c^v, t^v$  реализуем.

Следует отметить, что зависимость вида (1) можно представить в виде импликаций

$$t^v \leftarrow \rightarrow c^v \leftarrow \rightarrow f^v. \quad (2)$$

Создание последующего поколения внедряемого новшества осуществляется на базе предыдущего за счет применения накопленных знаний и новых достижений в области науки и технологии. При этом может происходить добавление дополнительных параметров, характерных только для нового поколения, т. е. будут выполняться соотношения:

$$\begin{aligned} f^v = \{f_1^v, \dots, f_{p_v}^v\} &\rightarrow f^{v+1} = \{f_1^{v+1}, \dots, f_{p_{v+1}}^{v+1}\} = \\ &= \{f_1^v + \Delta f_1^v, \dots, f_{p_v}^v + \Delta f_{p_v}^v, f_1^{v+1}, \dots, f_{p_{v+1}}^{v+1}\}; \\ c^v = \{c_1^v, \dots, c_{q_v}^v\} &\rightarrow c^{v+1} = \{c_1^{v+1}, \dots, c_{q_{v+1}}^{v+1}\} = \\ &= \{c_1^v + \Delta c_1^v, \dots, c_{q_v}^v + \Delta c_{q_v}^v, c_1^{v+1}, \dots, c_{q_{v+1}}^{v+1}\}; \\ t^v = \{t_1^v, \dots, t_{r_v}^v\} &\rightarrow t^{v+1} = \{t_1^{v+1}, \dots, t_{r_{v+1}}^{v+1}\} = \\ &= \{t_1^v + \Delta t_1^v, \dots, t_{r_v}^v + \Delta t_{r_v}^v, t_1^{v+1}, \dots, t_{r_{v+1}}^{v+1}\}. \end{aligned}$$

Для системы показателей, характеризующих новое поколение, также должно выполняться соотношение (1) вида

$$\Phi(f^{v+1}, c^{v+1}, t^{v+1}) = 0$$

и должна быть справедлива импликация типа (2).

Создание следующего поколения новшества возможно только на базе усовершенствования и модернизации уже существующего, с появлением новых признаков, характеризующих конструктивные и технологические особенности нового

поколения инновации. По этой причине, например, связь  $\Phi(f^{v+1}, c^v, t^v) = 0$  в принципе нереализуема, так как новое поколение ( $v + 1$ ) не приводит к появлению новых конструктивных и технологических свойств. Кроме того, одновременное осуществление набора  $(f^v, c^v, t^{v+1})$  или  $(f^v, c^{v+1}, t^{v+1})$  с позиций логики допустимо, но с учетом особенностей постановки задачи будет описывать ситуацию, связанную с нереализованными возможностями, а потому будет нерациональным.

Поясним сказанное на конкретных примерах.

Основные проблемы строительной организации появляются в сфере использования новых технологий. Возникает резонный вопрос о приоритетности различных фаз строительного производства при применении инноваций. Обычно в данном случае руководствуются количеством средств, необходимых для реализации определенного этапа строительства нового здания с использованием инноваций. Наиболее затратной стадией строительства здания всегда считалось создание каркаса и стен. Данный элемент укрупненного вида работ должен обеспечить необходимую прочность создаваемого здания, его тепло-, влаго-, паро- и шумоизоляцию. Эти требования могут находиться в противоречии друг с другом. Например, широко используемая в мире технология монолитного домостроения, помимо явных достоинств, имеет ряд существенных недостатков. Основной минус заключается в том, что построенные помещения будут напоминать изолированную капсулу, как в космическом корабле, что не очень пригодно для жилого помещения. При этом возникают вопросы по тепло-, влаго-, паро- и шумоизоляции. Так как возведенная по монолитной технологии конструкция является практически непроницаемой, это порождает многочисленные проблемы, решать которые приходится созданием достаточно сложных систем вентилирования.

Использование технологии монолитного строительства требует применения дорогостоящего оборудования, вовлечения значительного числа рабочих и инженеров, имеющих высокую квалификацию. Данные факторы сказываются на стоимости выполняемых работ, приводят к увеличению затрат на строительство всего объекта и стоимости продаваемых квартир. Следовательно, все это отрицательно воздействует на покупательную способность населения, которая и без того достаточно низкая.

В качестве примера рассмотрим Воронежский район. Если обратиться к статистическим данным о работе строителей, то можно сказать, что основными объектами строительства по-прежнему остаются жилые. В 2021 году затраты населения на приобретение недвижимости составили 11,06 млрд руб. При этом строительными организациями всех форм собственности и силами населения были построены 1 864 тыс. м<sup>2</sup> (из них 981,5 тыс. м<sup>2</sup> построены населением), число квартир составило 23 411. В настоящее время средняя цена 1 м<sup>2</sup> в Воронеже составляет ~79 797 руб/м<sup>2</sup>, т. е. стандартная двухкомнатная квартира площадью примерно 60 м<sup>2</sup> будет стоить ~4,8 млн руб. (при средней зарплате по Воронежской области в 2021 году 40 829,8 руб.). Понятно, что в регионе найдется мало семей, которые могут располагать всей требуемой суммой сразу. Объясняется это многими причинами, например низкой платежеспособностью населения и высокими ценами, но основной является отсутствие механизмов накопления средств, т. е. различных инвестиционных программ. В этом случае остается брать ипотеку.

Остановимся более подробно на возможностях, которые может предоставить ипотечный кредит. Согласно данным Банка России, в октябре 2022 года в Воронежской области объем ипотечных кредитов составил 5,176 млрд руб., а количество 1 671. В процентах по отношению к сентябрю 2022 года произошло уменьшение количества на -13,64 %, объема – на -11,60 %. По сравнению с октябрём прошлого года воронежцы

взяли меньше кредитов: 1 671 против 2 392 в октябре 2021 года (–30,14 %). Объем снизился на –13,79 %. Доступность ипотеки снижается, что приводит к ситуации уменьшения спроса на недвижимость.

Средняя величина займа составляет 3,10 млн руб., процентная ставка по ипотечным кредитам – 7,93 %, а средний срок ипотечного займа – более 23 лет. Доля процентов, которые должен выплачивать заемщик, будет составлять 245,8 тыс. руб. в год, или 20 485 руб. в месяц. Доля, приходящаяся на сам кредит, который нужно выплатить в течение 23 лет, – 3,1 млн руб., т. е. 11 232 руб. в месяц. Сложив две суммы, получаем, что ежемесячная выплата должна будет составлять 31 717 руб. Многие ли могут тратить практически всю зарплату на ипотечный кредит? Спрос на квартиры есть, люди хотят улучшить свои жилищные условия, но не имеют такой возможности.

Рынок недвижимости продолжает существовать, несмотря на катастрофически низкую платежеспособность населения. Объясняется это тем, что в стране практически полностью отсутствуют инвестиционные программы, направленные на сбережение накоплений, поэтому основную часть покупателей составляют люди, желающие оградить свои накопления от обесценивания, а не те, кто хочет улучшить жилищные условия. Таким образом, основной задачей строительной отрасли для расширения клиентской базы является снижение цен на жилье. Для этого необходимо проведение фундаментальных исследований, направленных на удешевление строительства жилья. Предполагается разработка новых технологий, которые обеспечили бы дешевое и качественное строительство.

Внедряемая повсеместно технология монолитно-каркасного домостроения является наиболее перспективной. Она имеет достоинства монолитного домостроения и позволяет использовать наиболее современные технологии при создании ограждающих конструкций. Каркас здания, обеспечивающий его прочность, создается по монолитной технологии, а заполнение проемов может осуществляться гораздо более разнообразно.

На основании анализа развития технологии ограждающих конструкций на воронежском предприятии ОАО «Домостроительный комбинат» (ОАО «ДСК») проводится инновационная работа по изучению перспектив развития ограждающих конструкций. По результатам исследований можно выделить следующие поколения при разработке технологии создания ограждающих конструкций:

монолитные стены с использованием съемной опалубки;

монолитные стены с использованием несъемной опалубки из вспененного полистирола «Пластбау» или Velox (при строительстве зданий с числом этажей не более пяти);

монолитные стены с использованием несъемной пенополистирольной опалубки типа «АБС», «Изодом» (при строительстве зданий повышенной этажности, но не более шестнадцати этажей);

заполненные крупнопористым керамзитобетоном монолитные стены с использованием несъемной опалубки из цементно-стружечных плит (ЦСП) (при строительстве пятиэтажных зданий);

заполненные крупнопористым керамзитобетоном монолитные стены с использованием несъемной опалубки из ЦСП (при строительстве зданий повышенной этажности (до шестнадцати этажей включительно)).

В настоящий момент процесс инновационного развития на ОАО «ДСК» в области разработки эффективных ограждающих конструкций для строительства зданий повышенной этажности привел к созданию технологии использования несъемных

опалубочных систем с последующим их заполнением крупнопористым керамзитобетоном с плотностью  $\gamma = 500 \text{ кг/м}^3$ . В этом случае получается монолитная стена с высокими эксплуатационными свойствами.

Предлагаемая технология не только позволяет получить конструкцию, обладающую необходимыми эксплуатационными параметрами, но и обеспечивает снижение трудозатрат, времени и стоимости выполнения работ по сравнению с кирпичной кладкой. Разработанный вариант технологии применим для малоэтажного строительства. В данный момент ведутся работы по совершенствованию технологии в целях ее распространения на строительство зданий любой этажности.

Считается, что жизненный цикл инновации состоит из стадий поиска инновационной идеи, определения возможности применения выбранной инновации в условиях конкретного предприятия, запуска ее в производство, использования и завершения периода эксплуатации.

Выделение в инновации поколений развития является основополагающим. Если разработчик укажет лишние поколения, это приведет к дополнительным затратам на исследования, которые не обеспечат создание следующего поколения с новыми функциональными возможностями. Если же разработчик пропустит поколение, значит, не все возможности новшества будут использованы. Определение временных границ каждого поколения является далеко не тривиальной задачей, но опыт исследований показал, что наиболее рациональным временем начала развития следующего поколения будет являться запуск в производство предыдущего. Именно модель развития инновации по поколениям и дает возможность реализовать потенциал развития идеи в последующем поколении.

С точки зрения реализуемости все фазы жизненного цикла инновации неравноценны: последние три, как правило, реализуются стандартным инструментарием производственного менеджмента, первые две носят неформальный и неформализованный характер. Невозможно разработать алгоритм, следуя которому, можно точно получить какую-то инновацию. Все гораздо сложнее, так как ситуация характеризуется высокой степенью неопределенности, а полученные результаты, скорее всего, носят вероятностный характер. Именно успешная реализация первых двух этапов дает возможность рассчитывать на успех.

Наиболее характерными параметрами, описывающими процесс создания нового  $i$ -го поколения инновации, являются продолжительность каждой стадии  $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{is}$  и интенсивность, т. е. размер вкладываемых средств в единицу времени  $F_i(\tau)$  (рис. 1). В данном случае второй индекс в переменной  $S_{is}$  будет означать номер стадии жизненного цикла инновации. В дальнейшем будем считать, что рассматриваются все пять стадий.

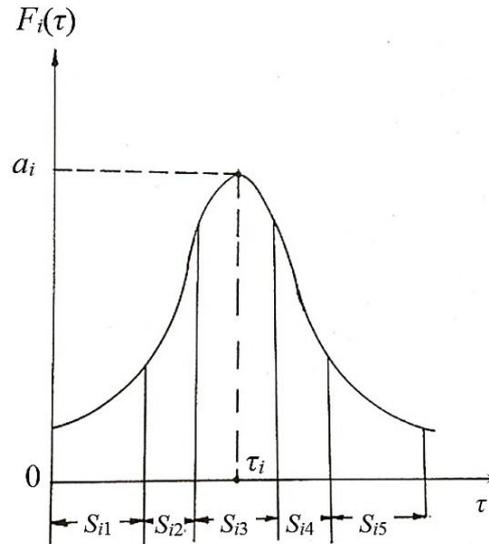


Рис. 1. Зависимость объема привлекаемых ресурсов от стадии жизненного цикла инновации

Представленная на рис. 1 кривая будет иметь в точке  $a_i$  экстремум (максимум), которому будет соответствовать точка  $\tau_i$  на временной шкале. Этим значением времени определяется момент наибольшей интенсивности вкладываемых в разработку средств.

Общий объем израсходованных средств будет численно равен площади, ограниченной кривой  $F_i(\tau)$  и осью времени  $\tau$ . Обозначив суммарные затраты на развитие  $i$ -го поколения новшества через  $A_i$ , можно записать [5, 6]:

$$A_i = \int_0^{\tau_i} F_i(\tau) d\tau .$$

Задача менеджмента предприятия будет заключаться в том, чтобы определить время начала развития поколения, длительность каждой из его стадий, интенсивность использования ресурсов на каждой из стадий, а также взаимные расположения кривых  $F_i(\tau)$ , относящихся к различным поколениям создаваемой инновации. Ограничения, которые будут конкретизировать стоящую перед управленцами задачу, находятся из условий реального производства и экономического положения предприятия в целом.

Из рис. 1 можно установить, что для аппроксимации изучаемого процесса наиболее подходит кривая Гаусса. В этом случае интенсивность использования ресурсов определяется выражением вида

$$F_i(\tau) = F_i(\tau, \tau_i, \sigma_i, A_i) = \frac{A_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\tau - \tau_i)^2}{2\sigma_i^2}\right\}. \quad (3)$$

Анализируя выражение (3), приходим к выводу, что каждое поколение инновации будет характеризоваться тремя параметрами: среднеквадратичным отклонением (стандартным отклонением)  $\sigma_i$ ; точкой, соответствующей максимальной интенсивности потребления ресурсов  $\tau_i$ ; величиной суммарных затрат  $A_i$ . С учетом известного из математической статистики свойства трех сигм можно предположить, что все основные события жизненного цикла новшества будут укладываться на

временном интервале, численно равном  $6\sigma$ , при этом границы временного интервала развития поколения инновации будут определяться выражением  $\tau = [\tau_i - 3\sigma_i, \tau_i + 3\sigma_i]$ .

Таким образом, указанные три параметра ( $\sigma_i, \tau_i, A_i$ ) будут в полной мере характеризовать развитие каждого поколения. От менеджмента предприятия требуется определить эти параметры, а на их основе – взаимное расположение кривых, описывающих различные поколения новшества.

Наиболее неформальным является определение временных параметров научного поиска, т. е. величины  $S_{i1}$ . В данном случае следует исходить из начальных данных, которые, как правило, известны до стадии проектирования, т. е. известно, какое количество ресурсов предприятие может направить на эти цели, поэтому зафиксируем уровень, обозначив его через  $\alpha$ .

Рассмотрим вариант решения поставленной задачи, если  $\alpha$  представляет собой долю ресурсов, направленных на стадию научного исследования, от всех средств, используемых для развития данного поколения (рис. 2). В этом случае должно выполняться неравенство  $\alpha < 1$ . Можно записать

$$\alpha_{A_i} = \frac{\int_{\tau_i - 3\sigma_i}^{\tau_i - 3\sigma_i + S_{i1}} F_i(\tau) d\tau}{\int_{\tau_i - 3\sigma_i}^{\tau_i - 3\sigma_i + S_{i1}} F_i(\tau) d\tau} \approx \frac{\int_{\tau_i - 3\sigma_i}^{\tau_i - 3\sigma_i + S_{i1}} F_i(\tau) d\tau}{\int_{\tau_i - 3\sigma_i}^{\tau_i - 3\sigma_i + S_{i1}} F_i(\tau) d\tau}.$$

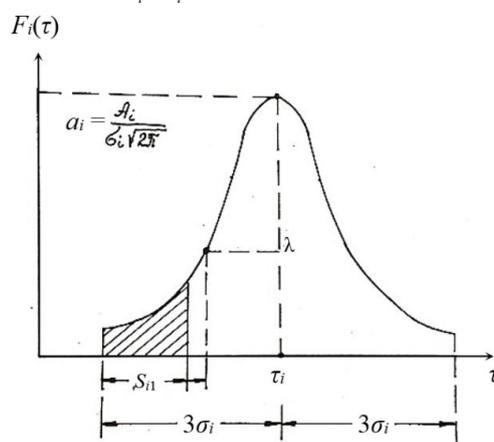


Рис. 2. Вычисление объема средств, направляемых на стадию научного поиска

Если линию, представленную на рис. 2, записать в форме функции Лапласа, то получим выражение

$$\Phi(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^w e^{-\frac{x^2}{2}} dx,$$

откуда следует

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-3\sigma_i + S_{i1}} e^{-\tau^2 / 2\sigma_i^2} d\tau = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-3 + S_{i1}/\sigma_i} e^{-x^2 / 2} dx,$$

или

$$\alpha = \Phi(-3 + S_{i1} / \sigma_i).$$

В итоге время реализации стадии научного поиска можно определить из выражения

$$S_{i1} = \sigma_i (3 + \Phi^{-1}(\alpha)), \quad (4)$$

где величина  $\Phi^{-1}(\alpha) < 0$  определяется по таблице функции Лапласа.

Если же уровень использования ресурсов  $\alpha$  задавать как отношение максимальной интенсивности потребления ресурсов на стадии научного поиска к максимальной интенсивности использования ресурсов для разработки всего поколения, тогда будет справедливо соотношение

$$F_i(\tau_i - 3\sigma_i + S_{i1}) = \alpha \frac{A_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi}}. \quad (5)$$

В этом случае, используя выражение

$$\exp\left\{-\frac{(-3\sigma_i + S_{i1})^2}{2\sigma_i^2}\right\},$$

получаем решение, позволяющее определить продолжительность стадии научного поиска:

$$S_{i1} = 3\sigma_i - \sigma_i \sqrt{2(\ln(1/\alpha))}^{\frac{1}{2}}.$$

Анализируя задачи, стоящие перед производственным менеджментом предприятия на этапе разработке инноваций, следует сформулировать возможные задачи, которые могут быть решены с использованием представленной модели поколений инноваций.

**Задача 1.** Пусть известны параметры  $i$ -го и  $(i + 1)$ -го поколений [7, 8]. Используя прогнозные значения для времени реализации  $(i + 2)$ -го и  $(i + 3)$ -го поколений новшества, а также величину используемых для этой цели ресурсов  $A_{i+2}$  и  $A_{i+3}$ , нужно определить стандартные отклонения для этих поколений, т. е.  $\sigma_{i+2}$  и  $\sigma_{i+3}$ . При этом должны быть выполнены условия, определяющие ограничения на минимальную продолжительность фазы научного поиска:

$$S_{51}, S_{61} \geq S_{\min}. \quad (6)$$

На первом шаге задача решается без учета ограничений (6).

Для последующего решения принимается гипотеза о том, что жизненные циклы поколений будут пропорциональны интервалам между пиками кривых  $F_i$  (рис. 3). Если предположить, что нам необходимо на базе сведений о третьем и четвертом поколениях получить значения стандартных отклонений для пятого и шестого поколений, то запишем гипотезу в следующем виде:

$$\frac{T_5}{T_4} = \frac{\sigma_5}{\sigma_4} = \frac{\tau_5 - \tau_4}{\tau_4 - \tau_3}; \quad \frac{T_6}{T_5} = \frac{\sigma_6}{\sigma_5} = \frac{\tau_6 - \tau_5}{\tau_5 - \tau_4}. \quad (7)$$

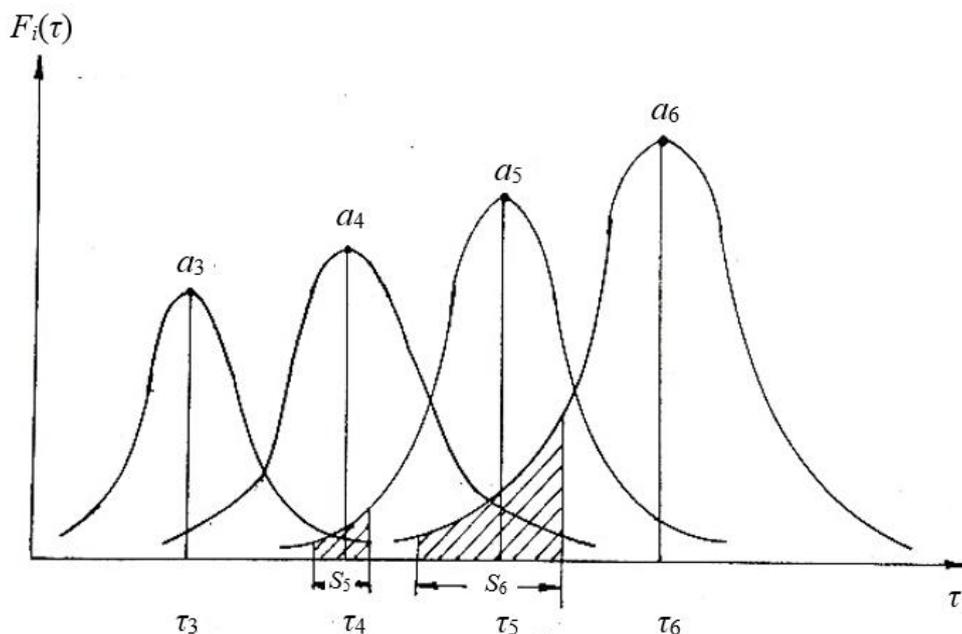


Рис. 3. Взаимное расположение различных поколений новшества

Соотношение (7) позволяет получить предварительное решение задачи, которое в общем случае может и не удовлетворять ограничению (6):

$$\sigma_5 = \sigma_4 \frac{\tau_5 - \tau_4}{\tau_4 - \tau_3}; \sigma_6 = \sigma_4 \frac{\tau_6 - \tau_5}{\tau_4 - \tau_3}. \quad (8)$$

Найденные значения необходимо подставить в выражения (4) или (5), определяющие время фазы научного поиска (выбор выражения для подстановки будет зависеть от способа задания  $\alpha$ ). Это позволяет вычислить значения требуемых величин, которые для нашего примера будут  $S_{51}$ ,  $S_{61}$ .

В случае когда решение удовлетворяет ограничению (6), выражением (8) будет определяться искомое решение, в противном случае необходимо при фиксированных моментах стадии научного поиска увеличить стандартные отклонения  $\sigma_5$ ,  $\sigma_6$  и осуществить перенос времени  $\tau_5$ ,  $\tau_6$  до величин  $\sigma_5^0$ ,  $\sigma_6^0$  и  $\tau_5^0$ ,  $\tau_6^0$  таким образом, чтобы выполнялось условие (7). В этом случае величины  $\tau_5^0$ ,  $\tau_6^0$  будут являться поправками прогноза, полученного на предыдущем шаге  $\tau_5$ ,  $\tau_6$ :

$$t_5 = \tau_5 - 3\sigma_5; \quad t_6 = \tau_6 - 3\sigma_6.$$

Рассмотрим задачу определения поправки к прогнозу в том случае, когда уровень потребления ресурсов  $\alpha$  задается как доля использования ресурса на стадии научного поиска от всего объема выделенного на эти цели ресурса, т. е. первый вариант, задаваемый соотношением (4). Необходимо вычислить минимальную поправку к стандартному отклонению, т. е. значение  $\sigma_i^0$ , обеспечивающее выполнение исходного ограничения вида (6).

Если величина времени на научный поиск определяется из соотношения (4), значение поправки  $\sigma_i^0$  вычисляется подстановкой  $S_{i1} = S_{\min}$  в уравнение (4), т. е. из выражения

$$\sigma_i^0 = \frac{S_{\min}}{3 + \Phi^{-1}(\alpha)}. \quad (9)$$

В этом случае максимальный уровень интенсивности использования ресурсов будет находиться в точке

$$\tau_i^0 = t_i + 3\sigma_i^0 = t_i + \frac{3S_{\min}}{3 + \Phi^{-1}(\alpha)}.$$

Подставляя значения  $t_i$  для пятого поколения, получим

$$\tau_5^0 = \tau_5 - 3\sigma_4 \frac{\tau_5 - \tau_4}{\tau_4 - \tau_3} + \frac{3S_{\min}}{3 + \Phi^{-1}(\alpha)}, \quad (10)$$

аналогично находим соответствующее значение и для шестого поколения:

$$\tau_6^0 = \tau_6 - 3\sigma_4 \frac{\tau_6 - \tau_5}{\tau_4 - \tau_3} + \frac{3S_{\min}}{3 + \Phi^{-1}(\alpha)}. \quad (11)$$

Выражения (9)–(11) дают решение задачи 1 в том случае, когда уровень потребления ресурсов задается как доля от всего запланированного на реализацию данного поколения инновации ресурса.

Если величина  $\alpha$  задается как отношение максимальной интенсивности потребления ресурсов на стадии научного поиска к максимальной интенсивности использования ресурсов для разработки всего поколения, то  $\sigma_i^0$  определяется уравнением (5), в которое вместо  $S_i$  подставлено  $S_{\min}$ :

$$\sigma_i^0 = \frac{S_{\min}}{3 - \sqrt{2 \ln(1/\alpha)}}. \quad (12)$$

В этом случае значения  $\tau_5^0, \tau_6^0$  задаются выражениями:

$$\tau_5^0 = \tau_5 - 3\sigma_4 \frac{\tau_5 - \tau_4}{\tau_4 - \tau_3} + \frac{3S_{\min}}{3 - \sqrt{2 \ln(1/\alpha)}}; \quad (13)$$

$$\tau_6^0 = \tau_6 - 3\sigma_4 \frac{\tau_6 - \tau_4}{\tau_4 - \tau_3} + \frac{3S_{\min}}{3 - \sqrt{2 \ln(1/\alpha)}}. \quad (14)$$

Соотношения (12)–(14) определяют решение задачи 1 при задании уровня потребления ресурса по второму варианту; ограничения вида (6) в этом случае выполняются.

Как правило, в задачах, связанных с распределением ресурсов, весьма важным является ограничение бюджетного вида, т. е. ограничение на объем используемого ресурса. К сожалению, в приведенных выше подходах этот фактор не учитывается. Рассмотрим возможный подход к решению данной задачи, когда на суммарное количество ресурса наложено ограничение: величина используемого ресурса не должна превышать заданной величины  $\theta(\tau)$ . В этом случае задача будет иметь ограничение в виде неравенства, которое можно записать в виде

$$F(\tau) = \prod_{i=4}^6 F_i(\tau) = \prod_{i=4}^6 \frac{A_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\tau - \tau_i)^2}{2\sigma_i^2}\right\} \theta(\tau). \quad (15)$$

Однако для применения соотношения (15) необходимо задаться видом зависимости  $\theta(\tau)$ , которая в общем виде неизвестна, а получить ее на реальных данных

не представляется возможным. В этом случае приходится задаваться априорной аппроксимацией этого соотношения. Представим, что предприятие осуществляет вложение средств в развитие новой техники, индексируя их ежегодно на 2 %. Тогда для величины  $\theta(\tau)$  будет справедлива аппроксимация

$$\Delta\theta(\tau) = \theta(\tau)k\Delta\tau,$$

где  $k = 0,02$  и определяет темп прироста вложений в инновационное развитие.

Разделив предыдущее соотношение на  $\Delta\tau$  и переходя к пределу при  $\Delta\tau \rightarrow 0$ , получаем для  $\theta(\tau)$  дифференциальное уравнение относительно  $\theta$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = k\theta,$$

которое дает решение

$$\theta(\tau) = \theta_0 e^{k\tau}, \quad (16)$$

где постоянная интегрирования  $\theta_0$  – интенсивность вложений в начальный момент времени.

При достаточно малой величине  $k\tau$  предельная интенсивность может быть представлена первыми двумя членами ряда Тейлора и примет вид

$$\theta(\tau) \approx \theta_0(1 + k\tau). \quad (17)$$

Приведенный алгоритм решения задач первого типа позволяет осуществлять вычисление параметров поколения новшества, что дает возможность менеджменту предприятия более целенаправленно влиять на процесс инновационного развития фирмы.

**Задача 2** (о выходе на заданный уровень). Имеются данные о предыдущих поколениях развития инновации, т. е., если в качестве предыдущих поколений рассматриваются третье и четвертое, то известны величины  $\tau_3, \sigma_3, A_3$  и  $\tau_4, \sigma_4, A_4$ . Если в качестве характеристики уровня инновационного развития предприятия принять момент времени, для которого характерно наибольшее значение интенсивности вложений средств, то необходимо для последнего поколения (в нашем случае шестого) определить данный момент времени и обеспечить при этом минимальное значение предельной интенсивности вложений  $\theta(\tau)$ . Иными словами, необходимо к заданному моменту времени обеспечить создание нескольких поколений инновационного развития фирмы при минимальных затратах, т. е. следует минимизировать интенсивность вложений в начальный момент времени. Формализованная постановка задачи может быть записана в следующем виде:

$$\theta_0 \rightarrow \min. \quad (18)$$

В качестве управляемых параметров выступают величины  $A_5, \sigma_5, \tau_5, A_6, \sigma_6$ , при этом полученное решение должно удовлетворять исходным ограничениям вида (6) и (15).

Решение задачи (18) предполагает итерационное решение первой задачи, которое в самом простом случае может состоять из одной итерации [9, 10].

В качестве целевой функции можно выбрать и другую величину. Если по исходным условиям известна величина ресурсов, направляемых на реализацию новшества, то, используя соотношение (17), согласно которому единственным варьируемым параметром остается  $k$ , приходим к целевой функции вида

$$k \rightarrow \min. \quad (19)$$

Если решение задачи вида (18) или (19) окажется меньше тех же величин, получаемых из соотношения (16), то это будет означать, что можно уменьшить величину  $\tau_6$  и тем самым ускорить инновационное развитие. Если же полученные в результате решения оптимизационной задачи (18) или (19) значения окажутся выше величин, получаемых по уравнению (16), то из этого будет следовать, что значение  $\theta(\tau)$  превышает реальные возможности системы. Скорректировать подобную ситуацию возможно только изменением значений коэффициентов, входящих в выражение, задающее зависимость  $\theta(\tau)$ . Это будет означать, что повышается эффективность используемых ресурсов, т. е. повышается производительность труда разработчиков.

**Задача 3** (о приближении к заданному уровню). Требуется за минимальное время по известным характеристикам предыдущих поколений обеспечить создание последнего поколения инновации.

Пусть известны параметры третьего и четвертого поколений. Необходимо найти минимальное время создания шестого поколения, т. е. целевая функция задачи принимает вид

$$\tau_6 \rightarrow \min$$

при ограничениях, задаваемых выражениями (6), (15), (17).

Варьируемыми параметрами задачи являются  $A_5, \tau_5, \sigma_5, A_6, \sigma_6$ .

**Задача 4** (о равномерности вложений). Необходимо обеспечить наиболее близкое к равномерному распределение ресурсов, направляемых на реализацию новшества, если имеются данные о предыдущих поколениях этой инновации, интенсивности вложений и времени реализации последнего поколения инновации.

Если заданы свойства третьего и четвертого поколений новшества, интенсивность вложений  $\theta(\tau)$ , определяемая из уравнения (17), и время, за которое необходимо создать новое поколение, т. е.  $\tau_6$ , то целевая функция задачи может быть записана в виде

$$\max |F(\tau) - \theta(\tau)| \rightarrow \min.$$

Управляемыми параметрами являются  $A_5, \tau_5, \sigma_5, A_6, \sigma_6$ .

Суть задачи состоит в достижении наиболее равномерной интенсивности средств, что, как правило, обеспечивает устойчивое функционирование системы.

В рамках рассматриваемой модели возможны и другие оптимизационные постановки задач типов 2–4 [11]. Все они относятся к многопараметрическим оптимизационным задачам и могут решаться методом целенаправленного перебора и другими методами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ОАО «ДСК» прошло целенаправленное изучение возможности создания перспективных способов возведения зданий и сооружений. Его результаты дали возможность успешно внедрить на предприятии технологии монолитного домостроения в съемной опалубочной системе.

Был определен перспективный подход при создании ограждающих конструкций, базирующийся на использовании однослойных конструкций стен и приводящий к отказу от использования дорогостоящих материалов, основанных на полимерном теплоизоляционном сырье. Это позволяет снизить затраты на строительство здания.

Единственным серьезным недостатком предлагаемой технологии является то, что она применима для возведения ограждающих конструкций при строительстве

зданий не выше пяти этажей. Понятно, что на данный момент для Воронежа это уже имеет невысокую востребованность. Следовательно, встает вопрос о разработке нового поколения данного новшества для применения его при возведении зданий повышенной этажности (до двадцати пяти этажей).

Разработка инновации для строительства современных ограждающих конструкций может быть представлена как процесс, разбитый на стадии создания:

ограждающей конструкции по монолитной технологии на основе тяжелого бетона в съёмной опалубке;

ограждающей конструкции по монолитной технологии на основе тяжелого бетона в несъёмной опалубке для зданий до пяти этажей (опалубки из вспененного полистирола «Пластбау», Velox);

ограждающей конструкции на основе монолитной стены, выполненной из тяжелого бетона в несъёмной опалубке, при строительстве зданий повышенной этажности до двадцати пяти этажей (пенополистирольная опалубка «АБС», «Изодом»);

ограждающей конструкции на основе монолитной стены в несъёмной опалубке из ЦСП с заполнением крупнопористым керамзитобетоном при возведении зданий до пяти этажей;

ограждающей конструкции на основе монолитной стены в несъёмной опалубке из ЦСП с заполнением крупнопористым керамзитобетоном при строительстве зданий повышенной этажности до двадцати пяти этажей.

Таким образом, работа по созданию инновации в области разработки технологии возведения ограждающих конструкций на ОАО «ДСК» может быть разбита на пять поколений. При этом работы по четырем поколениям уже завершены, но возникает задача определения параметров пятого поколения на основе имеющихся данных по третьему и четвертому. Необходимо определить характеристики пятого поколения при условии ограничения на минимальную продолжительность фазы научного поиска.

Способ решения задачи был рассмотрен выше, поэтому применим предложенный алгоритм. Будем считать, что жизненные циклы поколений пропорциональны интервалам между пиками кривых  $F_i$  (см. рис. 3), тогда соотношение (7) может быть записано в виде

$$\frac{T_5}{T_4} = \frac{\sigma_5}{\sigma_4} = \frac{\tau_5 - \tau_4}{\tau_4 - \tau_3}.$$

Из этого соотношения находим интересующую нас величину  $\sigma_5$ :

$$\sigma_5 = \sigma_4 \frac{\tau_5 - \tau_4}{\tau_4 - \tau_3}.$$

На предприятии ОАО «ДСК» в ходе финансового планирования инноваций в качестве заданного уровня потребляемых ресурсов  $\alpha$  используется отношение максимальной интенсивности вложений на стадии научного поиска к максимальной интенсивности вложений всего поколения. Поэтому для данного случая подставим найденное значение для  $\sigma_5$  в формулу

$$S_{i1} = 3\sigma_i - \sigma_i \sqrt{2(\ln(1/\alpha))}^{\frac{1}{2}}.$$

Данное выражение дает первое приближение к решению исходной задачи. Для дальнейшего решения необходимо учесть ограничения на величину используемого ресурса, что позволяет вычислить поправку к полученному решению  $S_{51}$ . Практика показала, что на предприятии при выполнении этапа научного поиска используется до 80 % отпущенных на реализацию инновации средств, т. е.  $\alpha = 0,8$ .

Принимая во внимание имеющиеся сведения о параметрах третьего  $\tau_3 = 30$  и четвертого поколений, когда наибольшая интенсивность вложения средств была достигнута на 40-м месяце, т. е.  $\tau_4 = 40$  и  $\sigma_4 = 12$ , можно вычислить  $\sigma_5 = 14,4$ . Следовательно,  $S_{51} \approx 34$  месяца, т. е. для пятого поколения продолжительность этапа научного поиска составит 34 месяца. Возникает проблема уменьшения этого значения. Для этой цели вычислим поправку  $\tau_5^0$  к полученной величине прогноза  $\tau_5$ , используя приведенный выше алгоритм, и получим 33 месяца.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с целью планирования внедрения новшеств на предприятии предлагается модель управления инновационным развитием на базе использования поколений разрабатываемого новшества, что дает возможность динамически изменять функциональные, конструктивные и технологические признаки создаваемой продукции. Показано, что модель поколений инновационного развития фирмы позволяет проследить развитие каждого последующего поколения, приведена математическая модель поколений инновационного развития фирмы. Разработаны процедуры прогноза продолжительности жизненного цикла поколения инновационного развития фирмы с учетом ограничений интенсивности вложений на каждой стадии жизненного цикла, определения момента достижения и уровня максимальной интенсивности затрат для прогнозируемых поколений инновационного развития фирмы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование оптимальной очередности реализации инновационных проектов / Т.А. Аверина [и др.] // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2009. Т. 5. № 1. С. 54–58.
2. Баркалов С.А., Курочка П.Н., Мищенко В.Я. Генезис процессов организационно-технологического моделирования строительного производства // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2020. № 9 (741). С. 76–92.
3. Баркалов С.А., Курочка П.Н., Серебрякова Е.А. Построение рейтинговой оценки на основе потоковой модели // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2023. Т. 23. № 1. С. 31–41.
4. Трахинин Е.Л. Метод прогнозирования периодичности контроля состояния элементов системы распределенных ситуационных центров при их мониторинге // *Информационные системы и технологии*. 2022. № 1 (129). С. 77–82.
5. Бородин А.Р. Модели выбора и оценивания проектов // *Системы управления эволюцией организации: сборник трудов по материалам IV Международной конференции*. Воронеж: Научная книга. 2007. С. 207–215.
6. Бурков В.Н., Буркова И.В. Задачи дихотомической оптимизации. М.: Радио и связь. 2003. 156 с.
7. Курочка П.Н., Чередниченко Н.Д. Задачи ресурсного планирования в строительном проекте // *XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014*. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 4745–4753.

8. Рожкова Т.С., Невров А.А., Ветров И.И. Разработка модели распределения ресурсов в многоузловой децентрализованной системе управления потоками данных мобильных устройств // *Системы управления и информационные технологии*. 2021. № 4 (86). С. 14–18.

9. Жилиякова Л.Ю., Кузнецов О.П. Теория ресурсных сетей. М.: РИОР: ИНФРА-М. 2017. 283 с.

10. Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Социальные сети. Модели информационного влияния, управления и противоборства. М.: Физматлит. 2010. 228 с.

11. Новиков Д.А., Бреер В.В., Рогаткин А.Д. Управление толпой: математические модели порогового коллективного поведения. М.: ЛЕНАНД. 2016. 168 с.

**Для цитирования:** Баркалов С.А., Буркова И.В., Курочка П.Н., Серебрякова Е.А. Моделирование инновационного развития фирмы // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 49–64.

## MODELING THE INNOVATIVE DEVELOPMENT OF THE FIRM

S.A. BARKALOV<sup>1</sup>, Dr. Sc., I.V. BURKOVA<sup>2</sup>, Dr. Sc.,  
P.N. KUROCHKA<sup>1</sup>, Dr. Sc., E.A. SEREBRYAKOVA<sup>1</sup>, Cand. Sc.

<sup>1</sup> Voronezh State Technical University  
84, st. 20th Anniversary of October, Voronezh, 394006, Russian Federation;  
e-mail: kpn55@rambler.ru

<sup>2</sup> V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS  
65, st. Profsoyuznaya, Moscow, 117997, Russian Federation

The article considers issues related to the innovative development of the firm. It is emphasized that the period of existence of any innovation is determined by its life cycle, during which different actions are required from the enterprise: at the stage of initiation and development - investment of funds, at other stages of the successful implementation of innovation there is a return on investment and profit. There is a situation when most enterprises simultaneously implement several innovations. As a consequence, maximum investments can be required in several projects, and almost simultaneously, which can lead the enterprise to financial difficulties. To avoid this situation, it is necessary at the planning stage to determine as precisely as possible the timing of the beginning and end of the stages of implementation of innovation. On the example of the introduction of innovative enclosing structures in the construction of residential buildings of higher storey the problem of determining the time parameters on the stages of implementation of the process of implementing the developed innovation is considered.

*Keywords:* innovative development of a firm, generation of innovation development, innovation life cycle, enclosing structures, models of innovation generations, prediction of the duration of the innovation life cycle.

Поступила в редакцию/received: 28.02.2023; после рецензирования/ revised: 06.03.2023;  
принята/accepted: 13.03.2023

УДК 004.01:621.391

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕРИЙНОГО РЯДА ГИБРИДНЫМ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ

*Вестник Тверского государственного технического университета.*  
*Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

Д.И. ПРИХОДЬКО<sup>1</sup>, магистр, А.В. МОКРЯКОВ<sup>2,3</sup>, канд. физ.-мат. наук,  
В.В. ГОРШКОВ<sup>3</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup> ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований РАН  
117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к. 1; e-mail: mitry1205@mail.ru

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
125993, Москва, Волоколамское ш., 4г; e-mail: ali.latex@gmail.com

<sup>3</sup> Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство)

119071, Москва, ул. Малая Калужская, 1; e-mail: gorshkov-vv@rguk.ru

© Приходько Д.И., Мокряков А.В.,  
Горшков В.В., 2023

Рассмотрены технические модели информационных систем, для которых можно определить не только простой жизненный цикл, но и гибридную модель, выделив каскадную и версионные части модели информационной системы. Это выделение позволяет в особых случаях реализовать более точные данные по техническому обслуживанию и модернизации для информационной системы, а для серийного ряда операционных систем соотнести эволюцию ряда и версии. Проанализирована модель эволюции программного и аппаратного обеспечения, которая показывает, как именно идет процесс устаревания аппаратного обеспечения с появлением новых требований к программному обеспечению. Исследована модель жизненного цикла информационных систем, обладающая способностью к динамическому выбору разрядности вычислений, предназначенных для работы в экстремальных условиях окружающей среды (при воздействии ионизирующего излучения на компоненты информационной системы).

*Ключевые слова:* гибридная модель жизненного цикла, эволюционная взаимосвязь программного и аппаратного обеспечения, модель информационной системы для экстремальных условий окружающей среды.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-65-71**

## ВВЕДЕНИЕ

Современные технические системы и их серии обладают крайне сложной внутренней структурой, при этом каждый из компонентов может иметь свои особенности. Например, для транзисторов, входящих в микросхему, используют специальную подложку, которая забирает на себя часть попавшего излучения. Для информационных систем существуют специальные характеристики, например возможность работать на нескольких режимах микропроцессора в мультиразрядных информационных системах, которые похожи на мультиверсионные по назначению.

Приведенные примеры особенностей относятся к эксплуатации информационных и вычислительных систем [1]. Одно из определений эксплуатации заключается в том, что она является стадией жизненного цикла информационных и вычислительных систем [2]. При этом для информационных систем, которые эксплуатируются в экстремальных условиях окружающей среды, в частности при ионизирующем излучении, имеет смысл рассматривать детализацию жизненного цикла.

В рамках данной статьи рассматривается вопрос, связанный с детализацией жизненного цикла, для построения расширенных моделей информационных систем [2].

## МЕТОДОЛОГИЯ

*Вестник Тверского государственного технического университета.*

*Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

Теория жизненных циклов позволяет рассматривать технические системы и их модельные ряды. В настоящей статье будет рассмотрено подмножество технических систем и модельных рядов – информационные системы и наборы их версий. В классических вариантах строение жизненного цикла информационных систем описывается в рамках нескольких стандартных моделей: каскадной [3] и версионной [4].

Как уже было описано во введении, особенностью технических и информационных систем является анализ внутренней структуры жизненных циклов информационных систем или модельных рядов с точки зрения анализа жизненного цикла входящих основных компонент, что в случае информационной системы и ее модельного ряда выглядит следующим образом:

1. *Модельный ряд информационных систем.* Анализ эволюции компонента и модельного ряда вместе.

2. *Информационная система.* Для данного объекта элементарными подсистемами будет аппаратное и программное обеспечение.

При этом будет подразумеваться особенность, состоящая в том, что подсистемы эволюционируют с точки зрения разных жизненных циклов: будет происходить взаимодействие версионной и каскадной моделей жизненных циклов.

Взаимодействие программного и аппаратного компонентов (элементарных компонентов) информационной системы в целом предполагает несколько особенностей:

1. Ошибки программной части включают в себя, прежде всего, ошибку обращения программы через интерфейсы к аппаратуре. Например, деление на 0, когда делитель, который был ненулевым, стал равен 0.

2. Ошибки аппаратной части подразумевают выход из строя программного обеспечения. Таким образом, программное обеспечение полностью опирается на возможности аппаратного обеспечения.

С точки зрения программной и аппаратной детализации можно построить детализированные модели жизненного цикла информационных систем:

1. *Модель эволюционной взаимосвязи программного и аппаратного обеспечения с точки зрения обновления информационной системы.* Ее основной задачей является отображение данных об эволюции информационной системы в процессе замены компонентов и модернизации в рамках нормированного срока компании.

2. *Модель жизненного цикла информационной системы при работе в экстремальных условиях окружающей среды.* Показывает жизненный цикл информационной системы, подвергшейся экстремальному воздействию поражающих факторов окружающей среды, например космическому излучению.

3. *Детализированная модель эволюции серии информационных систем.* Отображает эволюцию модельного ряда информационных систем с точки зрения обслуживания.

Целью и задачей статьи является построение структурных схем указанных моделей, так как с первой и последней пользователи встречаются непосредственно, а вторая подходит для использования в специфических отраслях, к которым можно отнести космическую отрасль и военное дело. В работе будем использовать методы синтеза и индукции.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования нами были выбраны модели, включающие в себя механизмы каскадного и версионного жизненного цикла, и прежде чем мы перейдем к

непосредственному изложению полученных результатов, необходимо в кратком изложении пояснить детальные различия между этими двумя моделями.

*Каскадная модель подразумевает заданное число шагов, выполняемых последовательно для построения информационной или любой другой технической системы. Каскадные модели обычно используются для работы и разработки обычных технических изделий. Версионная модель жизненного цикла подразумевает циклический цикл разработки информационной системы – создается и анализируется версия, затем на ее основе создается другая. Этот тип моделей более характерен для программных продуктов, которые в большинстве случаев разрабатываются через beta-версии, или технического релиза, когда нормальная рабочая версия выводится впоследствии.*

Модели жизненного цикла в кратком изложении рассмотрены, теперь перейдем к структурным схемам предложенных моделей.

### МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРОГРАММНОГО И АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Данная модель предназначена для анализа взаимосвязи жизненного цикла программ и аппаратного обеспечения (рис. 1). В частности, это может быть взаимодействие версий операционной системы и микропроцессора, однако можно рассмотреть эволюцию и других составляющих информационной системы.

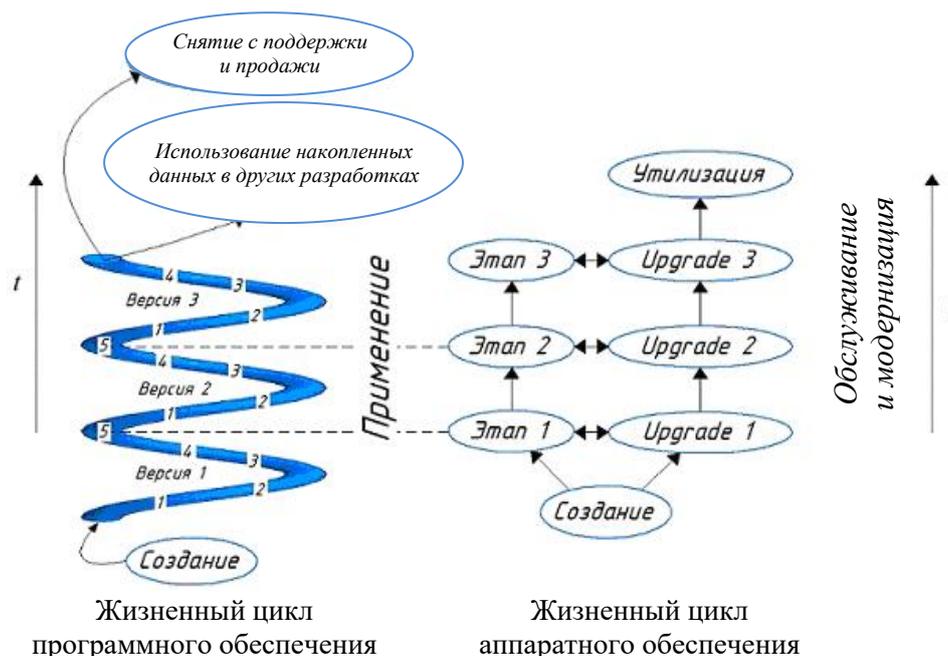


Рис. 1. Модель эволюции взаимосвязи аппаратного и программного обеспечения

Основной сутью модели является то, что правая часть (жизненный цикл аппаратного обеспечения) представляет собой системный блок, который пользователь обновляет в процессе использования, когда выходит из строя компонент системного блока или для поддержки нового игрового приложения возникает техническая необходимость произвести обновление аппаратной части. Левая часть модели представляет собой обновление программного обеспечения, которое осуществляется при выходе новой игры или версии операционной системы, требующей обновления. Поскольку выпуск новой версии обычно влечет за собой добавление некоторых

функций и увеличение объема программ из-за обновлений компиляторов, пользователю также приходится обновлять системный блок. Стоимость такого обновления становится сопоставимой с покупкой нового системного блока. Вследствие этого системный блок выводится из эксплуатации.

Если же требования к программному обеспечению возросли настолько, что стоимость обновления уже приближается к цене нового компьютера, пользователи покупают новое устройство, а старое отправляется в утилизацию. При этом программное обеспечение, которое считается устаревшим, в некоторых случаях эффективно используют в других разработках (например, Windows 3.x использовалась ранее как операционная система [5] для принтеров, так как она весьма неприхотлива к оборудованию).

Применение модели можно продемонстрировать на примере развития 64-битных процессоров и вытеснения на пользовательском рынке 32-битных.

Первый 64-битный процессор для пользователей вышел примерно в 2003 году с выпуском процессора компании AMD модели athlon 64 – первого компьютерного x86-совместимого процессора на разрядности 64 бита. До этого компания Intel выпустила архитектуру IA-64, не совместимую с архитектурой x86, что сказалось на ее дальнейшем развитии. Под данную архитектуру Microsoft создала пользовательскую версию Windows XP 64-bit IA. Выпуск AMD64, совместимого с x86, привел к тому, что уже в 2005 году Microsoft выпустила Windows XP 64bit Pro для модели AMD64 и перестала поддерживать версию Windows XP 64-bit IA. На данный момент вышла Windows 11, которая является только 64-битной, т. е. не имеет 32-битной версии. Несмотря на то, что приложения под 32-битные микропроцессоры пока поддерживаются системой, становится очевидно, что 32-битные программы начинают уходить в прошлое, как когда-то их 16- и 8-битные предшественники.

### **МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ РАБОТЕ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Данная модель описывает ситуацию, когда информационная система эксплуатируется в экстремальных условиях (рис. 2). Информационная система [6] доработана специальными механизмами, которые позволяют путем изменения разрядности осуществить отключение поврежденных частей аппаратного обеспечения, что приводит к уменьшению используемых возможностей и позволяет продлить работоспособность информационной системы.

Модель работает следующим образом. Идет деградация компонентов микропроцессора, из строя выводятся не только регистры общего назначения, возможности которых определяют режим микропроцессора, устанавливающий доступную адресацию в операционной системе, но и различные дополнительные компоненты, при этом отключение этих возможностей не приводит к необходимости сменить разрядности вычислений. При критических повреждениях, степень которых не позволяет работать на текущем режиме работы (например, регистр получил повреждения, при которых корректный адрес (или значение) может быть сохранен только в половине регистра), производится откат на младшую разрядность, в результате чего восстанавливается работоспособность системы. Помимо этого, можно использовать уцелевшие расширенные наборы команд.

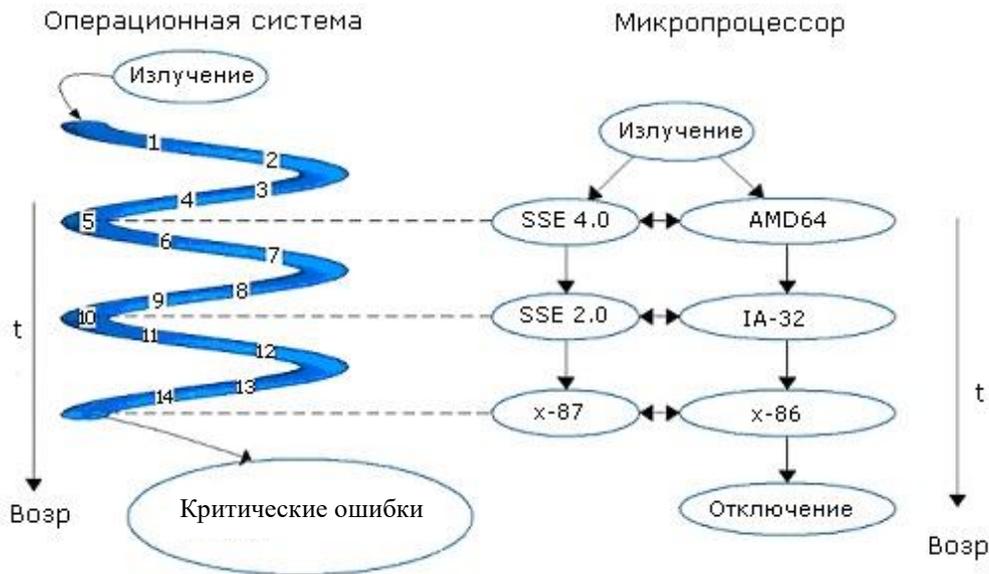


Рис. 2. Модель жизненного цикла информационной системы при работе в экстремальных условиях окружающей среды

### ДЕТАЛИЗИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ СЕРИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Данная модель отображает эволюцию модельного ряда информационных систем (рис. 3). В любой компании, когда происходят значимые изменения, например в Microsoft при выпуске некоторых версий операционных систем, актуальным становится вопрос о том, каким образом можно обеспечить выпуск и некоторый период выпуска и поддержки операционной системы определенного уровня вычислительной системы.



Рис. 3. Детализированная модель эволюции серии информационных систем

Работает модель следующим образом. Выделяем необходимый уровень технической поддержки (например, для Windows XP нормальный уровень поддержки был на протяжении 11 лет после выпуска операционной системы). В течение определенного периода формируем требующийся уровень программной поддержки, который заключается в двух ключевых особенностях:

1. Выпуск драйверов и компонентов под новое аппаратное обеспечение. Для Windows XP, например, это набор драйверов для USB 3.0 контроллера и добавление поддержки файловой системы exFAT.

2. Выпуск средств разработки и программ. В частности, приложения для Windows XP можно создавать на платформе Visual Studio 2017 (при установке доступен плагин для создания приложений).

Выбор компанией Microsoft длительного срока поддержки был обусловлен тем, что Windows XP очень хорошо себя зарекомендовала, а Windows Vista оказалась крайне провальной с точки зрения производительности и функционала. В течение этого времени выпускаются новые версии системы: Vista и 7. Из этих версий наиболее успешной стала Windows 7. После того как была выпущена новая версия Windows 7, которая оказалась удачной (в 2011 году она обогнала Windows XP), было принято решение, что поддержку Windows XP необходимо заканчивать. В течение трех лет поддержка обновлений для Windows XP прекратилась.

Таким образом, приведенные модели позволяют как бизнесу, так и госкорпорациям выработать общий подход к техническим системам.

## **ОБСУЖДЕНИЕ**

В большинстве случаев исследователями рассматривались конкретные модели жизненных циклов с общей позиции. Например, в работах Липаева [3, 4], в которых рассматривались каскадные модели жизненного цикла, не уделяется должного внимания современному понятию технической эксплуатации информационных систем, так как в них описана сама модель жизненного цикла, но не отображены детали. В работе А.В. Горшкова [2] отображены жизненные циклы, но совершенно не детализировано понятие эксплуатации.

Основным отличием нашей статьи является демонстрация того, что расширенное рассмотрение жизненного цикла с точки зрения жизненных циклов компонентов информационной системы, т. е. программного и аппаратного обеспечения, позволяет более качественно разрабатывать жизненный цикл современных информационных систем. Это дает возможность существенно проработать с точки зрения как регламентов технического обслуживания, так и вопросов финансирования процессы закупки и поддержки, принятые в компании.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Рассмотренные модели, основанные на подходе к анализу жизненного цикла как к взаимодействию составляющих, позволяют обеспечить необходимый уровень сервисов информационной системы, а также определить требуемый уровень поддержки выбранной информационной системы.

Механизмами, которыми описываются дополнительные изменения существующей информационной системы, можно также спрогнозировать эволюционные изменения. Предложенные частные модели, за исключением модели информационной системы, находящейся в экстремальных условиях окружающей среды, позволяют определить перечень изменений, с помощью которых решаются вопросы использования необходимого функционала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мокряков А.В., Приходько Д.И. Общие концепции и идеи теории эксплуатации в контексте вычислительной техники // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки»*. 2020. № 12. С. 88–92.
2. Горшков А.В. Разработка и обоснование крупных информационных систем с учетом динамики их жизненного цикла. Дисс... канд. техн. наук. Москва. 2011. 206 с.
3. Липаев В.В. Системное проектирование сложных программных средств для информационных систем. М.: Синтег. 2002. 268 с.
4. Липаев В.В. Процессы и стандарты жизненного цикла сложных программных средств: справочник. М.: Синтег. 2006. 260 с.
5. Проектирование информационных систем: учебник / под ред. Д.В. Чистова. М.: Юрайт. 2018. 258 с.
6. Инюшкина О.Г. Проектирование информационных систем (на примере методов структурного системного анализа): учебное пособие. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть. 2014. 240 с.

**Для цитирования:** Приходько Д.И., Мокряков А.В., Горшков В.В. Моделирование информационных систем и серийного ряда гибридным жизненным циклом // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 65–71.

## MODELING OF INFORMATION SYSTEMS AND SERIES HYBRID LIFECYCLE

D.I. PRIKHODKO<sup>1</sup>, Master, A.V. MOKRYAKOV<sup>2,3</sup>, Cand. Sc.,  
V.V. GORSHKOV<sup>3</sup>, Dr. Sc.

<sup>1</sup> FSC Research Institute for System Research RAS  
36, bld. 1, Nakhimovsky Ave., Moscow, 117218, Russian Federation;  
e-mail: mitry1205@mail.ru

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University)  
4, Volokolamskoe Hwy., Moscow, 125993, Russian Federation; e-mail: ali.latex@gmail.com

<sup>3</sup> Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art)  
1, st. Malaya Kaluzhskaya, Moscow, 119071, Russian Federation;  
e-mail: gorshkov-vv@rguk.ru

Technical models of information systems are considered, for which it is possible to define not only a simple life cycle, but also a hybrid model, highlighting the cascade and version parts of the information system model. This allocation allows, in special cases, to implement more accurate maintenance and upgrade data for the information system, and for the serial series of operating systems, to correlate the evolution of the series and version. A model of the evolution of software and hardware is considered, which shows exactly how the process of hardware obsolescence is going on for the requirements of software. A model of the life cycle of information systems with the ability to dynamically select the bit depth of calculations designed to work in extreme environmental conditions (when exposed to ionizing radiation on the components of an information system) is investigated

*Keywords:* hybrid life cycle model, evolutionary software-hardware relationship, information system model for extreme environmental conditions.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЛИНИЙ ПРИ ПРОЦЕССЕ ПЕРЕНАСТРОЙКИ ОБОРУДОВАНИЯ**

А.В. ШАХОВСКОЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В.Н. ВЛАСОВА<sup>2</sup>, канд. техн. наук,  
Е.Г. РОТАНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Московский государственный университет технологий и управления  
имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)  
109004, Москва, ул. Земляной Вал, 73; e-mail: a.shakhovskoy@mgutm.ru

<sup>2</sup> Поволжский казачий институт управления и пищевых технологий  
(филиал Московского государственного университета технологий  
и управления имени К.Г. Разумовского)  
Ульяновская обл., 433515, Димитровград, ул. Гвардейская, 30;  
e-mail: vlasova-va75@mail.ru

© Шаховской А.В., Власова В.Н.,  
Ротанов Е.Г., 2023

В статье показано, что проведение методической оценки способов и методов автоматизации производственных линий возможно методами диагностики оборудования, используемого для фиксации производственных показателей. Применение методик переконфигурации технологического оборудования возможно только при перестройке структуры программного обеспечения, которая достигается путем установления новых параметров. Определено, что возможности использования конфигураций оборудования формируются исходя из ранее обозначенных параметров. В качестве объекта управления при переконфигурации оборудования использована SCADA-система.

*Ключевые слова:* автоматизация, производство, конфигурация, развитие, система, канал, передача данных.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-72-78**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Вследствие технического прогресса умственный и физический труд человека все больше заменяется на автоматизированные и мехатронные системы, что позволяет повысить качественные показатели товаров и услуг. Автоматизация технологических процессов имеет многоуровневую структуру, начиная с управления конкретными технологическими процессами и заканчивая управлением производствами или целыми отраслями. Такая сложная структура требует больших капиталовложений. Обновление производственных систем управления с учетом современных средств автоматизации будет эффективно в том случае, если будет разработана объемная программа выпуска товаров. Компании, следящие за современными тенденциями развития производств, все чаще используют системный подход. Это позволяет своевременно реагировать на изменения конъюнктуры рынка, а также в реальном времени следить за результатами работы своего предприятия. В настоящее время на рынке существует достаточно большой выбор программных и аппаратных средств для автоматизации практически

любого производства, что дает возможность подобрать наиболее подходящий способ реализации с учетом имеющихся потребностей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим в общем виде пример некоторого фрагмента структуры SCADA-системы (рис. 1) для диагностики отказов в процессе прохождения потоков данных по структурным элементам и уровням иерархии SCADA-системы. На момент времени  $t$  набор технических оценок контроля (ТОК) [1]

$$X(t) = \{[x_1(t), x_2(t), \dots, x_{n(x)}(t)]\}$$

измеряется с помощью первичных преобразователей ПП<sub>*i*</sub> и регистрируется в специализированных контроллерах – узлах сбора данных ВЗД<sub>*j*</sub>. Считывание  $x_i(t)$  с ПП<sub>*i*</sub>, который связан с ВЗД<sub>*j*</sub> с помощью канала передачи данных (КПД)  $Ch_m$  через порт П<sub>*m*</sub>, обеспечивает программный процесс  $A_j$ , который работает на ВЗД<sub>*j*</sub>. Сервер  $S_1$  соединен с глобальной вычислительной сетью (ГОМ) с помощью каналов передачи данных через соответствующие порты П<sub>*s1,j*</sub> и П<sub>*j,s1*</sub>. За передачу данных между ВЗД<sub>*j*</sub> и сервером  $S_1$  по  $Ch_{1,j}$  с использованием протокола передачи данных ППД<sub>*j*</sub> отвечают программные процессы  $B_j$  и  $C$ . На сервере  $S_1$  ведутся две базы данных: база данных реального времени – БД<sub>1</sub> и архивная база данных – БД<sub>2</sub>. Запись данных в БД<sub>1</sub> и БД<sub>2</sub> осуществляется с помощью программных процессов  $D$  и  $E$ . С сервером  $S_1$  работает эксплуатационный персонал SCADA через интерфейс ряда специализированных рабочих мест (АРМ). Сервер  $S_1$  соединен с АРМ в ГОМ с помощью каналов передачи данных  $Ch_{1,A}$ . На АРМ отображается оперативная и архивная информация в виде мнемосхем, отчетов, графиков и т. п.

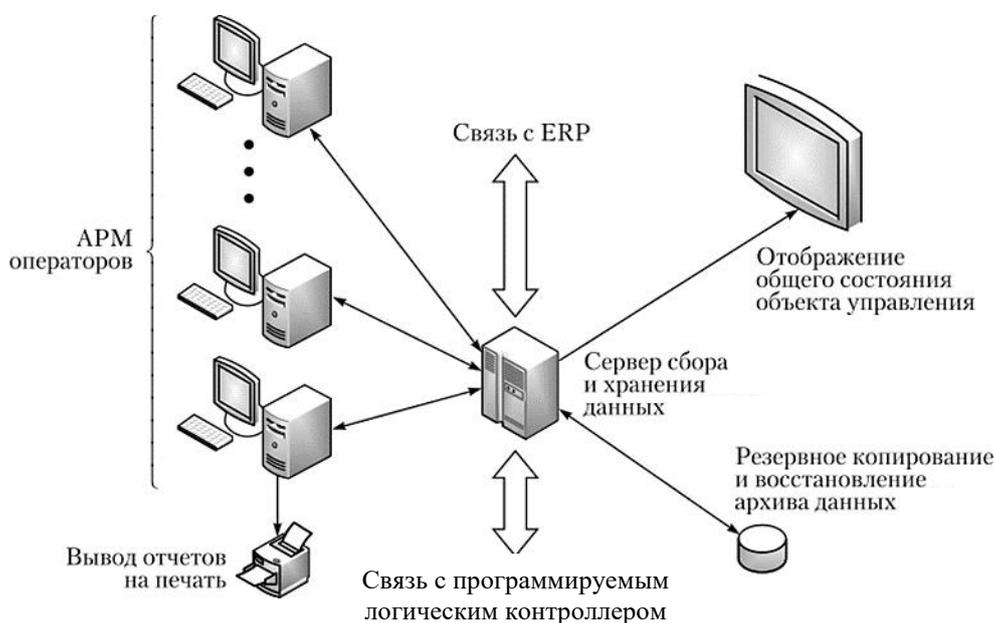


Рис. 1. Пример структурной схемы SCADA-системы [2]

Задачами подсистемы диагностики SCADA-системы в рамках предложенного метода, разработанного на основе структурно-логической модели диагностики отказов (SLM DV), являются автоматическая самодиагностика в режиме реального времени функционирования SCADA-системы в процессе прохождения потоков данных по

структурным элементам и уровням иерархии SCADA-системы с целью обнаружения и локализации отказов; определение видов отказов с помощью состояния контрольной панели (КП) ТОК  $X(t)$  в системе [3].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим приведенный на рис. 1 пример типовой структуры SCADA-системы [4]. Пусть  $L$  – уровни иерархии системы, соответствующие уровням возможной локализации неисправности;  $L_1$  – уровни иерархии системы, соответствующие системообразующим узлам;  $L_2$  – уровни иерархии системы, соответствующие каналам передачи данных:

$$L = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\};$$

$$L_1 \subset L, L_1 = \{2, 4, 6, 8\};$$

$$L_2 \subset L, L_2 = \{3, 5, 7\}.$$

На уровне ТОК ( $l = 1$ ) на момент времени  $t$  для набора  $X(t)$  параметр  $x_i(t)$  может находиться в одном из следующих состояний [5]:

- 1) значение КП находится в диапазоне технологических рамок (Г);
- 2) значение КП находится вне пределов технологических рамок (Т);
- 3) значение КП находится в аварийном диапазоне (А).

На уровнях SCADA-системы параметр  $x_i(t)$  может находиться в одном из состояний:

1) значение параметра достоверно (Д), т. е. корректно передано/зарегистрировано в системе;

2) значение параметра недостоверно (Н), например [6]:

зарегистрированное в системе значение параметра невозможно по физическому содержанию (находится вне диапазона допустимых значений / шкалы измерения датчика);

комбинация значений параметров невозможна по физическому содержанию, для заданного режима работы ТОК или в связи со спецификой контролируемого технологического процесса;

произошел невозможно большой скачок значения контролируемого параметра за невозможно малый для этого промежуток времени;

в протоколе передачи данных были зафиксированы ошибки передачи.

3) параметр отсутствует в системе (В), значение параметра не определено.

На уровнях SCADA-системы  $l \in L_2$  определим возможные виды завершения процесса приема-передачи набора  $X(t)$  по КПД  $Ch_\mu$ :

прием-передача параметра  $x_i(t)$  завершены корректно и считаются достоверными (Д);

прием-передача параметра  $x_i(t)$  завершены, но обнаружены ошибки ППД или некорректные настройки среды передачи данных и т. д. Передача параметра считается недостоверной (Н);

прием-передача параметра  $x_i(t)$  отсутствовали или не были завершены в течение тайм-аута, настраиваемого для ожидания завершения приема-передачи (В).

Критерием обнаружения неисправности является:

для уровня ТОК – выход значения параметра за технологические границы / границы пребывания в аварийном диапазоне [7];

на уровне системы (для  $l \in L_1$ ) – недостоверное значение / отсутствие параметра;

изменение достоверного состояния параметра (рис. 2) при переходе на более высокий уровень иерархии ( $l \in L_1$ );

ложность/отсутствие приема-передачи параметра ( $l \in L_2$ ).

Изменение состояния контролируемого параметра при переходе с объектового уровня ( $l = 1$ ) на системный уровень ( $l = 2$ ) приведено на рис. 3.

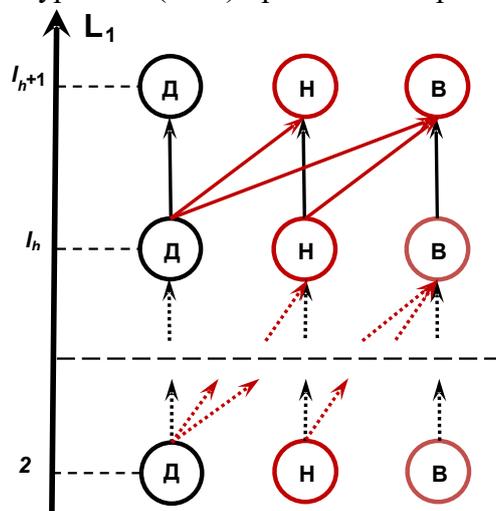


Рис. 2. Диаграмма допустимых изменений состояния КП ТОК при продвижении вверх по региональной информации (РИ) системы

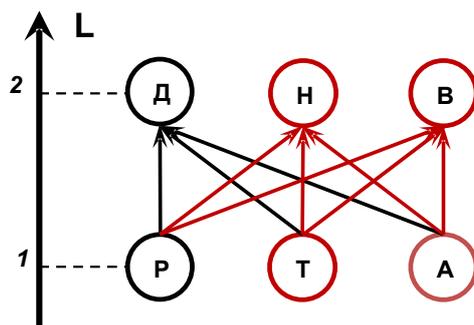


Рис. 3. Диаграмма изменения состояния КП ТОК при переходе с РИ ТОК на РИ системы

При переходе с уровня  $l_h$  на уровень  $l_{h+1}$  (для  $l \in L_1$ ) состояние параметра может измениться в результате возникновения неисправности, как показано на рис. 3. Недопустимые изменения состояния параметра при переходе с уровня  $l_h$  на уровень  $l_{h+1}$  (для  $l \in L_1$ ) приведены на рис. 4.

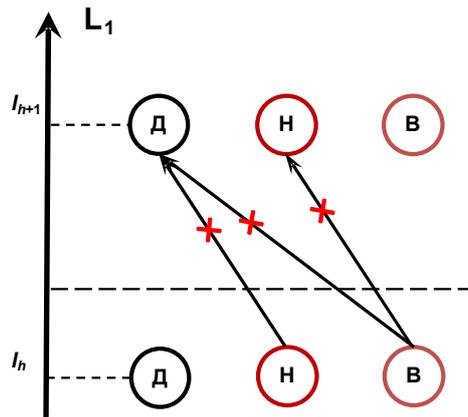


Рис. 4. Диаграмма недопустимых изменений состояния ТОК при продвижении вверх по РИ системы

На приведенных выше диаграммах (см. рис. 2–4) события, соответствующие критериям обнаружения неисправности, выделены красным цветом.

Определим множество состояний для набора  $X(t)$  по РИ SCADA-системы в виде матрицы  $M(t)$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} M(t) = [m_{iL, iC}(t)], \\ m_{iL, iC}(t) \in \begin{cases} \{P, T, A\}, & l = 1, \\ \{D, H, B\}, & l > 1, \end{cases} \\ iL = l(S_1) + 1 + l, 1 \leq l \leq l(S_1), \\ 1 \leq iC \leq n(X), \end{array} \right.$$

где  $iL$  – индекс строки матрицы  $M(t)$ , соответствующий уровням иерархии SCADA-системы  $l$ , расположенным в порядке убывания;  $iC$  – индекс столбца матрицы  $M(t)$ , соответствующий индексу контролируемого параметра  $x_{iC}(t)$ ;  $l(S_1)$  – уровень иерархии сервера SCADA-системы;  $n(X)$  – количество ТОК.

К матрице состояний КП ТОК поставим в соответствие диагностическую матрицу (ДМ)  $D(t)$  вероятности КП для  $1 \leq l \leq l(S_1)$  уровней иерархии системы. При формировании и анализе матрицы будем использовать трехзначную логику  $E$ . Определим элементы матрицы  $d_{iL, iC}$  на трехзначном множестве  $E_3 = \{0, 1, 2\}$ , что соответствует состояниям  $\{B, H, D\}$  параметра при  $l \in L_1$  или  $\{B, H, D\}$  видам завершения процесса приема-передачи параметра при  $l \in L_2$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} D(t) = [d_{iL, iC}(t)], \\ d_{iL, iC}(t) \in E_3, \\ iL = l(S_1) + 1 - l, 1 \leq l \leq l(S_1), \\ 1 \leq iC \leq n(X). \end{array} \right.$$

На основе анализа матрицы  $D(t)$  выведем аналитические зависимости для определения допустимого изменения состояния КП ТОК в процессе его прохождения по структурным элементам и РИ SCADA-системы.

Представим в табличном виде функцию  $f_1(x, y)$  изменения состояния контролируемого параметра при переходе на следующую РИ SCADA-системы (см. рис. 3, 4), где  $x$  – состояние параметра на предыдущей РИ  $l_h \in L_1$ ;  $y$  – состояние параметра на следующей РИ  $l_{h+1} \in L_1$ ;  $f_1(x, y) = 1$  – допустимое изменение состояния параметра по РИ  $L_1$  системы;  $f_1(x, y) = 0$  – недопустимое изменение состояния параметра по РИ  $L_1$  системы [8]:

$x$	0	0	0	1	1	1	2	2	2
$y$	0	1	2	0	1	2	0	1	2
$f_1(x, y)$	1	0	0	1	1	0	1	1	1

Данному табличному заданию функции  $f_1(x, y)$  соответствует полином

$$f_1(x, y) = (1 + xy - y^2 - xy^2 + 2x^2y)(mod3).$$

Таким образом, корректность формирования матрицы  $D(t)$  в соответствии с допустимыми изменениями состояния контролируемого параметра  $x_{iC}(t)$  по РИ SCADA-системы  $l \in L_1$  проверяется следующим образом:

$$f_1(d_{iL+2,ic}, d_{iL,ic}) = 1, iL = l(S_1) + 1 - l, l \in L_1.$$

Диагностическим признаком (К) выявления неисправности в работе SCADA-системы является вычисление значения функции  $f_1(d_{iL+2,ic}, d_{iL,ic}) = 0$ . При этом критерий выявления неисправности – недопустимое изменение состояния контролируемого параметра  $x_{iC}(t)$  путем его продвижения между РИ  $l \in [l(S_1) - iL; l(S_1) - iL + 1]$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Причиной проявления признаков неисправностей в большинстве случаев является нарушение логики функционирования программного обеспечения SCADA-системы, что с наибольшей вероятностью связано с ошибками проекта или ошибками реализации проектных решений и должно быть устранено как максимум на стадии тестовых испытаний. Проявление неисправностей на этапе опытной эксплуатации говорит о том, что не все ошибки реализации проектных решений были устранены или необходима модернизация оборудования, поскольку задействованные ресурсы программного обеспечения SCADA-системы не в состоянии обеспечить необходимую функциональность.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование измерительно-управляющей системы на базе гибкого производственного участка / Д.Ф. Мамедов [и др.] // *Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2018)*. Уфа. 2018. С. 27–30.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613374 РФ. *Программная платформа для создания компьютерного тренажерного комплекса АСУТП* / Лебедев И.С., Безуглов Д.В., Тюрин О.Г. Заявл. 28.02.2022. Оpubл. 14.03.2022. Бюл. № 3.
3. Васильченко А.П., Кореновский А.М. Телеметрия пунктов водоучета мелиоративной системы // *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*. 2021. № 1 (81). С. 12–16.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613142 РФ. *Отраслевые решения SCADA Infinity в составе: ACSConfigurator, EstTasks, DataCollector, WebPortal, Отслеживание цикла жизни оборудования, Комплекс технологических расчетов, Комплекс отчетов «Банкир», Карта технологических уставок, Многофункциональная система безопасности, Планировщик работы декоративного освещения* / Чириков С.В. Заявл. 01.02.2022. Оpubл. 01.03.2022. Бюл. № 3.
5. Овчаренко Д.М., Раздобреев Е.И. Автоматизация технологии индукционного нагрева вязкой нефти при трубопроводном транспорте // *Трубопроводный транспорт*

углеводородов: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Омск: ОмГТУ. 2020. С. 26–30.

6. Беляков А.И. Эргономический анализ пользовательских интерфейсов в информационных и управляющих системах // *Научный лидер*. 2021. № 14 (16). С. 12–15.

7. Топольский Д.В., Топольская И.Г. Автоматизация диагностики состояния интеллектуального привода // *Наука ЮУрГУ. Секции технических наук: материалы 72-й научной конференции*. Челябинск: ЮУрГУ. 2020. С. 300–307.

8. Федорова Э.Р., Трифонова М.Е. Анализ измеряемых параметров секции измельчения руд горнообогатительного комбината // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2019. № 2. С. 3–10.

**Для цитирования:** Шаховской А.В., Власова В.Н., Ротанов Е.Г. Автоматизация производственных линий при процессе перенастройки оборудования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 72–78.

### **AUTOMATION OF PRODUCTION LINES DURING THE PROCESS OF EQUIPMENT RECONFIGURATION**

A.V. SHAKHOVSKOY<sup>1</sup>, Cand. Sc., V.N. VLASOVA<sup>2</sup> Cand. Sc.  
E.G. ROTANOV<sup>1</sup>, Cand. Sc.

<sup>1</sup> K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management  
73, Zemlyanoy Val str., Moscow, 109004, Russian Federation;  
e-mail: shahand291072@gmail.com

<sup>2</sup> Volga Cossack Institute of Management and Food Technologies  
30, st. Gvardeyskaya, Dimitrovgrad, 433515, Ulyanovsk region, Russian Federation;  
e-mail: vlasova-va75@mail.ru

The article shows that carrying out methodical evaluation of methods and methods of automation of production lines is possible by methods of diagnostics of equipment used for fixing of production indicators. The application of methods of reconfiguration of technological equipment is possible only when reconfiguring the software structure, which is achieved by establishing new parameters. It is determined that the possibilities of using equipment configurations are formed on the basis of previously indicated parameters. SCADA-system is used as a control object during equipment reconfiguration.

*Keywords:* automation, production, configuration, development, system, channel, data transmission.

Поступила в редакцию/received: 01.12.2022; после рецензирования/revised: 20.12.2022;  
принята/accepted: 26.12.2022

УДК 681.516

### **РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИМ РЕАКТОРОМ СУСПЕНЗИОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ КАНАЛОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

А.Ф. ЕГОРОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А.Г. ЛОПАТИН<sup>2</sup>, канд. техн. наук,  
Б.А. БРЫКОВ<sup>2</sup>, ст. препод.

*Вестник Тверского государственного технического университета.*  
*Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

<sup>1</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева  
125047, Москва, Миусская площадь, 9; e-mail: egorov.a.f@muctr.ru

<sup>2</sup> Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева  
Тульская обл., 301665, Новомосковск, ул. Дружбы, 8; e-mail: lopatin.a.g@muctr.ru

© Егоров А.Ф., Лопатин А.Г.,  
Брыков Б.А., 2023

Рассмотрен вопрос управления химическими реакторами периодического действия на примере процессов суспензионной полимеризации. Актуальность работы обусловлена характером процессов суспензионной полимеризации, протекающих в реакторе и не позволяющих обеспечить управление на основе классических одноконтурных систем управления. Показано, что эффективное с точки зрения технологии процесса управление реактором синтеза полимеров возможно благодаря наличию в системе управления двух контуров стабилизации: температуры реакционной массы и скорости вращения мешалки. Даны структурные схемы таких систем управления, описан принцип их работы. Сравнительный анализ качества систем выполнен путем имитационного моделирования. Сделан вывод о том, что приведенные системы управления по всем показателям качества превосходят одноконтурные системы, что подтверждает целесообразность их разработки.

*Ключевые слова:* система автоматического управления, двухконтурные системы, реактор периодического действия, суспензионная полимеризация.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-78-86**

## ВВЕДЕНИЕ

Химические реакторы по своему значению всегда занимают центральное место в технологической схеме производства любого химического продукта. Химический реактор, помимо чисто кинетических аспектов, одновременно является теплообменником и массообменным аппаратом. Ему приходится обеспечивать контакт между различными фазами исходных и конечных продуктов химической реакции, использовать перемешивающие устройства, а также проводить синтез конечных продуктов в условиях высоких температур и давления. В связи с этим возникают серьезные проблемы при создании систем контроля и управления основными технологическими параметрами химического реактора.

Классическими процессами, протекающими в химических реакторах периодического действия (ХРПД), являются процессы суспензионной полимеризации стирола, метилметакрилата и т. п. В динамическом соотношении ХРПД характеризуются весьма сложными и нелинейными зависимостями скорости реакции полимеризации от температуры и рецептуры загрузки реактора [1]. Экзотермический тепловой эффект реакции суспензионной полимеризации играет роль положительной обратной связи. Вследствие этого возникает опасность появления неустойчивых состояний ХРПД и развития аварийных режимов. В то же время желание достигнуть максимальной производительности ХРПД побуждает вести процесс суспензионной полимеризации на границе тепловой устойчивости.

Для ХРПД, используемых в настоящее время в промышленности, характерно наличие двух одноконтурных систем автоматического управления (САУ). Первая система предназначена для поддержания заданного значения температуры реакционной массы в процессе протекания реакции суспензионной полимеризации, а вторая обеспечивает стабилизацию скорости вращения мешалки ХРПД. Главной

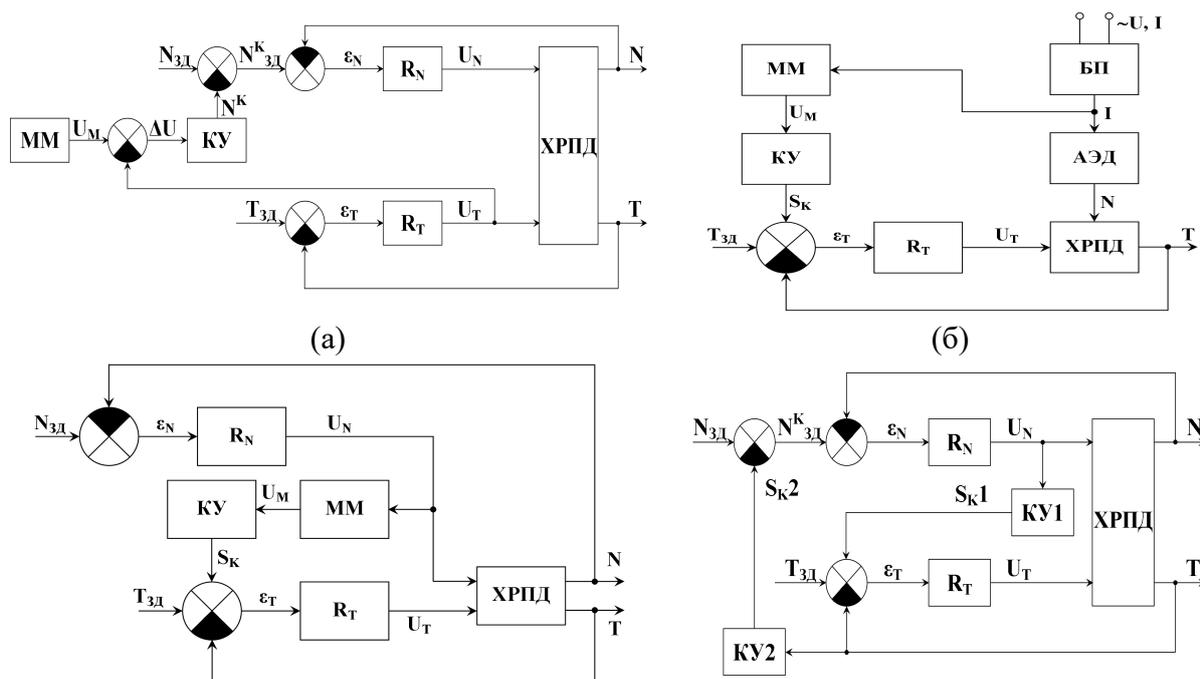
особенностью использования данных САУ является большое различие инерционности по каналам управления, от нескольких секунд в канале управления скоростью вращения мешалки (быстродействующий канал) до нескольких часов в канале управления температурой реакционной массы (инерционный канал) [1], также они оказывают взаимное влияние на работу друг друга [1, 2].

Основной негативный фактор, влияющий на температурный режим протекания процессов суспензионной полимеризации, – наличие гель-эффекта, который в момент возникновения приводит к резкому, а иногда и неконтролируемому увеличению температуры реакционной массы, что может вызвать аварийную остановку процесса суспензионной полимеризации в ХРПД. Из-за наличия данного эффекта процессы суспензионной полимеризации, подверженные влиянию гель-эффекта, проводят при большом водном модуле (например, синтез полиметилметакрилата методом суспензионной полимеризации проводят при соотношении мономер:вода = 1:4).

### ОПИСАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В результате исследования процессов суспензионной полимеризации стирола и метилметакрилата [2–4, 10] выявлено, что в момент возникновения гель-эффекта увеличивается вязкость реакционной массы, что отмечается в виде увеличения токовой нагрузки на электродвигатель мешалки ХРПД. Кроме того, поскольку инерционность канала управления скоростью вращения мешалки намного меньше инерционности канала стабилизации температуры реакционной массы, данное условие можно использовать для упреждающего воздействия на контур управления температуры, чтобы сгладить отрицательное воздействие гель-эффекта на температуру реакционной массы.

С учетом данной особенности были разработаны пять структурных схем САУ ХРПД (рис. 1) [5–9]. Обозначения на рис. 1:  $R_N$  – регулятор, стабилизирующий скорость вращения мешалки; ММ – математическая модель ХРПД; КУ – корректирующее устройство; ХРПД – химический реактор периодического действия;  $R_T$  – регулятор, стабилизирующий температуру реакционной массы; БП – блок питания; АЭД – асинхронный электродвигатель.



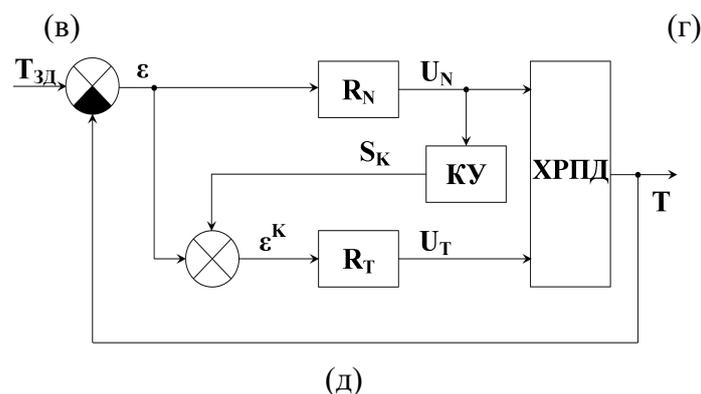


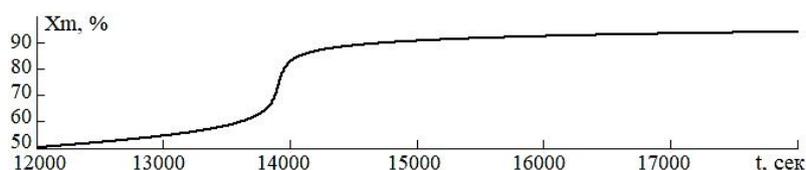
Рис. 1. Структурные схемы САУ

В качестве технологического объекта управления при имитационном моделировании разработанных САУ используется математическая модель ХРПД, которая представляется в виде совокупности уравнений кинетики суспензионной полимеризации и уравнений теплового баланса, записанных для потока хладагента в рубашке, для стенки корпуса реактора и для реакционной массы. Вид ХРПД, описание его физических размеров и численные значения параметров, входящих в состав уравнений кинетики процесса, опубликованы в работах [10–12]. Расчет выполнен в среде динамического моделирования MATLAB Simulink с учетом зависимости параметров реакционной массы от времени реакции, что существенно повышает точность математической модели, а также позволяет адекватно оценить работоспособность разработанных САУ.

Рассмотрим результаты имитационного моделирования разработанных САУ на примере процесса суспензионной полимеризации стирола. Результаты представлены в виде трех графиков (рис. 2):  $X_m$  – конверсия мономера, %;  $T$  – температура реакционной массы, °С;  $N$  – скорость вращения мешалки, мин<sup>-1</sup>.

Кривые, представленные на графиках изменения температуры реакционной массы ( $T$ ) и скорости вращения мешалки ( $N$ ), имеют следующие обозначения:

- 1 – кривая изменения температурного режима в случае применения одноконтурной САУ температурой реакционной массы;
- 2 – кривая изменения температурного режима в случае применения предлагаемой САУ;
- 3 – кривая изменения задания контура управления температурой реакционной массы;
- 4 – кривая изменения скорости вращения мешалки;
- 5 – кривая изменения задания контура управления скоростью вращения мешалки.



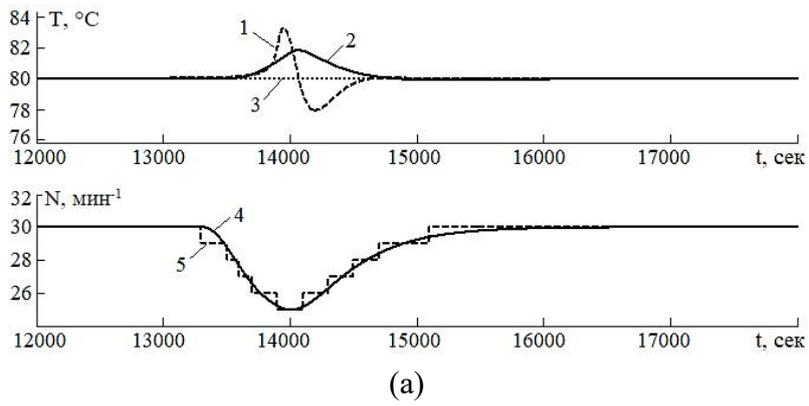
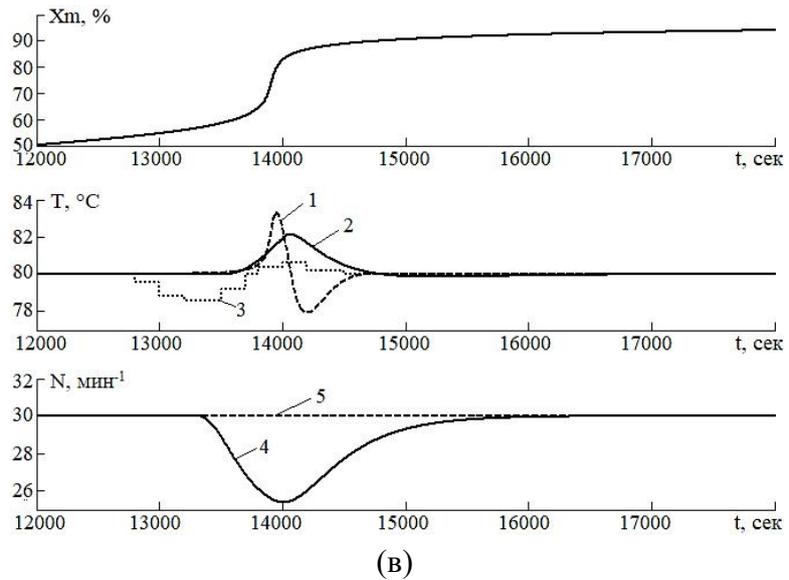
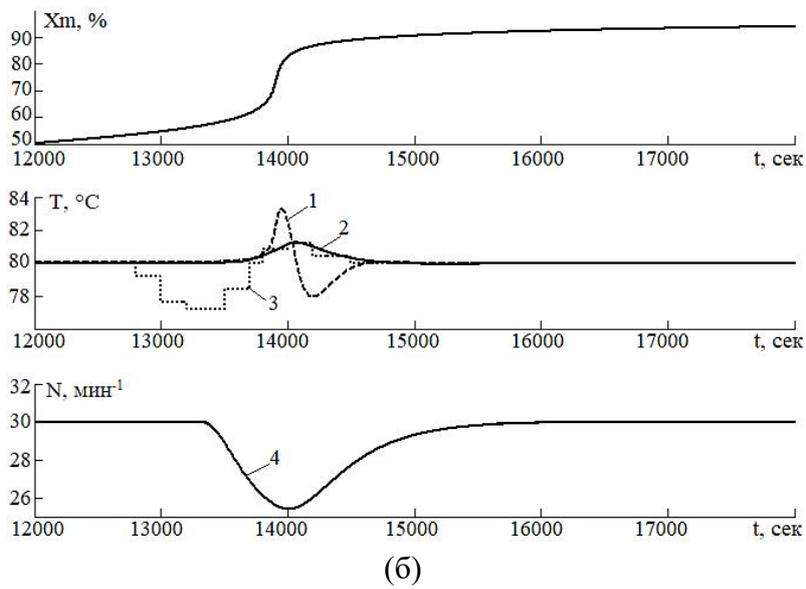


Рис. 2. Результаты имитационного моделирования работы САУ



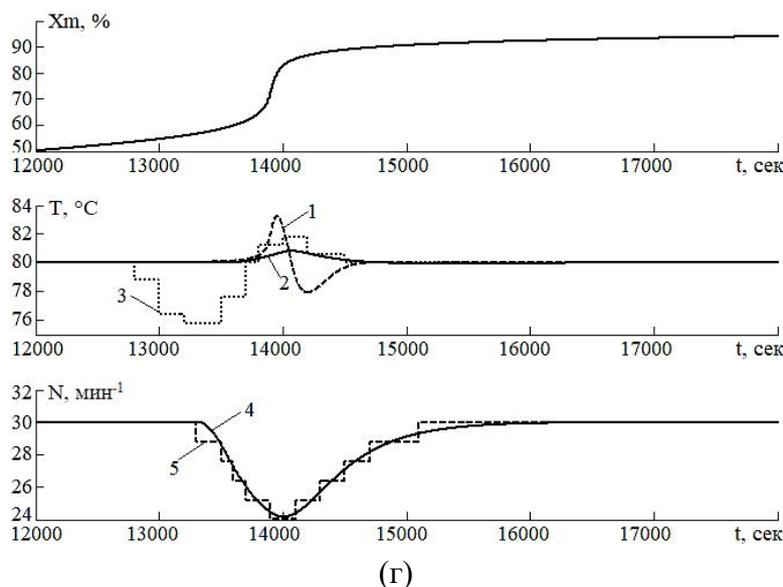


Рис. 2. Продолжение

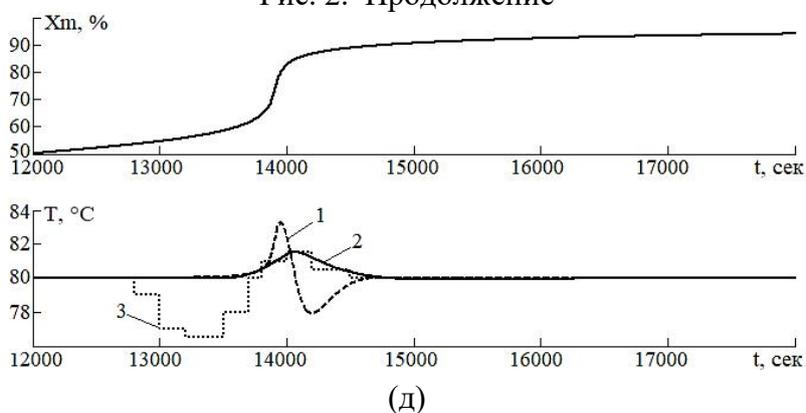


Рис. 2. Окончание

Приведенная на рис. 1а САУ с учетом математической модели процесса для коррекции скорости вращения мешалки ХРПД состоит из двух контуров управления [5]. Первый контур обеспечивает стабилизацию скорости вращения мешалки, а второй – стабилизацию температуры реакционной массы в ХРПД.

С целью уменьшения в ХРПД вязкости реакционной массы, которая начинает расти в момент проявления гель-эффекта, что может привести к «козлообразованию» во всем объеме ХРПД, в контур управления скоростью вращения введен специальный сигнал с блока КУ.

Блок КУ работает следующим образом: в течение всего процесса суспензионной полимеризации в блоке ММ рассчитывается оптимальная кривая изменения управляющего сигнала с регулятора  $R_T$ , который обеспечивает стабилизацию температуры реакционной массы в ХРПД. Пока сигнал с элемента сравнения  $\Delta U = U_M - U_T = 0$ , мешалка вращается с заданной первоначальной скоростью вращения  $N_{3д}$ . Как только  $\Delta U \neq 0$ , блок КУ вырабатывает корректирующее воздействие, которое меняет текущее заданное значение на величину  $N^K$ , т. е.  $N_{3д}^K = N_{3д} - N^K$ .

Изменение сигнала  $N^K$  с выхода блока КУ возможно как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения скорости вращения мешалки в ХРПД. Когда вязкость реакционной массы начинает увеличиваться, скорость вращения мешалки снижается,

что способствует уменьшению слипания полимер-мономерных частиц (ПМЧ) и, как следствие, уменьшению вероятности полного слипания ПМЧ во всем объеме ХРПД, а также снижению диссипации механической энергии на перемешивание, за счет чего можно существенно снизить отклонение текущей температуры реакционной массы в ХРПД от заданного значения.

После прохождения липкой стадии в процессе суспензионной полимеризации скорость вращения мешалки за счет увеличения сигнала  $N^K$  возвращается к начальному заданному значению  $N_{зд}$ . Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2а.

В представленной на рис. 1б САУ с упреждающим воздействием в контуре температуры в зависимости от нагрузки на электродвигатель мешалки реактора вводится дополнительное корректирующее воздействие в виде сигнала  $S_K$  с блока КУ [6]. Блок ММ в течение всего процесса суспензионной полимеризации отслеживает скорость изменения токовой нагрузки  $I$  на АЭД. Когда скорость начинает резко возрастать (что соответствует проявлению гель-эффекта, способствующего резкому увеличению текущего значения температуры реакционной массы в ХРПД), при превышении заданного значения блок ММ выдает сигнал  $U_M$  на блок КУ, который за счет сигнала  $S_K$  увеличивает ошибку рассогласования  $\varepsilon_T = T_{зд} - T + S_K$ , в результате чего возрастает подача хладагента в рубашку ХРПД. Это приводит к уменьшению отклонения текущей температуры реакционной массы в ХРПД от заданного значения. Токосигнал  $I$  на АЭД выбран в качестве сигнала упреждения, поскольку вязкость реакционной массы начинает изменяться раньше, чем температура реакционной массы, из-за большой разности инерционности по каналам прохождения сигналов [1]. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2б.

Развитием структурной схемы САУ, показанной на рис. 1б, является структурная схема САУ, приведенная на рис. 1в, отличительной особенностью которой является наличие контура стабилизации скорости вращения мешалки в ХРПД [8].

В схеме САУ, представленной на рис. 1в, в блоке ММ оценивается скорость изменения сигнала  $U_N$  на выходе регулятора  $R_N$ . В момент проявления гель-эффекта увеличивается вязкость реакционной массы, что приводит к резкому изменению сигнала  $U_N$ , который указывает на увеличение температуры реакционной массы. В этот момент блок ММ выдает сигнал на блок КУ, который за счет сигнала  $S_K$  способствует увеличению ошибки рассогласования  $\varepsilon_T = T_{зд} - T + S_K$  в контуре стабилизации температуры реакционной массы в ХРПД, что приводит к заблаговременному снижению температуры реакционной массы в ХРПД от заданного значения. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2в.

Структурная схема САУ с двумя контурами управления и коррекции показана на рис. 1г [7]. В каждый контур управления включен канал коррекции, при этом по изменению сигнала  $U_N$  блок КУ1 изменяет значение ошибки рассогласования  $\varepsilon_T = T_{зд} - T + S_{K1}$ , способствуя тем самым заблаговременному уменьшению отклонения температуры реакционной массы в ХРПД от заданного значения. Изменение сигнала  $U_T$  на входе блока КУ2 способствует выработке сигнала коррекции  $S_{K2}$ , который изменяет заданное значение скорости вращения мешалки  $N_{зд}^K = N_{зд} - S_{K2}$ , что способствует снижению слипаемости ПМЧ. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2г.

Показанная на рис. 1д САУ температурой реакционной массы с каналом упреждения по скорости вращения мешалки включает два контура управления

(быстродействующий и инерционный) одной переменной – температурой реакционной массы [9]. Быстродействующий контур управления обеспечивает стабилизацию температуры реакционной массы внутри ХРПД с помощью регулятора  $R_N$ . Инерционный контур управления обеспечивает стабилизацию температуры реакционной массы внутри ХРПД с помощью регулятора  $R_T$ .

В инерционный контур управления, как показано на рис. 1д, введен канал упреждения, вырабатывающий сигнал коррекции  $S_K$  на выходе блока КУ, который в течение процесса суспензионной полимеризации отслеживает состояние ХРПД, используя быстродействующий канал управления. Это позволяет заблаговременно определить момент увеличения диссипации механической энергии на перемешивание, что фиксируется в блоке КУ на основе изменения сигнала  $U_N$  на выходе регулятора  $R_N$ . Если значение  $U_N$  превышает заданный предел, вырабатывается сигнал  $S_K$ , увеличивающий значение сигнала  $\varepsilon^K = \varepsilon + S_K$ , что способствует значительному замедлению роста температуры реакционной массы в ХРПД. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2д.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа графиков изменения температуры реакционной массы, полученных при моделировании классической одноконтурной САУ, и графиков изменения температуры реакционной массы, полученных при моделировании разработанных САУ, видно, что максимальная динамическая ошибка регулирования всегда меньше по сравнению с классической одноконтурной САУ. Большое отклонение температуры реакционной массы от заданного значения может отрицательно сказаться на устойчивой работе ХРПД. Кроме того, для разработанных САУ характерно полное отсутствие перерегулирования, что также является очень хорошим показателем качества предложенных САУ.

Таким образом, полученные результаты моделирования говорят о высоком качестве регулирования САУ, предложенных в работе.

С точки зрения промышленной реализации разработанных САУ наиболее предпочтительно использовать САУ, представленные на рис. 1б, в и г, поскольку отсутствует необходимость в программной реализации на промышленных средствах автоматизации математической модели ХРПД для конкретного процесса суспензионной полимеризации. Данная модель включает в себя большое количество дифференциальных, алгебраических и эмпирических уравнений, а также реализации численных алгоритмов их совместного решения в реальном масштабе времени (в течение процесса суспензионной полимеризации).

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-07-00914 А)

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Дранишников Л.В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы полимеризации. М.: Наука, 1991. 349 с.
2. Реакторная динамика процесса суспензионной полимеризации стирола / Д.П. Вент [и др.] // *Теоретические основы химической технологии*. 2020. Т. 54. № 5. С. 615–622.
3. Факторный анализ кинетики радикальной полимеризации метилметакрилата / Д.П. Вент [и др.] // *Теоретические основы химической технологии*. 2018. Т. 52. № 5. С. 555–561.

4. Прикладная кинетика суспензионной полимеризации стирола / Д.П. Вент [и др.] // *Теоретические основы химической технологии*. 2014. Т. 48. № 3. С. 356–360.
5. Патент РФ 2534365. Способ автоматического управления реактором синтеза суспензионной полимеризации стирола / Сафин М.А., Вент Д.П., Лопатин А.Г., Савельянов В.П. Заявл. 24.04.2012. Опубл. 27.11.2014. Бюл. № 33.
6. Патент РФ 2649039. Способ автоматического управления реактором суспензионной полимеризации стирола / Лопатин А.Г., Вент Д.П., Самородова И.И. Заявл. 30.01.2017. Опубл. 29.03.2018. Бюл. № 10.
7. Патент РФ 2669791. Способ автоматического управления реактором суспензионной полимеризации / Лопатин А.Г., Вент Д.П., Брыков Б.А., Стекольников А.Ю. Заявл. 04.06.2018. Опубл. 16.10.2018. Бюл. № 29.
8. Патент РФ 2679221. Способ автоматического управления реактором суспензионной полимеризации / Лопатин А.Г., Вент Д.П., Брыков Б.А., Стекольников А.Ю. Заявл. 16.04.2018. Опубл. 06.02.2019. Бюл. № 4.
9. Патент РФ 2754804. Способ автоматического управления реактором суспензионной полимеризации / Лопатин А.Г., Вент Д.П., Брыков Б.А. Заявл. 20.02.2020. Опубл. 07.09.2021. Бюл. № 25.
10. Лопатин А.Г., Брыков Б.А., Вент Д.П. Исследование динамических свойств промышленного реактора синтеза полиметилметакрилата // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 9 (140). С. 91–100.
11. Curteanu S. Modeling and simulation of free radical polymerization of styrene under semibatch reactor conditions // *Central European Journal of Chemistry*. 2003. V. 1. № 1. P. 69–90.
12. Silvia Curteanu V.B., Lisa C. Free radical polymerization of methyl methacrylate: modeling and simulation by moment generating function // *Iranian Polymer Journal*. 1998. V. 7. P. 225–233.

**Для цитирования:** Егоров А.Ф., Лопатин А.Г., Брыков Б.А. Разработка систем управления периодическим реактором суспензионной полимеризации с учетом взаимного влияния каналов регулирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 78–86.

#### **DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEMS FOR A SUSPENSION POLYMERIZATION BATCH REACTOR WITHIN THE MUTUAL INFLUENCE OF CONTROL CHANNELS**

A.F. EGOROV<sup>1</sup>, Dr. Sc., A.G. LOPATIN<sup>2</sup>, Cand. Sc., B.A. BRYKOV<sup>2</sup>, Senior Lecturer

<sup>1</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation; e-mail: egorov.a.f@muctr.ru

<sup>2</sup> Novomoskovsk Institute of MUCTR

8, st. Druzhby, Novomoskovsk, 301665, Russian Federation; e-mail: lopatin.a.g@muctr.ru

The issue of control of batch chemical reactors is considered on the example of suspension polymerization processes. The relevance of the work is due to the nature of the suspension polymerization processes occurring in the reactor and not allowing to provide control based on classical single-loop control systems. It is shown that efficient control of the polymer synthesis reactor from the point of view of process technology is possible due to the presence of two stabilization loops in the control system: mixture temperature and stirrer

rotation speed. Block diagrams of such control systems are given, the principle of their operation is described. Comparative analysis of the quality of systems was carried out by simulation. It is concluded that the above control systems are superior to single-circuit systems in all quality indicators, which confirms the feasibility of their development.

*Keywords:* automatic control system, double-loop systems, batch reactor, suspension polymerization.

Поступила в редакцию/received: 22.11.2022; после рецензирования/ revised: 28.11.2022; принята/accepted: 05.12.2022

УДК 681.5.01

## **О МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПОШАГОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА УЧАСТКЕ ДОВЕДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ НАГРУЗОК\***

Г.В. КАЗАКОВ, канд. техн. наук, П.В. КОРОБОВ, канд. техн. наук,  
А.В. СИДОРОВ, старший научный сотрудник

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт» Минобороны РФ  
141091, Московская обл., Королев, ул. М.К. Тихонравова, 29; e-mail: 4cnii@mil.ru

© Казаков Г.В., Коробов П.В., Сидоров А.В., 2023

Рассмотрено решение задачи определения оптимальных управлений поступательным движением центра масс летательного аппарата на участке доведения полезных нагрузок в импульсной схеме полета двумя методами: пошаговой оптимизации (оптимизация программы управления движением центра масс определяется исходя из минимума затрат топлива двигательной установки на каждом шаге доведения полезных нагрузок) и оптимизации в целом (оптимальное управление движением центра масс летательного аппарата на участке доведения полезных нагрузок определяется исходя из минимума суммы затрат топлива двигательной установки на всех одношаговых переходах с одной попадающей траектории на другую). Установлено, что программа управления летательным аппаратом на участке доведения, оптимальная на каждом шаге доведения, не будет оптимальной для всего участка доведения в целом. В рамках импульсной схемы полета на участке доведения полезных нагрузок

---

\* Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022 г., Тверь, Тверской государственный технический университет).

рассчитана величина методической погрешности метода пошаговой оптимизации.

*Ключевые слова:* двигательная установка, движение центра масс, доводочная ступень, летательный аппарат, полезная нагрузка, пошаговая оптимизация, участок доведения, энергетические затраты.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-87-94**

## **ВВЕДЕНИЕ**

Программу управления движением центра масс летательного аппарата (ЛА) на участке доведения полезной нагрузки (ПН) обычно определяют исходя из минимума энергетических затрат двигательной установки (ДУ) доводочной ступени (ДС) на ее реализацию [1, 2]. При этом минимизация критерия оптимизации (энергетические затраты ДУ) по определению программы управления осуществляется на каждом шаге доведения ПН, т. е. принимается допущение о том, что управления движением центра масс ЛА, оптимальные (минимальные) по энергетике для каждого шага доведения ПН, будут оптимальными и для всего участка доведения ПН ЛА. Такой подход к определению программы движения ЛА на участке доведения ПН будем называть в дальнейшем пошаговой оптимизацией, в отличие от оптимизации в целом, когда программа управления движением ДС ЛА определяется исходя из минимума суммарных энергетических затрат ДУ ДС на всем участке доведения ПН.

Цель работы – определить методическую погрешность метода пошаговой оптимизации или допущения о том, что минимум суммы энергетических затрат ДУ при доведении ПН ЛА равен сумме минимумов энергетических затрат ДУ на каждом шаге доведения ПН.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Задачу оптимизации программы движения ЛА на участке доведения ПН будем рассматривать при заданном порядке обхода терминальных точек (пунктов прибытия ПН). Анализ известных методик решения задачи оптимизации программы движения ЛА на участке доведения ПН [1, 2] показывает, что программы управления движением центра масс ЛА определяются на основе пошаговой оптимизации, т. е. программа управления определяется из условия минимума энергетических затрат ДУ на каждом шаге доведения ПН (под шагом доведения ПН понимается переход ЛА с  $i$ -й на  $(i + 1)$ -ю попадающую траекторию). Предпосылкой пошагового подхода является предположение о том, что программы управления, оптимальные на каждом шаге доведения ПН, будут оптимальными и для всего участка доведения ПН, т. е. предполагается равенство минимума суммы энергетических затрат ДУ на участке доведения ПН сумме минимумов энергетических затрат на одношаговые переходы. На этой основе исходная задача определения оптимальных управлений полетом ЛА декомпозируется на  $(n - 1)$  задачу оптимизации (где  $n$  – количество терминальных точек). Однако вследствие зависимости вектора управлений на  $i$ -м шаге доведения ПН от вектора управлений на  $(i - 1)$ -м шаге доведения указанное выше предположение не выполняется. Поэтому программа управления ЛА, оптимальная для каждого в отдельности одношагового перехода, не будет глобально-оптимальной для участка доведения ПН ЛА в целом (рисунок).

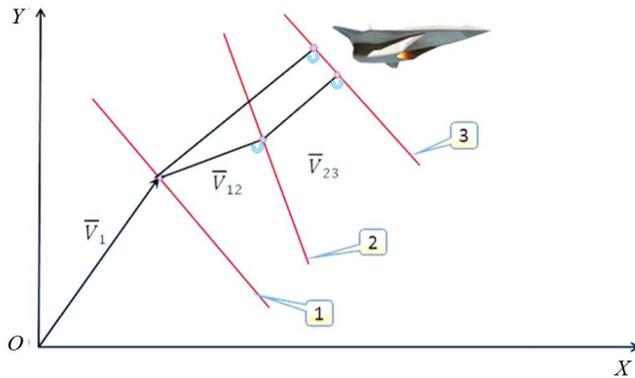


Иллюстрация пошаговой оптимизации и оптимизации в целом:

1–3 – линеаризованные годографы векторов скорости попадающих траекторий

Сформулируем в общем виде задачу оптимизации программы движения центра масс ЛА на участке доведения ПН. Дано:

1) модель программного полета

$$\dot{X} = F_{\pi}(t, X, U),$$

где  $X$  – фазовый вектор координат центра масс ЛА и проекций скоростей ЛА;  $U$  – фазовый вектор управлений;  $F_{\pi}$  – заданная вектор-функция для программного полета в выбранной схеме полета;

2) модель баллистического полета

$$\ddot{X} = F_{\sigma}(t, X),$$

где  $F_{\sigma}$  – заданная вектор-функция для выбранной модели баллистического полета;

3) начальные условия программного полета

$$t = 0, X = X_0;$$

4) краевые условия

$$r_1, r_2, \dots, r_n,$$

где  $r_i (i = \overline{1, n})$  – заданные радиус-векторы терминальных точек;  $n$  – количество терминальных точек;

5) порядок обхода терминальных точек

$$\pi(i_1, i_2, \dots, i_n),$$

где  $i_1, i_2, \dots, i_n$  – номера терминальных точек;

6) критерий оптимизации

$$J = \sum_{i=2}^n \Delta m_i,$$

где  $\Delta m_i$  – затраты топлива ДУ ДС на одношаговый переход.

Требуется определить фазовый вектор управлений  $U(t)$ , обеспечивающий минимум по критерию оптимизации и удовлетворяющий условиям 3–5.

Основные допущения:

1) решение задачи рассматривается с применением модели баллистического полета в рамках кеплеровой схемы: Земля – невращающаяся сфера заданного радиуса,

атмосфера отсутствует, действует одна центральная сила притяжения Земли;

2) программный полет рассматривается в рамках импульсной схемы, пренебрегается время на сообщении ДУ ЛА дополнительной скорости ПН, участок доведения ПН сводится в точку;

3) начальные условия программного полета обеспечивают попадание первой ПН в заданную первую терминальную точку.

Введем систему координат участка доведения. Начало системы координат поместим в точку  $O$  – точку начала участка доведения. Ось  $OY$  является продолжением радиус-вектора точки  $O$ . Ось  $OX$  перпендикулярна оси  $OY$  и лежит в плоскости, проходящей через вектор  $r_0$  и радиус-вектор первой терминальной точки  $r_1$ . Ось  $OZ$  дополняет систему координат до правой тройки.

За вектор управлений  $U(t)$  примем цилиндрические координаты  $V_{yi}, V_{gi}, E_i$  ( $i = \overline{2, n}$ ), где  $V_{yi}$  – проекция вектора скорости на  $i$ -м шаге доведения на ось  $OY$ ;  $V_{gi}$  – проекция вектора скорости на плоскость  $XZ$ ;  $E_i$  – угол между плоскостью  $XY$  и плоскостью, проходящей через  $r_0$  и радиус-вектор  $i$ -й терминальной точки  $r_i$ . Угол  $E_i$  может быть однозначно определен по заданным координатам терминальных точек.

Для определения условий попадания  $i$ -й ПН в  $i$ -ю терминальную точку, записанных в цилиндрических координатах  $V_{yi}, V_{gi}, E_i$  ( $i = \overline{2, n}$ ), используем известную формулу дальности полета ПН по эллиптической траектории [3]:

$$\chi_i \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\Phi_i}{2} - 2 \cdot \operatorname{tg} \Theta_i \cdot \operatorname{tg} \frac{\Phi_i}{2} - h = 0, \quad (1)$$

где  $\chi_i = \frac{1}{k_i \cdot \cos^2 \Theta_i} - 2 - h$  – введенное безразмерное обозначение ( $k_i = \frac{r_0 \cdot V_i^2}{2 \cdot b_0}$  – безразмерное отношение кинетической энергии точки в любой момент движения к той работе, которую необходимо затратить для переноса этой точки в бесконечность из положения, занимаемого ею в рассматриваемый момент времени, где  $r_0$  – заданный радиус начала участка доведения ЛА;  $b_0 = 3,986032 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$  – гравитационная постоянная Земли);  $h = \frac{r_0 - R}{R}$  – безразмерная относительная высота участка доведения по отношению к радиусу Земли  $R$ ;  $\Phi_i$  – угловая дальность  $i$ -й терминальной точки от начала участка доведения.

Запишем выражение (1) через цилиндрические координаты, используя следующие очевидные соотношения:

$$\cos \Theta_i = \frac{V_{gi}}{V_i}; \quad \operatorname{tg} \Theta_i = \frac{V_{yi}}{V_{gi}}; \quad V_i^2 = V_{gi}^2 + V_{yi}^2.$$

После несложных преобразований условие попадания  $i$ -й ПН в  $i$ -ю терминальную точку, записанное в цилиндрических координатах  $V_{yi}, V_{gi}, E_i$  ( $i = \overline{2, n}$ ), примет следующий вид:

$$V_{yi} = \frac{a_i \frac{b_0}{r_0} - b_i V_{gi}^2}{V_{gi}}, \quad (2)$$

где безразмерные введенные параметры:

$$a_i = \operatorname{tg} \frac{\Phi_i}{2}; \quad b_i = a_i + \frac{h}{2} \cdot \left( a_i + \frac{1}{a_i} \right); \quad i = \overline{2, n}.$$

Импульс скорости, требуемый для перехода с  $(i - 1)$ -й на  $i$ -ю попадающую

траекторию, с использованием теоремы косинусов может быть представлен в виде

$$\Delta V_{i-1,i}^2 = V_{gi}^2 + V_{gi-1}^2 + (V_{yi} - V_{yi-1})^2 - 2 \cdot V_{gi} \cdot V_{gi-1} \cdot \cos(E_i - E_{i-1}) \quad (3)$$

Суммарные энергетические затраты ДУ на реализацию программы движения центра масс ЛА на участке доведения ПН могут быть получены по известной формуле К.Э. Циолковского для характеристической скорости  $\Delta V$  следующим образом [4]:

$$\Delta V = u_e \cdot \ln \frac{m_0}{m_0 - m_t}, \quad (4)$$

где  $u_e$  – эффективная скорость истечения газов из сопла ДУ ДС;  $m_0$  – масса ЛА до маневра;  $m_t$  – масса топлива ДУ, расходуемого на маневр ЛА.

Если в полете для всех маневров используется одно и то же топливо и характеристики всех двигателей, работающих в процессе маневров, одинаковы, то, решая выражение (4) относительно  $m_t$  и учитывая, что в нашем случае имеется  $(n - 1)$  маневр, мы можем рассчитать суммарные энергетические затраты ДУ на реализацию программы движения центра масс ЛА по формуле

$$\Delta m_\Sigma = \sum_{i=2}^n (m_{i-1} - m_{эi-1}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta V_{i-1,i}}{u_e}}\right), \quad (5)$$

где  $m_{i-1}$  – масса ЛА перед отделением  $(i - 1)$ -й ПН;  $m_{эi-1}$  – масса  $(i - 1)$ -й ПН.

Решим сформулированную задачу методом пошаговой оптимизации и методом оптимизации в целом, а затем сравним результаты для определения методической погрешности метода пошаговой оптимизации.

Для пошаговой оптимизации из формулы (5) для  $i = 2$  (требуемые затраты топлива для перехода с первой на вторую попадающую траекторию) имеем

$$\Delta m_2 = (m_1 - m_{э1}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta V_{1,2}}{u_e}}\right),$$

где с учетом принятого допущения об обеспечении попадания первой ПН в первую терминальную точку за счет начальных условий участка разведения (что не нарушает общности рассуждений) требуемый для перехода на вторую попадающую траекторию импульс скорости

$$\Delta V_{1,2}^2 = V_{g2}^2 + V_{g1}^2 + (V_{y2} - V_{y1})^2 - 2V_{g2}V_{g1} \cos(E_2 - E_1).$$

Параметры с индексом «1» определяются по начальным условиям и, таким образом, с учетом уравнения (2)  $\Delta m_2$  является функцией одной независимой переменной  $V_{g2}$ :

$$\Delta m_2 = \Delta m_2(V_{g2})$$

или в общем случае для всего участка доведения ПН:

$$\Delta m_i = \Delta m_i(V_{gi}), i = \overline{2, n} \quad (6)$$

Условие экстремума функции вида (6) на каждом шаге доведения запишем в виде

$$\frac{d\Delta m_i(V_{gi})}{dV_{gi}} = 0, i = \overline{2, n},$$

или

$$\left[ V_{gi} + (V_{yi} - V_{yi-1}) \cdot \frac{dV_{yi}}{dV_{gi}} - V_{gi-1} \cdot \cos(E_i - E_{i-1}) \right] = 0,$$

и после несложных преобразований имеем в общем виде для определения требуемого вектора управлений в цилиндрической системе координат следующую сводку соотношений:

$$\begin{aligned} V_{gi}^4 + l_1 \cdot V_{gi}^3 + l_2 \cdot V_{gi} + l_3 &= 0; \\ V_{yi} &= \frac{(a_i \cdot b_0 / r_0 - b_i \cdot V_{gi}^2)}{V_{gi}}, i = \overline{2, n}; \\ a_i &= \operatorname{tg} \frac{\Phi_i}{2}, b_i = a_i + \frac{h}{2} \cdot \left( a_i + \frac{1}{a_i} \right), h = \frac{r_0 - R}{R}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $l_1, l_2, l_3$  на первом шаге участка доведения определяются по начальным условиям, а затем на последующих шагах – по параметрам найденной по сводке соотношений (7) попадающей траектории предыдущего шага:

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{[b_i \cdot V_{yi-1} - V_{gi-1} \cdot \cos(E_i - E_{i-1})]}{1 + b_i^2}; \\ l_2 &= \frac{a_i \cdot \frac{b_0}{r_0} \cdot V_{yi-1}}{1 + b_i^2}, i = \overline{2, n}; \\ l_3 &= -\frac{\left( a_i \cdot \frac{b_0}{r_0} \right)^2}{1 + b_i^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение четвертой степени в сводке соотношений (7) в общем случае не имеет аналитического решения в радикалах и может быть решено методом последовательных приближений. Таким образом, по сводке соотношений (7) с применением выражений (8) могут быть получены  $V_{gi}, V_{yi}, E_i (i = \overline{2, n})$ , т. е. выбранный вектор управлений  $U(t)$ , обеспечивающий минимум затрат топлива на каждом шаге доведения ПН.

Рассмотрим оптимизацию в целом.

Анализ формулы (5) с учетом формул (2) и (3) позволяет сделать вывод о том, что  $\Delta t_\Sigma$  является функцией  $(n - 1)$  независимой переменной  $V_{g2}, V_{g3}, \dots, V_{gn}$ , т. е.

$$\Delta t_\Sigma = \Delta t_\Sigma(V_{g2}, V_{g3}, \dots, V_{gn}). \quad (9)$$

Таким образом, решение сформулированной задачи методом оптимизации в целом в рамках импульсной схемы полета сводится к определению экстремума функции  $(n - 1)$  независимой переменной вида (9).

Записывая условия экстремума функции  $(n - 1)$  независимой переменной и произведя несложные преобразования, получим систему  $(n - 1)$  нелинейного уравнения с  $(n - 1)$ -м неизвестным следующего вида:

$$\begin{aligned} & \frac{m_i}{\Delta V_{i-1,i}} \cdot \left[ V_{gi} + (V_{yi} - V_{yi-1}) \cdot \frac{dV_{yi}}{dV_{gi}} - V_{gi-1} \cdot \cos(E_i - E_{i-1}) \right] + \\ & + \frac{m_{i+1}}{\Delta V_{i,i+1}} \cdot \left[ V_{gi} + (V_{yi} - V_{yi+1}) \cdot \frac{dV_{yi}}{dV_{gi}} - V_{gi+1} \cdot \cos(E_i - E_{i+1}) \right] = 0, \quad i = \overline{2, n-1}; \quad (10) \\ & V_{gn} + (V_{yn} - V_{yn-1}) \cdot \frac{dV_{yn}}{dV_{gn}} - V_{gn-1} \cdot \cos(E_n - E_{n-1}) = 0, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} m_i &= (m_{i-1} - m_{gi-1}) \cdot e^{\frac{\Delta V_{i-1,i}}{u_e}}; \\ V_{yi} &= \frac{a_i \cdot \frac{b_0}{r_0} - b_i \cdot V_{gi}^2}{V_{gi}}; \\ \frac{dV_{yi}}{dV_{gi}} &= -a_i \cdot \frac{b_0}{r_0 V_{gi}^2} - b_i. \end{aligned}$$

Анализ системы уравнений (10) показал, что равенство нулю первой квадратной скобки представляет собой условие пошаговой оптимизации, а вторая квадратная скобка – влияние следующего шага доведения на текущий шаг.

Для решения системы уравнений (10) целесообразно в качестве первого приближения использовать решения исходной задачи, полученные методом пошаговой оптимизации, т. е.  $U_i^*(t)$  ( $i = \overline{2, n}$ ). Тогда систему нелинейных уравнений (10) мы можем линеаризовать в окрестности решений  $U_i^*(t)$  ( $i = \overline{2, n}$ ) и после несложных преобразований получить систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned} & F_i(U_i^*(t)) + \frac{\partial F_i}{\partial V_{gi-1}}(U_i^*(t)) \cdot \Delta V_{gi-1} + \\ & + \frac{\partial F_i}{\partial V_{gi}}(U_i^*(t)) \cdot \Delta V_{gi} + \frac{\partial F_i}{\partial V_{gi+1}}(U_i^*(t)) \cdot \Delta V_{gi+1} = 0; \\ & F_n(U_n^*(t)) + \frac{\partial F_n}{\partial V_{gn-1}}(U_n^*(t)) \cdot \Delta V_{gn-1} + \\ & + \frac{\partial F_n}{\partial V_{gn}}(U_n^*(t)) \cdot \Delta V_{gn} + \frac{\partial F_n}{\partial V_{gn+1}}(U_n^*(t)) \cdot \Delta V_{gn+1} = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $F_i(U_i^*(t))$ ,  $\frac{\partial F_i}{\partial V_{gi}}(U_i^*(t))$  – значения функций левых частей системы уравнений (10) и их производных после подстановки решений исходной задачи методом пошаговой оптимизации;  $\Delta V_{gi}$  – поправки к решениям задачи методом пошаговой оптимизации для получения оптимальных в целом управлений для участка доведения.

Таким образом, решение исходной задачи методом оптимизации в целом сводится к решению системы линейных уравнений (11), т. е. оптимальные для всего участка доведения управления  $U(t)$  могут быть определены методом итераций с заданной точностью следующим образом:

1) из решения системы (11) определяем поправки на  $k$ -м шаге итераций (при достижении заданной точности) для определения оптимальных для всего участка доведения ПН цилиндрических координат вектора управлений:

$$V_{gi} = V_{gi}^k + \Delta V_{gi};$$

2) по формуле (2) определяем  $V_{yi}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ предварительных численных результатов позволяет сделать выводы: погрешность пошаговой оптимизации для расстояний между терминальными точками менее 500 км не превышает 2 % от суммарных энергетических затрат ДУ ДС, а при расстояниях более 500 км может достигать 6 %; при вариации порядка обхода терминальных точек погрешность пошаговой оптимизации принимает минимальное значение при оптимальном по энергетике порядке обхода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены численные исследования метода оптимизации в целом и оценена методическая погрешность метода пошаговой оптимизации при определении оптимальной программы полета ЛА в рамках выбранных схем программного (импульсная схема) и баллистического (кеплерова схема) полетов. Полученные результаты позволяют судить о существенной зависимости погрешности пошаговой оптимизации от координат терминальных точек, порядка их обхода и типа опорной траектории (траектории, проходящей через первую терминальную точку). Исследования проведены для типовых конфигураций расположения терминальных точек, в качестве которых выбраны конфигурации, охватывающие равномерные по площади геометрии (решетка, правильный многоугольник) и вытянутые в каком-либо направлении геометрии расположения терминальных точек (прямая).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Разоренов Г.А. Лекции по механике полета баллистических ракет. М.: Машиностроение-Полет. 2019. 564 с.
2. Гарантированное оценивание конечного фазового состояния управляемых систем на заданном множестве достижимости / М.М. Бордюков [и др.] // *Двойные технологии*. 2009. № 4. С. 34–38.
3. Погорелов Д.А. Теория кеплеровых движений летательных аппаратов. М.: Физматгиз. 1961. 107 с.
4. Одинцов В.А., Анучин В.М. Маневрирование в космосе. М.: Воениздат. 1974. 152 с.

**Для цитирования:** Казаков Г.В., Коробов П.В., Сидоров А.В. О методической погрешности пошаговой оптимизации программы управления движением летательного аппарата на участке доведения полезных нагрузок // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 87–94.

## ON THE METHODOLOGICAL ERROR OF STEP-BY-STEP OPTIMIZATION OF THE AIRCRAFT MOTION CONTROL PROGRAM IN THE PAYLOAD ADJUSTMENT SECTION

G.V. KAZAKOV, Cand. Sc., P.V. KOROBOV, Cand. Sc., A.V. SIDOROV, Senior Researcher

FSBI “4 Central Research Institute” of the Ministry of Defense of Russia  
29, M.K. Tikhonravova st., Korolev, 141091, Russian Federation; e-mail: 4cnii@mil.ru

The solution of the problem of determining optimal control of the translational motion of the center of mass of the aircraft in the section of bringing payloads in the pulse flight scheme by two methods is considered: step-by-step optimization method (the optimization of the center of mass motion control program is determined based on the minimum fuel consumption of the propulsion system at each step of adjusting the payloads) and the optimization method as a whole (optimal control of the movement of the center of mass of the aircraft in the payload bringing section is determined based on the minimum amount of fuel consumption of the engine system at all one-step transitions from one falling path to another). It has been found that the control program of the aircraft in the bringing section, optimal at each bringing step, will not be optimal for the entire bringing section as a whole. Within the framework of the pulse flight scheme, the value of the methodological error of the step-by-step optimization method is calculated at the section of bringing payloads.

*Keywords:* propulsion system, center of mass movement, finishing stage, aircraft, payload, step by step optimization, finishing section, energy costs.

Поступила в редакцию/received: 30.10.2022; после рецензирования/ revised: 12.11.2022;  
принята/accepted: 24.11.2022

УДК 681.5.01

## ОЦЕНКА РЕШЕНИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА \*

Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук, А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22; e-mail: gbtms@yandex.ru

© Бурдо Г.Б., Болотов А.Н., 2023

Показано, что специфика единичного и мелкосерийного приборостроительного и машиностроительного производства предполагает одновременную реализацию значительного числа договоров, что подразумевает упрощенную и не всегда адекватную техническую подготовку производства. Выявлены основные принципы организационно-технологического проектирования, проанализированы теоретико-множественная и временная модели производственной системы, позволяющие выявлять критерии при проведении технологической подготовки. Установлены субъекты и объекты производственной системы и временные точки для определения указанных критериев. Показано, что теоретико-множественная модель процедуры установления критериев технологической подготовки производства отражает информационную структуру производственной системы, а временная структура обеспечивает синхронизацию по времени выполняемых процедур.

*Ключевые слова:* система автоматизированного проектирования технологических процессов, технологическая подготовка производства, искусственный интеллект, целевая функция, единое информационное пространство, системный подход.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-94-101**

---

\* Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022 г., Тверь, Тверской государственный технический университет).

## ВВЕДЕНИЕ

Специфика единичного и малосерийного приборостроительного и машиностроительного производства предполагает нахождение в производстве большого числа заказов одновременно, а следовательно, и упрощенную техническую подготовку производства.

Важнейшей частью технической подготовки является технологическая подготовка производства (ТПП), охватывающая действия по проектированию технологических процессов и технологической оснастки, подбору средств автоматизации и механизации технологических процессов. Для осознанного и целенаправленного проведения ТПП с применением систем автоматизированной подготовки необходимо задание критериев ее выполнения для конкретного заказа. Отсутствие подобных указаний вследствие высокой динамичности производственной ситуации позволяет проектировщику разрабатывать технологические процессы по своему усмотрению, что не всегда соотносится с их качеством. Поэтому важным аспектом является нахождение компромисса между качеством ТПП и небольшими сроками ее осуществления [1–4].

## ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Одним из подходов к устранению дисбаланса между динамичной производственной системой и качеством ТПП является создание автоматизированных систем проектирования технологических процессов (САПР ТП), построенных на выявленных в работах [1–4] принципах. Смысл подхода заключается в осознании того факта, что ТПП является слабо формализованной, многовариантной организационно-технологической задачей, решаемой в условиях информационной неопределенности [1, 2, 5, 6]. Предлагаемые принципы состоят в следующем.

1. *Проектирование технологических процессов в соответствии с критериями, устанавливаемыми для конкретного заказа.* Для каждого заказа должны формироваться критерии, по которым проектировщиками оценивается качество проведения ТПП.

2. *Проектирование технологических процессов с учетом текущей загрузки оборудования в производственных подразделениях.* Подразумевается загрузка наиболее свободных рабочих мест путем целенаправленного выбора оборудования для выполнения технологических операций.

3. *Создание при ТПП предпосылок эффективного управления технологическими процессами.* Предполагается обеспечение равномерной загрузки рабочих мест, что сокращает время пролеживания деталей перед выполнением операций.

4. *Высокая оперативность технической подготовки производства.* Предполагается меньшее время проведения технической подготовки производства по сравнению с оставшимся временем до запуска заказа.

## ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Изменчивость ситуации, складывающейся в производственной системе организации и в договорной политике (имеющееся незагруженное оборудование, появление новых контрактов и изменение условий выполнения действующих, изменение условий работы подрядчиков, финансовое состояние и т. п.), обуславливает необходимость установления критериев выполнения конкретного заказа.

Обычно предполагается [5–7 и др.], что критерием может быть или минимизация технологической себестоимости  $C_{\min}$ , или максимизация штучной производительности  $Q_{\max}$ .

Указанные подходы имеют некоторую односторонность и не свойственны производственным системам многономенклатурного машиностроения. Минимизация технологической себестоимости предполагает получение максимальной прибыли, что может иметь место при устоявшейся номенклатуре выпуска и при условии проведения серьезных технологических мероприятий. В случае рассматриваемого нами производства для этого просто не будет времени [8–11].

Максимум штучной производительности свойственен производствам, продукция которых имеет неограниченный спрос, что, скорее всего, в нормальных условиях работы производственной системы может быть лишь гипотетически.

Стоит также отметить, что один какой-либо критерий не позволит учесть все стороны деятельности производственной системы. Очевидно, компромисс следует искать в рамках дилеммы «технические показатели – экономические показатели».

Рассмотрим еще один критерий, имеющий организационно-техническое содержание, – минимизацию цикла изготовления партии деталей  $T_{\min}$ , а также комбинированные критерии, составленные из  $C_{\min}$ ,  $Q_{\max}$  и  $T_{\min}$ . Таким образом, критерий  $C_{\min}$  характеризует экономическую, критерий  $Q_{\max}$  – техническую, а критерий  $T_{\min}$  – организационную сторону решения. Очевидно, комплексный критерий поможет оценить решение в интегрированном виде [12, 13].

Если учитывать динамику производственной системы, то интересным представляется вопрос о видоизменении критериев в процессе выполнения заказа. Критерии технической подготовки не вполне справедливо принимаются постоянными в период всего времени выполнения контракта. В одном контракте могут находиться заказы с различными сроками поставки, а некоторые понятия, например срочность или дешевизна, не определяются формальным образом. В связи с этим можно сделать вывод, что при реализации конкретного контракта для находящихся в нем разных заказов [14–17], а также на протяжении времени критерии должны видоизменяться в ответ на изменение ситуации в производственной системе. Следовательно, имеет смысл говорить об управлении критериями в процессе выполнения контрактов.

## **ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКОЙ**

Для исследования связанных с установлением критериев оценки ТПП информационных потоков между производственными подразделениями в производственной системе разработаны теоретико-множественная и временная модели управления критериями (рис. 1).

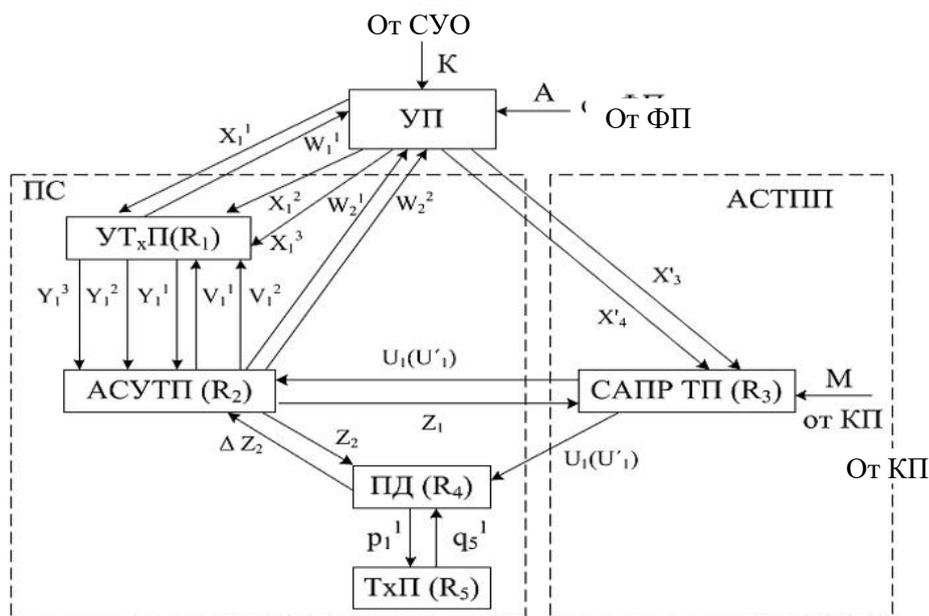


Рис. 1. Теоретико-множественная модель системы управления критериями

На рис. 1 показаны системы управления (УП), производственная система (ПС) и автоматизированная система ТПП (АСТПП). Производственная система реализована функциями  $R_1$  (подсистема управления технологическими подразделениями, УТхП),  $R_2$  (автоматизированная система управления технологическими процессами, АСУТП),  $R_4$  (подсистема диспетчирования, ПД) и  $R_5$  (технологические подразделения, ТхП). Автоматизированная система ТПП реализована оператором  $R_3$  (САПР ТП). Функция УП реализована агентом  $R_0$  и определяет воздействия на ПС со стороны дирекции.  $R_1$ , как и  $R_0$ , является гибридной системой, представляемой руководителем производственной службы. Операторы  $R_2$ – $R_5$  – автоматизированные системы, функционирующие в диалоговом режиме.

Управление критериями выполнения технологической подготовки целесообразно производить в определяющих режим работы ПС временных точках: непосредственно до начала выполнения технологической подготовки и непосредственно перед запуском в изготовление изделий контракта. При этом необходимо иметь в виду, что в период времени между технологической подготовкой производства и запуском заказов контракта может произойти критическое изменение производственной ситуации [1–3].

### УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ УСТАНОВЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ

Определим механизм реализации решений агентами и субъектами производственной системы на начало проведения технологической подготовки (на время  $t_1$ ).

Операция-функция  $A(\tau_{A1})$ , выполняемая финансовыми подразделениями (ФП), – определение финансового состояния на время  $\tau_{A1}$ , которое находится через время  $t_1$ . Операции-функции системы управления организацией (СУО): анализ и создание сведений о договорах и сроках их выполнения  $K$ , известных до времени  $\tau_{A1}$ . Функции оператора  $R_0$ : 1) директива о критериях выполнения рассматриваемого заказа на время  $t_1$  ( $X_1^1(t_1)$ , ( $X_3^1(t_1)$ ); 2) указание о составе заказов в контрактах и сроках их выполнения на время  $\tau_1$  ( $X_1^2(t_1)$ ,  $X_4^1(\tau_1)$ ); 3) указание о приоритетности рассматриваемого заказа  $X_1^3(t_1)$ ; 4) задание на ведение технологической подготовки заказа  $X_4^1(\tau_1)$ .

Операции, выполняемые УТхП: 1) оценка сроков выполнения заказа  $W_1^1(\tau_1)$  (достаточные, недостаточные) УТхП на время  $\tau_1$ , которое зависит от времени  $t_1$ ; 2) выработка распоряжений о приоритетности заказов  $Y_1^1(t_1)$ , имеющих в производстве на момент времени  $t_1$ ; 3) расчет времени завершения  $Y_1^2(t_1)$  заказов, имеющих в производстве на момент времени  $t_1$ ; 4) разработка задания  $Y_1^3(\tau_{11})$  на период времени до  $\tau_{11}$ ,  $Y_1^3(\tau_{11})$  по смыслу эквивалентно  $X_1^2(t_1)$ , но имеет другой отсчет времени,  $\tau_{11} < \tau_1$  и связано со временем  $t_1$ .

Автоматизированная система управления технологическими процессами ( $R_2$ ) выполняет: 1) синтез данных  $W_2^1(\tau_1)$  о загрузке оборудования в качественном виде (большая, средняя, малая) в технологических подразделениях; 2) разработку календарных планов-графиков  $Z_2(\tau_1)$  на время  $\tau_1$ ; 3) формирование данных  $Z_1(\tau_{11})$  по загрузке станков в ТхП на время  $\tau_{11} < \tau_1$ ; 4) синтез данных  $V_1^1(\tau_1)$ , определяющих загрузку станочного парка на время  $\tau_1$ .

Действие САПР ТП ( $R_3$ ) – синтезирование множества данных  $U_1(\tau_1)$  и  $U'_1(\tau_{11})$ , описывающих сведения о ТПП, осуществленной в САПР ТП до настоящего момента времени.

Подсистема диспетчирования (оператор) осуществляет: 1) выявление несоответствия фактических календарных планов-графиков  $\Delta Z_2(\tau_1)$  и запланированных; 2) доведение фактических календарных планов-графиков  $p_5^1(\tau_1)$  до технологических подразделений.

Работники ТхП выявляют ход фактической реализации календарных планов-графиков  $q_5^1(\tau_1)$  на время  $\tau_1$ .

Критерии на момент начала выполнения заказа  $t_2$  определяются подобным рассмотренному выше способом, смысловая часть функций операторов остается неизменной. Очевидно, что определение функций ведется для времени  $t_2$ .

## ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Организационно-технологические системы, как и любой класс систем, имеют различные структуры, что можно сказать и о процессах, происходящих в них. Информационно-иерархическая структура процесса установления критериев была рассмотрена ранее. Временная модель процедуры установления критериев ведения ТПП позволяет выявить процессы, происходящие при ее реализации, придать им логическую завершенность и синхронизировать выполняемые функции (рис. 2).

По горизонтали на рис. 2 приведена временная шкала. Время  $t_{A1}$  соответствует времени получения информации от финансовых подразделений. Желательно добиваться величины  $\Delta t_4$ , не превышающей 4–8 часов. Время  $\tau_1$  соответствует передаче информации для выработки управляющих воздействий представителями СУО, УТхП и АСУТП. Понятно, что интервал  $\Delta t_3$  требуется для принятия согласованного решения указанными операторами (по опыту до 8 часов). Время  $\tau_{11}$  соответствует времени начала первичной оценки информации субъектами и операторами системы,  $\Delta t_2$  обычно равно ~4 часам.  $t_0$  – время обновления данных от СУО и УП,  $\Delta t_1$  обычно составляет до 3–4 часов.

Временные данные показаны для базовой организации, поэтому для других производственных систем подлежат уточнению.



проектирования, предусматривающего информационную интеграцию всех подсистем производственной системы.

На основе исследования моделей были реализованы алгоритмы функционирования подсистем производственной системы под координацией системы управления организацией в целом. Это придает осознанность деятельности производственной системы при проведении ТПП и способствует системной целостности предприятия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бурдо Г.Б., Палюх Б.В. Теоретические основы комплексной автоматизированной системы проектирования и управления технологическими процессами в многономенклатурном производстве // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2010. № 4 (127). С. 44–54.
2. Бурдо Г.Б., Палюх Б.В. Метод интеллектуальной оценки решений при проектировании технологий в многономенклатурных производствах // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2011. Т. 17. № 2. С. 342–350.
3. Бурдо Г.Б., Исаев А.А. Особенности автоматизированной технологической подготовки производства в геофизическом приборостроении // *Каротажник*. 2013. № 3 (225). С. 235–239.
4. Бурдо Г.Б., Палюх Б.В. Оценка решений в системах автоматизированного проектирования технологических процессов для многономенклатурных производств // *Вестник Воронежской государственной технологической академии. Серия «Информационные технологии, моделирование и управление»*. 2011. № 2. С. 99–102.
5. Горанский Г.К. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение. 1970. 224 с.
6. Цветков В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. Минск: Наука и техника. 1979. 264 с.
7. Кондаков А.И. САПР технологических процессов. М.: Академия. 2007. 272 с.
8. Евгеньев Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. 334 с.
9. Кунву Ли. Основы САПР. CAD/CAM/CAE. СПб.: Питер. 2017. 560 с.
10. Детмер У. Теория ограничений Голдратта: Системный подход к непрерывному совершенствованию / пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс. 2008. 444 с.
11. Вумек Дж.П., Джонс Д.Т. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. М.: Альпина Бизнес Букс. 2008. 473 с.
12. Денисов А.Р., Левин М.Г. Подходы к организации конструкторско-технологической подготовки производства // *Проблемы теории и практики управления*. 2018. № 7. С. 52–61.
13. Денисов А.Р. Принципы конструкторско-технологического проектирования в условиях мелкосерийного машиностроительного производства // *Известия вузов: Приборостроение*. 2017. Т. 50. № 12. С. 56–60.
14. Егорова Т.А. Организация производства на предприятиях машиностроения. СПб.: Питер. 2004. 304 с.
15. Прилуцкий М.Х. Многокритериальные многоиндексные задачи объемно-календарного планирования // *Известия академии наук. Теория и системы управления*. 2011. № 1. С. 78–82.
16. Акофф Р.Л., Магидсон Дж., Эдисон Г.Дж. Идеализированное проектирование. Как предотвратить завтрашний кризис сегодня. Создание будущего организации. М.: Баланс Бизнес Букс. 2007. 320 с.

17. Самойлович В.Г. Организация производства и менеджмент. М.: Академия. 2008. 336 с.

**Для цитирования:** Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Оценка решений при подготовке производства // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 2 (18). С. 94–101.

## EVALUATION OF SOLUTIONS DURING PRE-PRODUCTION

G.B. BURDO, Dr. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation; e-mail: gbtms@yandex.ru

It is shown that the specifics of single and small-scale instrument-making and machine-building production presupposes the implementation of a significant number of contracts at the same time, which implies simplified, and not always adequate, technical preparation of production. The basic principles of organizational and technological design are revealed, the set-theoretic and time models of the production system are analyzed, which allows identifying criteria during technological preparation. The subjects and objects of the production system and time points for determining the specified criteria are established. It is shown that the set-theoretic model of the procedure for establishing criteria for technological preparation of production reflects the information structure of the production system, and the time structure ensures synchronization of the procedures performed in time.

*Keywords:* computer-aided design of technological processes, technological preparation of production, artificial intelligence, objective function, unified information space, system approach.

Поступила в редакцию/received: 30.10.2022; после рецензирования/reviced: 12.11.2022;  
принята/accepted: 24.11.2022

УДК 004.032.26

## АРХИТЕКТУРА ГЛУБОКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ<sup>†</sup>

В.К. КЕМАЙКИН, канд. техн. наук, А.С. ПОЛЫГАЕВ, студ.

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22; e-mail: vk-kem@mail.ru

© Кемайкин В.К., Польшаев А.С., 2023

Рассмотрено использование глубокой рекуррентной нейронной сети в задаче прогнозирования координат движущейся цели в условиях неточности измерений.

---

<sup>†</sup> Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022 г., Тверь, Тверской государственный технический университет).

Обучение нейронной сети проводится на предварительной выборке координат ограниченной длины, моделируются ошибки измерения координат. Характер движения цели при тестировании сети отличается от модели, используемой при обучении нейронной сети и положенной в основу фильтра Калмана.

*Ключевые слова:* искусственная нейронная сеть, нейронная сеть с долгой кратковременной памятью, фильтр Калмана, прогнозирование временных рядов, фильтрация измерений, экстраполяция.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-101-112**

## **ВВЕДЕНИЕ**

Задача прогнозирования координат движущейся цели в условиях неточности измерений координат и недостатка априорной информации о характере движения цели крайне актуальна в системах траекторной обработки радиолокационной информации.

Применительно к задаче траекторной обработки прогнозирование координат включает в себя последовательное решение двух задач: фильтрации измерений и прогнозирования. Задача фильтрации измерений сводится к прогнозированию временных рядов, которое традиционно можно осуществить применением фильтров калмановского типа [1, 2]. Как известно, фильтр Калмана успешно используется в случаях, когда модель системы линейна, а шум измерений некоррелирован и имеет плотность вероятности, соответствующую плотности вероятности нормального (гауссовского) распределения [3]. Чтобы обойти данные ограничения, применяют такие модификации, как расширенный фильтр Калмана (Extended Kalman Filter) [4] и ансцентный фильтр Калмана (Unscent Kalman Filter) [5]. Однако, как и классический фильтр Калмана, данные модификации требуют априорных знаний в виде модели процесса, отклонение от которой ведет к некорректным результатам [3].

Задача прогнозирования может быть решена двумя способами: экстраполяцией отфильтрованных координат цели и получением априорной оценки фильтра на следующий момент времени.

В качестве альтернативы традиционному подходу к фильтрации и экстраполяции координат движущейся цели в данной статье предлагается использовать многослойную искусственную нейронную сеть с долговременной краткосрочной памятью (Long Short-Term Memory), обученную на референсной выборке неточных измерений и истинных положений цели. Такой подход не требует построения точной модели наблюдаемого процесса и позволяет обеспечить адаптивность подсистемы фильтрации и экстраполяции к изменениям характера движения цели в пределах заданной модели движения.

Целью данной статьи является иллюстрация использования глубокой рекуррентной нейронной сети в задаче прогнозирования координат движущейся цели в условиях неточности измерений.

## **ФИЛЬТР КАЛМАНА**

Алгоритм работы фильтра Калмана заключается в последовательном выполнении двух основных шагов: прогнозирования измерений на основе заложенной модели процесса и обновления состояния фильтра по результатам измерений [6].

Основным достоинством фильтра Калмана применительно к задаче траекторной обработки является то, что он не требует накопления измерений за несколько шагов и дает оценку согласно модели процесса на каждом шаге измерения.

Для решаемой задачи также важно, что фильтр позволяет дать априорную оценку состояния процесса (положения цели) на следующий за текущим измерением момент времени.

Состояние процесса в момент времени  $n$  обозначается  $x(n)$ . Изменение состояния системы описывается уравнением

$$x(n) = F(n) \cdot x(n - 1) + B(n) \cdot u(n) + W(n), \quad (1)$$

где  $F(n)$  – матрица перехода состояний;  $B$  – матрица управления;  $u(n)$  – вектор управляющих воздействий;  $W(n)$  – шум процесса.

Измерения положения цели осуществляются регулярно и связаны с истинными значениями следующим образом:

$$z(n) = H(n) \cdot x(n) + V(n), \quad (2)$$

где  $H(n)$  – модель измерений;  $V(n)$  – белый шум измерений с нулевым средним значением.

Оценка состояния системы в момент времени  $(n + 1)$

$$\hat{x}(n + 1 | n) = F(n) \cdot \hat{x}(n | n), \quad (3)$$

где  $\hat{x}(n | n)$  – предыдущая оценка состояния.

Оценка измерения на момент времени  $(n + 1)$  получается из оценки состояния системы с учетом модели измерений:

$$\tilde{z}(n + 1 | n) = H(n + 1) \cdot \hat{x}(n + 1 | n). \quad (4)$$

После получения очередного измерения оно сравнивается с ранее полученной оценкой измерения:

$$\tilde{z}(n + 1) = z(n + 1) - \tilde{z}(n + 1 | n). \quad (5)$$

Далее оценка состояния системы уточняется на основе полученного измерения и коэффициента усиления фильтра:

$$\hat{x}(n + 1 | n + 1) = \hat{x}(n + 1 | n) + K(n + 1) \cdot \tilde{z}(n + 1), \quad (6)$$

где  $K(n + 1)$  – коэффициент усиления фильтра Калмана.

Усиление фильтра Калмана требует вычислений ковариационной матрицы состояния  $P(n + 1 | n)$  и ковариационной матрицы ошибок  $S(n + 1)$ . Ковариационная матрица состояния вычисляется следующим образом:

$$P(n + 1 | n) = F(n) \cdot P(n | n) \cdot F(n)' + Q(n), \quad (7)$$

где  $Q(n)$  – матрица ковариации белого шума процесса.

Ковариационная матрица ошибок

$$S(n + 1) = H(n + 1) \cdot P(n + 1 | n) \cdot H(n + 1)' + R(n + 1), \quad (8)$$

где  $R(k + 1)$  – ковариация белого шума измерений.

Коэффициент усиления фильтра Калмана

$$K(n + 1) = P(n + 1 | n) \cdot H(n + 1)' \cdot S(n + 1)^{-1}. \quad (9)$$

Затем ковариационная матрица состояния обновляется с использованием рассчитанного коэффициента усиления фильтра Калмана:

$$P(n + 1 | n + 1) = P(n + 1 | n) - K(n + 1) \cdot S(n + 1) \cdot W(n + 1)'. \quad (10)$$

Вычисление выражений (3)–(10) выполняется в цикле на каждом шаге измерений состояния наблюдаемой системы (рис. 1).

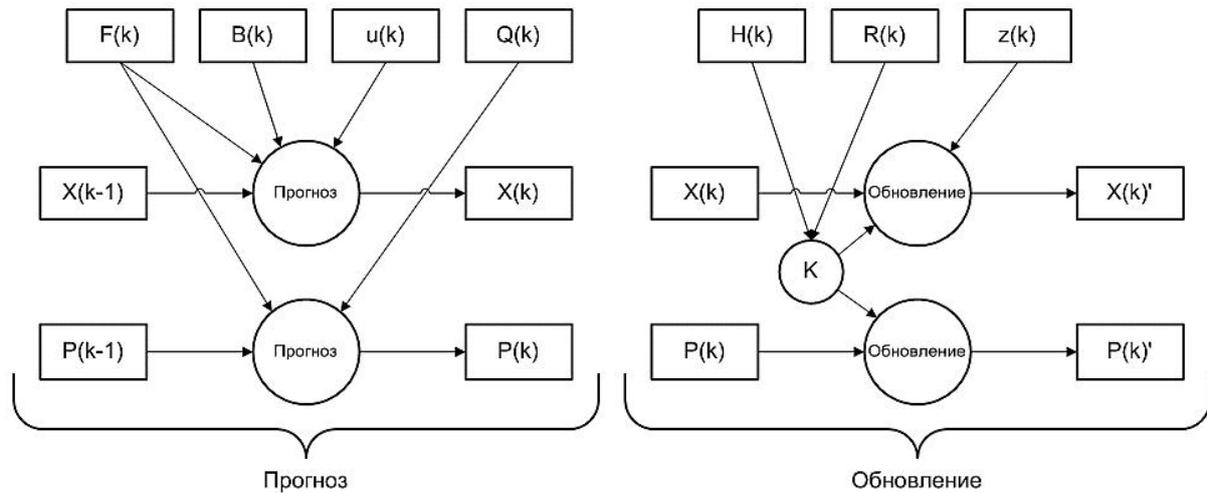


Рис. 1. Принцип работы фильтра Калмана

### НЕЙРОННАЯ СЕТЬ LSTM

Сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM-сети, от англ. Long Short-Term Memory) – это модификация классической рекуррентной нейронной сети, способная находить долгосрочные и краткосрочные зависимости. Такие сети хорошо приспособлены к обучению на задачах прогнозирования временных рядов в тех случаях, когда измерения достаточно сильно отделены друг от друга по времени [7].

LSTM-сети, как и рекуррентные нейронные сети, имеют цепную структуру, но устройство клетки сети более сложное: она состоит из четырех нейронов, соединенных специальным образом (рис. 2). В источниках [8, 9] можно увидеть отличия нейронной LSTM-сети от классической рекуррентной нейронной сети.

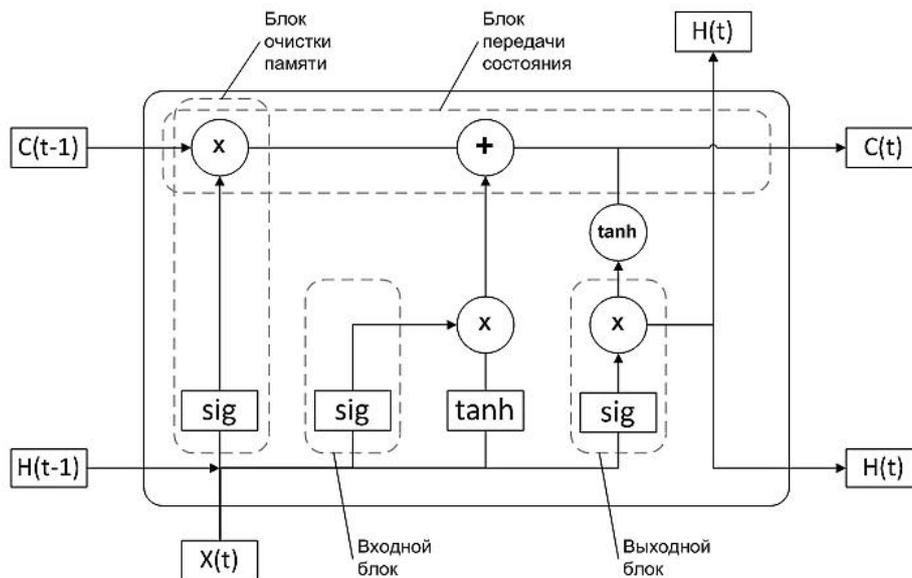


Рис. 2. Структура клетки LSTM-сети (блоками обозначены нейроны клетки, кругами – операции)

LSTM-сети способны как отслеживать долгосрочные зависимости в данных, так и удалять (забывать) информацию. Этот процесс регулируется структурами, называемыми блоками или вентилями (от англ. gates).

Как указано на рис. 2, у каждой клетки имеются две рекуррентные компоненты: выходной вектор  $H_t$  и вектор состояния  $C_t$ . На вход сети в момент времени  $t$  подается вектор измерений  $X_t$ , а также выходной вектор  $H_{t-1}$  и вектор состояния  $C_{t-1}$  предыдущей клетки.

Состояние входного блока

$$I_t = \text{sig}(x_t W_i + H_{t-1} W_i + b_i), \quad (11)$$

где  $x_t$  – вектор измерений;  $W_i$  – вес нейрона входного блока;  $H_{t-1}$  – выходной вектор предыдущей клетки;  $b_i$  – смещение (от англ. bias) функции активации.

Далее работает блок очистки памяти:

$$F_t = \text{sig}(x_t W_f + H_{t-1} W_f + b_f), \quad (12)$$

где  $W_f$  – вес нейрона блока очистки памяти;  $b_f$  – смещение функции активации.

Изменение памяти для блока передачи состояния

$$\tilde{C}_t = \text{tanh}(x_t W_c + t - 1 W_c + b_c), \quad (13)$$

где  $W_c$  – вес нейрона блока передачи состояния;  $b_c$  – смещение функции активации.

Затем рассчитывается выходной вектор состояния клетки:

$$C_t = F_t C_{t-1} + I_t \tilde{C}_t, \quad (14)$$

где  $F_t$  – состояние блока очистки памяти;  $C_{t-1}$  – вектор состояния предыдущей клетки;  $I_t$  – состояние входного блока;  $\tilde{C}_t$  – оценки изменения памяти.

Состояние выходного блока рассчитывается по формуле, аналогичной формуле для входного блока:

$$O_t = \text{sig}(x_t W_o + H_{t-1} W_o + b_o), \quad (15)$$

где  $W_o$  – вес нейрона выходного блока;  $b_o$  – смещение функции активации.

Затем применяется тангенциальный слой:

$$H_t = O_t \cdot \text{tanh}(C_t), \quad (16)$$

где  $O_t$  – состояние выходного блока клетки;  $C_t$  – выходной вектор состояния клетки.

Для обучения нейронных сетей LSTM и GRU в данной работе применяется алгоритм ADAM (от англ. Adaptive Moment Estimation) – «метод адаптивной оценки моментов» [10, 11]. В данном методе используются скользящие средние значения, рассчитанные как для градиентов весов, так и для вторых моментов градиентов. Суть алгоритма заключается в делении скорости обучения для каждого веса в отдельности на скользящие средние значения градиентов веса.

Значения скользящих среднего первого и второго моментов градиента при обучении рассчитываются следующим образом ( $m_t$  (от англ. mean) – значение скользящего среднего для первого момента градиента;  $v_t$  (от англ. variance) – для второго момента градиента):

$$\begin{aligned} m_t &= \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t; \\ v_t &= \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $t$  – номер итерации;  $g_t$  – значение первого момента градиента;  $g_t^2$  – значение второго момента градиента;  $\beta_1, \beta_2$  – коэффициенты забывания для первого и второго моментов градиента соответственно.

Первый и второй моменты градиента являются частью гиперпараметра алгоритма обучения нейронной сети. По умолчанию в начале обучения они имеют значения 0,9 и 0,999 соответственно.

Оценки скользящего среднего для первого и второго моментов градиента на очередном шаге обучения рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \hat{m}_t &= \frac{m_t}{1-\beta_1^t}, \\ \hat{v}_t &= \frac{v_t}{1-\beta_2^t}, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\hat{m}_t$  – оценка скользящего среднего для первого момента градиента;  $\hat{v}_t$  – оценка скользящего среднего для второго момента градиента.

Затем полученные оценки скользящего среднего для первого и второго моментов градиента используются для обновления значений веса нейрона, рассчитанного на основе предыдущего значения:

$$W_{t+1} = W_t - \frac{\eta}{\sqrt{\hat{v}_t + \epsilon}} \hat{m}_t, \quad (19)$$

где  $\eta$  – размер шага итерации;  $\epsilon$  – относительно малое значение, используемое, чтобы избежать деления на ноль.

По умолчанию для значения  $\epsilon$  используется значение  $10^{-8}$ .

### АРХИТЕКТУРА ГЛУБОКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Предлагаемая архитектура нейронной сети включает в себя два сложносоставных слоя, каждый из которых состоит из рабочего слоя LSTM с заданным количеством нейронов, слоя активации и слоя исключения (от англ. dropout) (рис. 3, табл. 1).

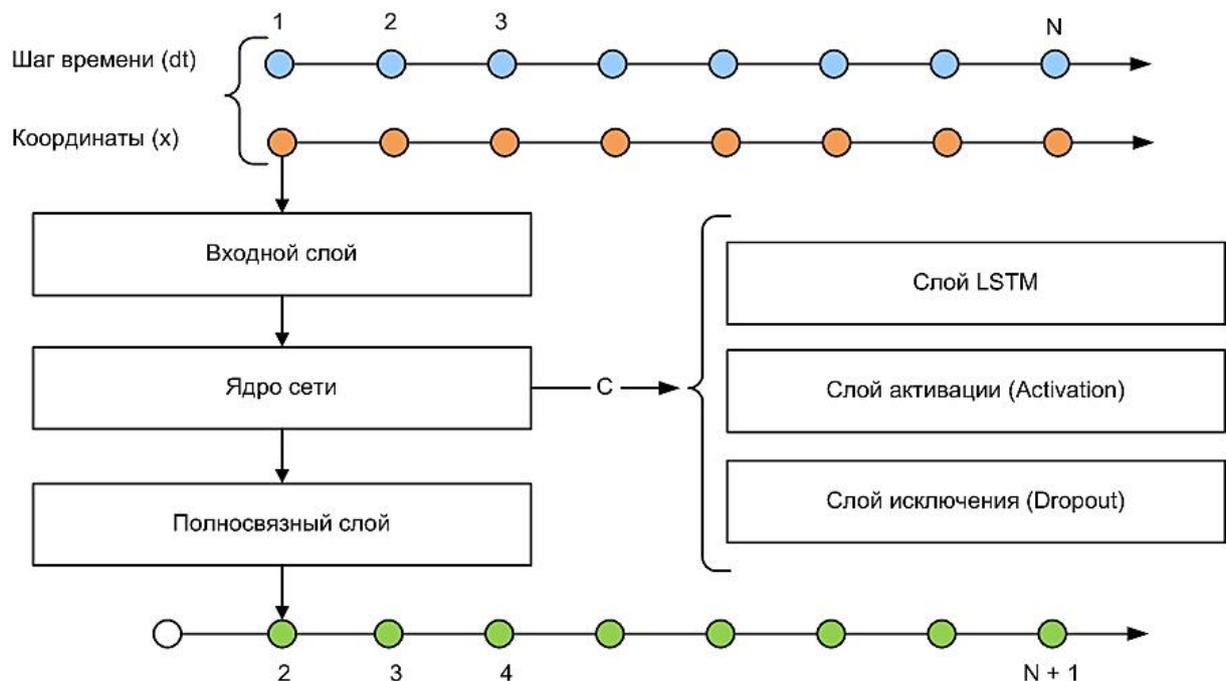


Рис. 3. Функциональная схема экстраполирующего фильтра на основе глубокой нейронной сети LSTM

Таблица 1. Архитектура нейронной сети

Номер слоя	Наименование слоя	Параметры слоя
1	Входной слой	Количество входов: 2
2	LSTM-слой	Функция активации состояния: Tanh Функция активации вентилей: Sigmoid
3	Слой активации	Тип функции активации: ReLu
4	Слой исключения	Вероятность исключения: 0,2
5	Полносвязный слой	Количество выходов: 2
6	LSTM-слой	Функция активации состояния: Tanh Функция активации вентилей: Sigmoid
7	Слой активации	Тип функции активации: ReLu
8	Слой исключения	Вероятность исключения: 0,2
9	Полносвязный слой	Количество выходов: 1

Ожидается, что правильно подобранная функция активации и значение вероятности исключения данных для слоя исключения помогут избежать переобучения сети и повысить адаптивность сети к отклонениям от обучающей выборки и пропускам данных.

Используя свойство нейронной сети LSTM запоминать более ранние измерения и состояния нейронов и учитывая, что размер предварительной выборки существенно не влияет на точность предсказания такой нейронной сетью, зададим размер предварительной выборки равным 1. При этом размер выборки, используемой для обучения (англ. Mini-Batch Sequence Length), будет установлен по результатам оптимизации гиперпараметра.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве модели движения цели использовался процесс изменения во времени некоторой величины, заданный уравнением

$$x = A \cdot \sin(w \cdot t + \phi), \quad (20)$$

где  $A = 5$  ;  $w = 3 \cdot \pi$  ;  $\phi = 0$  ; время моделирования фиксировано в диапазоне  $t \in [0, 10]$ ; шаг времени равен 0,01.

Данная модель использовалась для обучения нейронной сети, а также в качестве модели, лежащей в основе используемого для сравнения результатов работы нейронной сети фильтра Калмана.

Для экспериментальной отработки сформировано несколько наборов измерений (обучающих наборов) на основе выражения (20) с наложением на полученные

координаты цели белого гауссового шума с соотношением «сигнал – шум» (Signal – Noise Rate (SNR)), равным 10.

Чтобы имитировать несоответствие модели процесса и модели, заложенной в фильтр Калмана, дополнительно был сформирован тестовый набор измерений с соотношением «сигнал – шум», равным 10, на основе модифицированной модели измерений, для которой  $A = f(t)$ ,  $w = 3 \cdot \pi$ ,  $\phi = 0$ .

Обучающий и тестовый наборы данных представлены на рис. 4.

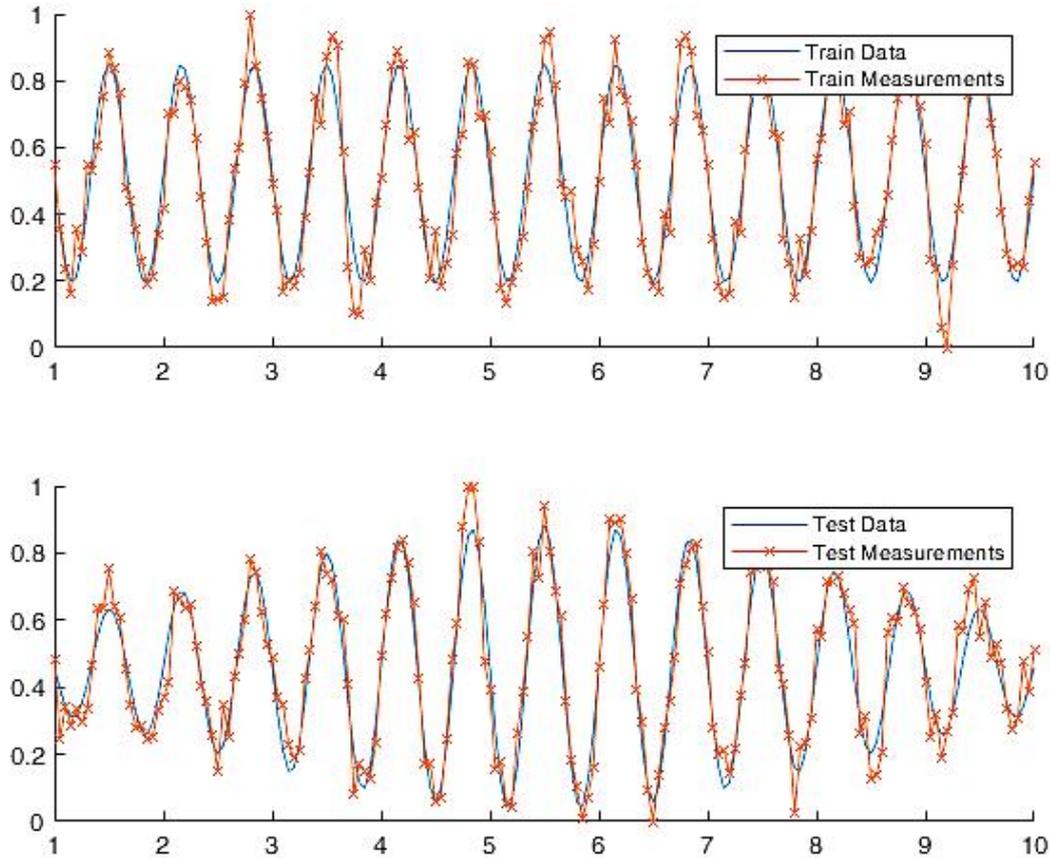


Рис. 4. Обучающий и тестовый наборы данных, SNR = 10

Размер обучающей выборки для рассматриваемой сети составляет 2/3 от общей длины набора данных. Данные измерений, используемые для обучения и валидации нейронной сети, нормализованы в диапазоне от 0 до 1.

На вход нейронной сети для оценки следующего положения цели в пространстве подаются два параметра: координата цели на текущий момент времени  $x$  и разница по времени с ранее полученным значением координаты  $dt$  (для обнаружения пропусков в данных), как показано на рис. 3.

Для анализа результатов для каждого выходного набора данных рассчитывались: средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE):

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |a_i - y_i|; \quad (21)$$

среднеквадратическое отклонение (Mean Squared Error, MSE):

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |a_i - y_i|^2; \quad (22)$$

корень среднеквадратического отклонения (Root MSE, RMSE):

*Вестник Тверского государственного технического университета.*

*Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |a_i - y_i|^2}. \quad (23)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оптимизация выполнялась в течение 15 часов на процессоре Intel Xeon-1230 v2 (четыре ядра, восемь потоков, линейная частота 3,6 ГГц), за это время было выполнено около трехсот итераций (рис. 5).

Из графика хода процесса оптимизации видно, что наилучший результат был получен в районе двухсотой итерации и дальнейшие гипотезы результатов не дали.

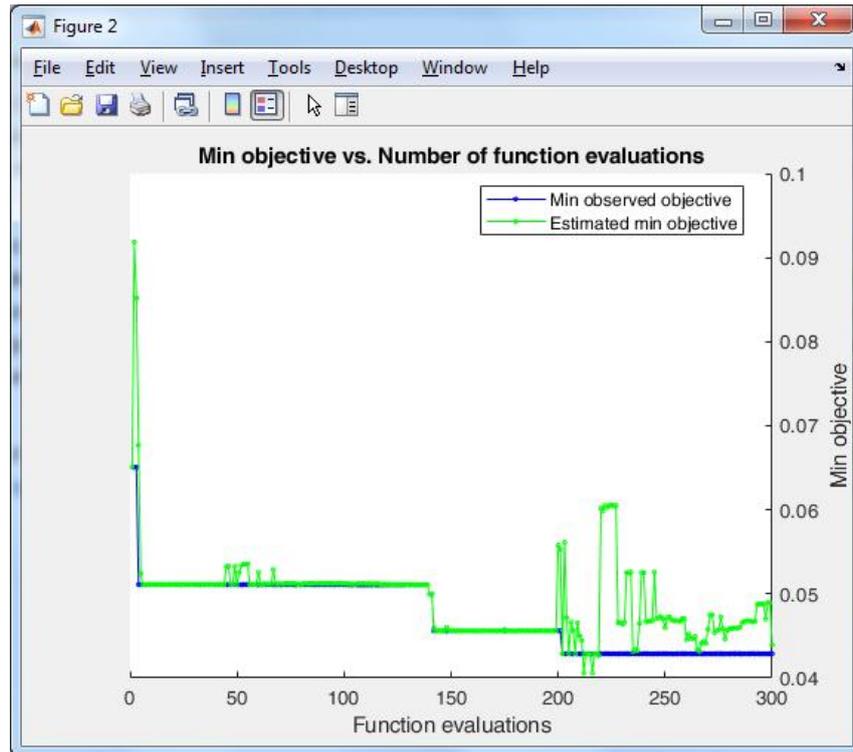


Рис. 5. Процесс обучения нейронной сети

Расчитанные по результатам моделирования средняя абсолютная ошибка, максимальная ошибка и среднеквадратическое отклонение представлены в табл. 2, фильтры обозначены следующим образом: KF – фильтр Калмана; LSTM – нейронная сеть LSTM; GRU – нейронная сеть GRU; Deep LSTM – разработанная глубокая нейронная сеть.

Таблица 2. Результаты моделирования

Фильтр	Средняя абсолютная ошибка	Максимальная ошибка	Среднеквадратическое отклонение
Шаг времени модели $ts = 0,1$			
KF	0,0900	0,2596	0,0111
LSTM	0,0565	0,2111	0,0052
GRU	0,0570	0,2275	0,0048

Deep LSTM	0,0557	0,1947	0,0049
-----------	--------	--------	--------

Окончание табл. 2

Фильтр	Средняя абсолютная ошибка	Максимальная ошибка	Среднеквадратическое отклонение
Шаг времени модели $t_s = 0,05$			
KF	0,1169	0,2979	0,0173
LSTM	0,0695	0,2102	0,0073
GRU	0,0748	0,1979	0,0081
Deep LSTM	0,0709	0,1790	0,0077

Результаты экстраполяции по проверочному набору данных разработанной глубокой нейронной сети в сравнении с фильтром Калмана, нейронной сетью LSTM и нейронной сетью GRU представлены на рис. 6.

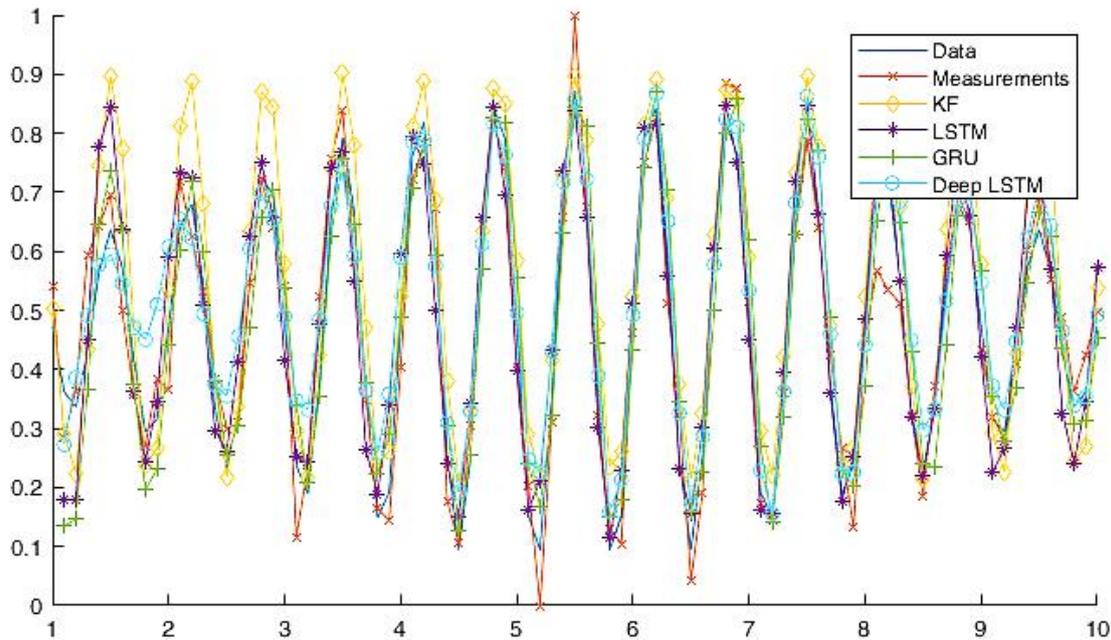


Рис. 6. Данные измерения: выход нейронной сети и выход фильтра Калмана в сравнении

По результатам моделирования видно, что фильтр Калмана вне конкуренции в ситуации, когда шум измерений относительно высок, а модель процесса в точности соответствует модели, положенной в основу фильтра.

Рекуррентные нейронные сети, в свою очередь, позволяют выявлять долговременные зависимости во входных данных и адаптироваться к изменяющейся модели движения цели.

Разработанная глубокая нейронная сеть в сравнении с однослойными решениями показывает более высокий уровень адаптации к измененной относительно

применяемой для обучения модели движения и, как следствие, имеет более низкие среднюю и максимальную ошибки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глубокая рекуррентная нейронная сеть LSTM, описанная в статье, может быть успешно применена в задаче фильтрации измерений (прогнозирования временных рядов) в случае, когда модель протекания процесса не соответствует заранее заданной, а шум измерений по своему характеру не является гауссовым.

Из недостатков данного подхода стоит отметить необходимость обучения нейронной сети на тестовой выборке, что представляет собой определенную вычислительную сложность. Подобная выборка может быть получена на основе модели измерений, лежащей в основе применяемого фильтра Калмана.

Способности нейронной сети к прогнозированию напрямую следуют из ее способности к обобщению и выделению скрытых зависимостей между входными и выходными данными. После обучения сеть способна предсказать будущее значение некой последовательности на основе нескольких предыдущих значений и (или) существующих в настоящий момент факторов. Прогнозирование возможно только тогда, когда предыдущие изменения действительно в какой-то степени предопределяют будущие.

Выбор архитектуры нейронной сети зависит от характера входных данных, их пригодности к классификации и структурированию (для обучения без учителя), особенностей применения нейронной сети: рекуррентные нейронные сети имеют более сложную структуру и дольше обучаются, но за счет обратной связи лучше адаптируются к шуму измерений и дают меньшую ошибку.

Применение в архитектуре разработанного экстраполирующего фильтра более двух рекуррентных блоков для описанных в данной работе входных данных не повышает точность фильтрации и экстраполяции координат, увеличивает время обучения и вычислительную сложность алгоритма.

Разработанная исполняемая модель позволяет проводить оптимизацию глубоких нейронных сетей для задачи фильтрации и экстраполяции координат движущейся цели методом байесовской оптимизации, а также сравнивать результаты работы полученной нейронной сети с классическим фильтром Калмана, нейронной сетью прямого распространения, однослойными рекуррентными нейронными сетями LSTM и GRU.

Разработанный экстраполирующий фильтр координат цели показал себя лучше классического фильтра Калмана в условиях, когда наблюдаемая модель движения не вполне соответствует модели, используемой при обучении нейронной сети (положенной в основу фильтра Калмана). Авторы полагают, что использование экстраполирующих фильтров, построенных на основе рекуррентных нейронных сетей, может быть полезно при разработке систем траекторной обработки, использующих фильтры на основе множественных взаимодействующих моделей, за счет способности рекуррентной нейронной сети к обобщению данных во времени и, как следствие, быстрой адаптации к изменяющейся модели движения цели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Adaptive AR modeling of nonstationary time series by means of Kalman filtering / M. Arnold [et al.] // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1998. V. 45. № 5. P. 553–562.

2. Sorensen J.V.T., Madsen H. Water level prediction skill of an operational marine forecast using a hybrid Kalman filter and time series modeling approach // *Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No. 03CH37492)*. IEEE. 2003. V. 2. P. 790.
3. Brookner E. Tracking and Kalman filtering made easy. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1998. 480 p.
4. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // *Journal of Basic Engineering*. 1960. V. 82. Is. 1. P. 35–45.
5. Julier S.J., Uhlmann J.K. New extension of the Kalman filter to nonlinear systems // *Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition VI*. 1997. V. 3068. P. 182–193.
6. Zarchan P., Musoff H. Fundamentals of Kalman filtering: a practical approach. United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2000. 664 p.
7. Zell A. Simulation neuronaler netze. Boston: Addison-Wesley. 1994. 624 p.
8. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview // *Neural networks*. 2015. V. 61. P. 85–117.
9. Time-series well performance prediction based on Long Short-Term Memory (LSTM) neural network model / X. Song [et al.] // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. V. 186. P. 106682.
10. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. 6.5 Back-propagation and other differentiation algorithms. Deep Learning. 2016. 800 p.
11. Kingma D.P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization // *arXiv preprint arXiv: 1412.6980*. 2014. URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (дата обращения: 12.11.2022).

**Для цитирования:** Кемайкин В.К., Польшаев А.С. Архитектура глубокой нейронной сети в задаче прогнозирования координат движущейся цели // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 2 (18). С. 101–112.

## **ARCHITECTURE OF A DEEP NEURAL NETWORK IN THE PROBLEM OF PREDICTING THE COORDINATES OF A MOVING TARGET**

V.K. KEMAYKIN, Cand. Sc., A.S. POLYGAEV, stud.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation;  
e-mail: vk-kem@mail.ru

The use of a deep recurrent neural network in the problem of predicting the coordinates of a moving target under conditions of measurement inaccuracy is considered. The training of the neural network is carried out on a preliminary sample of coordinates of a limited length, errors in measuring the coordinates are modeled, the nature of the movement of the target during network testing differs from the model used in training the neural network and underlying the Kalman filter.

*Keywords:* artificial neural network, long short-term memory neural network, Kalman filter, time series forecasting, measurement filtering, extrapolation.

УДК 004.032

## **МЕТОДИКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ВАРИАНТА ПЕРЕОСНАЩЕНИЯ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИХ СИЛ СОВРЕМЕННЫМИ ОБРАЗЦАМИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ\***

А.В. БОЙКОВА, д-р экон. наук

Тверской государственной технической университет  
170026, Тверь, наб. А. Никитина, 22; e-mail: common@tstu.tver.ru

© Бойкова А.В., 2023

Предложена методика технико-экономического обоснования варианта переоснащения частей и подразделений радиотехнических войск воздушно-космических сил РФ с применением искусственной нейронной сети и имитационного моделирования, что позволяет воспроизводить процесс реализации варианта переоснащения современными образцами техники и давать прогноз с учетом стохастичности процессов их функционирования в течение заданного периода времени и с учетом выделенных бюджетных ассигнований.

*Ключевые слова:* обороноспособность, вооружение и военная техника, переоснащение, прогнозирование, эффективность, нейронные сети, имитационное моделирование, технико-экономический анализ.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-113-119**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Реализация концепции строительства и развития Вооруженных сил РФ требует значительных финансовых затрат в ходе проведения мероприятий по переоснащению частей и подразделений радиотехнических войск воздушно-космических сил РФ (РТВ ВКС). Одним из способов снижения затрат является технико-экономическое обоснование вариантов переоснащения частей и подразделений РТВ ВКС с учетом имеющихся возможностей и ограничений. В статье предложена методика технико-экономического обоснования варианта переоснащения частей и подразделений РТВ ВКС современными образцами вооружения и военной техники.

Процесс переоснащения РТВ ВКС представляет собой комплекс мероприятий по разработке, производству, ремонту и поставке образцов радиотехнических средств (РТС), соответствующих по техническому уровню задачам, возлагаемым на части и подразделения в программном периоде, а также переводу к новому месту эксплуатации, постановке на хранение и утилизации образцов РТС, подлежащих замене [1]. Одним из основных принципов переоснащения организационных единиц является поддержание

---

\* Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022 г., Тверь, Тверской государственной технической университет).

сбалансированности качественного и количественного состава техники и средств за счет достижения рационального соотношения их номенклатуры, численного состава, темпов развития и сроков замены.

Как показывает международная практика осуществления закупок товаров, работ и услуг для обеспечения государственных нужд, около половины контрактов выполняются с лагом запаздывания и (или) перерасходом средств (корректировкой исходной цены контракта). Не является исключением и государственный оборонный заказ. Задержки по времени обычно связаны с такими причинами, как ошибки планирования, форс-мажоры, корректировка исходного технического задания, удорожание работ смежников и т. д.

Сущность методики технико-экономического обоснования варианта переоснащения РТВ ВКС заключается в проведении факторного анализа затрат на повышение эффективности РТВ ВКС, корректировке варианта с учетом результатов моделирования, определении коэффициента удорожания варианта и совокупных затрат на повышение эффективности РТВ ВКС в течение заданного времени.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Информационную базу исследования составили материалы, содержащиеся в научных трудах отечественных [1, 3, 6] и зарубежных [4, 5] авторов. В ходе исследования применялись методы военно-экономического анализа, экспертного оценивания, элементы теории искусственных нейронных сетей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными этапами методики являются:

1. Определение совокупных затрат  $Z_{\text{общ}}$  на реализацию варианта переоснащения и затрат на эксплуатацию образцов вооружения РТВ ВКС. Позволяет заблаговременно установить общий объем необходимых ресурсов (люди, оборудование, материалы и т. д.). Так как затраты на реализацию начальных стадий жизненного цикла РТС, в частности на создание научно-технического задела РТС, на формирование концепции образца (аванпроект), на разработку РТС, находятся за рамками данного исследования, совокупные затраты на переоснащение РТВ ВКС  $Z_{\text{общ}}$  определим на основе соотношения

$$Z_{\text{общ}} = Z_{\text{кз}} + Z_{\text{экс}} + Z_{\text{утл}},$$

где  $Z_{\text{кз}}$  – капитальные затраты на закупку образцов РТС в процессе переоснащения РТВ ВКС;  $Z_{\text{экс}}$  – затраты на эксплуатацию имеющихся и вновь вводимых образцов РТС;  $Z_{\text{утл}}$  – затраты на утилизацию РТС.

Факторы, учитываемые при определении капитальных затрат, представлены на рис. 1. Капитальные затраты на реализацию варианта переоснащения РТВ ВКС определяются по формуле

$$Z_{\text{кз}} = Z_{\text{зак}} + Z_{\text{дст}} + Z_{\text{мтж}},$$

где  $Z_{\text{зак}}$  – затраты на закупку РТС;  $Z_{\text{дст}}$  – затраты на транспортирование РТС на техническую (стартовую) позицию;  $Z_{\text{мтж}}$  – затраты на развертывание и ввод в строй РТС.

Вышеперечисленные затраты относятся к единовременным. В то же время, как показывает практика, до 80 % стоимости полного жизненного цикла приходится на стадию эксплуатации РТС в частях и подразделениях РТВ ВКС (рис. 2).

Эксплуатация вооружения и военной техники специального назначения – это стадия жизненного цикла изделия, на которой реализуется, поддерживается и

восстанавливается его качество. Эксплуатация изделия в общем случае включает в себя использование по назначению, транспортирование, хранение, техническое обслуживание и ремонт. Данная категория затрат, как правило, приводится в расчете на единицу времени: час, месяц, год [2].

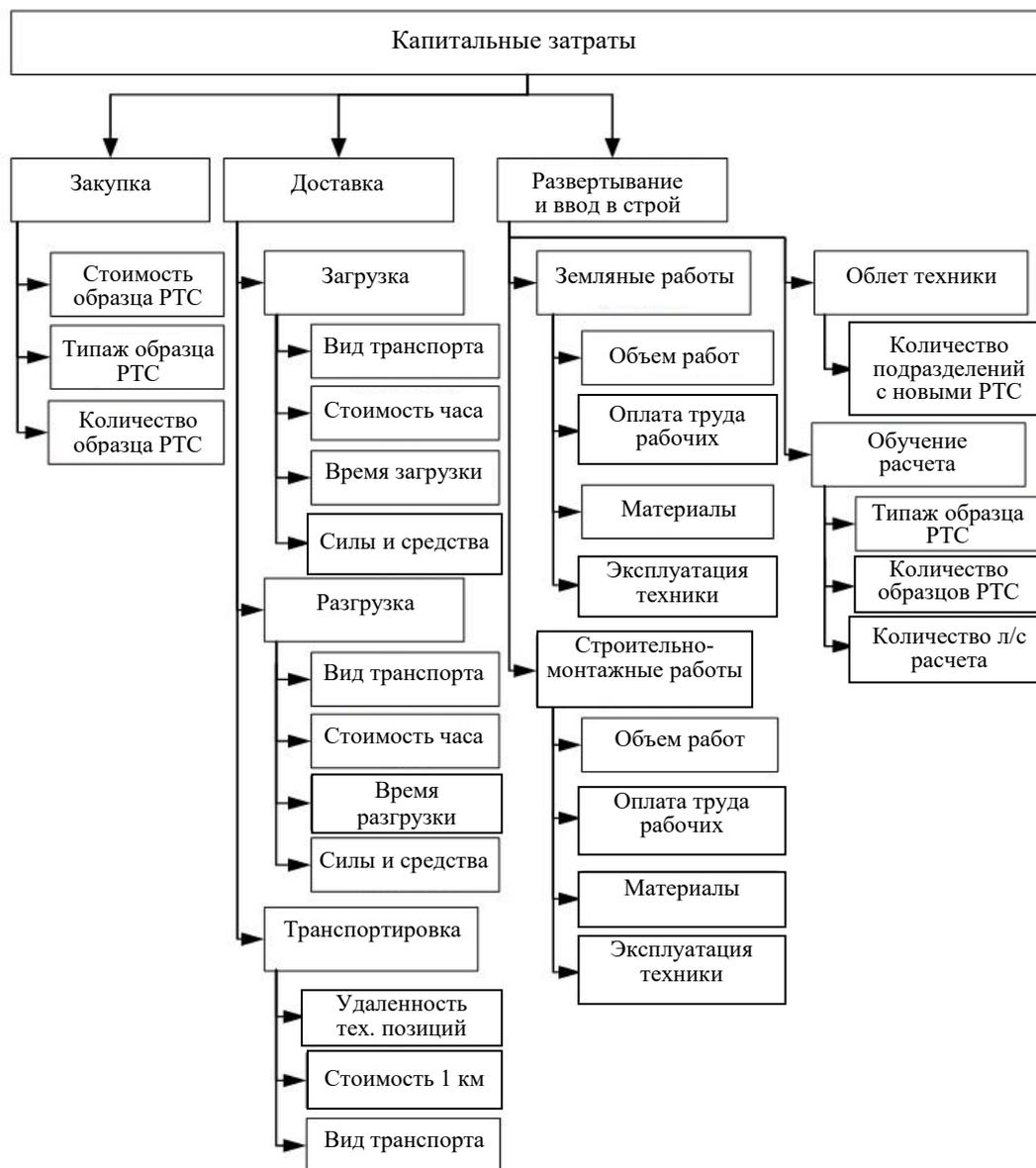


Рис. 1. Факторы, учитываемые при определении капитальных затрат

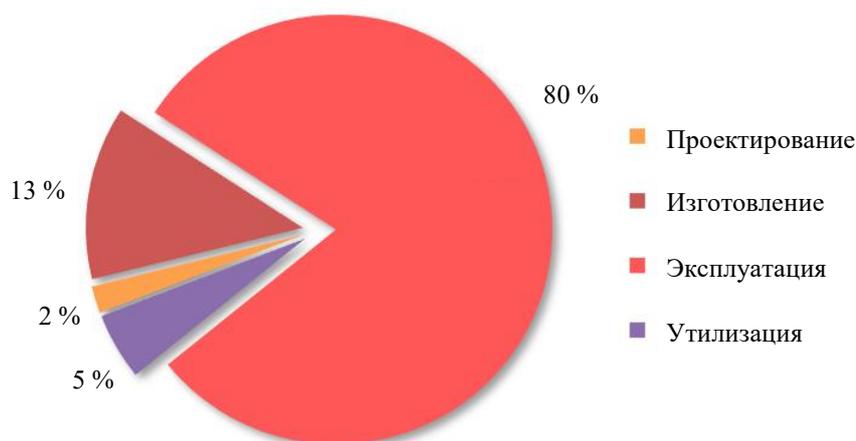


Рис. 2. Соотношение затрат на обеспечение этапов полного жизненного цикла РТС

Совокупные затраты на эксплуатацию РТС в частях и подразделениях РТВ ВКС определяются по формуле

$$Z_{\text{экс}} = Z_{\text{уп}} + Z_{\text{зип}} + Z_{\text{ээ}} + Z_{\text{лс}} + Z_{\text{рм}} + Z_{\text{бг}} + Z_{\text{а}},$$

где  $Z_{\text{уп}}$  – затраты на услуги промышленности;  $Z_{\text{зип}}$  – затраты на одиночный комплект запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП-О) и групповой (ЗИП-Г);  $Z_{\text{ээ}}$  – затраты на электроэнергию;  $Z_{\text{лс}}$  – затраты на содержание личного состава боевых расчетов;  $Z_{\text{рм}}$  – затраты на расходные материалы;  $Z_{\text{бг}}$  – затраты на поддержание РТС в установленной степени готовности к использованию по назначению;  $Z_{\text{а}}$  – амортизационные отчисления.

Определение и учет затрат на эксплуатацию РТС в течение заданного периода времени – это необходимый инструмент при технико-экономическом обосновании варианта переоснащения РТВ ВКС.

Утилизации подлежит военная техника, сокращенная по международным договорам, снятая с вооружения, выработавшая свой ресурс или морально устаревшая. Наиболее характерные виды утилизации: использование в гражданских целях без доработки и раскомплектации (автомобили, инженерная техника и т. д.) или после демонтажа вооружения и соответствующих доработок; переработка в товары бытового потребления.

Затраты на утилизацию  $Z_{\text{утл}}$  рассчитываются по формуле

$$Z_{\text{утл}} = Z_{\text{лс}} + Z_{\text{мат}} + Z_{\text{т}},$$

где  $Z_{\text{лс}}$  – затраты на персонал, привлекаемый для работ по утилизации объектов военного назначения;  $Z_{\text{мат}}$  – затраты на расходные материалы;  $Z_{\text{т}}$  – затраты на специальную технику, привлекаемую для работ по утилизации объектов военного назначения.

2. Определение коэффициента удорожания варианта с учетом факторов риска и темпа инфляции  $R^T$ .

Коэффициент удорожания  $R^i$  определяется на основе кумулятивного метода (с учетом премии за риск) и показывает, насколько увеличится каждый рубль изначальных плановых вложений в течение заданного периода времени. Данный метод расчета широко применяется при оценке эффективности проектов инвестиционного и инновационного характера, когда идентификация рисков связана со статистическими сложностями сбора исходной информации. Математически коэффициент определяется по формуле [3]

$$R^{t_i} = 1 + r_0 + r + k_{и},$$

где  $r_0$  – безрисковая ставка;  $r$  – общий уровень премии за риск;  $k_{и}$  – прогнозируемый темп инфляции.

В данной методике все источники риска объединены в один показатель – общий уровень премии за риск, который определяется сложением значений оценок факторов, влияющих на итоговую стоимость реализации варианта переоснащения:

$$r = \sum_{i=1}^I r_i,$$

где  $r_i$  –  $i$ -й риск при реализации варианта переоснащения;  $I$  – разновидность рисков, которые могут возникнуть при реализации варианта.

Формула для  $r$  позволяет определить коэффициент удорожания лишь для интервала планирования в один год, ее нельзя применить при определении коэффициента удорожания с большим количеством интервалов. Для учета данного фактора при определении коэффициента удорожания для периода времени, отличного от одного года, целесообразно использовать функцию сложного процента, т. е. неоднократно корректировать затраты, и каждую последующую корректировку производить с учетом ранее полученной суммы. Тогда коэффициент удорожания для заданного периода времени будет определяться по формуле

$$R^T = (R^{t_i})^T = (1 + r_0 + r + k_{и})^T.$$

3. Корректировка варианта с учетом определенных факторов, влияющих на затраты, и результатов моделирования динамики состояния РТВ ВКС с целью повышения эффективности переоснащения РТВ ВКС.

В предлагаемой методике вероятность работоспособности образцов РТС определяется посредством использования искусственной нейронной сети (ИНС) с радиально-базисными элементами. Эта сеть обучается на ретроспективных данных эксплуатационных характеристик образцов РТС и в дальнейшем, на основе имеющихся сведений о параметрах образцов РТС, определяет вероятность их работоспособности на данном шаге моделирования.

Задача, для которой разрабатывается ИНС, формулируется следующим образом. На основе исходных данных по образцам РТС (срока службы, фактической наработки на отказ, места дислокации, данных по проводимым ремонтам и др.) необходимо определить, с какой вероятностью они будут находиться в работоспособном состоянии на очередном шаге моделирования.

Для решения данной задачи наиболее перспективными являются вероятностные нейронные сети, отличающиеся высокой скоростью обучения и универсальными аппроксимирующими возможностями. Вероятностные нейронные сети (Probabilistic Neural Network, PNN) предложены Д.Ф. Шпехтом как совершенствование статистических методов распознавания (идентификации) образов и относятся к нейронным сетям радиально-базисного типа, которые благодаря своим достоинствам используются в различных задачах классификации образов [4].

В вероятностных нейронных сетях образцы классифицируются на основе оценок их сходства с соседними образцами. Формальным правилом при классификации является то, что класс с большей плотностью распределения вероятностей в области неизвестного образца будет иметь преимущество по сравнению с другими классами. Для оценки функции плотности распределения вероятностей используются

непараметрические методы оценки. Исследование работ по данному вопросу показало, что, как правило, применяют метод Парцена. В соответствии с ним для каждого учебного образца рассматривается некоторая весовая функция, которая еще имеет название функции потенциала или ядра [5]. Чаще всего в качестве ядерных функций берут упрощенные функции Гаусса:

$$G(X) = e^{-\frac{\|X-X_l\|^2}{2\sigma^2}},$$

где  $X_l$  –  $l$ -й образец вектора  $X$ ,  $l = \overline{1, L}$ ;  $X$  – неизвестный образец;  $\sigma$  – параметр, задающий ширину ядерной функции Гаусса и определяющий ее влияние.

Стоит отметить, что вид функции ядра  $G$  практически не влияет на точность восстановления плотности и на качество классификации [6].

Параметр  $\sigma$  (его также называют сглаживающим фактором) позволяет корректировать чувствительность нейрона и определять, насколько «острой» будет гауссова функция [6].

С помощью пакета прикладных программ Neural Network Toolbox, функционирующего под управлением ядра системы MATLAB, было проведено тестирование нейронной сети на различных наборах параметров образцов РТС и выявлена группа параметров, позволяющих с наибольшей эффективностью определять вероятность нахождения образца РТС в работоспособном состоянии. Для эффективной работы ИНС были определены входные параметры: тип РТС, срок службы образца РТС, наработка образца РТС, количество проводимых ремонтов, вид последнего ремонта.

4. Определение конечных затрат за весь период времени с учетом коэффициента удорожания и параметров скорректированного варианта:

$$Z^T = Z_{\text{общ}} \cdot R^T.$$

5. Определение эффективности переоснащения РТВ ВКС в течение заданного периода времени:

$$W_{\Pi} = \frac{W_{\text{э}}}{Z^T}.$$

В целом методика технико-экономического обоснования варианта переоснащения РТВ ВКС современными образцами РТС на основе нейросетевых технологий позволяет учесть совокупность факторов, влияющих на затраты, а также коэффициент удорожания варианта при его технико-экономическом обосновании, что позволяет повысить эффективность переоснащения РТВ ВКС в течение заданного периода времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика позволяет повысить эффективность переоснащения РТВ ВКС современными образцами РТС с учетом коэффициента удорожания варианта переоснащения РТВ ВКС, затрат на проведение мероприятий по переоснащению РТВ ВКС, а также на эксплуатацию и утилизацию образцов РТС, находящихся в составе РТВ ВКС в течение заданного периода времени.

## ЛИТЕРАТУРА

*Вестник Тверского государственного технического университета.*  
*Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

1. Луценко А.Д., Орлов В.А. Направления совершенствования методологии обоснования перспектив развития радиоэлектронной техники специального назначения // *Материалы X Международной конференции и российской научной школы*. М.: Радио и связь. 2005. Ч. 5. С. 48–57.
2. ГОСТ 25866-83. Эксплуатация техники. Термины и определения. М.: Издательство стандартов. 1983. 8 с.
3. Бланк И.И. Финансовый менеджмент. Учебный курс. Киев: Ника-Центр Эльга. 2007. 454 с.
4. Specht D.F. Probabilistic neural networks // *Neural Networks*. 1990. V. 3. P. 109–118.
5. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode // *The annals of Mathematical Statistics*. 1962. V. 33. № 3. P. 1065–1076.
6. Воронцов К.В. Математические методы обучения по прецедентам (теория обучения машин). URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/voron-ml-1.pdf> (дата обращения: 11.09.2022).

**Для цитирования:** Бойкова А.В. Методика технико-экономического обоснования варианта переоснащения воздушно-космических сил современными образцами радиотехнических средств на основе нейросетевых технологий // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Технические науки». 2023. № 2 (18). С. 113–119.

**METHODOLOGY FOR A FEASIBILITY STUDY  
OF THE OPTION OF RE-EQUIPPING THE AEROSPACE FORCES  
WITH MODERN SAMPLES OF RADIO EQUIPMENT BASED  
ON NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES**

A.V. BOYKOVA, Dr. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation;  
e-mail: common@tstu.ru

As a result of the research, a method of feasibility study of the option of re-equipment of the RTV VCS units and subdivisions using an artificial neural network and simulation modeling is proposed, which makes it possible to reproduce the process of implementing the option of re-equipment of the RTV VCS with modern RTS samples and make a forecast taking into account the stochasticity of the processes of their functioning during a given period of time and taking into account the allocated budget allocations.

*Keywords:* defense, weapons and military equipment, re-equipment, forecasting, efficiency, neural networks, simulation.

Поступила в редакцию/received: 30.10.2022; после рецензирования/revised: 12.11.2022;  
принята/accepted: 24.11.2022

**ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал  
№ 2 (18), 2023**

**Print ISSN 2658-5030  
Online ISSN 2687-0029**

Редактор Я.А. Петрова  
Корректор С.В. Борисов

---

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 2 (18), 2023*

Подписано в печать 30.06.2023

Дата выхода в свет 13.09.2023

Формат 60 x 84/8

Физ. печ. л. 15

Тираж 500 экз.

Усл. печ. л. 13,95

Цена свободная

Заказ № 325

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 13,05

С – 120

---

Редакционно-издательский центр  
Тверского государственного технического университета  
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22  
Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»  
Центр инженерной печати  
170024, Тверь, ул. Академическая, д. 14