

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# **ВЕСТНИК ВОЛОГОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 2018 г.

**№ 2 (4) / 2019**

СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ВОЛОГДА  
2019

№ 2 (4) / 2019 / ОКТЯБРЬ. Выходит 4 раза в год.

Научный журнал «Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки» включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) с 2018 г.

Полнотекстовые версии выпусков научного журнала размещены в свободном доступе на сайте Научной электронной библиотеки ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru))

**Серия:** Технические науки

**Группы специальностей:** 05.02.00 Машиноведение, системы приводов и детали машин;  
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление;  
05.23.00 Строительство и архитектура

**Учредитель и издатель:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»

**Свидетельство о регистрации СМИ:** ПИ № ФС77-75456 от 05 апреля 2019 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

#### **Главный редактор**

*А.А. Кочкин*, доктор технических наук, директор Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета

#### **Заместители главного редактора:**

*Ю.Р. Осипов*, доктор технических наук, профессор Вологодского государственного университета,  
*А.Н. Швецов*, доктор технических наук, профессор Вологодского государственного университета

#### **Секретарь**

*В.А. Раков*, кандидат технических наук, доцент Вологодского государственного университета

#### **Члены редколлегии:**

*И.К. Александров*, доктор технических наук, профессор Вологодского государственного университета,  
*В.П. Гусев*, доктор технических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН),

*И.В. Зефирова*, кандидат технических наук, доцент Вологодской государственной молочно-хозяйственной академии им. Н.В. Верещагина,

*К.В. Кияненко*, доктор архитектуры, профессор Вологодского государственного университета,

*В.И. Леденёв*, доктор технических наук, профессор Тамбовского государственного университета,

*С.В. Лукин*, доктор технических наук, профессор Череповецкого государственного университета,

*А.Е. Немировский*, доктор технических наук, профессор Вологодского государственного университета,

*В.И. Римшин*, доктор технических наук, профессор Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН),

*А.С. Степанов*, кандидат технических наук, доцент Вологодского государственного университета,

*В.А. Шорин*, доктор химических наук, профессор Вологодского государственного университета,

*И.Л. Шубин*, доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)

**Переводчик** – *Т.В. Рудакова*, кандидат педагогических наук, доцент Вологодского государственного университета

**Редакторы** – *А.И. Ланькова*, *А.П. Митракова*, *Н.Н. Постникова*

**Оригинал-макет** – *Н.В. Подхомутова*

**Адрес редакции:** 160000, г. Вологда, ул. Сергея Орлова, д. 6, каб. 202а; тел.: 8 (8172) 76-91-92, 72-11-55  
e-mail: [vestniktech@vogu35.ru](mailto:vestniktech@vogu35.ru)

**ISSN 2658-3399**

© ФГБОУ ВО «Вологодский  
государственный университет», 2019

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION  
FEDERAL STATE-FUNDED EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION  
VOLOGDA STATE UNIVERSITY

# **BULLETIN OF VOLOGDA STATE UNIVERSITY**

SCIENTIFIC JOURNAL

Founded in 2018

**№ 2 (4) / 2019**

ENGINEERING SCIENCES

VOLOGDA  
2019

No. 2 (4) / 2019 / OCTOBER. It is published 4 times a year.

Scientific journal "Bulletin of the Vologda State University. Engineering Sciences" has been included into Russian Science Citation Index (RSCI) since 2018.

Full-text versions of the scientific journal issues are freely available on the website of Scientific Electronic Library ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru))

**Series:** Engineering Sciences

**Specialty groups:** 05.02.00 Mechanical engineering, drive systems and machine parts;  
05.13.00 Computer science, computer engineering and management;  
05.23.00 Construction and architecture

**Founder and publisher:** Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education Vologda State University

**Mass Media Registration Certificate:** PI No. FS77-75456 dated of April 05, 2019 was issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Communications (Roskomnadzor)

**Chief Editor**

*A.A. Kochkin*, Doctor of Engineering Sciences, Director of Civil Engineering Institute of Vologda State University

**Assistant editors:**

*Yu.R. Osipov*, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Vologda State University,

*A.N. Shvetsov*, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Vologda State University

**Secretary:**

*V.A. Rakov*, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Vologda State University

**Members of the Editorial Board:**

*I.K. Alexandrov*, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Vologda State University,

*V.P. Gusev*, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of the Laboratory of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN),

*I.V. Zefirov*, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Vologda State Dairy and Economics Academy named after N.V. Vereshchagin,

*K.V. Kiyanenko*, Doctor of Architecture, Professor of Vologda State University,

*V.I. Ledenev*, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Tambov State University,

*S.V. Lukin*, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Cherepovets State University,

*A.E. Nemirovsky*, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Vologda State University,

*V.I. Rimshin*, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN),

*A.S. Stepanov*, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Vologda State University,

*V.A. Shorin*, Doctor of Chemical Sciences, Professor of Vologda State University,

*I.L. Shubin*, Doctor of Engineering Sciences, Director of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)

**Translator** – *T.V. Rudakova*, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of Vologda State University

**Editors** – *A.I. Lankova*, *A.P. Mitrakova*, *N.N. Postnikova*

**Original layout** – *N.V. Podhomutova*

**Editorial office:** 160000, Vologda, Sergeya Orlova st., 6, office 202a; tel.: 8 (8172) 76-91-92, 72-11-55  
e-mail: [vestniktech@vogu35.ru](mailto:vestniktech@vogu35.ru)

**ISSN 2658-3399**

© FSFEI of HE Vologda  
State University, 2019

## Содержание

### МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

<i>Бакаев В.Н.</i> УПРАВЛЯЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМОВ МАЯТНИКОВОГО ТИПА.....	6
<i>Бормосов Н.А., Осипов Ю.Р., Мартыненко Д.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОДШИПНИКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	9
<i>Попов И.П.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСОВ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	15
<i>Попов И.П.</i> СГЛАЖИВАНИЕ НАГРУЗКИ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА.....	19
<i>Яняк С.В., Пивень Г.Ю.</i> АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА С ЖЕЛЕЗО-МОЛИБДЕНОВОЙ СВЯЗКОЙ.....	22

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Баранов В.В., Звонарев А.А., Чжао К.</i> СИСТЕМА РАЗРАБОТКИ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ВЫСОКОГО УРОВНЯ.....	27
<i>Булавин В.Ф., Степанов А.С., Яхричев В.В.</i> ИНФОРМАЦИОННОЕ ПОЛЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МАЛЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	31
<i>Вяткина О.С., Алюнов А.Н.</i> ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ.....	38
<i>Жаравин Д.Е., Козин Д.Ю., Фомичев Д.Ю., Федотовский С.Б.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ.....	41
<i>Казакова С.А., Булавин В.Ф.</i> КОМПЛЕКСНАЯ ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	44
<i>Полянский А.М., Смирнова Е.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА В АРХИТЕКТУРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	48
<i>Старкова Л.Е.</i> УПРАВЛЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ НИЗКОЙ ЗАГРУЗКЕ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	53
<i>Щекин С.М., Никифорова М.М.</i> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ.....	56

### СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Кияненко К.В.</i> СОЦИАЛЬНО-АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ СМЕШАННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ.....	61
<i>Мясникова С.А., Шорин В.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННЫХ И КОГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ.....	68
<i>Очур-оол А.П., Севен С.С.</i> ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЫЗЫЛСКОГО ЗОЛОТВАЛА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ.....	71
<i>Соловьев С.А., Шевцов Л.С.</i> АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ ПО ШИРИНЕ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН НА ОСНОВЕ АСІ 224R-01.....	75
<i>Соловьева Е.В.</i> ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗУПРОЧНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	78
<i>Уткин В.С.</i> УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОСАДКИ СВАЙ-СТОЕК В ГРУНТЕ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТА.....	81
Сведения об авторах.....	84

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING, DRIVE SYSTEMS AND MACHINE PARTS

<i>Bakaev V.N.</i> CONTROLLED ELECTRIC DRIVE OF PENDULAR TYPE MECHANISMS.....	6
<i>Bromosov N.A., Osipov Y.R., Martynenko D.V.</i> MODELLING OF HEAT-INDUCED DEFORMATIONS FORMATION PROCESS IN PRODUCTION OF BEARINGS FOR METALLURGICAL EQUIPMENT.....	9
<i>Popov I.P.</i> RESEARCH OF RESONANCES IN TECHNICAL SYSTEMS .....	15
<i>Popov I.P.</i> LOAD LEVELING OF DIESEL SHUNTING LOCOMOTIVE.....	19
<i>Yanyak S.V., Piven G.Y.</i> ANALYSIS OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF HARD ALLOYS BASED ON TITANIUM CARBIDE WITH IRON-MOLYBDENUM BUNDLE .....	22

### COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

<i>Baranov V.V., Zvonarev A.A., Chzhao K.</i> DEVELOPMENT SYSTEM OF APPLIED SOFTWARE USING A HIGH-LEVEL LANGUAGE.....	27
<i>Bulavin V.F., Stepanov A.S., Yakhrichev V.V.</i> INFORMATION FIELD OF SMALL MACHINE- BUILDING ENTERPRISES DIGITAL TECHNOLOGY .....	31
<i>Vyatkina O.S., Alyunov A.N.</i> DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL TO IDENTIFY SHORT CIRCUITS IN POWER LINES .....	38
<i>Zharavin D.E., Kozin D.Y., Fomichev D.Y., Fedotovskij S.B.</i> USE OF GENETIC ALGORITHM FOR TRAINING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK.....	41
<i>Kazakova C.A., Bulavin V.F.</i> COMPLEX DIGITALIZATION OF PREPARATION MACHINE-BUILDING PRODUCTION .....	44
<i>Polyanskiy A.M., Smirnova E.A.</i> APPLICATION OF AGENT-BASED APPROACH IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS ARCHITECTURAL MODELLING .....	48
<i>Starkova L.E.</i> POWER CONSUMPTION MANAGEMENT OF UNDERUSED ENGINES.....	53
<i>Shchekin S.M., Nikiforova M.M.</i> FORECASTING SYSTEMS DEVELOPMENT FOR GENERATING MANAGEMENT SOLUTIONS .....	56

### CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Kiyanenko K.V.</i> SOCIO-ARCHITECTURAL PROGRAMMING OF RESIDENTIAL MIXED-USE DEVELOPMENTS .....	61
<i>Myasnikova S.A., Shorin V.A.</i> STUDY OF ADHESIVE AND COHESIVE PROPERTIES IN COMPOSITE MATERIAL .....	68
<i>Ochur-ool A.P., Seven S.S.</i> ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE KYZYL ASH DUMP .....	71
<i>Solovyev S.A., Shevcov L.S.</i> RELIABILITY ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAM BY CRACK WIDTH BASED ON ACI 224R-01 .....	75
<i>Solovyeva E.V.</i> THERMOCHEMICAL MODEL OF WEAKENING IN COMPOSITE MATERIALS .....	78
<i>Utkin V.S.</i> IMPROVED CALCULATION METHOD OF POINT-BEARING PILES SETTING IN FOUNDATION SOIL.....	81
Information about the authors .....	84



**В.Н. Бакаев**

*Вологодский государственный университет*

## УПРАВЛЯЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМОВ МАЯТНИКОВОГО ТИПА

Рассмотрены методы управления электроприводом с механизмом маятникового типа. Обосновано применение фаззи-управления, чтобы достичь некоторой робастности. Рекомендуется в качестве входных переменных фаззи-регулятора задавать скорость, ускорение тележки и угол отклонения груза от вертикали при формировании требуемого переходного процесса.

Математический маятник, электрический привод, стабилизация, робастное управление, нечеткая логика.

Электромеханические системы перемещения и позиционирования, состоящие из электропривода и нестационарного механизма, применяются для выполнения погрузочно-разгрузочных, подъемно-транспортных, ремонтных сборочных и складских работ. Оптимизация их работы требует современных методов управления с применением кроме классических регуляторов различных идентификаторов, наблюдателей, фаззи-управления, чтобы достичь некоторой робастности. В автоматизированных установках раскачивание грузов вносит неопределенность в программу работы механизмов и в ряде случаев может существенно ограничить преимущества автоматизации.

В этом случае приходится решать задачу синтеза системы управления, чтобы сформировать диаграмму разгона и торможения механизма передвижения, минимизирующую амплитуду отклонения груза и при этом обеспечивающую максимальную производительность работы взаимосвязанных электроприводов.

Общий подход при решении подобных задач заключается в том, что электромеханическая система (двигатель с тележкой, канат и груз), образует маятник (канат и груз) с подвижной точкой подвеса (двигатель с тележкой) [1–2]. Путем рационального перемещения точки подвеса этого маятника можно управлять его колебаниями с помощью электропривода механизма передвижения. Для ограничения времени и амплитуды маятниковых колебаний груза используют ручные и автоматические способы.

При использовании автоматических способов управления дается только начальный командный сигнал, а движение механизма автоматически формируется системой управления электроприводом. При этом необходимо применение сложных датчиков отклонения груза. Для осуществления способов с нулевыми начальными отклонениями также необходимы определенные датчики параметров движения, однако они проще датчиков отклонения. При этом необходимо применение различных датчиков в зависимости от того, какую переменную задавать при формировании требуемого переходного процесса: приложенную к тележке результирующую силу, скорость и ускорение тележки, угол отклонения груза от вертикали и т. д.

Объект управления в нашем случае является сложной нелинейной электромеханической системой [3]. Анализ динамических нагрузок в такой системе возможен при учете как электрических связей, так и механических между движущимися массами системы. В [1] приведено описание работы маятника при условии постоянной приложенной силы к движущейся тележке. Синтез алгоритма управления нестационарной системой подразумевает наличие в математической модели ряда допущений [4]:

- механическая передача от двигателя к тяговому органу жесткая;
- масса подвешенного груза сосредоточена в точке, совпадающей с ее центром тяжести;
- гибкая подвеска, связывающая тяговый орган и груз, является безынерционной и абсолютно жесткой;
- система электропривода настроена так, что быстрое действие перехода к силе воздействия на тележку также можем пренебречь.

Эти допущения вполне оправданны при определении управляющего воздействия для минимизации параметров колебаний груза. В этом случае возможно использование уравнения Лагранжа второго рода для определения колебаний массы  $m_2$  при воздействии на тележку момента двигателя  $M_o$  (рис. 1).

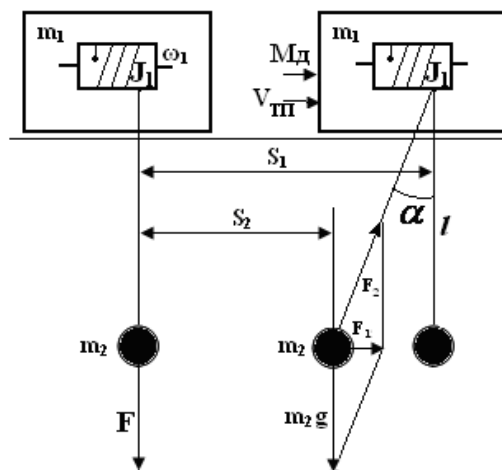


Рис. 1. Механизм с маятниковой подвеской

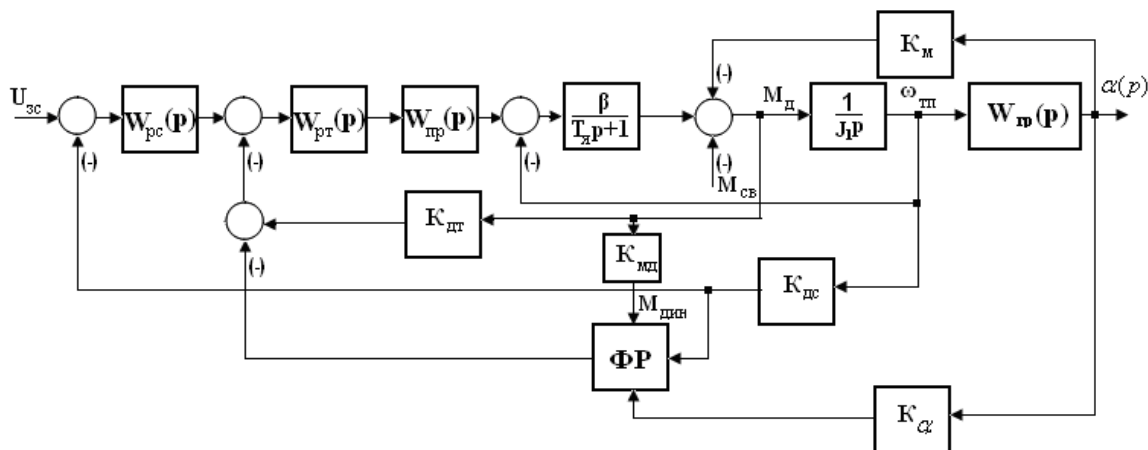


Рис. 2. Структурная схема электропривода с фаззи-регулятором

Уравнения Лагранжа:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial W}{\partial s'_1} \right) - \frac{\partial W}{\partial s_1} = M_o; \quad \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial W}{\partial \alpha'} \right) - \frac{\partial W}{\partial \alpha} = m_2 g l \sin \alpha \quad (1)$$

$$W = \frac{m_1 s'^2_1}{2} + \frac{m_2 (s'^2_2 - l \alpha' \sin \alpha)^2}{2} + \frac{m_2 l^2 \alpha'^2 \sin^2 \alpha}{2},$$

где  $W$  – кинетическая энергия системы;  $s'_1$  – скорость массы  $m_1$ ;  $\alpha'$  – угловая скорость массы  $m_2$ ;  $l$  – длина подвески;  $g$  – ускорение свободного падения.

После выполнения дифференцирования получим:

$$(m_1 + m_2) s''_1 - m_2 l \alpha'' \cos \alpha + m_2 l \alpha'^2 \sin \alpha = M_o; \quad (2)$$

$$m_2 l^2 \alpha'' - m_2 l \cos \alpha s'' = -m_2 g l \sin \alpha$$

Решив систему уравнений (2) для отклонения груза от вертикали  $\alpha(t)$  массы груза  $m_2$ , получим при условии  $m_2 \sin^2 \alpha \ll m_1$  уравнение (3):

$$\alpha'' + \frac{m_2}{m_1} \alpha'^2 \sin \alpha \cos \alpha + \frac{m_1 + m_2}{m_1} \frac{g}{l} \sin \alpha = \frac{M_o \cos \alpha}{m_1 l}. \quad (3)$$

Линеаризованную передаточную функцию  $W_{пp}(p)$  от скорости точки подвеса  $v_{тп}(p)$  к отклонению груза от положения равновесия  $\alpha(p)$  примем в виде [2]:

$$W_{пp}(p) = \frac{\alpha(p)}{v_{тп}(p)} = \frac{Kp}{(T_1 p)^2 + T_2 p + 1}, \quad (4)$$

где  $K$  – зависит от конструкции механизма;  $T_1 = \sqrt{\frac{l}{g}}$ ,  $T_2 = \frac{K_{св} l}{m_2 g}$ ;  $l$  – длина подвеса;  $K_{св}$  – зависит от скорости ветра;  $m_2$  – масса груза.

Тогда от управляемого электропривода необходимо потребовать воспроизведения выходной функции фаззи-регулятора. А структурная схема в этом случае может быть представлена в виде рис. 2. Ускорение в приводе подвеса пропорционально динамическому моменту в двигателе (динамическому току).

Электромеханическая система в целом включает в себя механизм, электропривод и систему управления электроприводом с фаззи-регулятором (ФР), на вход которого подаются сигналы о скорости подвеса груза, его отклонения и динамического момента. Термы функций принадлежности ФР приняты треугольного вида. Выходной сигнал ФР подается в контур управления моментом двигателя, чтобы управлять необходимым ускорением движения точки подвеса. Моделирование и offline-настройка системы возможна с использованием любого пакета прикладных программ, имеющего Simulink, FZ-logik и математические функции.

Предложенная модель электропривода может быть использована для систем управления поворотом стрелы кранов с автоматизированным гашением возникающих колебаний груза.

#### Литература

1. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – Москва : Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
2. Системы управления электродвигателями [Электронный ресурс]: сайт компании ООО «ГК Приводные системы». – Режим доступа: <http://www.drive-systems.ru/>.
3. Сериков, С. А. Задачи идентификации и рекуррентный подход к их решению / С. А. Сериков. – Воронеж : Научная книга, 2003. – 92с.
4. Масандилов, Л. Б. Электропривод подъемных кранов / Л. Б. Масандилов. – Москва : МЭИ, 1998. – 100 с.

V. N. BAKAEV

#### CONTROLLED ELECTRIC DRIVE OF THE PENDULAR TYPE MECHANISMS

The methods of control of electric drive with a pendular mechanism are considered. The use of fuzzy control for achieving robustness is grounded. It is recommended to set the speed, acceleration of the carriage and the deviation angle of the weight from the vertical as input variables of the fuzzy controller when forming the required transient process.

Mathematical pendulum, electric drive, stabilization, robust control, fuzzy logic.





## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОДШИПНИКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье представлены результаты проведенного анализа факторов, влияющих на изменение размеров колец подшипников, выполнен кластерный, дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализ результатов исследований с целью выявления наиболее значимых факторов. По результатам обработки экспериментальных данных получены математические модели, позволяющие прогнозировать изменение геометрии колец при термической обработке в зависимости от конструктивных параметров кольца (толщина стенки, наличие канавок под уплотнение, жесткость и т. п.).

Производство подшипников, термическая обработка, тепловые деформации, математическая модель, эксплуатационные свойства изделий.

Изготовление колец подшипников является сложным многоступенчатым технологическим процессом. После тепловой обработки макрогеометрические отклонения кольца могут значительно увеличиться. В связи с этим требуется учитывать возможные изменения размеров на начальном этапе изготовления и в процессе самой термообработки.

Оцинкованная стальная полоса является одним из самых востребованных конструкционных материалов на мировом рынке. Она нашла свое применение в строительстве, автомобилестроении, производстве бытовой техники и многих других отраслях промышленности и хозяйства. Основным свойством оцинкованной стали, определяющим его широкое промышленное использование, является высокая коррозионная стойкость при сохранении всех качеств обычного стального листа.

На сегодняшний день в мире действует около 550 агрегатов оцинкования стального листа, а доля оцинкованного проката в структуре мирового потребления составляет порядка 8–9 % [1]. Российский рынок оцинкованного проката между собой делят три крупнейшие металлургические компании – это ОАО «НЛМК» («Новолипецкий металлургический комбинат», г. Липецк), ПАО «Северсталь» («Череповецкий металлургический комбинат», г. Череповец) и ОАО «ММК» («Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск). ПАО «ЧМК» и ОАО «ММК» имеют по два агрегата непрерывного горячего цинкования (АГНЦ), а ОАО «НЛМК» ввел в эксплуатацию уже четвертый агрегат.

К основным технологическим узлам линии непрерывного горячего цинкования (АГНЦ) относятся: механизмы подготовки горячекатаных рулонов (размотка, правка, обрезка концов, сварка в непрерывную полосу); узел предварительной очистки и подготовки

поверхности полосы к нанесению покрытий и узел основной очистки (химическая + электролитическая + мойка + сушка); башенная вертикальная или горизонтальная печь термохимической подготовки поверхности, применяющаяся также для рекристаллизационного отжига полосы; сменные ванны горячего цинкования с расплавами различных составов; воздушные ножи и выходные устройства (промасливатель, ножницы, моталки, весы, упаковка) [1].

В узлах секций прижимных, натяжных и опорных роликов линии непрерывного горячего цинкования применяются различные типы роликовых подшипников. Крупнейшими производителями таких подшипников являются всемирно известные фирмы SNR (Франция, крупнейший европейский бренд), SKF (Швеция, крупнейший мировой производитель подшипников, второй производитель в Европе), FAG (Германия), NSK (Япония, второй по объемам производитель в мире), Timken (США, крупнейший производитель в мире по подшипникам конической группы). Среди российских производителей подшипников для металлургического и прокатного производств это ОАО «Самарский подшипниковый завод», ОАО «Московский подшипник», ОАО «Волжский подшипниковый завод».

Крупнейшим в России производителем подшипников для различных отраслей экономики является ЗАО «ВПЗ» (Вологодский подшипниковый завод, г. Вологда, торговая марка VBF). На его долю приходится до 18% всего объема продукции подшипниковых предприятий в России и свыше 1700 производимых типоразмеров. Вместе с тем перспективными планами развития предприятия предусмотрено освоение новых типов подшипников, в том числе применяющихся в опорах роликовых секций линий непрерывного цинкования. Для этого осуществляется ре-

конструкция и модернизация производства. Одно из ключевых мест в производстве подшипников занимает термическая обработка колец и тел качения.

Основу парка технологического оборудования термического производства ЗАО «ВПЗ» составляют агрегаты типа СИЗа 6/40, СКЗа 8/40 (СССР, Россия). Дополнительно в цехе установлены высокопроизводительные агрегаты МБФА компании «SES» г. Атланта, США.

Российское и американское оборудование применяется для термической обработки колец различных типов подшипников, поэтому возникает необходимость поэтапного пересмотра технологии их изготовления и перераспределения всей номенклатуры обрабатываемых колец между этими видами технологического оборудования.

Во время термической обработки колец подшипников происходит существенное изменение их формы, что может привести к ухудшению качества деталей и изделия в целом. Поэтому основной задачей представленной работы является получение математических моделей для прогнозирования и оценки изменения геометрии колец подшипников при термической обработке для дальнейшей корректировки и совершенствования технологии их производства.

Исследования температурных (тепловых) деформаций колец подшипников проводились в термическом цехе Вологодского подшипникового завода на агрегатах СИЗа (СССР, Россия) №№ 4, 6, 21, 23, 26 и МБФА (США) №№ 24, 25 по режимам, соответствующим действующей нормативно-технической документации.

Исследовались 01 кольца роликовых радиальных самоцентрирующихся, роликовых конических, роликовых радиальных сферических подшипников, с наружным диаметром  $150 \div 180$  мм (типы 3517, 3518, 3519, 3520, 2120, 2120, 2121, 2122, 7219).

Сложность эксперимента обусловлена тем, что он проводился на действующем оборудовании в условиях непрерывного производственного цикла, поэтому возможность изменять технологические режимы в широком диапазоне была затруднена.

Перед термообработкой была определена микроструктура колец, измерены геометрические параметры колец, проведен анализ закалочного масла в соответствии с методикой [2].

Термическая обработка колец проведена в соответствии со схемой на рисунке.

Кольца, поступив в термический цех после токарной обработки, дробились в партии в зависимости от нежесткости и типа заготовок.

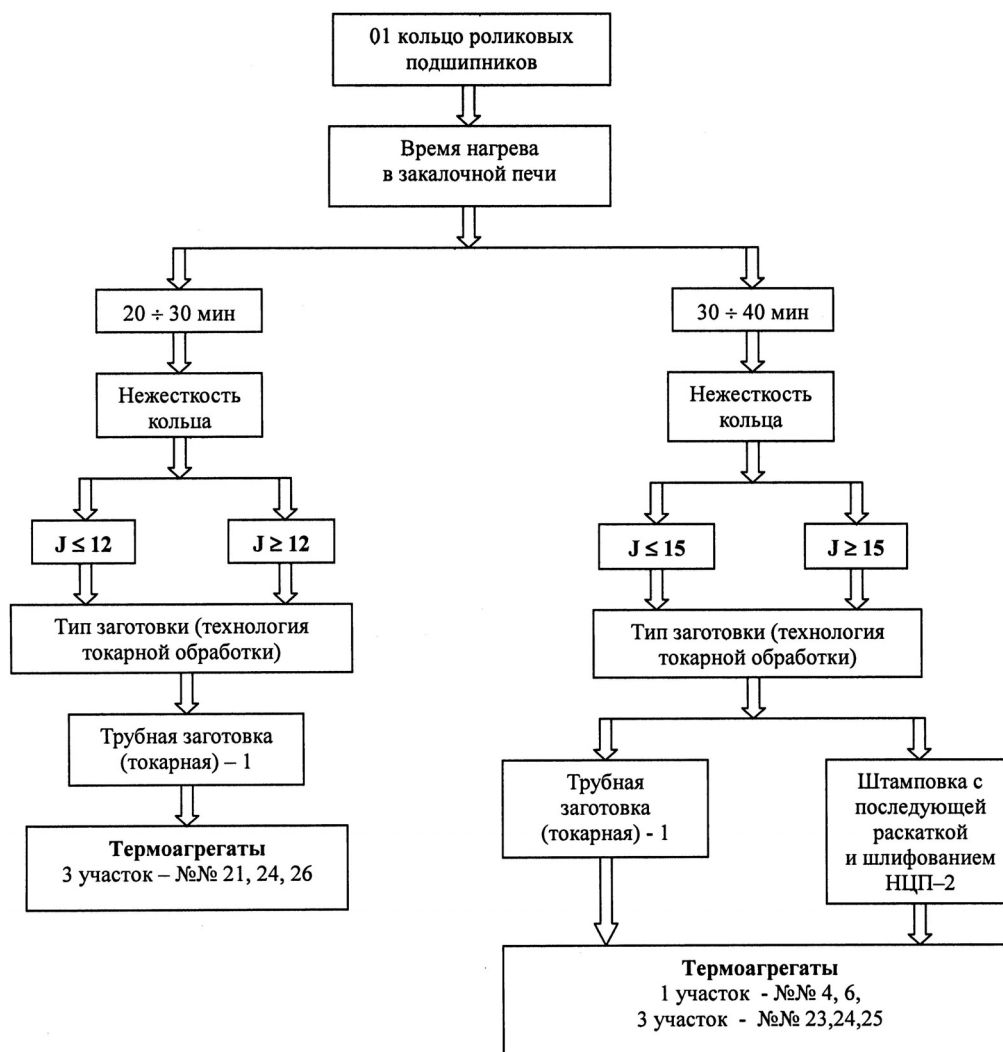


Рис. 1. Схема проведения термической обработки колец

Нежесткость кольца определяется по формуле:

$$J = \frac{d_{нар}}{\left(\frac{d_{нар} - d_{вн}}{2}\right)},$$

где  $d_{нар}$  – наружный диаметр кольца;

$d_{вн}$  – внутренний диаметр кольца.

По полученным значениям нежесткости определялась допустимая овальность по таблице НТД «Допустимая овальность термически обработанных наружных колец по наружному диаметру. Охлаждение со свободным падением или качением».

Далее кольца партиями направлялись для загрузки в термоагрегаты. Объем выборки для агрегатов МБФА – 50 ÷ 60 шт., для СИЗа – 70 ÷ 80.

После термической обработки кольца контролировались по НЦП, диаметру дорожки качения, диаметру борта.

Обработка результатов исследований проводилась с помощью пакета прикладных программ STATISTICA 6.0 в следующей последовательности: кластерный анализ, дисперсионный анализ, корреляционный анализ, регрессионный анализ. Для расчетов была составлена матрица переменных (табл. 1).

Применение в исследованиях кластерного анализа позволило классифицировать и систематизировать большой объем информации для дальнейшей обработки статистических данных.

Иерархическая структура объединения переменных в кластеры по принципу создания древовидной диаграммы даёт основание предполагать некоторую связь между следующими переменными, объединенными в кластеры:

- тип заготовки, кислотное число;
- кинематическая вязкость масла, исходная микроструктура;

Эти два кластера, в дальнейшем, объединялись в следующий кластер, содержащий исходную микроструктуру, кинематическую вязкость масла, тип заготовки, кислотное число, нежесткость кольца. Отдельное место занимают номинальный диаметр кольца и температура масла, объединенные в самостоятельный кластер.

Применение процедуры кластеризации позволило объединить изучаемые параметры следующим образом:

- первый кластер включает номинальный диаметр кольца и температуру масла;
- второй кластер включает кинематическую вязкость масла, исходную микроструктуру;
- третий кластер включает тип заготовки, кислотное число, нежесткость кольца.

Применение процедуры дисперсионного анализа в исследованиях позволяло изучать каждый фактор, представленный в таблице 1, управляя значениями других факторов, и обнаружить эффекты взаимодействия между факторами, и позволяя проверять более сложные гипотезы.

Корреляционный анализ обеспечил выявление факторов, влияющих на температурные деформации при соответствующем объеме выборки. Так, степень значимости фактора определялась коэффициентом корреляции  $> 0,33$  для агрегата МБФА и  $> 0,22$  для агрегата СИЗа. Пример корреляционной матрицы для конуса кольца для агрегата СИЗа показан в таблице 2.

Таблица 1

Матрица переменных

№	Параметр после т/о	Переменная								
		var 1	var 2	var 3	var 4	var 5	var 6	var 7	var 8	var 9
1	Н. предел по НЦП	Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
2	В. предел по НЦП	Y2	X9	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
3	Конус по НЦП	Y3	X10	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
4	Овал по НЦП	Y4	X11	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
5	Рост (усадка) по НЦП	Y5	X12	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Обозначение переменных										
	Параметр							Ед. изм.	Обознач.	
1	Нижний предел по НЦП до т/о							мкм	X1	
2	Верхний предел по НЦП до т/о							мкм	X9	
3	Конус по НЦП до т/о							мкм	X10	
4	Овал по НЦП до т/о							мкм	X11	
5	Макс. диаметр кольца до т/о							мм	X12	
6	Ном. диаметр кольца							мм	X2	
7	Тип заготовки (техпроцесса): 1 – труба, 2 – штамповка							-	X3	
8	Температура закалочного масла							°C	X4	
9	Нежесткость кольца							-	X5	
10	Кинематическая вязкость масла							мм <sup>2</sup> /сек	X6	
11	Кислотное число закалочного масла							-	X7	
12	Показания неразрушающего контроля (исх. структура)							μА	X8	
13	Частота вращения вентилятора (для агрегатов СИЗа)*							мин <sup>-1</sup>	X13	

\*Регулировка скорости охлаждения на агрегатах МБФА не осуществлялась. Давление масла в форсунках закалочного бака является постоянным, настраивается при пуске агрегата в эксплуатацию, последующих ремонтных работах и контролируется специалистами.

Таблица 2

Корреляционная матрица

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
Y1	<b>0.23</b>	<b>0.40</b>	<b>-0.29</b>	<b>0.25</b>	<b>-0.40</b>	<b>0.28</b>	0.11	<b>0.40</b>	<b>0.40</b>

Матрица ротации факторов (овал по НЦП (для агрегата МБФА))

Вариант			Факторы		
1	var 1	Y4	0,20915	0,78526	-0,08494
2	var 2	X11	0,20247	0,88774	-0,24135
3	var 3	X2	0,99054	0,31730	0,13987
4	var 4	X3	-0,27804	-0,39518	0,99297
5	var 5	X4	0,65691	-0,31899	0,79576
6	var 6	X5	-0,97262	0,20423	0,50903
7	var 7	X6	-0,63919	0,84055	-0,14691
8	var 8	X7	0,19610	0,97586	0,98179
9	var 9	X8	0,96058	0,40062	0,07003

Из таблицы следует, что на конус, получаемый при т/о на термоагрегате СИЗа, оказывают влияние значения всех факторов, кроме X7 (кислотное число закалочной среды).

С учетом влияния на исследуемые показатели довольно большого числа переменных, характеризующих процесс термической обработки и качество заготовки, в работе в качестве инструмента исследований принят метод главных компонент с последующим механизмом процедуры факторного анализа.

После проведения процедуры главных компонент с массивом исходных данных, включающих 9 независимых переменных, получены 3 главных компоненты, на 90% описывающие состояние системы, объекта исследований.

Для возможно более правильной интерпретации главных компонент и получения в последующем математических моделей изучаемого процесса в терминах обобщенных факторов была проведена процедура факторного анализа, сущность которой – выделение из множества измеряемых характеристик объекта новых факторов, более адекватно отражающих свойства объекта исследований, и возможность их интерпретаций.

Используя предусмотренные факторным анализом приемы по обработке обширных массивов входных переменных, после вращения полученного факторного пространства, составлена матрица 3-х основных факторов (табл. 3 – подчеркнуты весомые признаки), по результатам которой выполнена следующая интерпретация основных факторов:

1-й фактор – включает в себя влияние номинального диаметра кольца и структуры заготовки до термической обработки, т.е. интерпретируется как фактор исходного геометрического и структурного состояния колец;

2-й фактор – определяется овалом кольца по наружной цилиндрической поверхности кольца подшипника (НЦП) до термической обработки и характеристиками закалочного масла (кинематическая вязкость и кислотное число), т.е. интерпретируется как фактор закалочной среды (условий закалки) и несовершенства геометрии колец;

3-й фактор – определяется температурой закалочного масла, т.е. является фактором технологических режимов закалки.

Далее, исходя из полученной после вращения факторного пространства матрицы основных факторов, можно построить уравнение модели технологического процесса в терминах обобщенных факторов.

Например, овал НЦП 01 кольца после термической обработки на агрегате МБФА описывается следующим уравнением в нормированных значениях главных факторов:

$$Y4 = 0,209 (X2, X5, X9) + 0,785 (X11, X6, X7) - 0,085 (X3, X7).$$

Уравнение 1-й степени связи выходного показателя (овал НЦП) с факторами состояния:

$$Y4 = 0,209 f_1 + 0,785 f_2 - 0,085 f_3.$$

Полученную зависимость можно интерпретировать следующим образом: для уменьшения овала НЦП при термической обработке факторная модель предписывает в первую очередь определить возможность снижения всех факторов  $f_1$  и  $f_2$  и увеличения всех факторов  $f_3$ , т.е. исходя из физики процесса термообработки необходимо:

во-первых, уменьшение размерности таких показателей, как номинальный диаметр кольца, закалка колец со структурой предварительной термической обработки (отжиг) близкой к 1-му баллу, уменьшение нежесткости колец, кинематической вязкости и кислотного числа, овал по НЦП до термообработки;

во-вторых, увеличение размерности таких параметров, как тип заготовки, кислотное число закалочного масла.

Здесь необходимо сделать несколько замечаний:

- номинальный диаметр и нежесткость колец определяются их конструкцией и являются величинами, заданными для данного типа;

- одновременно увеличивать или уменьшать кислотное число закалочного масла невозможно, так как при его увеличении прокаливаемость кольца ухудшается (что приводит к браку колец п/ш), а вместе с тем уменьшается овал кольца. Согласно НТД кислотное число должно стремиться к 0, поэтому данный параметр следует отнести к факторам  $f_2$ . Для стабильности процесса кинематическая вязкость масла также должна лежать в пределах, установленных НТД (ТУ 38.101135-88);

- тип заготовки в выбранной системе обозначений представляется как: 1 – трубная заготовка, 2 – штампованная заготовка, т.е. уравнение модели предписывает, что предпочтительней является штамповка, а, следовательно, для колец подшипника, к которым предъявляются более высокие требования качества, необходимо делать выбор в пользу кузнечной обработки заготовок. Остальные модели приведены в таблице 4.

## Результаты факторного анализа

№	Агрегат	Параметр	Группы факторов						
			1		2		3		
1	СИЗа	Конус	Y3	0,611	X2, X5, X8	0,441	X6, X7	-0,201	X10, X3
	МБФА	по НЦП	Y3	0,183	X2, X5, X8	0,914	X10, X6	-0,0001	X3, X7
2	СИЗа	Овал	Y4	0,104	X2, X5, X8	-0,339	X6, X7	0,704	X3
	МБФА	по НЦП	Y4	0,209	X2, X5, X8	0,785	X11, X6, X7	-0,085	X3, X7
3	СИЗа	Рост (усадка)	Y5	0,107	X12, X5, X8	-0,143	X6, X7	0,922	X4
	МБФА	по НЦП	Y5	0,683	X12, X2, X7, X8	0,165	X5, X6	0,061	X3

После проведения процедуры факторного анализа методом наименьших квадратов были подобраны регрессионные соотношения, связывающие основные тепловые (температурные) деформации (овал, конус, рост/усадка) с параметрами процесса.

Степень адекватности (весомости) модели оценивали по скорректированному по числу степеней свободы коэффициенту детерминации  $R - sq$  ( $0,5 \div 0,8$ ). Чем больше его значение, тем выше степень адекватности уравнения регрессии.

Получены следующие соотношения:

**конус кольца, мкм:**

на агрегате МБФА

$$Y = -2,36X_7 + 0,07X_2^2 - 16,99X_3 - 5,67X_3^2 - 0,12X_4 - 0,0006X_4^2 - 6,99X_6 - 0,13X_6^2 + 2,51X_7X_3 - 0,013X_7X_4 - 0,14X_3X_4 - 0,09X_7X_6 - 0,63X_3X_6 - 0,006X_4X_6,$$

на агрегате СИЗа

$$Y = -3,34X_1 - 0,002X_1^2 - 4,85X_2 - 0,03X_2^2 - 77,92X_3 - 25,97X_3^2 - 2,39X_4 - 0,012X_4^2 + 10,48X_5 + 0,36X_5^2 - 0,12X_6 - 0,0009X_6^2 - 5,46X_8 - 2,46X_9 - 0,05X_9^2 - 0,09X_1X_2 - 1,51X_1X_3 - 1,2X_2X_3 - 0,12X_1X_4 - 0,02X_2X_4 - 0,87X_3X_4 + 1,01X_1X_5 + 0,19X_2X_5 - 1,35X_3X_5 + 0,05X_4X_5 + 0,05X_1X_6 - 0,01X_2X_6 - 0,28X_3X_6 - 0,01X_4X_6 + 0,07X_5X_6 + 0,38X_1X_8 + 0,16X_2X_8 + 10,08X_3X_8 + 0,4X_4X_8 - 4,77X_5X_8 + 0,019X_6X_8 - 0,03X_1X_9 - 0,01X_2X_9 - 0,47X_3X_9 - 0,07X_5X_9 - 0,002X_6X_9 + 0,06X_8X_9,$$

**рост/усадка кольца после термической обработки, мкм:**

на агрегате МБФА

$$Y = 0,08X_3 + 0,0004X_3^2 - 0,53X_4 - 0,18X_4^2 - 24,51X_5 - 0,45X_5^2 - 0,006X_3X_4 + 0,002X_3X_5 - 0,02X_4X_5,$$

на агрегате СИЗа

$$Y = 3,4X_3 - 0,13X_3^2,$$

**овал кольца по наружной цилиндрической поверхности кольца подшипника (НЦП), мкм:**

на агрегате МБФА

$$Y = 6,18X_1 + 0,01X_1^2 + 212,83X_3 + 70,94X_3^2 + 29,83X_8 - 0,02X_8^2 + 2,53X_1X_3 - 0,23X_1X_8 - 12,82X_3X_8,$$

на агрегате СИЗа

$$Y = 2,49X_1 + 0,008X_1^2 + 5,0X_2 - 0,03X_2^2 - 41,46X_3 - 13,82X_3^2 + 10,56X_5 + 0,37X_5^2 - 129,01X_7 - 1243,65X_7^2 + 11,28X_8 - 0,3X_8^2 - 2,49X_9 - 0,006X_9^2 - 0,08X_1X_2 + 2,82X_1X_3 - 0,71X_2X_3 - 1,2X_1X_5 + 0,2X_2X_5 - 0,08X_3X_5 + 4,0X_1X_7 - 1,35X_2X_7 + 193,3X_3X_7 - 10,54X_5X_7 - 0,12X_1X_8 + 0,18X_2X_8 + 1,59X_3X_8 - 2,24X_5X_8 + 11,28X_7X_8 + 0,03X_1X_9 - 0,01X_2X_9 - 0,27X_3X_9 + 0,07X_5X_9 - 0,56X_7X_9 + 0,07X_8X_9,$$

где  $X_1$  – нижний предел по НЦП до т/о, мкм;  $X_2$  – номинальный диаметр кольца, мм;  $X_3$  – тип заготовки (техпроцесса);  $X_4$  – температура закалочного масла, °C;  $X_5$  – нежесткость кольца;  $X_6$  – кинематическая вязкость масла, мм<sup>2</sup>/сек;  $X_7$  – кислотное число закалочного масла;  $X_8$  – исходная структура заготовки (по

показаниям неразрушающего контроля), мА;  $X_9$  – верхний предел по НЦП до т/о.

Таким образом, в ходе проведенных исследований были получены уравнения регрессии, позволяющие установить связи между изменениями геометрических параметров колец подшипника после термической обработки и влияющими на их изменение входными факторами для оптимизации технологического процесса производства подшипников.

Так, например, для стабилизации процесса образования тепловых деформаций особое внимание следует обратить на качество закалочной среды (кинematicкая вязкость масла, наличие примесей и т. д.), исходную структуру заготовки. При выборе заготовки кольца подшипника, особенно если к нему предъявляются высокие требования, выбор следует делать в пользу заготовки, прошедшей кузнечную обработку (штамповку). Качество масла в закалочном баке необходимо жестко контролировать и поддерживать его состояние в пределах требований, установленных ТУ 38.101135-88, или иных регламентирующих документов.

Полученные модели позволяют прогнозировать изменение геометрии колец при термической обработке в зависимости от конструктивных параметров кольца (толщина стенки, наличие канавок под уплотнение, нежесткость и т. п.). Поэтому их можно использовать при назначении припусков на механическую обработку в зависимости от типоразмера кольца.

**Выводы.** Исследование и моделирование процессов образования температурных (тепловых) деформаций при производстве подшипников актуально при разработке и оптимизации технологических процессов термической обработки.

Возможность прогнозирования изменения геометрии колец при наличии большого количества факторов, влияющих на процесс образования температурных (тепловых) деформаций, заслуживает особого внимания в инженерной практике.

## Литература

1. Субботина, Ю. М. Технологические особенности агрегатов непрерывного горячего цинкования стальной полосы / Ю. М. Субботина, Л. В. Родионова // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. – 2016. – Т.16. – № 1. – С. 112–119.
2. Бормосов, Н. А. Экспериментальные исследования тепловых деформаций при термической обработке колец подшипников / Н. А. Бормосов // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин приборов и оборудования: материалы XII междунар. научн.-техн. конф. – Вологда : ВоГУ, 2017. – С. 44–48.

**N.A. Bormosov, Y.R. Osipov, D.V. Martynenko**  
Vologda State University

**MODELING OF HEAT-INDUCED DEFORMATIONS FORMATION PROCESS IN PRODUCTION OF  
BEARINGS FOR METALLURGICAL EQUIPMENT**

The article presents the results of the analysis of the factors affecting the change in bearing rings size; a cluster, dispersion, correlation and regression analysis of the research results is performed in order to identify the most significant factors. Based on the results of the experimental data processing, mathematical models which make it possible to predict a change in the geometry of the rings during heat treatment depending on the design parameters of the ring (wall thickness, the presence of grooves for sealing, non-rigidity, etc.) have been obtained.

Bearing production, heat treatment, heat-induced deformations, mathematical model, exploitation properties of the components.



## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСОВ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье представлено решение задачи оценки резонанса сил в технических системах. На основании общеизвестных математических зависимостей представлена математическая модель резонанса сил и скоростей. Приведены примеры расчета и даны рекомендации по использованию модели в методиках расчета.

Резонанс сил, скоростей, параллельное соединение, последовательное, источник силы, скорости.

Учет механических резонансных явлений в технических системах является актуальной задачей [1]. При этом резонанс может быть как вредным [2], так и полезным. Исходя из этого, разработчики машин и механизмов стремятся, соответственно, либо не допустить его развития [3], либо наоборот – создать для него необходимые условия [4]. Крайне негативным проявлением резонанса является разрушение механических конструкций и вывод машин из строя. Полезное действие резонанса заключается в существенном увеличении амплитуды перемещений рабочих органов механизмов и возрастании их силового воздействия [5].

В основе описания резонанса лежит широко известное дифференциальное уравнение

$$a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = a_\omega \sin \omega t, \quad (1)$$

которое имеет решение  $x = x_1 + x_2$ , где

$$x_1 = a e^{-bt} \sin(\omega_1 t + \alpha) \quad (2)$$

– собственные затухающие колебания,

$$x_2 = A \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

– вынужденные колебания,  $a$ ,  $\alpha$  – постоянные интегрирования,

$$b = \frac{a_1}{2a_2}, \quad \omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - b^2}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}, \quad A = \frac{\delta_0}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 4h^2\lambda^2}}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2h\lambda}{1 - \lambda^2}, \quad \lambda = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad h = \frac{b}{\omega_0}, \quad \delta_0 = \frac{a_\omega}{a_0}. \quad (5)$$

При подстановках

$$a_2 = m, \quad a_1 = r, \quad a_0 = k, \quad a_\omega = F \quad (6)$$

уравнение (1) превращается в классическое дифференциальное уравнение вынужденных механических колебаний [6]

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F \sin \omega t \quad \text{или} \quad m \frac{dv}{dt} + rv + k \int v dt = F \sin \omega t. \quad (7)$$

При

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

имеет место резонанс.

Теоретическая электротехника, объекты и процессы которой математически изоморфны механическим [7], различает два резонанса – резонанс напряжений и резонанс токов.

В 1873 г. Максвелл ввел первую (из двух) систему электро-механических аналогий, в соответствии с которой напряжение дуально силе, а ток – скорости. В этой связи возникает закономерный вопрос: резонанс применительно к уравнению (7) это резонанс сил или скоростей? Ответы на этот и связанные с ним вопросы составляют предмет настоящего исследования.

Резонанс сил – это резонанс, возникающий на частоте (8) в механической системе, включающей инертное тело и упругий элемент, при котором развиваемые ими реактивные силы максимальны и противоположны.

Резонанс скоростей – это резонанс, возникающий на частоте (8) в механической системе, включающей инертное тело и упругий элемент, при котором развиваемые ими скорости максимальны и противоположны.

Резонанс сил. Уравнению (7) соответствует схема параллельного соединения (рис. 1), при котором инертное тело и изменения размеров упругого элемента и демпфера имеют единую скорость, а их реактивные силы складываются. При этом сумма реактивных сил потребителей механической мощности равна силе, развиваемой источником механической мощности, который подобно источнику напряжения в электротехнике можно назвать источником силы.

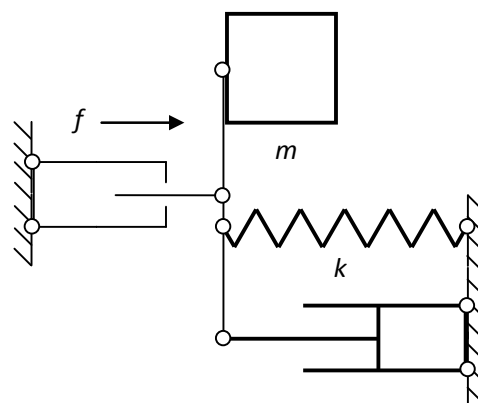


Рис. 1. Параллельное соединение

При выполнении условия (8) в механической системе, состоящей из параллельно соединенных инертного тела, упругого элемента и демпфера, что соответствует уравнению (7), возникает резонанс сил.

Действительно, в соответствии с (4)–(6)

$$A = \frac{F}{k} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{k}\right)^2 + 4 \frac{r^2 m}{4m^2 k} \frac{m\omega^2}{k}}} = \frac{F}{k} \frac{1}{\omega/k \sqrt{(k/\omega - m\omega)^2 + r^2}} =$$

$$= \frac{F}{\omega \sqrt{(k/\omega - m\omega)^2 + r^2}}.$$

В установившемся режиме

$$x = A \sin(\omega t - \varphi) = \frac{F}{\omega \sqrt{(k/\omega - m\omega)^2 + r^2}} \sin(\omega t - \varphi).$$

$$f_k = kx = \frac{kF}{\omega \sqrt{(k/\omega - m\omega)^2 + r^2}} \sin(\omega t - \varphi). \quad (9)$$

$$f_m = m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{m\omega^2 F}{\omega \sqrt{(k/\omega - m\omega)^2 + r^2}} \sin(\omega t - \varphi). \quad (10)$$

При выполнении условия (8)

$$f_k^* = \frac{kF}{\sqrt{k/m} \sqrt{(k/\sqrt{k/m} - m\sqrt{k/m})^2 + r^2}} \sin(\omega t - \varphi) = \frac{\sqrt{mk}F}{r} \sin(\omega t - \varphi) = \quad (11)$$

$$= \frac{\sqrt{k/m} \sqrt{mk} F}{\omega r} \sin(\omega t - \varphi) = \frac{kF}{\omega r} \sin(\omega t - \varphi). \quad (12)$$

$$f_m^* = -\frac{m\sqrt{k/m} F}{\sqrt{(k/\sqrt{k/m} - m\sqrt{k/m})^2 + r^2}} \sin(\omega t - \varphi) = -\frac{\sqrt{mk} F}{r} \sin(\omega t - \varphi) = \quad (13)$$

$$= -\frac{\omega \sqrt{mk} F}{\sqrt{k/mr}} \sin(\omega t - \varphi) = -\frac{\omega m F}{r} \sin(\omega t - \varphi). \quad (14)$$

Выражения (11) и (13) показывают, что  $f_k^*$  и  $f_m^*$  равны и противоположны. (9) и (12), (10) и (14) показывают, что  $f_k^*$  и  $f_m^*$  максимальны. Следовательно, имеет место резонанс сил.

В связи с этим в первую (максвелловскую) систему электро-механических аналогий необходимо добавить следующее дуально-инверсное соответствие: последовательное соединение потребителей электрической мощности при резонансе напряжений дуально параллельному соединению потребителей механической мощности при резонансе сил.

При резонансе сил реактивная сила системы «упругий элемент – инертное тело» равна нулю, поскольку  $f_k^* = -f_m^*$ .

Величину  $\sqrt{mk}$  по аналогии с электротехникой можно назвать *волновым сопротивлением* (системы).

Если  $\sqrt{mk} > r$ , то реактивные силы, развиваемые инертным телом и упругим элементом, превышают приложенную силу.

**Пример 1.**  $F = 100 \text{ Н}$ ,  $\omega = 2 \text{ рад/с}$ ,  $m = 10 \text{ кг}$ ,  $k = 40 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-2}$ ,  $r = 5 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ . Найти  $f_k^*$  и  $f_m^*$ .

В соответствии с (12) и (14)

$$f_k^* = \frac{40 \cdot 100}{2 \cdot 5} \sin(\omega t - \varphi) = 400 \sin(\omega t - \varphi) \text{ (Н)},$$

$$f_m^* = -\frac{2 \cdot 10 \cdot 100}{5} \sin(\omega t - \varphi) = -400 \sin(\omega t - \varphi) \text{ (Н)}.$$

Реактивные силы, развиваемые инертным телом и упругим элементом, превышают приложенную силу.

Последовательное соединение. Инертное тело, упругий элемент и демпфер можно соединять не только параллельно, но и последовательно (рис. 2).

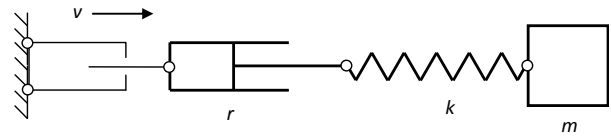


Рис. 2. Последовательное соединение

При последовательном соединении к элементам системы приложена единая сила, а скорости инертного тела и изменения размеров упругого элемента и демпфера складываются. При этом сумма скоростей потребителей механической мощности равна скорости, развиваемой источником механической мощности, который подобно источнику тока в электротехнике можно назвать источником скорости.

Скорости компонентов системы равны

$$v_m = \frac{1}{m} \int f dt, \quad v_k = -\frac{1}{k} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{k} \frac{df}{dt}, \quad v_r = \frac{f}{r}, \quad v = -V \cos \omega t$$

$$v_m + v_k + v_r = v,$$

$$\frac{1}{k} \frac{df}{dt} + \frac{f}{r} + \frac{1}{m} \int f dt = -V \cos \omega t \quad \text{или} \quad \frac{1}{k} \frac{d^2 f}{dt^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dt} + \frac{1}{m} f = V \omega \sin \omega t. \quad (15)$$

Последнее уравнение изоморфно (1). Собственные затухающие колебания силы на штоке источника скорости для последовательного соединения в соответствии с (2) определяются выражением

$$f_1 = ae^{-bt} \sin(\omega_1 t + \alpha) = ae^{-\frac{k}{2r}t} \sin \left( \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{k^2}{4r^2}} t + \alpha \right).$$

Вынужденные колебания силы на штоке источника скорости для последовательного соединения в соответствии с (3) определяются выражениями

$$A = \frac{\delta_0}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 4h^2\lambda^2}} = \frac{V\omega m}{\sqrt{\left(1 - \omega^2 \frac{m}{k}\right)^2 + 4 \frac{k^2}{4r^2} \frac{m}{k} \frac{m}{k}}} = \frac{V\omega m}{\omega m \sqrt{\left(\frac{1}{\omega m} - \frac{\omega}{k}\right)^2 + \frac{1}{r^2}}},$$

$$\text{tg} \varphi = \frac{2h\lambda}{1 - \lambda^2} = 2 \frac{k}{2r} \frac{\omega m}{k} \frac{1}{1 - \omega^2 m/k} = \frac{\omega m}{r \omega m (1/\omega m - \omega/k)},$$

$$f_2 = A \sin(\omega t - \varphi) = \frac{V}{\sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + 1/r^2}} \sin \left[ \omega t - \arctg \frac{1}{r(1/\omega m - \omega/k)} \right].$$

Резонанс скоростей. При выполнении условия (8) в механической системе, состоящей из последовательно соединенных инертного тела, упругого элемента и демпфера, что соответствует уравнению (15), возникает резонанс скоростей.

Действительно, в установившемся режиме

$$f = \frac{V}{\sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + 1/r^2}} \sin(\omega t - \varphi).$$

$$v_m = \frac{1}{m} \int f dt = -\frac{1}{\omega m} \frac{V}{\sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + 1/r^2}} \cos(\omega t - \varphi). \quad (16)$$

$$v_k = \frac{1}{k} \frac{df}{dt} = \frac{\omega}{k} \frac{V}{\sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + 1/r^2}} \cos(\omega t - \varphi). \quad (17)$$



При выполнении условия (8)

$$v_m^* = -\frac{1}{\sqrt{k/mm}} \frac{V}{\sqrt{\left[1/(\sqrt{k/mm}) - \sqrt{k/m}/k\right]^2 + 1/r^2}} \cos(\omega t - \varphi) =$$

$$= -\frac{Vr}{\sqrt{mk}} \cos(\omega t - \varphi) = \quad (18)$$

$$= -\frac{\sqrt{k/m} Vr}{\omega \sqrt{mk}} \cos(\omega t - \varphi) = -\frac{Vr}{\omega m} \cos(\omega t - \varphi). \quad (19)$$

$$v_k^* = \frac{\sqrt{k/m}}{k} \frac{V}{\sqrt{\left[1/(\sqrt{k/mm}) - \sqrt{k/m}/k\right]^2 + 1/r^2}} \cos(\omega t - \varphi) =$$

$$= \frac{Vr}{\sqrt{mk}} \cos(\omega t - \varphi) = \quad (20)$$

$$= \frac{\omega Vr}{\sqrt{k/m} \sqrt{mk}} \cos(\omega t - \varphi) = \frac{\omega Vr}{k} \cos(\omega t - \varphi). \quad (21)$$

Выражения (18) и (20) показывают, что  $v_k^*$  и  $v_m^*$  равны и противоположны. (16) и (19), (17) и (21) показывают, что  $v_k^*$  и  $v_m^*$  максимальны. Следовательно, имеет место резонанс скоростей.

В связи с этим в первую (максвелловскую) систему электро-механических аналогий необходимо добавить следующее дуально-инверсное соответствие: параллельное соединение потребителей электрической мощности при резонансе токов дуально последовательному соединению потребителей механической мощности при резонансе скоростей.

При резонансе скоростей точка приложения силы к системе «упругий элемент – инертное тело» неподвижна, поскольку

$$v_k^* = -v_m^*. \quad (22)$$

Если  $\sqrt{mk} < r$ , то скорости, развиваемые инертным телом и упругим элементом, превышают скорость штока источника воздействия.

**Пример 2.**  $V = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $r = 80 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ , остальные данные из примера 1. Найти  $v_k^*$  и  $v_m^*$ .

В соответствии с (19) и (21)

$$v_m^* = -\frac{10 \cdot 80}{2 \cdot 10} \cos(\omega t - \varphi) = -40 \cos(\omega t - \varphi) (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$v_k^* = \frac{2 \cdot 10 \cdot 80}{40} \cos(\omega t - \varphi) = 40 \cos(\omega t - \varphi) (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}).$$

Скорости, развиваемые инертным телом и упругим элементом, превышают скорость штока источника воздействия.

**Артефакты.** Существуют устройства, в удовлетворительном приближении способные выполнять функции источников силы и источников скорости. Источником гармонической скорости может выступать привод с кривошипно-кулисным механизмом и маховиком с большим моментом инерции. Источником гармонической силы может выступать шток пневмоцилиндра, полость которого сообщается с полостью другого пневмоцилиндра, диаметр которого неизмеримо выше, чем у первого, а поршень совершает гармонические колебания [8].

В [9] описана механическая система из двух инертных тел и двух упругих элементов, для которой обнаружено «удивительное явление», при котором

точка приложения гармонической силы остается неподвижной. Это явление, казалось бы, очевидным образом названо антирезонансом. Степень неудачности этого термина можно оценить, применив его к резонансу токов в электротехнике.

В действительности упомянутая система представляет собой суперпозицию «элементарных» систем, рассмотренных выше. По этой причине процессы, происходящие в ней, являются суперпозицией соответствующих процессов, одним из которых и был резонанс скоростей, ошибочно принятый за «антирезонанс». При этом неподвижность точки приложения гармонической силы («удивительное явление») соответствует следствию (22).

**Заключение.** Описываемый в курсах теоретической механики механический резонанс является резонансом сил. Ему соответствует параллельное соединение инертного тела, упругого элемента и демпфера. При последовательном соединении этих элементов возникает резонанс скоростей.

Существование двух механических резонансов естественным образом соответствует аналогиям между электрическими и механическими явлениями и объектами. Механическому резонансу сил соответствует резонанс напряжений в электротехнике, а резонансу скоростей – резонанс токов. Подобно тому, как оба электрических резонанса примерно в равной мере встречаются в электротехнике, отдать приоритет какому-либо из двух механических резонансов также затруднительно.

При резонансе сил реактивные силы, развиваемые инертным телом и упругим элементом, могут значительно превышать приложенную силу. В то же время реактивные силы нейтрализуют друг друга, что может быть использовано в вибротехнике, в частности, в решетных сортировальных машинах для обеспечения равномерной нагрузки на привод [10].

При резонансе скоростей скорости, развиваемые инертным телом и упругим элементом, могут значительно превышать скорость штока источника воздействия. При этом точка приложения силы к системе «упругий элемент – инертное тело» неподвижна, что используется для разработки гасителей колебаний.

Предлагаемые модели могут быть полезными для теоретических исследованиях колебательных процессов, а также при разработке методик оценки резонанса в технических системах.

## Литература

1. Energy efficiency assessment of sieve separation gear kinematic diagram / I. P. Popov, V. G. Chumakov, S. S. Rodionov, L. Ja. Chumakova, S. I. Rodionova // British journal of innovation in science and technology. – 2017. – Vol. 2, № 3. – P. 5–11.
2. Попов, И. П. Самобалансировка вибрационных механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2018. – № 2 (2). – С. 16–19.
3. Пат. 2601891 RU, МПК6 F 16 F 15/24. Устройство для уравнивания инерционных сил / И. П. Попов, В. Г. Чумаков, М. В. Давыдова, Д. П. Попов, С. Ю. Кубарева (Россия). – № 2015100567/11; заявл. 12.01.2015; опубл. 10.11.2016, бюл. № 31.

4. Popov, I. P. Synthesis inert-inertial oscillator / I. P. Popov // *Applied mathematics and control sciences*. – 2017. – № 1. – P. 7–13.
5. Попов, И. П. Искусственные масса и упругость / И. П. Попов // *Вестник Тверского государственного технического университета*. – 2016. – № 1 (29). – С. 7–11.
6. Попов, И. П. Спонтанные упруго-емкостные колебания в системах автоматики / И. П. Попов // *Вестник Морского государственного университета им. адмирала Г. И. Невельского. Серия: Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии*. – 2017. – Вып. 78. – С. 93–96.
7. Попов, И. П. Комплексная мощность механических колебательных процессов / И. П. Попов // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. – 2016. – № 1. – С. 32–36.
8. Popov, I. P. Modeling tree-inert oscillator / I. P. Popov // *Applied mathematics and control sciences*. – 2018. – № 4. – P. 73–79.
9. Пановко, Я. Г. Устойчивость и колебания упругих систем. Современные концепции, парадоксы и ошибки / Я. Г. Пановко, И. И. Губанова. – Москва: Наука, 1987. – 352 с.
10. Попов, И. П. Моделирование биинертного осциллятора / И. П. Попов // *Приложение математики в экономических и технических исследованиях: сб. науч. тр. / под общ. ред. В. С. Мхитаряна*. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2017. – С. 188–192.

*I.P. Popov*  
*Kurgan State University*

### RESEARCH OF RESONANCES IN TECHNICAL SYSTEMS

The article presents a solution to the problem of estimating the resonance of forces in technical systems. On the basis of well-known mathematical relationships, a mathematical model of the resonance of forces and velocities is presented. Examples of calculation are given and recommendations are given on the use of the model in calculation methods.

Resonance of forces, velocities, parallel connection, series, source of force, speed.



### СГЛАЖИВАНИЕ НАГРУЗКИ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА

Рассматривается возможность оснащения маневрового тепловоза инертно-емкостным накопителем энергии, что позволит сгладить нагрузку на силовую установку и за счет этого снизить ее мощность и массогабариты. Относительно частая смена режима работы маневрового тепловоза обуславливает эффективность и целесообразность оснащения его накопителем энергии. Помимо сглаживания нагрузки на силовую установку накопитель позволит рекуперировать энергию при торможении, за счет чего возрастет энергоэффективность маневрового тепловоза. Представлены теоретические предпосылки создания инертно-емкостного накопителя энергии, который технически выполнен в виде машины постоянного тока с супермаховиком.

Маневровый тепловоз, накопитель, супермаховик, силовая установка, энергоэффективность.

Мощность силовой установки маневрового тепловоза определяется его пиковой нагрузкой, которой в первую очередь является трогание поезда с места. Очевидно, что большую часть времени силовая установка работает в недогруженном режиме. Использование накопителя энергии позволит сгладить нагрузку на силовую установку и за счет этого снизить ее мощность и массогабариты. Относительно частая смена режима работы маневрового тепловоза обуславливает эффективность и целесообразность оснащения его накопителем энергии.

Помимо сглаживания нагрузки на силовую установку накопитель позволит рекуперировать энергию при торможении, за счет чего возрастет энергоэффективность маневрового тепловоза.

**Теоретические предпосылки создания инертно-емкостного накопителя энергии.** В качестве такого накопителя можно рассматривать машину постоянного тока с супермаховиком.

Подача на якорную обмотку постоянного напряжения  $U$  инициирует следующие механический [1–6] и электрический [7–10] процессы:

$$\begin{cases} J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k \frac{d\varphi}{dt} = B l w \frac{D}{2} i, \\ B l w \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt} + R i = U \end{cases}$$

где  $J$  – суммарный момент инерции;  $k$  – коэффициент трения;  $B$  – магнитная индукция;  $2l$  – активная длина проводника;  $w$  – количество витков;  $D$  – эффективный диаметр ротора;  $R$  – электрическое сопротивление.

Можно ввести параметрический коэффициент

$$B l w D = Y. \quad (1)$$

Пусть начальные условия

$$\begin{aligned} \varphi(0) &= \varphi_0, \\ \frac{d\varphi}{dt}(0) &= \omega_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Из уравнения электрического равновесия следует

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= -\frac{R}{Y} i + \frac{U}{Y}, \\ \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= -\frac{R}{Y} \frac{di}{dt}. \end{aligned} \quad (3)$$

Подстановка в первое уравнение системы дает

$$\begin{aligned} -\frac{JR}{Y} \frac{di}{dt} - \frac{kR}{Y} i + \frac{kU}{Y} &= Y i, \\ \frac{di}{dt} + \left( \frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J} \right) i &= \frac{kU}{JR}. \end{aligned}$$

Пусть

$$\begin{aligned} \frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J} &= A, \\ \frac{kU}{JR} &= B. \end{aligned}$$

Тогда

$$\frac{di}{dt} + A i = B. \quad (4)$$

Общим решением является

$$i_1 = C_1 e^{-At}.$$

Частным –

$$i_2 = C_2.$$

Подстановка его в формулу (4) дает

$$\begin{aligned} 0 + A C_2 &= B, \\ C_2 &= \frac{B}{A}. \end{aligned}$$

Искомый ток равен

$$i = i_1 + i_2 = C_1 e^{-At} + \frac{B}{A}. \quad (5)$$

С учетом (2) и (3)

$$i(0) = \frac{U}{R} - \frac{Y \omega_0}{R}.$$

С учетом (5)

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{U}{R} - \frac{Y \omega_0}{R} - \frac{B}{A}, \\ i &= \left( \frac{U}{R} - \frac{Y \omega_0}{R} - \frac{B}{A} \right) e^{-At} + \frac{B}{A}. \end{aligned}$$

$$i = \left( \frac{U - Y\omega_0}{R} - \frac{U}{Y^2/k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{Y^2/k + R} =$$

$$= \left( \frac{U - E_0}{R} - \frac{U}{R_k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{R_k + R}, \quad (6)$$

где  $E_0 = Y\omega_0$ .

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{J/k} =$$

$$= \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{(J/Y^2)(Y^2/k)} =$$

$$= \frac{1}{RC_J} + \frac{1}{R_k C_J} = \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_m}. \quad (7)$$

При  $k = 0$   $R_k = \infty$  и

$$i = \frac{U - E_0}{R} e^{-t/\tau}, \quad (8)$$

$$\tau = \frac{RJ}{Y^2} = RC_J. \quad (9)$$

Формулы (8) и (9) неотличимы от формул, описывающих заряд конденсатора.

При замыкании накоротко клемм якорной обмотки

$$i = \frac{-E_0}{R} e^{-t/\tau}.$$

Эта формула неотличима от формулы, описывающей разряд конденсатора.

Выражения (6)–(9) свидетельствуют о емкостном характере рассматриваемого накопителя мощности.

Емкость накопителя равна

$$C_J = \frac{J}{Y^2}.$$

Электромеханическое сопротивление

$$R_k = \frac{Y^2}{k}.$$

Запасаемая накопителем энергия равна

$$W = \frac{C_J U^2}{2} = \frac{JU^2}{2Y^2} = \frac{J\omega^2}{2}.$$

На рис. 1 изображена электрическая схема инертно-емкостного накопителя, на рис. 2 – характер тока при его зарядке и разрядке.

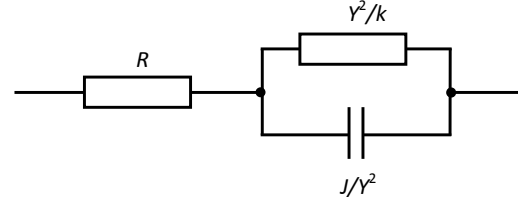


Рис. 1. Электрическая схема инертно-емкостного накопителя

**Закключение.** В настоящее время созданы высокоэффективные супермаховики, и даже рассматривается возможность применения их на автомобилях. Очевидно, что использование маховиков на маневровых тепловозах значительно менее проблематично в силу существенно менее жестких требований к общему весу. Еще более выгодным преимуществом тепловоза является наличие электромеханической трансмиссии, что минимизирует разработку для него рассмотренного инертно-емкостного накопителя.

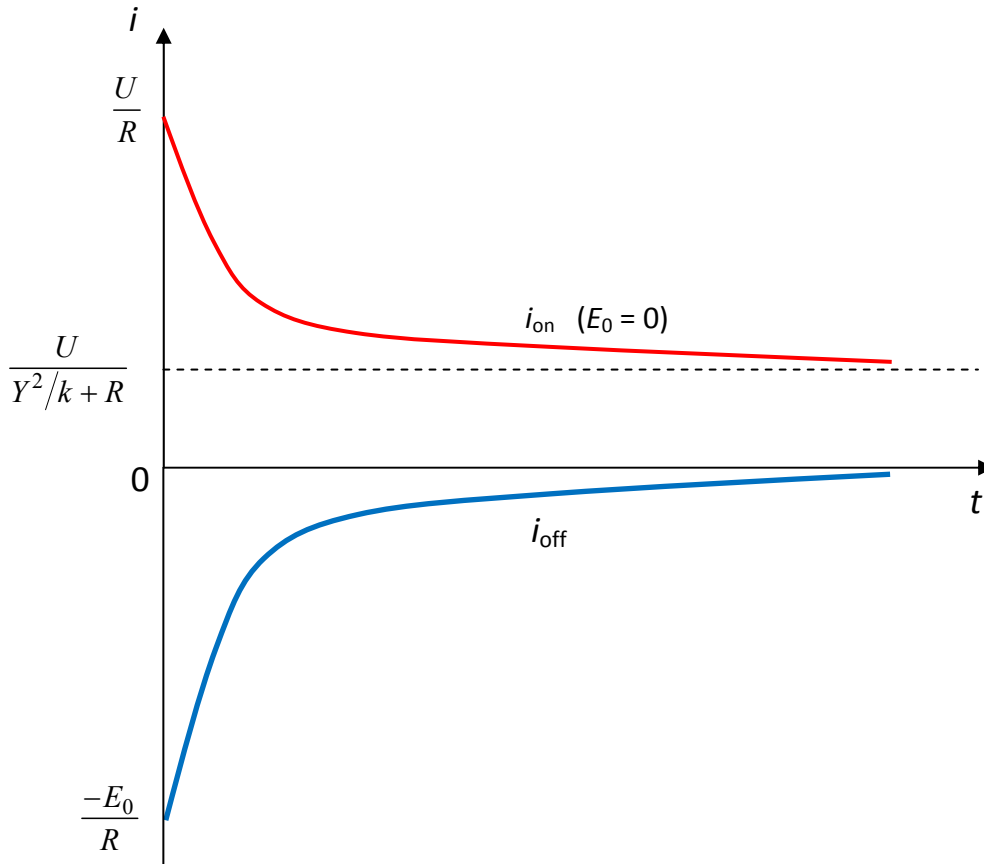


Рис. 2. Характер тока при зарядке и разрядке инертно-емкостного накопителя

#### Литература

1. Попов, И. П. Самобалансировка вибрационных механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2018. – № 2 (2). – С. 16–19.
2. Popov, I. P. Synthesis inert-inertial oscillator / I. P. Popov // Applied mathematics and control sciences. – 2017. – № 1. – P. 7–13.
3. Popov, I. P. Modeling tree-inert oscillator / I. P. Popov // Applied mathematics and control sciences. – 2018. – № 4. – P. 73–79.
4. Попов, И. П. Моделирование биинертного осциллятора / И. П. Попов // Приложение математики в экономических и технических исследованиях: сб. науч. тр. / под общ. ред. В. С. Мхитаряна. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2017. – С. 188–192.
5. Попов, И. П. Искусственные масса и упругость / И. П. Попов // Вестник Тверского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (29). – С. 7–11.
6. Energy efficiency assessment of sieve separation gear kinematic diagram / I. P. Popov, V. G. Chumakov, S. S. Rodionov, L. Ja. Chumakova, S. I. Rodionova // British journal of innovation in science and technology. – 2017. – Vol. 2, № 3. – P. 5–11.
7. Попов, И. П. Спонтанные упруго-емкостные колебания в системах автоматики / И. П. Попов // Вестник Морского государственного университета им. адмирала Г. И. Невельского. Серия: Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – 2017. – Вып. 78. – С. 93–96.
8. Попов, И. П. Комбинированные векторы и магнитный заряд / И. П. Попов // Прикладная физика и математика. – 2018. – № 6. – С. 12–20.
9. Попов, И. П. Емкостно-инертное устройство / И. П. Попов // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». – 2015. – Т. 2. – С. 43–45.
10. Попов, И. П. Четыре теоремы для синхронных машин с реактивной нагрузкой / И. П. Попов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия: Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28. – С. 169–178.

**I.P. Popov**  
Kurgan State University

#### LOAD LEVELING OF DIESEL SHUNTING LOCOMOTIVE

The possibility of equipping a shunting diesel locomotive with an inert-capacitive energy storage device is being considered; it will allow to level load on the power plant and thereby to reduce its power and mass and dimensions. The relatively frequent change in the operating mode of a shunting locomotive determines the efficiency and feasibility of equipping it with an energy storage device. In addition to leveling of the load on the power plant, the drive will allow energy to be recovered during braking, thereby increasing the energy efficiency of the diesel locomotive. The theoretical background for creating an inert-capacitive energy storage device, which is technically designed as a DC machine with a super flywheel, is presented.

Shunting diesel locomotive, drive, super-flywheel, power plant, energy efficiency..



## АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА С ЖЕЛЕЗО-МОЛИБДЕНОВОЙ СВЯЗКОЙ

Металлографический, рентгеноструктурный, фрактографический виды анализов позволили установить различия в структурах сплавов на основе карбида титана с железной и железо-молибденовой связками. В сплаве 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe обнаружено сильное легирование феррита и образование интерметаллида, с которыми связывается упрочнение связки и сплава в целом.

Карбид титана, феррит, интерметаллид, легирование, железная связка, микрорельеф, сплав, микроструктура.

У твёрдых сплавов на основе карбида титана с железо-молибденовой связкой нами экспериментально установлен [1] высокий уровень механических свойств (табл.), который позволяет рекомендовать сплавы 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe – 80%TiC, 5%Mo, 15%Fe для промышленного использования в качестве износостойких материалов как альтернативу другим твёрдым сплавам и износостойким сталям.

Положительное влияние молибдена на свойства твёрдых сплавов на основе карбида титана с никель-молибденовой связкой отмечено во многих работах отечественных и зарубежных авторов.

Для объяснения повышения основных механических свойств (прочности при изгибе, твёрдости, износа абразивом) за счёт легирования молибденом нами проведён комплексный сравнительный анализ структуры экспериментальных твёрдых сплавов TiC-Fe-Mo и TiC-Fe [2].

Для анализа микроструктуры использовались: металлографический микроскоп «Neophot-2» (Германия) и электронный микроскоп «JSM-35» (Япония). Рентгеноструктурный фазовый анализ выполнен на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-3». Фрактографи-

ческий анализ поверхностей разрушения и износа производился на электронном микроскопе «JSM-35».

Металлографический анализ показал сходство микроструктур сплавов 70%TiC, 30%Fe и 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe (рис. 1).

В микроструктурах наблюдаются округлые зёрна карбида, частично объединённые (слившиеся) в агрегаты, в большей степени – в сплаве с молибденом. Сплошного карбидного каркаса нет. Фрагменты (прослойки) связки довольно равномерно окружают карбидные зёрна, между отдельными агрегатами – увеличены, но по ширине не превышают средний размер карбидного зерна. В сплаве с молибденом средний размер карбидного зерна (3 мкм) меньше, чем в сплаве с железной связкой (5 мкм). Это связано со снижением оптимальной температуры спекания.

Микроструктуры сплавов на основе 80%TiC имеют большое сходство со сплавом на основе 70%TiC

степень агрегатирования зёрен (фактически образование карбидного каркаса в сплаве 80%TiC, 5%Mo, 15%Fe).

Таблица

**Свойства твёрдых сплавов TiC-Mo-Fe**

№ п/п	Состав сплава, % масс.	Оптимальная температура спекания, °C	Пористость, %	Средний размер карбидных зёрен, мкм	Предел прочности при изгибе, МПа	Твёрдость HRA	Износ абразивом, мг
	1	2	3	4	5	6	7
1	70%TiC, 30%Fe	1600	3,4	5	790	86	20,2
2	70%TiC, 2,5%Mo, 27,5%Fe	1550	1,2	3	860	88	16,5
3	70%TiC, 5%Mo, 25%Fe	1550	0,6	3	970	89,5	7,2
4	70%TiC, 10%Mo, 20%Fe	1550	0,8	2,5	880	88,5	8,5
5	80%TiC, 5%Mo, 15%Fe	1600	1,5	3,5	830	91	5,7
6	80%TiC, 20%Fe	1650	4	5	700	88,5	14,5

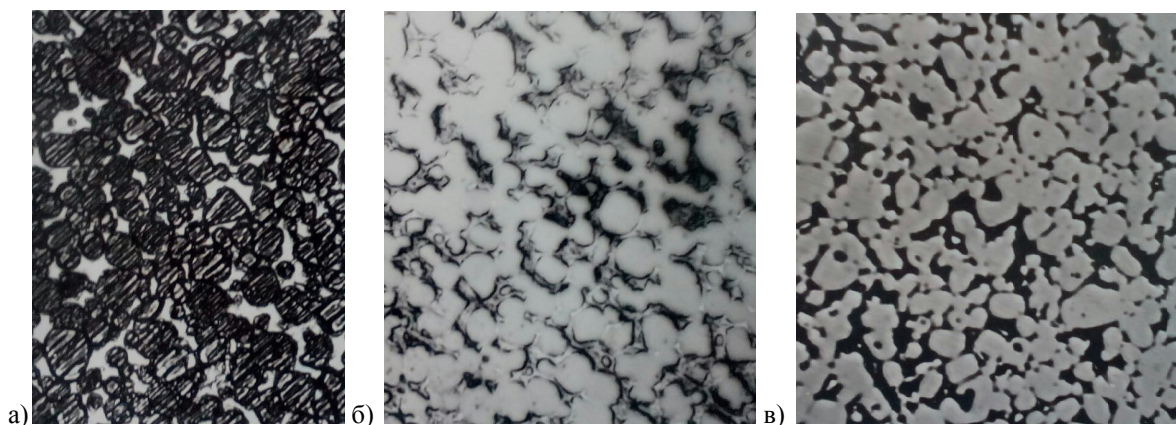


Рис. 1. Микроструктуры сплавов: а) 70%TiC, 30%Fe, травление реактивом Мураками;  
б) 70%TiC, 30%Fe, травление солянокислым хлорным железом;  
в) 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe, травление азотной кислотой

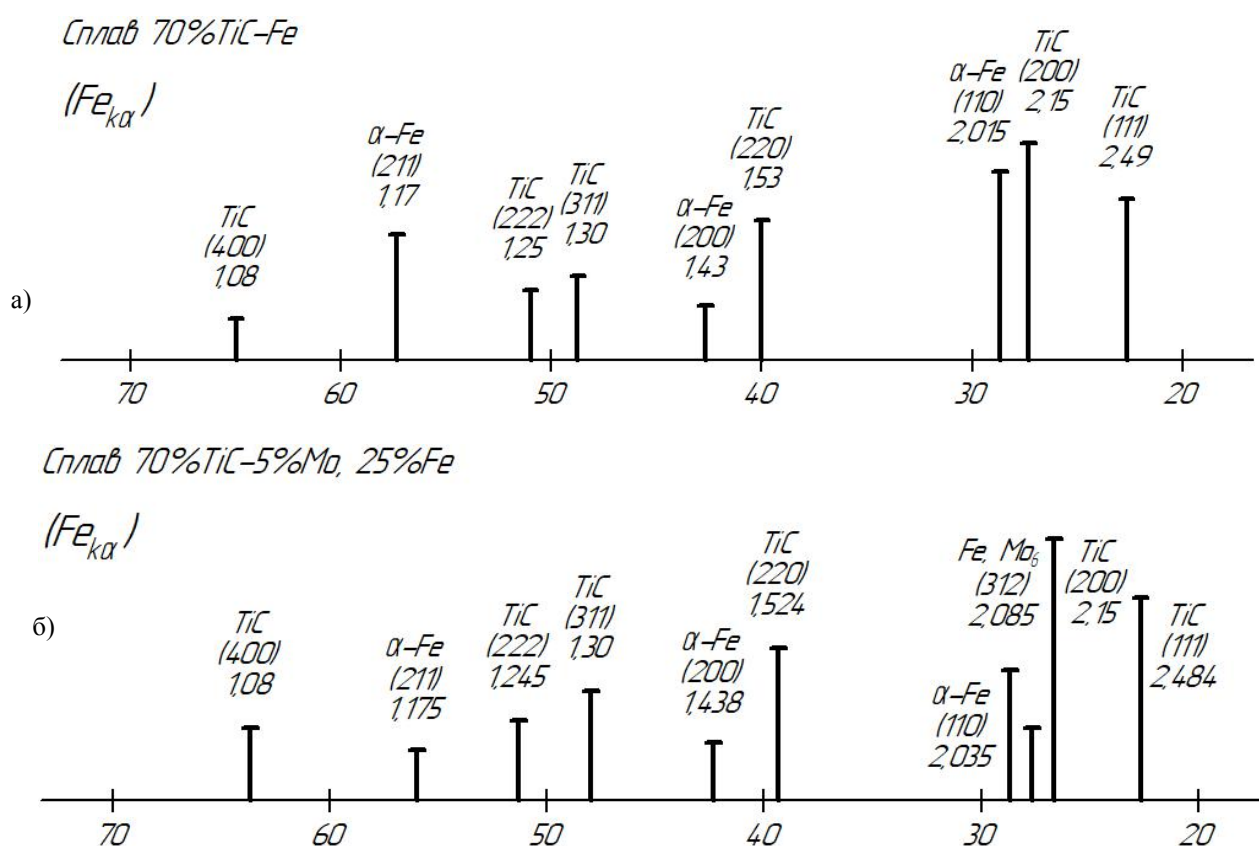


Рис. 2. Рентгенограммы сплавов: а) 70%TiC, 30%Fe,  
б) 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe

Рентгеноструктурный фазовый анализ обнаруживает различия в фазовом составе сплавов 70%TiC, 30%Fe (рис. 2а) и 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe (рис. 2б).

Линии (межплоскостные расстояния) феррита ( $\alpha$ -Fe) сильно смещены у сплава с молибденом в сторону увеличения: у сплава TiC-Fe расстояние (110) составляет 2,015Å, у сплава TiC-Mo-Fe расстояние (110) – 2,035Å. Это свидетельствует о значительном растворении молибдена с атомным радиусом 1,40Å в феррите (атомный радиус железа 1,27Å). В сплаве TiC-Mo-Fe на пределе чувствительности метода (2% в сплаве, 7% в связке) обнаружена линия – межплоскостное

расстояние (321) 2,085 Å – наиболее интенсивная линия интерметаллидного соединения Fe<sub>7</sub>Mo<sub>6</sub>. Это означает, что часть молибдена в сплаве превратилась в соединение, упрочняющее связку. Выделение интерметаллида возможно только из пересыщенного твёрдого раствора (молибдена в  $\alpha$ -железе). Остаточная растворимость молибдена в железе зафиксирована на рентгенограмме. С учётом атомных радиусов металлов (у железа – 1,27Å, у молибдена – 1,40Å) по изменению межплоскостного расстояния (110) феррита с 2,015Å до 2,035Å (на 0,02Å), с учётом расположения атомов молибде-

на в параллельных плоскостях атомов по обе стороны расстояния (110) можно ориентировочно определить содержание молибдена в феррите: 8–10% масс. (рис. 3). Линии карбида титана в сплаве TiC-Mo-Fe немного сдвинуты влево, в сторону уменьшения межплоскостных расстояний: (111) 2,484Å; (220) 1,524Å; (222) 1,245Å. У сплава TiC-Fe соответственно: (111) 2,49Å; (220) 1,53Å; (222) 1,25Å. Это свидетельствует об образовании твёрдого карбидного раствора (Ti,Mo)C на базе кубической кристаллической решётки карбида титана. Уменьшение параметров решётки вызвано меньшим атомным радиусом молибдена (1,40Å) по сравнению с атомным радиусом титана (1,45Å). Примерное распределение молибдена по фазам из 5% в сплаве: 1% – в карбидном твёрдом растворе (Ti,Mo)C, 1% – в интерметаллидах Fe<sub>7</sub>Mo<sub>6</sub>, 3% – в феррите α-Fe(Mo). Рентгенофазовый анализ других сплавов не проводился. Ожидается другое распределение молибдена в сплаве с 10% Mo: 2–4% – в (Ti,Mo)C, 5–6% – Fe<sub>7</sub>Mo<sub>6</sub>, 3–4% – в α-Fe.

Молибден, введённый в сплав на основе карбида титана с железной связкой, заметно меняет вид поверхности разрушения при изгибе (изломе) сплава (рис. 4).

Сплав с молибденом имеет более мелкую фасетку разрушения карбидных зёрен (если привести снимки к одинаковому увеличению). Разрушающая трещина в сплаве с молибденом пересекает почти все карбидные зёрна (что свидетельствует об упрочнении связки и её границ с карбидными зёрнами). В сплаве без молибдена разрушающая трещина значительно чаще проходит по ослаблённым границам зёрен со связкой. Характер разрушения железной связки – чашечный, вязкий, железо-молибденовой связки – преимущественно, хрупкий, что дополнительно подтверждает упрочнение связки (за счёт образования твёрдого раствора и интерметаллидов). Фрактография объясняет повышение прочности при изгибе (на 20%) сплава 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe по сравнению со сплавом 70%TiC, 30%Fe.

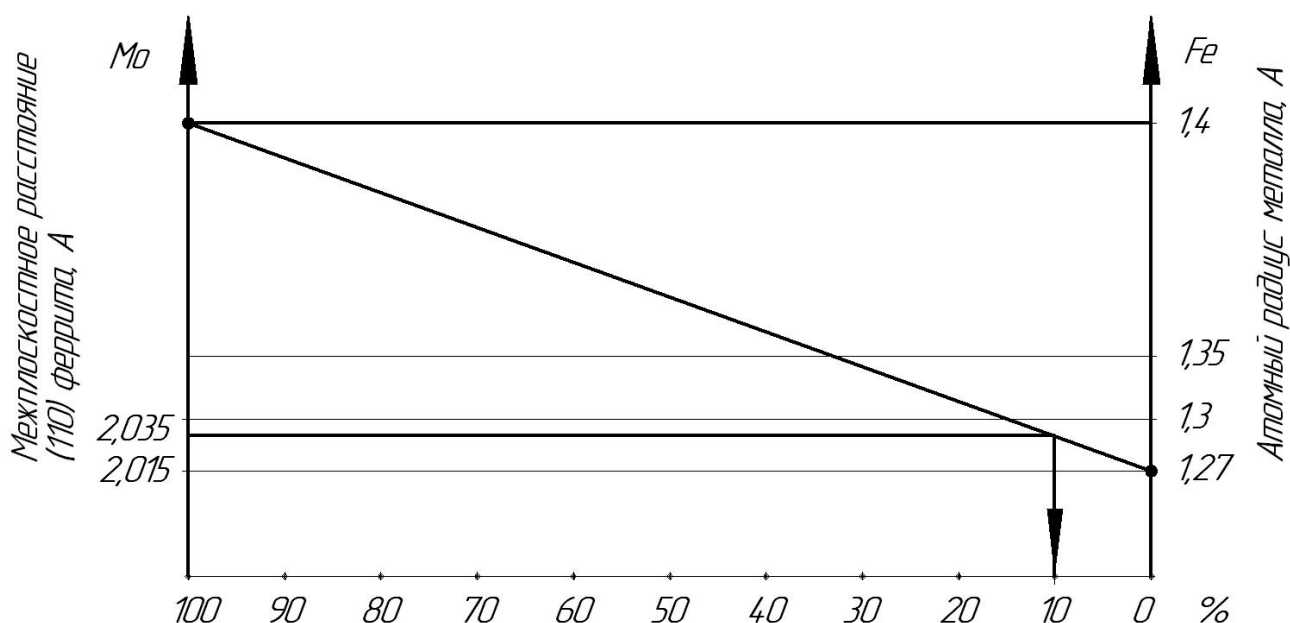


Рис. 3. Содержание молибдена в феррите

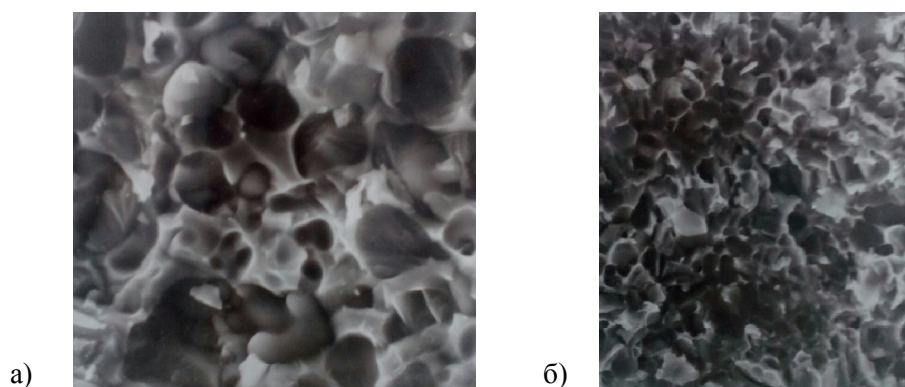


Рис. 4. Микрорельеф излома: а) сплава 70%TiC, 30%Fe x2000, б) сплава 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe, x1000



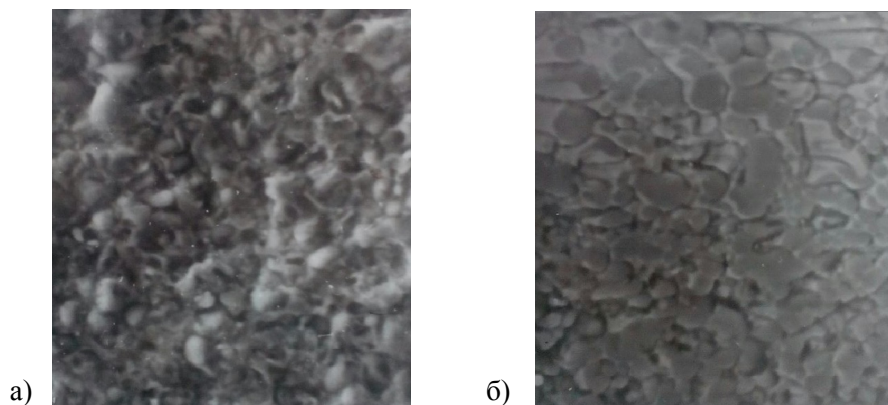


Рис. 5. Микрорельеф изношенных абразивом поверхностей:  
а) сплава 70%TiC, 30%Fe, б) сплава 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe

Наиболее заметны различия поверхностей сплавов с железной и железо-молибденовой связкой после износа абразивом (рис. 5).

На изношенной поверхности сплава 70%TiC, 30%Fe заметны признаки разрушения (выкрашивания) мелких карбидных зёрен из-за их ослабленной связи с железной связкой). Ресурс сплава (высокая микротвёрдость карбида титана) не использован. У сплава с железо-молибденовой связкой карбидные зёрна постепенно изнашиваются более твёрдым электрокорундовым абразивом без выкрашивания. Это означает, что связка прочно удерживает карбидные зёрна до их полного износа и обнажения новых зёрен. Менее твёрдая связка изнашивается быстрее, образуя на микрорельефе углубления между зёрнами. Такое поведение объясняет значительное (в 3 раза) повышение износостойкости сплава 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe по сравнению со сплавом 70%TiC, 30%Fe.

Диаграмма состояния сплавов железо-молибден [3] показывает сильное ферритообразующее влияние молибдена. Уже при 3,3% масс. молибдена в сплавах Fe-Mo (что соответствует 1% масс. в сплавах 70%TiC-Mo-Fe) происходит полное «выклинивание» аустенитной области  $\gamma$ -Fe. При концентрации молибдена 53% масс. образуется стабильная  $\epsilon$ -фаза, которая рентгенографически идентифицируется как интерметаллид  $\text{Fe}_7\text{Mo}_6$ . В пределах концентрации молибдена от 37% при 1400°C до 6,7% масс. при 650°C существует переменная растворимость молибдена в железе, которая означает выделение при охлаждении из перенасыщенного твёрдого раствора  $\alpha$ -Fe(Mo) избыточного молибдена. Выделение молибдена приводит либо к возникновению зон упорядоченного твёрдого раствора с повышенной концентрацией молибдена до состава  $\text{MoFe}_2$  (типа фазы Лавеса), либо при неравновесных условиях (связанных с повышенной скоростью охлаждения или с ликвацией) – к образованию богатой молибденом  $\epsilon$ -фазы (интерметаллида  $\text{Mo}_6\text{Fe}_7$ ).

Фазовый анализ диаграммы состояния Fe-Mo полностью подтверждает наши данные рентгеноструктурного фазового анализа сплава 70%TiC, 5%Mo, 25%Fe, подтверждает факт упрочнения связки по твёрдорастворному и дисперсному механизмам (за счёт легирования молибденом феррита и образования

в связке дисперсных упрочняющих интерметаллидных фаз).

Выводы:

Молибден в составе железо-молибденовой связки в сплавах с TiC-Fe-Mo вызывает существенные изменения в структуре сплавов по сравнению со сплавами TiC-Fe:

1. Обнаружено уменьшение среднего размера карбидного зерна, вызванное снижением оптимальной температуры спекания  $\sim$ на 50°C в связи с уменьшением температуры плавления связки.

2. Значительно уменьшается пористость сплавов (в 3–5 раз) благодаря улучшению взаимодействия связки с карбидом титана, так как молибден при температуре спекания имеет высокую растворимость как в железе, так и в карбиде титана (рис. 2).

3. Происходит повышение прочности межфазовых границ и связки (рис. 4), что приводит к повышению прочности (на 10–25%).

4. Меняется характер износа поверхности сплава (рис. 5), что обеспечивает повышение износостойкости при абразивном изнашивании (в 1,5–3 раза).

5. Структурное состояние связки (сталь ферритного класса с интерметаллидным упрочнением) предположительно является оптимальным для твёрдых сплавов на основе карбида титана со стальной связкой.

#### Литература

1. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твёрдых сплавов на основе карбида титана с железо-молибденовой связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Вестник Вологодского государственного университета. – Вологда: ВГПУ, 2018. – С. 23–27.
2. Третьяков, В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твёрдых сплавов / В. И. Третьяков. – Москва: Металлургия, 1976. – 528 с.
3. Хансен, М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко; пер. с англ. П. К.Новика, М. Б. Гутермана, Л. Б. Вульф, Г. В. Инденбаум. – Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. – 760 с.

**S.V. Yanyak, G.Y. Piven**  
Vologda State University

**ANALYSIS OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF HARD ALLOYS BASED ON TITANIUM CARBIDE  
WITH IRON-MOLYBDENUM BUNDLE**

Metallographic, x-ray, fractographic types of analysis allowed to establish differences in structures of alloys on the basis of titanium carbide with iron and iron-molybdenum bundles. In the alloy of 70%TiC,5% Mo,25%Fe we found a heavy doping of ferrite and formation of the intermetallic compound, which is associated with hardening of the bundle and of the alloy on the whole.

Titanium carbide, ferrite, intermetallic compound, doping, iron bundle, microrelief, alloy, microstructure.



**В.В. Баранов**

*Российская академия народного хозяйства  
и государственной службы при Президенте РФ*

**А.А. Звонарев**

*ООО «Яндекс»*

**К. Чжао**

*Московский государственный  
технологический университет «СТАНКИН»*

## СИСТЕМА РАЗРАБОТКИ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ВЫСОКОГО УРОВНЯ

В статье представлены результаты разработки системы прикладного программного обеспечения, использующегося при формировании высокотехнологичных производственных систем. Предложено создание механизма цепочек вызовов и синтаксических имен с целью упрощения читаемости кода. Разработана стандартная библиотека исходных кодов, имеющая разноуровневую абстракцию алгоритмов. Выполнена реализация интегрированной среды разработки АльфаКод, включающей управляемую подсветку синтаксиса и поддержку систем контроля версий.

Система прикладного программного обеспечения, язык программирования, статическая типизация, динамическая типизация, интегрированная среда разработки АльфаКод.

В условиях обострения конкуренции на рынках наукоемкой продукции актуальной задачей становится переход предприятий на принципы цифрового производства, включая информатизацию и формирование высокотехнологичных роботизированных структур. Это диктует необходимость создания качественно новой системы разработки прикладного программного обеспечения. Создаваемая система разработки программного обеспечения должна содержать инструментарий, способный помочь разработчику реализовать новый программный продукт и иметь удобный для пользователя интерфейс, библиотеку и синтаксис. В данный момент основную нишу среди прикладного программного обеспечения занимают системы, разработка в которых ведется на языках с синтаксисом, произошедшим от синтаксиса языка программирования С.

Однако использование на практике подобных систем сопряжено с рядом проблем, появление которых снижает эффективность системы. Это большой порог вхождения в язык, малое количество шаблонных решений в библиотеках, отсутствие поддержки современных методов разработки и т. д. Поэтому актуальным становится пересмотр ключевых особенностей компонентов системы разработки.

В этой связи необходим анализ современных подходов к разработке прикладного программного обеспечения, проектирование синтаксиса и разработка компилятора языка программирования. Кроме того, необходимы библиотека шаблонных решений и прототип интегрированной системы разработки.

**1. Факторы, влияющие на выбор языка программирования.** Основной частью большинства современных языков программирования является типизация, охватывающая несколько пересекающихся категорий. Статическая типизация предполагает, что конечные типы значений переменных, а также аргу-

ментов и возвращаемых значений функций, определяются на этапе компиляции. Подобная типизация используется в языках С++, С#, Java. Динамическая типизация предполагает, что тип значения переменной определяется на этапе выполнения программы, что характерно для языка Python [3].

Сильная (строгая) типизация запрещает смешение в выражениях различных типов данных. Кроме того, при использовании этого вида типизации не выполняется неявных преобразований, что характерно для таких языков, как С#, Java, Python. При слабой (нестрогой) типизации возможно выполнение неявных преобразований типов данных, что зачастую приводит к потере точности. Данная типизация используется в языке С++ [1]. Явная типизация, использующаяся в языках С++, С#, Java, предполагает явное указание в языке типа данных. При использовании неявной типизации, что характерно для языка Python, определение типа выполняет компилятор или интерпретатор [3].

Подход к разработке языка программирования нами был выбран на основе анализа различных типизаций. Так, например, статическая типизация, позволяя производить проверку типов один раз на этапе компиляции, ускоряет выполнение программы, способствует поиску потенциальных ошибок еще на этапе компиляции и обеспечивает тесную связь с интегрированной системой разработки. При потере данных произойдет ошибка компиляции или исключение, вместо тихой работы с неправильным поведением. Поэтому в такой ситуации целесообразно использовать сильную типизацию. Явная типизация дает возможность ограничить алгоритм функции по типу. При условии, что один алгоритм работает только с числами, а другой только со строками, используя явную типизацию их можно разделить. Поэтому предлагаемый нами язык программирования будет представ-

лять собой статически сильно явно типизированный язык программирования. При этом учтено, что каждый типизированный язык программирования должен иметь набор базовых типов данных, на основе которых программист может построить свои (пользовательские) типы данных.

**2. Особенности разработки прикладного программного обеспечения с использованием различных языков программирования.** Современное представление языков программирования характеризуется избыточным документированием кода. Ключевые слова, подчеркивающие тот или иной элемент кода, раньше выполнявшие роль разметки, в настоящее время являются лишними. Такие ключевые слова, как `class`, `def`, `func`, `function`, `let`, `var` перестали быть необходимостью при решении различных задач. Использование `code style guide` позволило применять его в подчеркивании синтаксических конструкций (например, имена пользовательским типам могут быть даны в `PascalCase`, а имена переменным и функциям – в `camelCase`). Подобные решения дают возможность снизить менеджерскую синтаксическую нагрузку на код [2]. В языке Python код, имея одинаковое семантическое предназначение, но без использования лишней «разметки» короче на 30% [2].

Часто при разработке программы приходится работать с коллекциями элементов. Это диктует необходимость писать функции обработки элемента коллекции и в дополнение создавать функцию обработки самой коллекции. Подобная функция может быть представлена как простой цикл. Вследствие этого возникает необходимость разработки концепции синтаксических имен.

Язык Python имеет синтаксическую конструкцию «генератор списков», что упрощает выполнение данной задачи. Язык C++ не обладает такими возможностями. Поэтому, применяя этот язык, необходимо использовать прямой метод. Язык Лего имеет синтаксическую конструкцию «синтаксические имена», что минимизирует использование семантически идентичных кусков кода, которые существенно замедляют чтение чужого кода.

В ряде языков, например в языке C++, у переменных и типов аргументов нет указания типов, а у функций – возвращаемых значений. Это связано с тем, что все функции по умолчанию рассматриваются как шаблонные, выводящие типы аргументов и возвращаемого значения на этапе компиляции. Поэтому, исходя из опыта использования динамически типизированных языков программирования, можно рекомендовать создание алгоритма, который будет инвариантен по отношению к типу данных. В статически типизированных языках к использованию шаблонов прибегают лишь в исключительных случаях. Использование шаблонов накладывает существенные ограничения на доработку кода в будущем, поскольку шаблонная функция может принимать всегда один и тот же тип, а нешаблонная функция всегда относится к определенному типу и никогда не может быть функцией другого типа.

Указать тип аргументов функции можно двумя способами. Во-первых, указав полный тип (`Int`, `Shrt`, `Str`, `Vctr<Int>`), а во-вторых, – частичный тип (`Vctr`,

`Container`, `Integer`, `String`). В первом случае указывается конкретный тип значения аргумента или возвращаемого значения. Во втором случае указывается лишь часть информации о типе. Это может быть либо семейство `Integer` (целые, т.е. `Int`, `UInt`, `Shrt`, `Long`, `Blnt` и т. д.), либо не специализированный шаблонный тип (например, `Vctr`, `List`).

В случае использования шаблонных типов иногда появляется необходимость доступа к косвенному имени типа. Например, для создания временной переменной внутри тела функции того же типа, что и аргумент функции, возможно использовать специальные имена шаблонных типов. Эти имена характеризуются теми же правилами составления, что и обычные типы в языке. Особенностью является то, что подобные имена должны начинаться с `T_`. Это повышает читаемость кода. Отсутствие указания типа у переменных объясняется автоматическим выводом по выражению справа. Если в этом выражении присутствует целое число, то `Int`, если присутствует дробное значение, то `Dbt` и т. д. Если необходимо заменить `Int` на `Shrt`, то используется конструктор `num = Shrt(0)`. Тогда типом значения переменной `num` будет `Shrt`. Переменные с момента их объявления и до момента уничтожения характеризуются одним типом.

**3. Разработка языка программирования.** Одной из важнейших задач, решаемых в процессе разработки программного обеспечения, является разработка компилятора языка программирования. Компилятор необходим для преобразования исходного текста программы, написанного на языке программирования, в представление понятное исполнителю программы (компьютеру или виртуальной машине). Для достижения подобного синтаксиса может быть использован базовый синтаксический анализатор, который позволяет типизировать токены на этапе лексинга [5].

Для достижения синтаксиса «синтаксических имен» на этапе формирования модели целесообразно использовать процесс генерации исходного кода. Суть генерации заключается в поиске «синтаксических имен» и автоматическом генерировании кода функций. Поиск «синтаксических имен» представляет собой поиск суффиксов у имен вызываемых пользовательских функций.

Если в области видимости существует функция, определенная пользователем, с именем `foo`, и обеспечивается вызов функции с именем `fooEach`, во время построения модели будет обнаружено, что функция с именем `fooEach` не существует. В этом случае начнется поиск суффикса в названии функции. После завершения этого процесса будет найден суффикс, и на основе подготовленного для этого суффикса шаблона будет сгенерирована функция с именем `fooEach`.

Созданная система прикладного программного обеспечения охватывает стандартную библиотеку типов и функций, а также интегрированную среду разработки АльфаКод. В отличие от стандартной библиотеки языка C++, которая построена по принципу максимальной абстракции, в языке программирования Лего стандартная библиотека имеет разноуровневую абстракцию алгоритмов.

**Результаты реализации функций «сортировка выбором» (F1) и «умножение матриц» (F2) на различных языках программирования**

Параметр		Язык программирования					
		C++		Python		Лего	
		F 1	F 2	F 1	F 2	F 1	F 2
1.	Количество символов	302	449	248	272	271	299
2.	Время работы, с	92,77	24,44	1218,6	185,1	93,8	25,6
3.	Используемый объем памяти	1,4 Гб	12,9 Мб	9,8 Гб	101 Мб	1,7 Гб	13,0 Мб

**4. Формирование интегрированной среды разработки.** Для формирования интегрированной среды разработки нами был выбран фреймворк Qt [4], на основе которого реализована совокупность мер поддержки, охватывающих, во-первых, управляемую подсветку синтаксиса, а во-вторых, поддержку систем контроля версий. Интегрированная среда разработки, охватывающая комплекс программных средств разработки прикладного программного обеспечения, в предложенной нами системе функционирует при работе с проектом как с обычной папкой, предлагая возможность сохранить настройки как в папке проекта, так и в папке пользователя. В предложенной нами интегрированной среде разработки имеется возможность создания и открытия различных проектов.

В системе реализована возможность добавления в проект ссылочных объектов. Данный функционал полезен при разработке модулей к существующим приложениям. Это дает возможность использовать статический анализ кода и осуществлять построение деревьев зависимостей с учетом стороннего кода, а также видеть его в папке проекта. Реализована функция предупреждения об удалении с выбором в диалоговом окне, а также закрытии несохраненных изменений с выбором и просмотром изменений в формате diff. Достоинствами предложенных нами решений являются возможности интегрированной среды разработки в сфере реализации управления системой контроля версий из интерфейса среды, а также возможности работы с несколькими вкладками, просмотра структуры проекта и файла.

**5. Сравнение предложенных решений с существующими разработками.** Сравнение по параметру функциональности языков проводилось методом тестирования предложенных решений с существующими разработками. Результаты реализации функций «сортировка выбором» (F1) и «умножение матриц» (F2) на различных языках программирования приведены в таблице.

Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что предложенный язык позволяет по сравнению с существующими языками повысить эффективность процесса разработки программного обеспечения. Причем это достигается без кардинальных изменений парадигмы разработки.

В статье предложена система разработки прикладного программного обеспечения, состоящая из языка программирования Лего, транслятора из языка Лего в язык C++, стандартной библиотеки и интегрированной среды разработки АльфаКод. Система отличается легкостью восприятия, низким порогом вхождения, не загруженным избыточной семантикой синтаксисом. Рекомендуемый для создания системы язык позволяет без кардинальных изменений парадигмы разработки повысить эффективность процесса создания программного обеспечения по сравнению с существующими языками.

Уникальность подхода к представлению синтаксиса обеспечивает высокий уровень компактификации файлов, уменьшая размер файла и увеличивая скорость разработки решений. Стандартная библиотека представлена в виде дерева абстракции, а новая модель типизации обеспечивает баланс между статической и динамической типизацией. Проведенное тестирование системы показало высокую эффективность ее применения. Предложенный подход к представлению синтаксиса, позволяет достичь высокого уровня (15–69%) компактификации файлов. Это уменьшает размер файла, вследствие чего происходит увеличение скорости разработки решений.

#### Литература

1. Страуструп, Б. Дизайн и эволюция языка C++ / Б. Страуструп. – Москва: ДМК Пресс, 2014. – 448 с.
2. Таненбаум, Э. Современные операционные системы / Э. Таненбаум. – 4-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2015. – 1120 с.
3. Бердонов, В. Д. Применение ТРИЗ-эволюционного подхода к исследованию объектно-ориентированных языков программирования / В. Д. Бердонов, А. А. Животова. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2014. – 116 с.
4. Вартаков, С. П. Применение статической инструментации байт-кода языка Java для динамического анализа программ / С. П. Вартаков, М. К. Ермаков // Труды ИСП РАН. – 2015. – Т. 1. – С. 25–38.
5. Рассел, С. Искусственный интеллект. Современный подход / С. Рассел, П. Норвиг. – Москва: Вильямс, 2007. – 1408 с.

**V.V. Baranov**  
*Russian Academy of National Economy and Public Administration  
under the President of the Russian Federation*

**A.A. Zvonarev**  
*Yandex LLC*

**K. Chzhao**  
*Moscow State Technological University "STANKIN"*

## **DEVELOPMENT SYSTEM OF APPLIED SOFTWARE USING A HIGH-LEVEL LANGUAGE**

The article presents the results of the development of an applied software system used in the formation of high-tech production systems. It is proposed to create a mechanism for call chains and syntactic names in order to simplify the readability of the code. A standard source code library has been developed; it has a multi-level abstraction of algorithms. The AlphaCode integrated development environment including controlled syntax highlighting and support for version control systems has been implemented.

Applied software system; programming language; static typing; dynamic typing; integrated development environment AlfaCode.



## **ИНФОРМАЦИОННОЕ ПОЛЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МАЛЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Приводится опыт валидации отечественных САПР на примере малых предприятий машиностроительного направления. Автоматизация в подготовке производства выступает как интегрирование основных этапов: конструкторского, технологического и инженерного анализа на общей программной основе. Платформа PLM по единым правилам соединяет в общее информационное пространство программные модули САПР, формируя техническую документацию, содержащую 3D-модели и 2D-чертежи, а также вспомогательную атрибутику по компонентам проекта. Пакет документов является целью подготовительного цикла производства, условием модификации изделий, основой работы в команде и выступает средством объединения в единое поле элементов цепи: заказчик – инженеры – производство – снабжение.

Малые предприятия, 3D-модели, цифровой макет, конструкторская и технологическая подготовка производства, инженерный анализ, цифровая экономика.

Атрибутом цифровой экономики является формирование информационного пространства предприятия, в котором функционирует значительная часть управленческих и технических технологий и осуществляется внедрение инновационных программных продуктов. Это направление получило импульс развития и нашло отражение в среде малого бизнеса машиностроительного сектора. Итогом этой деятельности является переход на следующую ступень в организационных подходах при организации производств. Политика цифровизации в модернизации экономических механизмов формирует электронный формат всей технологической документации, необходимой на производствах [1, 2].

Электронные инструменты 3D-проектирования и Product Lifecycle Management (PLM)-концепция в производственной среде качественно меняют содержание процессов организации и подготовки производств и создают новые компетенции для перехода к производству наукоемких видов продукции. Отмеченный фактор является определяющим для повышения конкурентных преимуществ на рынке машиностроительных изделий [2, 3, 4].

Автоматизация конструкторской подготовки базируется на методах проектирования электронных моделей изделий и деталей в 3D-форме, что одновременно сопровождается созданием конструкторских спецификаций и двухмерных сборочных чертежей, а также чертежей отдельных деталей. Связь между электронными прототипами и ассоциативными видами чертежей дает возможность быстрого учета всех модификаций цифровой версии в технической документации [2–4].

Подготовка производства на технологическом этапе опирается на ряд мероприятий: выбор заго-

товки, уточнение назначенного материала, поиск методов и формулирование способов обработки, определение перечня необходимого технологического оборудования и оснастки. Главная особенность работы малого бизнеса заключается в производстве товаров в условиях мелкой серии, а также изделий достаточно простых по конфигурации и трудоемкости при ограниченности станочного оборудования. Это обстоятельство диктует необходимость проектирования техпроцессов для конкретного оборудования и его технологических возможностей. Дополнительной ступенью является задача разработки приспособлений, оснастки и выбора мерительных инструментов.

Обслуживание машиностроительных изделий при эксплуатации требует оформления интерактивных электронных справочных руководств и рекламных буклетов для осуществления мероприятий по ремонту и обслуживанию, а также выработки логистических правил возможности удаленного заказа деталей и комплектующих [2]. Соблюдение сформулированных условий обеспечит выполнение рекомендаций комплекса менеджмента качества ISO 9001:2008 и способствует осуществлению целенаправленной стратегии на рынке машиностроительных продуктов.

При мелкосерийном и широкономенклатурном производстве продукции гибкость бизнеса может быть реализована исключительно на базе автоматизации процесса подготовки, ориентированной на конкретное оборудование. Именно в условиях небольших предприятий открыты широкие возможности реализации инновационных технологий и современных эффективных структурно-организационных принципов деятельности.

Линейка российских программных инструментов: «Машиностроительный комплекс Аскон», а также комплекс приложений компании «Спрут-Технология» дают возможность организовать интегрированную среду, обеспечивающую одновременное взаимодействие всех служб в подготовительный период. Валидацию отечественных САПР в работе малого предпринимательства продемонстрируем на примере производства предприятий в Вологодской области. На рис. 1 показан цифровой прототип изделия «Шредер» установки для измельчения бумажных, картонных, пластиковых и других отходов подобной структуры с целью их дальнейшей утилизации. Проектирование установки отвечает региональной программе по переработке вторичных ресурсов.

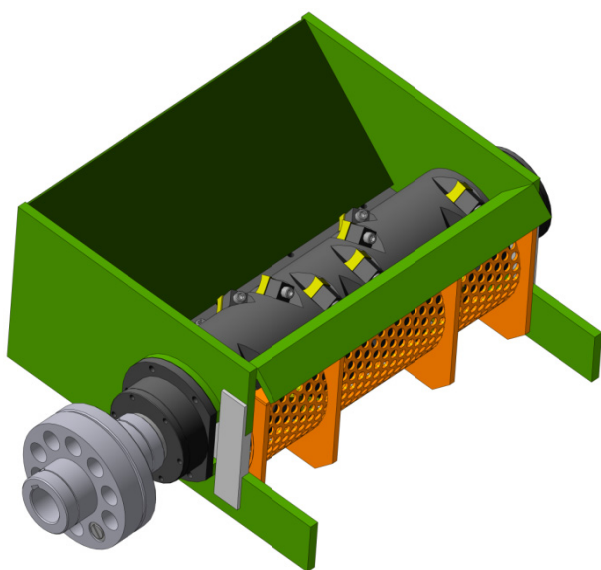


Рис. 1. Цифровая модель корпуса шредера

В рамках конструкторского этапа уточняются компоновочные решения, а также кинематическое взаимодействие узлов, состав будущей конструкции с учетом максимальной унификации и применения стандартных комплектующих. Дальнейшие шаги подразумевают классификацию и кодирование новых деталей. Присвоение кода облегчает поиск их прототипов в технологических базах предприятия. Методологической основой автоматизированного проектирования являются методы синтеза и адресации. Техника параметризации позволяет, используя единожды спроектированный прототип, получать конфигурации схожих деталей. Формообразующие элементы выступают средством наполнения конструкторских баз данных для следующих проектов.

Платформа «КОМПАС-3D» дает возможности создания и редактирования трехмерных макетов деталей (рис. 2), формирования их рабочих чертежей с изображением необходимых видов, сечений и разрезов, а также возможность получать виртуальные виды сборочных единиц. Этап подготовки чертежей завершается нормоконтролем полученного материала посредством программной библиотеки «КОМПАС-Эксперт», в функции которой входит поиск неточностей и замечаний в оформлении чер-

тежей. Финальная стадия проектирования – создание спецификаций.

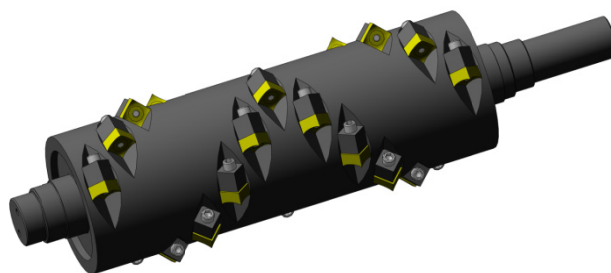


Рис. 2. 3D-модель сборочной единицы «Ротор» из сборки «Корпус шредера»

Электронные макеты сборочных единиц и всего изделия позволяют устранить коллизии и исключить ошибки проектирования, провести проверку размерных цепей, установить допуски из принципа взаимозаменяемости. Применение 3D-проектирования малыми машиностроительными предприятиями является отражением политики цифрового прогресса в экономике и слагаемым в становлении производства нового типа.

Функционал САПР, реализующих методологию 3D-моделирования, позволяет выполнить компоновку спроектированного изделия. Математическое описание 3D-модели даёт возможность оценить проектируемую конструкцию в пространстве и проекциях для предварительного вывода о конструкторских решениях, показать фотореалистичное оформление согласно цветовой гамме окраски для дизайнерских и эргономических оценок [2–4]. Рис. 3, 4 и 5 иллюстрируют 3D-макеты нескольких сборочных единиц изделия «Шредер».

Координация САПР-платформ осуществляется в интеграторе «ЛЮЦМАН: PLM», где ведется цифровой комплект конструкции путем включения всех электронных макетов (сборочные единицы, детали, стандартные компоненты и т. д.), а также сопровождением всеми требуемыми дополнениями [2].

С целью зрительного восприятия состава машиностроительного продукта, организации регламентных и ремонтных работ формируется электронный справочный перечень разнесенных сборок конструкции. Возможности САПР предполагают последовательное разнесение изделия на узлы, при этом подузлы в составе сборочных единиц выносятся как одним элементом, так и поэлементно. Окончательный результат – это наглядное изображение и доступность быстрой модификации.

Электронный прототип узла «Рама», полученный по 3D-каркасу рис. 3, показан на рис. 4. Данная схема металлоконструкции допускает редактирование с целью применения в качестве прототипа в других конструкциях. Геометрическое моделирование с использованием параметризации обеспечивает высокопроизводительную работу конструктора, что значительно снижает трудоемкость и затраты времени в подготовительном периоде.



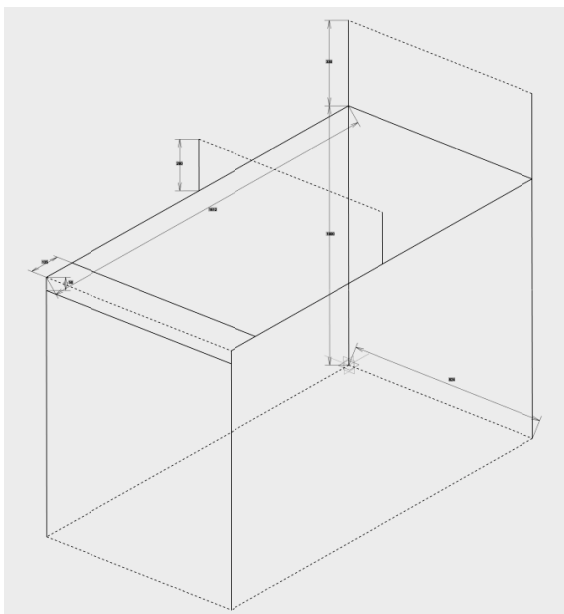


Рис. 3. Каркас из 3D-библиотеки металлоконструкций

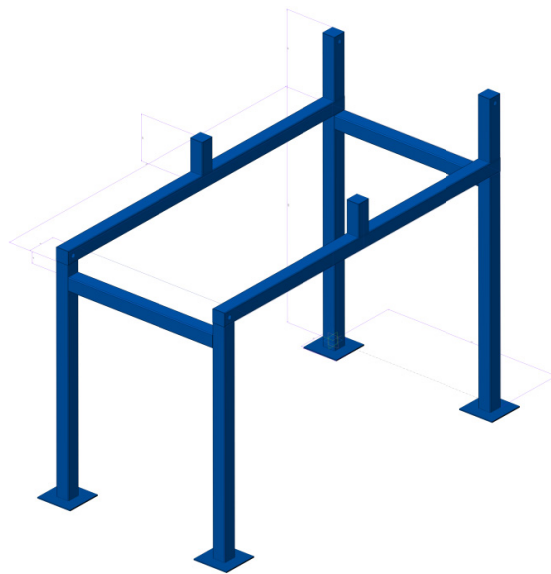


Рис. 4. Модель рамы, созданной по 3D-каркасу

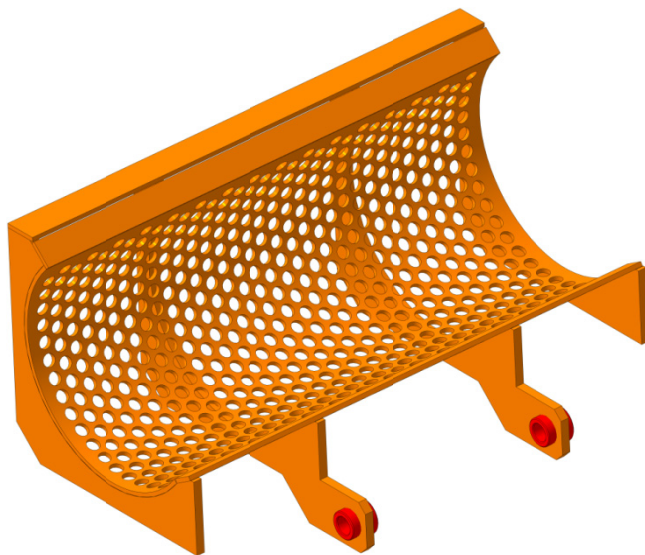


Рис. 5. Цифровая модель сборочной единицы «Сетка откидная»

Следующая ступень в подготовке производства – создание на базе системы автоматизированного проектирования технологических процессов «ВЕРТИКАЛЬ» и нормативных справочных материалов, присутствующих в БД платформы, техпроцессов на основе конкретного предприятия. Центральной задачей при использовании систем техподготовки является проработка на технологичность деталей изделия. В процессе функционирования САПР ТП обеспечивает поддержку связи с групповыми, типовыми и единичными технологическими объектами информационной платформы предприятия. На этом принципе анализируются известные техпроцессы и проектируются новые с учетом технологи-

ческих возможностей имеющегося парка станков, выбираются инструментальные средства, оснастка и определяется форма заготовок, рассчитываются временные нормативы.

Технологические решения разработанного техпроцесса хранятся как объектная модель в дереве структурного состава изделия на базе комплекса «ЛЮЦМАН: PLM» и связаны с деталью, для которой созданы. Для сборочной единицы из состава рамы (рис. 6) изделия «Шредер» представлен пример проектирования технологического маршрута с одновременным выбором оборудования, инструментария, вычислением времени и подбором мерительных средств.

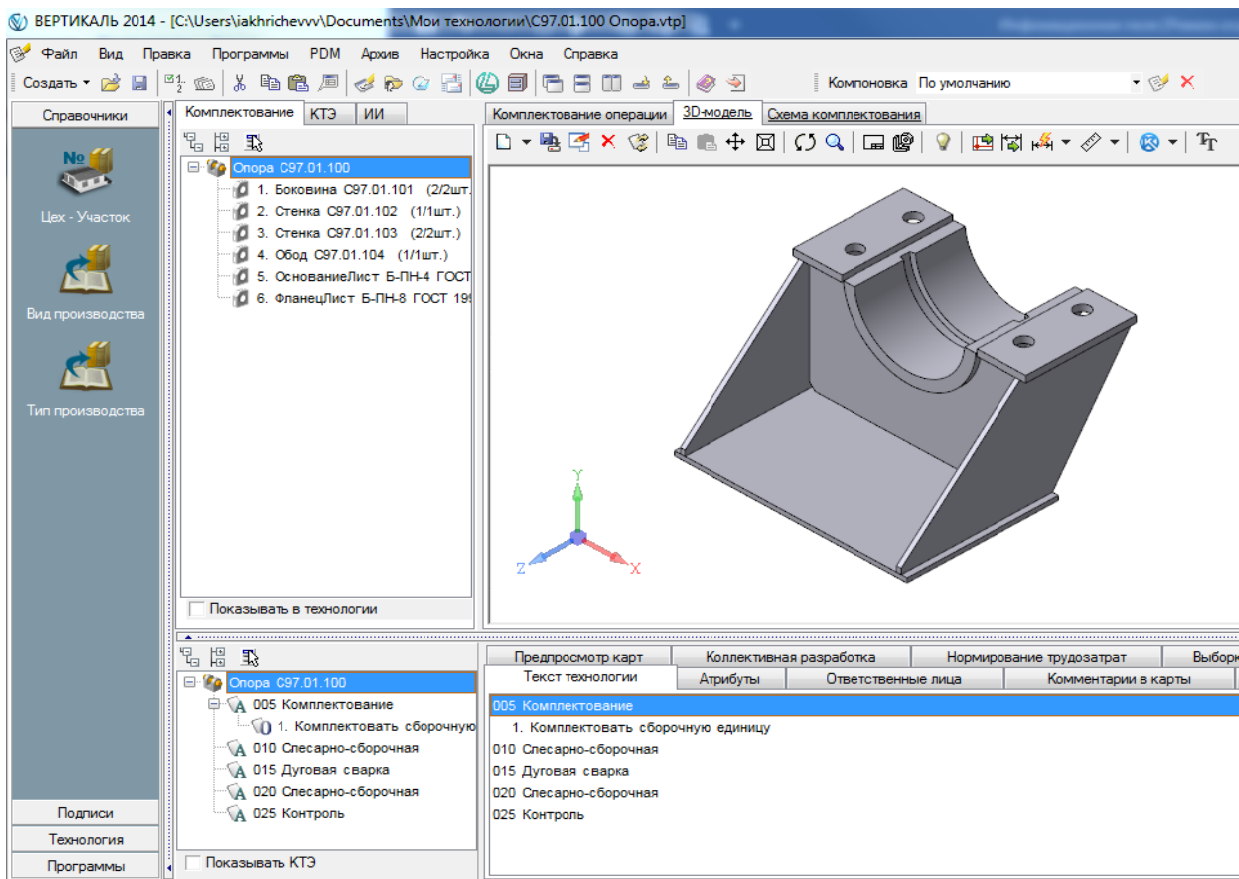


Рис. 6. Технологический процесс в системе САПР «ВЕРТИКАЛЬ-ТП»

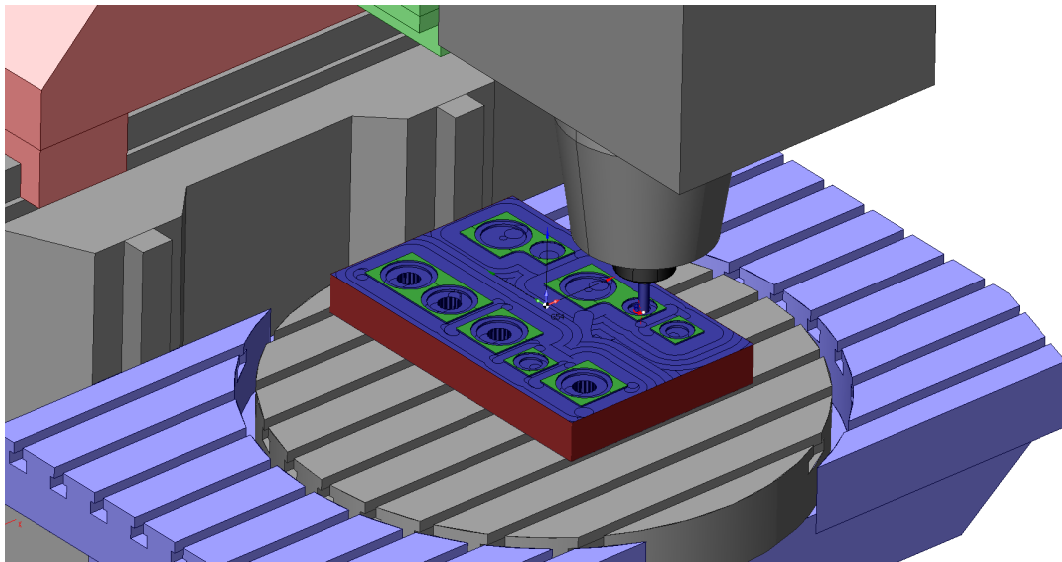


Рис. 7. Моделирование обработки детали на фрезерном станке

Среди отечественных САМ-приложений по автоматизированной подготовке программного обеспечения оборудования с числовым программным управлением отметим приложение «SprutCAM». Взаимодействие с приложением подразумевает назначение режущего инструмента из БД «ВЕРТИКАЛЬ» и получение требуемой формы детали посредством задания траектории движения инструмента. Возможности приложения позволяют провести моделирование токарных, фрезерных обработок, операций резки и ад-

дитивных технологий, а также получить затраченное на отдельные операции время выполнения техпроцесса и готовую программу с учетом вида станка с ЧПУ.

Визуальный контроль симуляции траектории движения узлов станка и инструмента в ходе процесса механообработки, учитывая перемещения также и оснастки, гарантирует безошибочность программного кода управляющей программы. На рис. 7 показано моделирование операции фрезерования объекта «Плита».

Виртуальная версия детали в «ЛОЦМАН: PLM» становится основным навигационным элементом комплекса автоматизированной конструкторской и технологической подготовки производства. Интеграция инструментов «КОМПАС-3D», «ВЕРТИКАЛЬ», «ЛОЦМАН: PLM» и «Гольфстрим» обеспечивает создание программно-информационной среды, что следует считать направлением в создании элементов виртуального предприятия в рамках движения к инициативе «Индустрия 4.0».

Концепция сквозного технологического обеспечения позволяет реализовать модифицирование конструкции с помощью управления конфигурациями изделий. Эти возможности регламентируют замены

как комплектующих, так и ДСЕ, используемых в фазе сборочных операций. В дереве построения изделия отражаются изменения, а информация записывается в «ЛОЦМАН: PLM» (рис. 8).

Инженерный анализ [6] узлов основан на силовом расчете и прогнозирует их поведение в рабочем режиме и в нештатных условиях. В качестве примера на рис. 9 показана конечно-элементная модель изделия «Барабан». В перечень исследований, доступных пользователю, входят следующие разделы: статический расчет деталей и узлов, устойчивость при циклическом нагружении, частотный анализ и тепловые деформации.

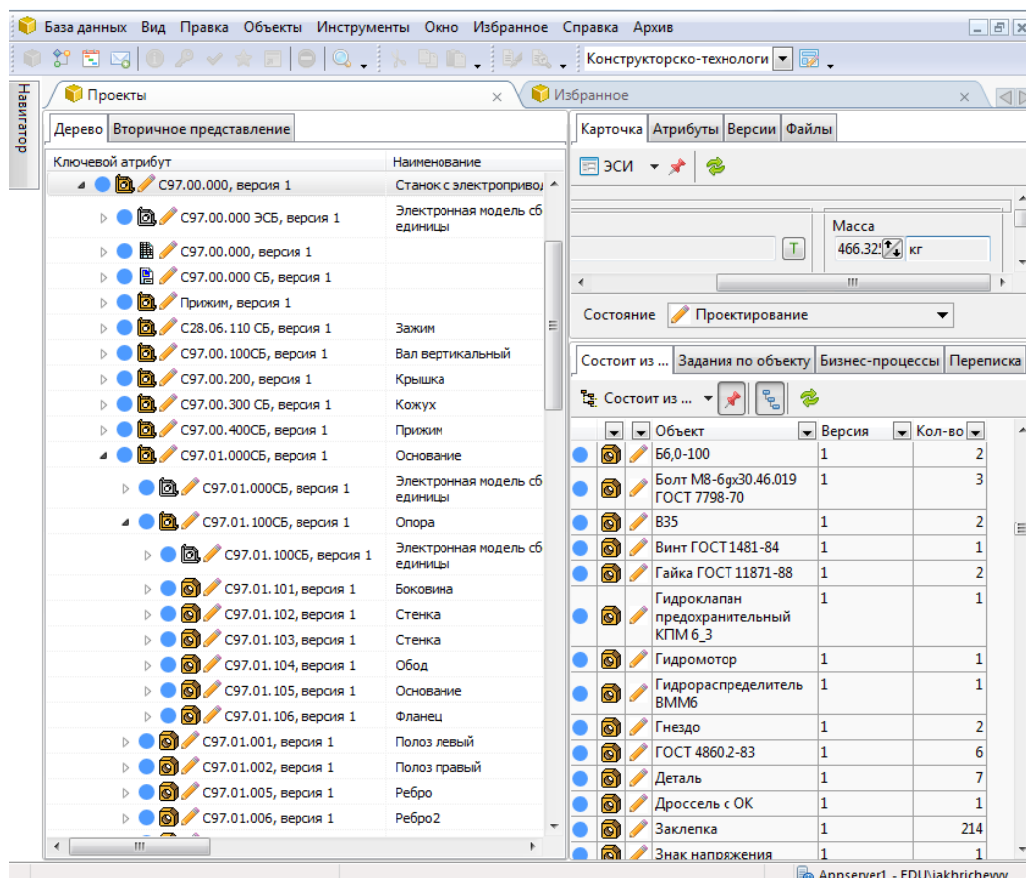


Рис. 8. Электронная структура изделия

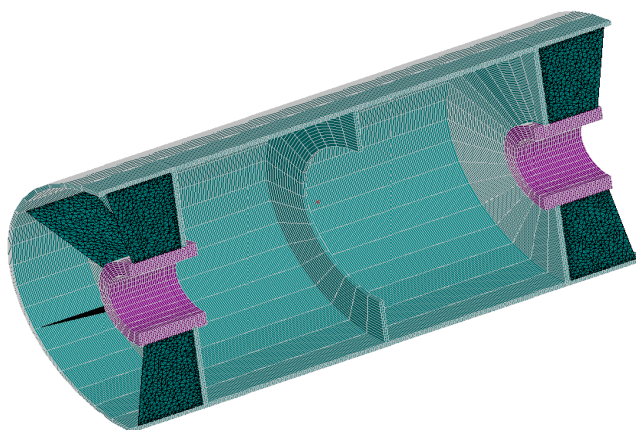


Рис. 9. Конечно-элементная модель (произвольный вид, в разрезе) барабана

Библиотека материальных компонентов дает возможность задать при расчете требуемый материал. В качестве первоочередного шага анализируются условия работы детали и выявляется распределение действующих усилий. По окончании расчета на напряженно-деформированное состояние формируется отчет с графическим отображением изделия после эксперимента, распределением коэффициента запаса прочности, напряжений и перемещений по объему детали. Цветная легенда, дополненная шкалой с числовыми величинами, позволяет выявить области максимальных значений параметров исследования и принять решение о прочностных характеристиках детали или конструкции.

Иерархическая последовательность CAD-продуктов отображается в виде дерева изделия, на базе которого «ЛОЦМАН: PLM» формирует состав конструкции. Структура содержит всю атрибутивную информацию, а также сопровождающие документы. В рабочем архиве данных спроектированный объект сохраняется как объектный образ, с которым связаны детали и узлы, присутствующие в разработке, а всем архивным документам присваивается инвентарный номер. Сформированный пакет технической документации является условием начала производства и служит возможностью дальнейших модификаций конструкции. «ЛОЦМАН: PLM» выступает средством и условием организации работы в команде над проектом [2], а также инструментом взаимодействия всех участников цепи – от заказчика до потребителя.

Внедрение PLM-стратегии в деятельность малого предпринимательства является фактором роста их эффективности при широкономенклатурном и наукоемком, но ограниченном выпуске продукции. При сопоставимой с аналогичными иностранными продуктами стоимости российские комплексы выигрывают в цене на обслуживание, поддержку и обновление.

Экспертные оценки прогнозируют рост эффективности производства до 100% на отдельных этапах, а в целом – до 40% и делают это направление

приоритетным. PLM-идеология предполагает инновационные принципы в организации работы предприятий: быстрый учет изменений конструкции изделий согласно требованиям потребителей и обмен технологическими данными участников подготовки производства. Эти системы становятся серьезным фактором роста производительности труда и конкурентоспособности отечественных продуктов машиностроительной отрасли.

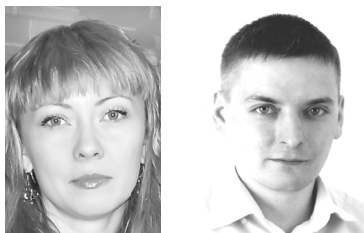
## Литература

1. Булавин, В. Ф. Цифровые технологии в малом бизнесе машиностроительной отрасли / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев // САПР и графика. – 2018. – № 6. – С. 52–55.
2. Булавин, В. Ф. Валидация CAD-продуктов в малых предприятиях машиностроительного сектора / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 5 (325). – С. 64–72.
3. Российские CAD-системы в приборостроительном секторе производства / Е. В. Волков, В. Ф. Булавин, Н. С. Григорьев, В. В. Яхричев и [др.] // Эффективные исследования современности: материалы Междунар. XXXII научн. конф. – Москва: ЕНО, 2017. – Ч.1, № 10 (32). – С. 65–68.
4. CAD/CAPP-технологии в машиностроительном производстве / С. А. Казакова, В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев и [др.] // Наука и современность 2018: материалы XXXV Междунар. научн. конф. – Москва: ЕНО, 2018. – Ч. 1, № 1 (35). – С. 70–73.
5. Булавин, В. Ф. PLM-стратегия в мелкосерийном производстве машиностроительной отрасли / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев, В. А. Глазков // Известия высших учебных заведений. Серия: Машиностроение. – 2018. – № 8. – С. 37–49.
6. Булавин, В. Ф. Инженерный анализ и новые технологии в методе конечных элементов / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 2 (328). – С. 109–120.

**INFORMATION FIELD OF SMALL MACHINE-BUILDING ENTERPRISES  
DIGITAL TECHNOLOGY**

The experience of validation of domestic CAD systems is given on the example of small machine-building enterprises. Automation in the preparation of production acts as the integration of the main stages: design, technological and engineering analysis on a common program basis. The PLM platform integrates CAD software modules into a common information space using uniform rules, forming technical documentation containing 3D models and 2D drawings and supporting attributes by project components. The package of documents is the purpose of the preparatory production cycle, the condition for the modification of products, the basis of teamwork and acts as a means of combining the chain elements into a single field: customer - engineers - production - supply.

Small enterprises, 3D-models, digital layout, design and technological preparation of production, engineering analysis, digital economy.



## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Рассмотрены вопросы моделирования линий электропередач с использованием самонастраивающейся математической модели, позволяющей анализировать режимы работы линий, отслеживая мгновенные значения параметров. Полученная модель может быть использована для построения быстродействующей защиты от междуфазных замыканий в линиях электропередач напряжением 10–35 кВ, имеющих небольшую протяженность.

Математическая модель, линия электропередач, защита от междуфазных замыканий.

Актуальность темы объясняется тем, что в настоящее время условия эксплуатации электрооборудования претерпевают глубокие изменения, постоянно усложняясь вместе с технологическими процессами, в которых они используются. Режимы работы электрических систем становятся более динамичными и разнообразными по характеру, что приводит к необходимости повышения быстродействия средств защиты.

В большинстве же случаев существующие защиты основаны на контроле, как правило, действующих значений токов и напряжений. Это требует сравнительно длительных наблюдений за сигналами в аварийных ситуациях для принятия правильного решения, что приводит к снижению быстродействия.

В связи с этим требуются новые подходы на основе представления защищаемых объектов более полными и точными математическими моделями, отражающими как статические, так и динамические свойства защищаемых объектов.

В основу предлагаемого метода выявления повреждений в линиях электропередач (ЛЭП) положен принцип работы самонастраивающейся программной математической модели контролируемой линии. Метод справедлив для анализа режимов линий напряжением 10–35 кВ.

Выбор математической модели начнем с представления линии электропередач в виде конечной цепочки RLC параметров, изображенной на рис. 1.

На рисунке указаны:  $R_A, R_B, R_C$  – активные сопротивления соответственно фаз А, В, С;  $L_A, L_B, L_C$  – индуктивности фаз А, В, С;  $C_A, C_B, C_C$  – емкости относительно земли фаз А, В, С; емкости между фаз А, В, С –  $C_{AB}, C_{BC}, C_{AC}$ .

Для линий 10–35 кВ междуфазными емкостными составляющими можно пренебречь, ввиду их незначительного влияния на переходные процессы в линии.

Таким образом, исходная схема замещения, изображенная на рис. 1, примет вид, представленный на рис. 2.

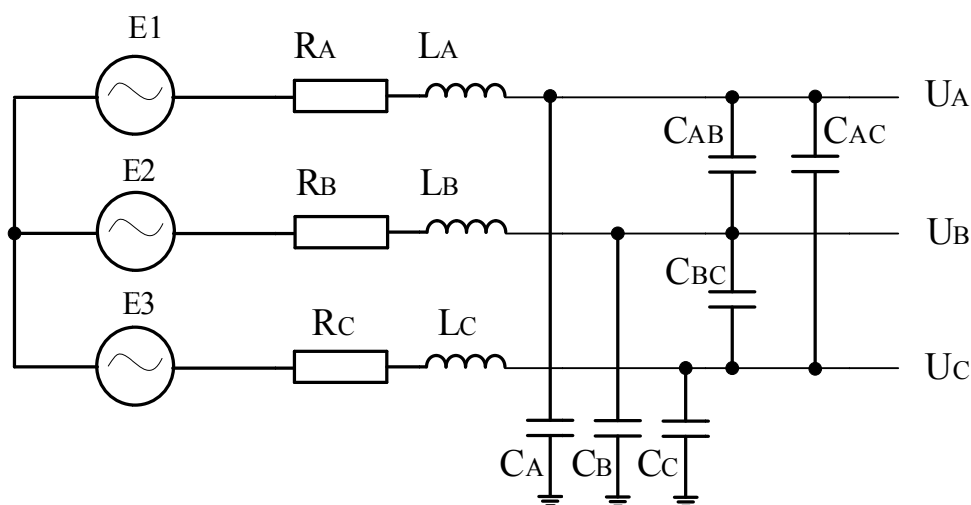


Рис. 1. Схема замещения ЛЭП в виде RLC-цепи

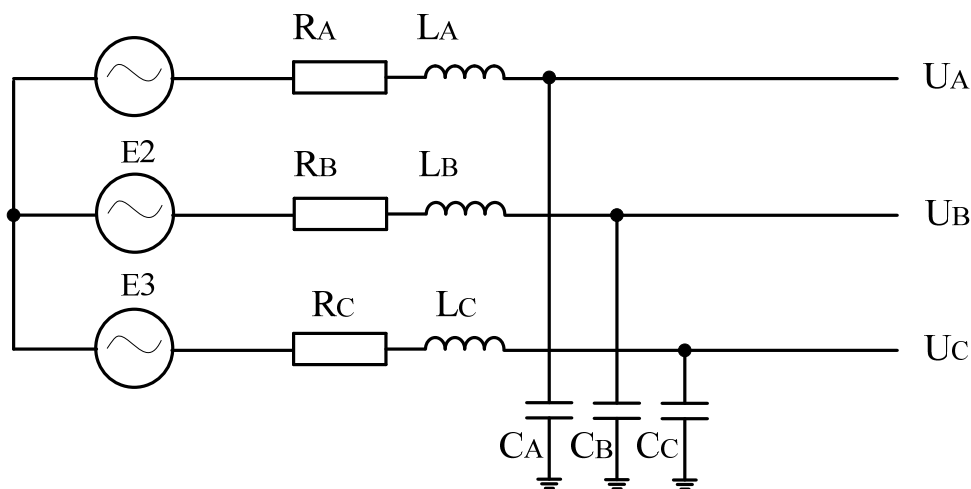


Рис. 2. Упрощенная схема замещения ЛЭП в виде RLC-цепи

Моделью для данной схемы замещения служит активно-индуктивно-емкостное звено, изображенное на рис. 3 [1].

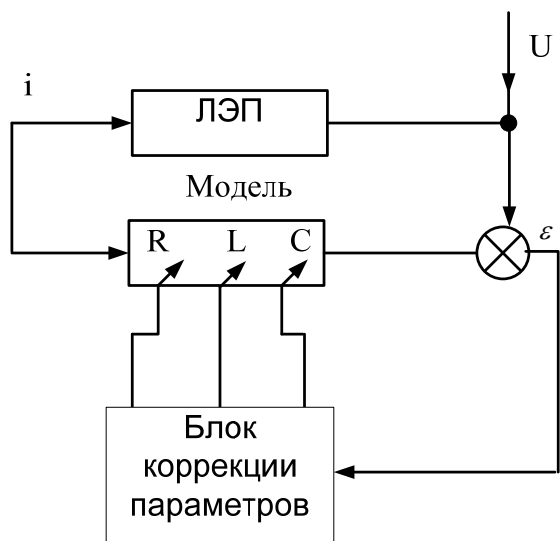


Рис. 3. Структурная схема модели RLC-цепи

Эта модель описывается уравнением закона Кирхгофа в дифференциальной форме [2]:

$$u = R_w i + L_w \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_w} \int i dt, \quad (1)$$

где  $R_w$ ,  $L_w$  и  $C_w$  – активное сопротивление, индуктивность и емкость линии соответственно.

Учитывая значительную сложность аналитического анализа подобной системы, а также трудности ее моделирования, докажем возможность неучета емкостной составляющей дифференциального уравнения.

Для доказательства представим одну из фаз ЛЭП П-образной схемой замещения, изображенной на рис. 4 [3].

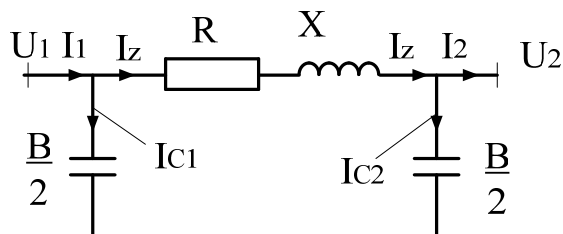


Рис. 4. П-образная схема замещения ЛЭП

На рисунке приняты следующие обозначения:  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  – комплексные действующие значения токов и напряжений по концам линий;  $I_z$  – ток в продольном сопротивлении линии;  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$  – токи в поперечных емкостных проводимостях;  $B$  – емкостная проводимость.

По первому закону Кирхгофа имеем следующие соотношения для токов в схеме замещения:

$$I_1 = I_z + I_{c1};$$

$$I_z = I_2 + I_{c2}.$$

Согласно второму закону Кирхгофа:

$$U_1 = U_2 + \Delta U,$$

где  $\Delta U$  – падение напряжения на продольном сопротивлении.

Учитывая соотношения между токами и напряжениями в ЛЭП, построим диаграмму соотношения токов и напряжений, изображенную на рис. 5.

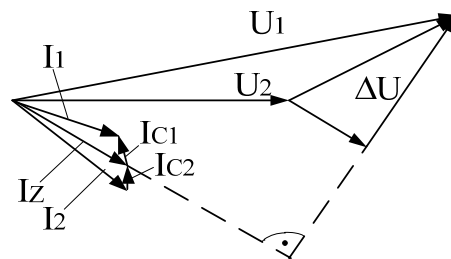


Рис. 5. Векторная диаграмма токов и напряжений в ЛЭП

Диаграмма наглядно указывает на тот факт, что емкостные токи  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$  значительно меньше, чем ток  $I_Z$  в продольном сопротивлении линии, поэтому при построении модели индуктивной составляющей в дифференциальном уравнении (1) можно пренебречь.

Учитывая все вышесказанное, уравнение, описывающее математическую модель ЛЭП, примет вид:

$$u = R_W i + L_W \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Однако следует сказать, что такое упрощение неприемлемо при рассмотрении однофазных и различных других замыканий на землю, так как в этом случае преобладает емкостная составляющая тока.

Итоговая модель линии изображена на рис. 6.

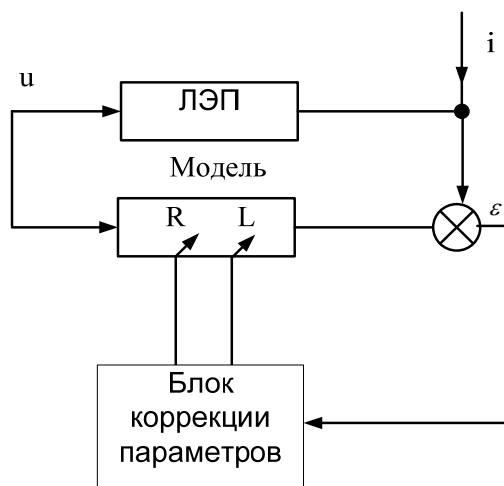


Рис. 6. Структурная схема упрощенной модели ЛЭП

Таким образом, полученная модель может быть использована для построения защиты от между-

фазных замыканий в ЛЭП напряжением 10–35 кВ, имеющих небольшую протяженность.

Несмотря на все приведенные упрощения, которые направлены на повышение быстродействия разрабатываемой защиты, можно говорить о незначительном снижении точности получаемых результатов.

Рассматриваемая модель в качестве входных сигналов использует ток и напряжение, а на выходе позволяет анализировать активную и реактивную (индуктивную) составляющие сопротивления. Таким образом, защита, построенная на основе предложенной математической модели, будет обладать большей точностью, чем, например, реле сопротивления [4], вычисляющее полное сопротивление. Построенную на основе такой модели защиту в дальнейшем можно будет использовать в качестве одного из каналов существующих цифровых защит.

#### Литература

1. Ванин, В. К. Релейная защита на элементах вычислительной техники / В. К. Ванин, Г. Н. Павлов. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 335 с.: ил.
2. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле: учеб. пособие / Г. И. Атабеков, С. Д. Купалян, А. Б. Тимофеев, С. С. Хухриков; под ред. Г. И. Атабекова. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 432 с.
3. Лыкин, А. В. Электрические системы и сети: учеб. пособие / А. В. Лыкин. – Москва: Университетская книга: Логос, 2006. – 254 с.
4. Моделирование устройств противоаварийной автоматики для предотвращения асинхронных режимов в ЭЭС по эксплуатационным формулам / Е. К. Лоханин, В. Г. Наровлянский, А. И. Скрыпник, Т. О. Товстяк // Электрические станции. – 2009. – № 9. – С. 54–58.

O.S. Vyatkina, A.N. Alyunov  
Vologda State University

#### DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL TO IDENTIFY SHORT CIRCUITS IN POWER LINES

The issues of modeling power lines using a self-adjusting mathematical model that allows analyzing to analyze the operating modes of lines, tracking instantaneous values of parameters are considered. The obtained model can be used to build high-speed phase-to-phase fault protection in power lines with a voltage of 10-35 kV, which have a small length.

Mathematical model, power line, phase-to-phase fault protection.





*Д.Е. Жаравин, Д.Ю. Козин, Д.Ю. Фомичев,  
С.Б. Федотовский*  
Вологодский государственный университет

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Задачей данной работы является исследование методики обучения искусственной нейронной сети при помощи генетического алгоритма. Проверена скорость и качество обучения на примере компьютерной модели. Определены положительные и отрицательные моменты алгоритма, а также перспективы его развития.

Искусственные нейронные сети, генетическое программирование, генетические алгоритмы, задачи оптимизации, поиск решения.

Теория искусственных нейронных сетей была известна ещё с 1993 года, но на то время невозможно было реализовать эту теорию технически. Сегодня, в век цифровых технологий, уже никого не удивит распознаванием отпечатков пальцев, определением лиц и картинок. Мы за считанные секунды можем распознать играющую в торговом центре мелодию или узнать любую информацию у голосового помощника [1].

Все это заслуга искусственных нейронных сетей, будущее уже наступило, каждый день сети становятся умнее и эффективнее. Улучшаются не только существующие архитектуры и алгоритмы обучения, но и создаются новые.

На сегодняшний день существует большое количество моделей нейронных сетей, а также методов для их обучения [3]. Задачи, которые могут выполнять сети, зависят от выбранной архитектуры. Также большую роль в нейросети играет её внутренняя организация, алгоритм обучения и так называемая функция активации или передаточная функция нейрона [5]. Комбинирование, перестановки и совокупность этих факторов влияют на работоспособность и функционирование всего алгоритма. Это подтверждается исследованиями, для разных целей используют разные алгоритмы и структуры сетей. Например, чтобы распознать музыку или изображение, принято использовать глубокие сверточные сети, а если нужно сгенерировать текст, то лучше всего с этой задачей справятся нейросети с обратными связями, и так далее. Сети с обратными связями называются также рекуррентными [4].

Таким образом, зная цель, для которой создаётся нейронная сеть, можно опытным путём подобрать её структуру, функцию активации и алгоритм обучения. Последний необходимо правильно настроить, так как с каждым циклом выполнения программы он будет корректировать свои веса до тех пор, пока результат не будет нас удовлетворять.

Но что делать, если задача неконтролируемая и ошибка на выходных слоях сети неизвестна, а также неизвестна конечная цель сети? В таком случае

обучить и подобрать её удачную архитектуру не удастся. Именно для таких целей придуманы генетические алгоритмы, чтобы решать задачи на оптимизацию и поиск решений для неконтролируемой функции.

Цель оптимизации с помощью генетических программ и алгоритмов состоит в том, чтобы найти лучшее возможное решение задачи [2].

Суть алгоритма основана на моделировании эволюционного процесса биологических организмов. Популяции животных в реальной жизни развиваются в течение нескольких поколений, подчиняясь законам естественного отбора, в результате действия которого в популяции увеличивается количество особей, обладающих максимальной приспособленностью, в то время как число особей с неблагоприятными признаками уменьшается [2].

Задачей проекта было создать такие условия эксперимента, при которых невозможно было бы обучить искусственную нейронную сеть никакими другими способами, кроме как при помощи генетического алгоритма.

Для реализации была выбрана интегрированная среда разработки Unity, так как она удобна в использовании, имеет простой интерфейс, который можно настроить индивидуально под любого пользователя, и имеет бесплатную лицензию типа "Personal". К преимуществам также относят наличие визуальной среды разработки, а в качестве скриптовых языков программирования используются JavaScript и C#, последний был выбран при разработке нашего проекта.

В среде разработки Unity была спроектирована компьютерная модель автомобиля, а также случайным образом сгенерирован трек, по которому он может свободно перемещаться. Полный контроль над органами управления транспортного средства предоставлен нейронной сети, которая состоит из пяти слоёв, три из них скрыты (рис. 1). Нейроны в сети управляют параметрами автомобиля, отвечают за рулевое управление, регулируют скорость и направление движения.

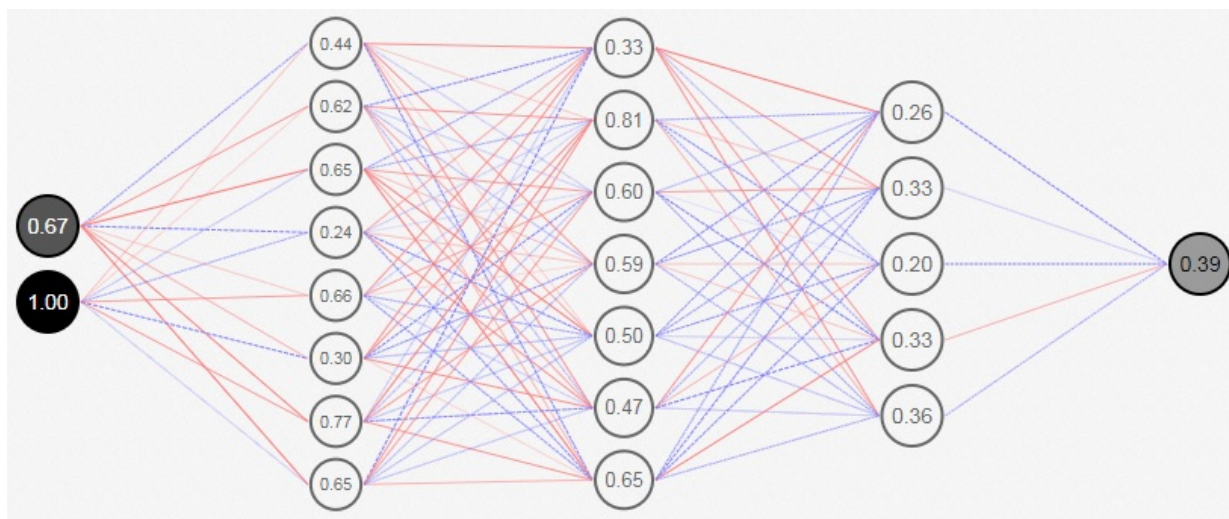


Рис. 1. Модель нейронной сети проекта

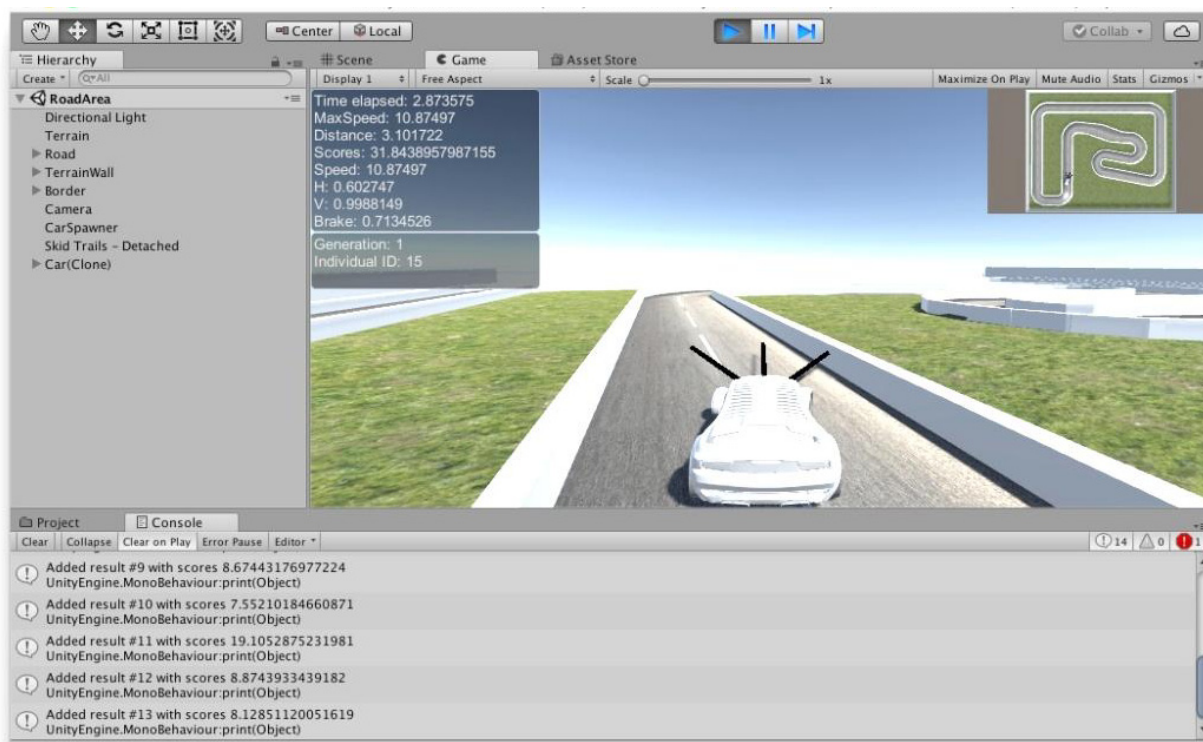


Рис. 2. Проект в Unity. Этап обучения нейронной сети

На вход нейронной сети подаются данные с датчиков, они закреплены на передней части автомобиля и определяют расстояние до бортиков трека, по которому движется машинка. На выходе получаются значения, которые передаются на определённые органы управления. Таким образом, автомобиль может перемещаться по треку, но только до тех пор, пока не произойдёт столкновение с бортиком, тогда эксперимент заканчивается.

Конечная цель эксперимента состоит в том, чтобы машинка проехала весь путь целиком, не столкнулась с преградами и бортиками трека (рис. 2). Задача поставлена таким образом, чтобы модель нейронной сети было невозможно обучить стандартными методами, так как трек генерируется

случайным образом, и ошибка на выходных слоях сети неизвестна.

При обучении сети генерируется большое количество поколений со случайными значениями весовых коэффициентов. Автомобили друг за другом выпускаются на модель трека и начинают движение в зависимости от весовых коэффициентов. После каждого столкновения с объектами эксперимент для особи заканчивается. Результаты каждой попытки записываются, измеряется время и расстояние, которое преодолели машинки. В конце эксперимента выбираются лучшие особи, которые проехали дальше всех. Значения их весовых коэффициентов копируются и присваиваются остальным особям, но некоторые получают случайные значе-

ния весов – это называется мутация. Она нужна для того, чтобы популяция могла корректировать свои гены, иначе, через несколько поколений, сеть просто перестанет обучаться.

В результате эксперимента выяснилось, что потребуется около 50 генераций для того, чтобы алгоритм подобрал необходимую комбинацию весовых коэффициентов для нейронной сети. Теперь, когда все весовые коэффициенты подобраны верно, можно генерировать трек любой сложности и длины, а нейронная сеть будет с ним справляться.

Таким образом, для обучения нейронных сетей в неконтролируемых задачах с неизвестной ошибкой на выходах, проще всего использовать алгоритмы генетического программирования.

Для того чтобы ускорить обучение сети, можно каждое поколение выпускать на трек одновременно, но при этом отключить столкновения между машинками – это нужно, чтобы упростить процесс сбора данных для определения длины пройденного расстояния. Также можно увеличить количество датчиков на передней части автомобиля, при этом увеличится количество входных нейронов в сети и её сложность, зато сеть будет совершать меньше ошибок. Внутреннюю структуру сети и функцию активации нейронов можно менять и модернизировать – это нужно для ускорения процесса обучения.

Генетические алгоритмы появились достаточно давно, но остаётся большое количество нерешённых проблем и задач в этой сфере [2].

Основной минус подобных систем, который создаёт трудности в решении прикладных задач, в том, что вычислительные машины требуют чёткой направленности, а природные системы, в основном, непредсказуемы и хаотичны [2].

Основной потенциал нейронных сетей в решении задач на оптимизацию и поиск решений состоит в том, чтобы комбинировать всевозможные структуры, архитектуры и методы построения сетей, связывать их с алгоритмами обучения. Тогда можно будет совместить природные системы с вычислительными, а также достигать хороших результатов в решении прикладных задач.

#### Литература

1. Жаравин, Д. Е. Обучение нейронных сетей при помощи генетических алгоритмов / Д. Е. Жаравин, Д. Ю. Козин, Д. Ю. Фомичев // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. LXXV междунар. студ. науч.-практ. конф. – Новосибирск: [б.и.], 2019. – № 3 (74) – С. 56.
2. Жаравин, Д. Е. Генетическое программирование / Д. Е. Жаравин, Д. Ю. Козин, Д. Ю. Фомичев // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 8 февр. 2019 г.) / редкол.: О. Н. Широков [и др.] – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2019. – С. 159–162.
3. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан; пер. с англ. – Москва: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 288 с.
4. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети: Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – 2-е изд. стереотип. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.
5. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин; пер. с англ. – 2-е издание. – Москва: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

**Zharavin D.E., Kozin D.Y., Fomichev D.Y., Fedotovskij S.B.**  
Vologda State University

#### USE OF GENETIC ALGORITHMS FOR TRAINING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

The objective of this work is to study the method of teaching an artificial neural network using a genetic algorithm. The speed and quality of training was tested on the example of a computer model. The positive and negative aspects of the algorithm, as well as the prospects for its development, are determined.

Artificial neural networks, genetic programming, genetic algorithms, optimization problems, search for solutions.



С.А. Казакова

Вологодский оптико-механический завод

В.Ф. Булавин

Вологодский государственный университет

## КОМПЛЕКСНАЯ ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В статье представлен опыт комплексной цифровизации машиностроительного производства на основе платформы PLM, представлены основные направления совершенствования технологической подготовки производства, приведены примеры комплексного подхода к полностью цифровой подготовке машиностроительного производства, представлен опыт использования программных продуктов, определены основные направления дальнейшей цифровизации производства.

3D-модель, цифровой образ, конструкторская и технологическая подготовка производства, информационная среда.

Цифровое развитие машиностроительного производства определяет стратегию цифровизации всего перечня необходимой для него конструкторско-технологической документации. Рост сложности проектных работ, с одной стороны, и стремление получить конкурентные преимущества за счет быстрого выхода на рынок, с другой стороны, диктуют внедрение цифровых технологий в сфере технологической подготовки производства (ТПП).

В этих условиях основным направлением в совершенствовании ТПП является внедрение электронного формата в технологическое обеспечение и инновационные технологии в организации труда. Этому в полной мере удовлетворяют комплексы в составе систем автоматизированного проектирования (САПР), баз данных и экспертных систем для решения и поддержки технологических задач.

Отечественное программное обеспечение позволяет во многих случаях полностью решить задачу автоматизированного проектирования. Интеграция продуктов САПР («КОМПАС-3D», «Вертикаль» и «ЛОЦМАН:PLM»), а также линейка программ «СПРУТ-Технология» позволяют реализовать сквозную интегрированную программно-информационную среду для повышения эффективности подготовки производства [1].

Концепция сквозной поддержки обеспечивает быстрое изменение состава конструкции или ее модификацию с помощью опций управления конфигураций изделия. Последнюю функцию берет на себя платформа PLM (*Product Lifecycle Management*) – «ЛОЦМАН:PLM», в которой формируется объектная модель изделия, связанная со всеми деталями и технологическими процессами для них. Коллективная работа над проектом технологических и конструкторских бюро приводится «к общему знаменателю».

На этапе конструкторской подготовки производства (КПП) уточняется общая компоновка, кинематические связи и состав будущего изделия из условия унификации и максимального использова-

ния стандартных узлов. Последующие действия опираются на предварительную классификацию и кодирование деталей с дальнейшим поиском прототипов в базах данных. Основой автоматизированного проектирования служат методы адресации и синтеза [2, 3].

На этапе КПП определяются как конструкция изделия в целом, так и конструкция отдельных сборок и деталей, назначаются физико-химические свойства применяемых материалов, внешний вид и эргономические показатели. Результатом завершения является пакет конструкторской документации нового изделия или документация для модернизации ранее изготовленного. Технологии 3D-проектирования предполагают создание цифрового образа изделия. Эта задача может быть решена на базе российской платформы «КОМПАС-3D».

Принятие конструкторских решений требует согласования с технологическими службами возможности изготовления на имеющемся оборудовании отдельных узлов и деталей, а со службами снабжения – необходимости приобретения комплектующих компонентов и материалов.

Электронные модели подборок и всего изделия в целом дают возможность выявить возможные коллизии и ошибки. Технология параметризации позволяет изменять геометрию объекта с целью, с одной стороны, создания унифицированного образа, а с другой – обеспечения разнообразия в формообразовании и получения моделей схожих изделий на основе однажды спроектированного прототипа. Технология 3D-проектирования является проявлением одной из сторон цифровой экономики [4, 5].

Примером конструкторской подготовки является деталь «Кронштейн» (рис. 1), представляющая собой несимметричное тело с базовой установочной плоскостью. В изделии имеются три крепежных и одно перпендикулярно расположенное, вспомогательное отверстие для сопряжения с соседними деталями.



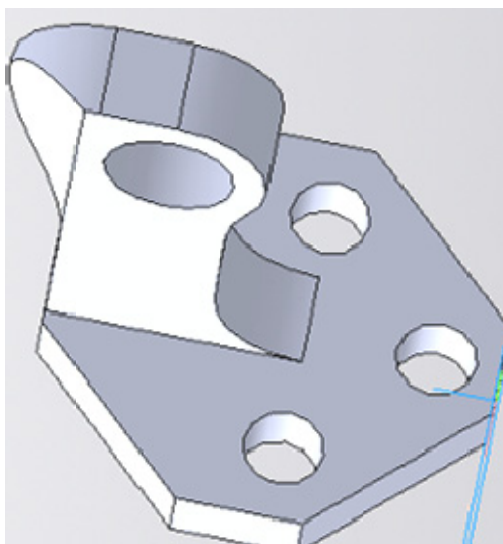


Рис. 1. 3D- и 2D-модели детали «Кронштейн»

Для наглядного представления состава изделия, облегчения сборки и разборки узлов разрабатывается каталог разнесенной сборки. Функционал программ САПР позволяет выполнить разнесение узлов конструкции на детали, при этом подузлы, входящие в сборку, могут быть вынесены одним элементом или также разнесены поддетально. Требования к результату – наглядность разнесения и возможность быстрого редактирования. На заключительном этапе конструкторского раздела осуществляется оформление электронного каталога.

Второй этап подготовки производства состоит в разработке на базе САПР ТП технологических процессов с использованием «Справочника технолога». В функции единой системы технологической подготовки производства входит обеспечение технологичности деталей и конструкции изделия в целом [6].

Технологическая подготовка производства (ТПП) – продолжение работ КПП. Российская САПР-платформа

«ВЕРТИКАЛЬ» поддерживает все процессы технологического обеспечения и электронного инженерного документооборота, в том числе управление технологическими изменениями и заявками на разработку специальных средств технологического оснащения.

САПР ТП позволяет:

- ✓ проектировать технологические процессы в нескольких автоматизированных режимах;
- ✓ проводить выбор оборудования, инструментов и оснастки;
- ✓ проводить выбор и расчет режимов резания;
- ✓ рассчитывать себестоимость, а также материальные и трудовые затраты на производство;
- ✓ формировать все необходимые комплекты технологической документации, используемые на предприятии.

Платформа «ВЕРТИКАЛЬ» реализует принцип проектирования технологических процессов, в основе которого лежит иерархическая структура из операций, переходов, оборудования, профессий, оснастки и других технологических объектов, а также предоставляет возможность параллельного проектирования сложных и сквозных технологических процессов группой технологов в реальном режиме времени.

САПР ТП поддерживает двустороннюю связь параметров технологического процесса с параметрами графических документов КОМПАС-3D: чертежей, эскизов, 3D-моделей. При изменении значений параметров в графических документах происходит соответствующее изменение ассоциированных параметров технологического процесса (например, изменение размеров в тексте перехода при изменении соответствующего габарита на чертеже). Предоставляется возможность и обратного действия – обновление значения параметра в графическом документе в ответ на изменения в ТП [4–6]. На рис. 2 представлен технологический маршрут, привязанный к последовательности операций детали «Кронштейн».

Комплект карт		Предпросмотр карт	
Текст технологии		Атрибуты	
<b>005 Абразивно-отрезная</b>			
Станок абразивно-отрезной 8A230			
Резчик на пил.,нож.,стан. 17052			
1. Нарезать заготовки в размер (1)			
300 Линейка ГОСТ 427-75			
Rz 20 ФТ Образец шероховатости ГОСТ 9378-93			
2. Контроль исполнителем 100%			
3. Контроль ОТК - 5%			
010 Транспортирование			
Тележка АЩВ-062			
015 Термическая обработка			
020 Транспортирование			
Тележка АЩВ-062			
025 Токарно-винторезная			
Ст. спец. токарный 250ИТВ			
Токарь 06100			
Тара 6800-005			
Патрон 7100-0005 ГОСТ 2675-80			
Rz 20 ФТ Образец шероховатости ГОСТ 9378-93			
1. Установить, выверить и закрепить заготовку			
2. Подрезать торец "как чисто"			
2102-0071 Резец Т30К4 ГОСТ 18877-73			

Рис. 2. Технологический маршрут детали «Кронштейн»

M01	Пруток AMг6														Дубл. Взам. Подл.									
M02	Код 1146334																							
A	Цех	Уч.	PM																					
B																								
A03	135 00																							
B04	3813385028																							
A05	103 20																							
B06	3812673205																							
A07	135 00																							
B08	3171111139																							
A09	103 20																							
B10	3867191013																							
A11	214 41																							
B12																								
A13	103 04																							
B14	3445110006																							
A15	135 00																							
B16	3171111139																							
МК		Маршр		МК		Маршр		МК		Маршрутная карта														

На базе платформы «ВЕРТИКАЛЬ» пользователь может создавать ТП трех видов: технологический процесс изготовления детали, технологический процесс изготовления сборочной единицы и типовой/групповой технологический процесс.

Заключительный этап – формирование комплекта, который включает в себя документы, содержащие сводную информацию, необходимую для решения одной задачи или комплекса инженерно-технических (рис. 3), планово-экономических и организационных задач, полностью и однозначно определяющих технологический процесс (операцию) изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия).

К вспомогательным относят документы, применяемые при разработке, внедрении и функционировании технологических процессов и операций, например: карта заказа на проектирование технологической оснастки; акт внедрения технологического процесса и др.

После завершения разработки технологического процесса, который содержит все необходимые сведения для производства изделия, система «ВЕРТИКАЛЬ» позволяет в автоматическом режиме сформировать комплект технологической документации. В базовой поставке системы имеется большинство форм документов, предусмотренных ГОСТ серии ЕСКД (технологические карты и ведомости).

Модуль «ВЕРТИКАЛЬ-Отчеты» позволяет создать новые отчетные формы и алгоритмы отбора данных для размещения на форме по требованиям предприятия практически любой сложности.

В функции платформы входит поддержка актуальности технологической информации с помощью процессов управления изменениями и осуществление наполнения баз типовых и групповых технологических процессов в рамках

над проектом технологических и конструкторских отделов приводится «к общему знаменателю».

Конструкторские и технологические работы становятся максимально доступными и прозрачными. Увеличивается скорость проектирования, уровень понимания, качество выполненных работ. Доработки и создание новых проектов на основе аналогичных либо типовых ускоряют на порядок процесс проектирования, исключается бумажная составляющая, необходимость хранения чертежей и технологий в архивах, библиотеках и т. д.

CAPP-концепция позволяет эффективно и в короткие сроки выполнить назначение оборудования, инструментов, оснастки, сопроводив этот перечень операционным эскизом детали, что позволяет обеспечить инструментальный контроль после выполнения всех операций.

Дальнейшее повышение эффективности машиностроительного производства может быть реализовано за счет комплексного использования высокотехнологичных программных платформ. Наличие цифрового отображения, связанного с системами PLM, позволяет говорить о переходе предприятия к новому типу производства. В этих условиях 3D-модель детали выступает средством навигации в технологическом процессе. Автоматизированные системы проектирования дают возможность использовать любые из существующих технологических баз данных. Функционал платформ САПР предоставляет пользователям возможность параллельного проектирования сложных и сквозных конструкторских и технологических процессов группой инженеров в реальном режиме времени. Разграничение прав доступа и различные варианты защиты информации служат условием организации коллективной работы над проектом.

Развитие цифровизации производства будет возможно за счет расширения интеграции программных продуктов во все сферы деятельности предприятия, включая транспортировку готовых продуктов, отслеживание продукции при вводе ее в эксплуатацию и дальнейшее наблюдение за работой в процессе экс-

плуатации. Для этого потребуются объединение всех элементов производственной системы высокоскоростными сетями передачи информации.

#### Литература

1. Булавин, В. Ф. PLM-стратегия в мелкосерийном производстве машиностроительной отрасли / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев, В. А. Глазков // Известия высших учебных заведений. Серия: Машиностроение. – 2018. – № 8. – С. 37–49.
2. Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства изделий машиностроительного сектора в условиях малых предприятий / С. А. Казакова, В. В. Яхричев, В. Ф. Булавин и [др.]. // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике: сб. тр. Междунар. научн.-техн. конф. – Курск: ЮЗГУ, 2017. – С. 149–155.
3. Булавин, В. Ф. Валидация САД-продуктов в малых предприятиях машиностроительного сектора / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 5 (325). – С. 64–72.
4. CAD/CAPP-технологии в машиностроительном производстве / С. А. Казакова, В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев и [др.]. // Наука и современность 2018: материалы Междунар. XXXV научн. конф. – Москва: ЕНО, 2018. – Ч. 1, № 1 (35). – С. 70–73.
5. Булавин, В. Ф. Цифровые технологии в малом бизнесе машиностроительной отрасли / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев // САПР и графика. – 2018. – № 6. – С. 52–55.
6. Российские САД-системы в приборостроительном секторе производства / Е. В. Волков, В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев, и [др.]. // Эффективные исследования современности: материалы Междунар. XXXII научн. конф. – Москва: ЕНО, 2017. – Ч. 1, № 10 (32). – С. 65–68.
7. Высогорец, Я. В. САПР ТП «Вертикаль»: учеб. пособие для самостоятельной работы / Я. В. Высогорец. – Челябинск: ЮУрГУ, 2012. – 48 с.

**C.A. Kazakova**

Vologda optical-and-mechanical plant

**V. F. Bulavin**

Vologda State University

#### COMPLEX DIGITALIZATION OF PREPARATION MACHINE-BUILDING PRODUCTION

The article presents the experience of complex digitalization of engineering production based on the PLM platform. Presents the main directions of improvement of technological preparation of production. Examples of an integrated approach to fully digital preparation of engineering production are given. The experience of using software products is presented. The main directions of further digitalization of production are determined.

3D model, digital image, design and technological preparation of production, information environment.



*А.М. Полянский, Е.А. Смирнова*  
Вологодский государственный университет

## **ПРИМЕНЕНИЕ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА В АРХИТЕКТУРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Целью исследования, представленного в статье, является разработка многоуровневой архитектуры интеллектуального агентно-ориентированного программного комплекса, позволяющего заинтересованным лицам использовать представления, формируемые на основе архитектурной модели организационной системы, в процессах подготовки и принятия управленческих решений. В ходе исследования разработана и обоснована концептуальная многоуровневая архитектура, которая сочетает в себе многоагентный и сервисно-ориентированный подходы к проектированию программных продуктов. В представленном решении определены уровни модельных представлений, сервисов и интеллектуальных агентов. Каждый из уровней относительно независим от других, а способы взаимодействия между ними могут быть унифицированы в соответствии с рекомендациями международных стандартов. Также представлены модель среды существования интеллектуального агента, сценарий работы интеллектуального агента и его окружения, архитектура интеллектуальной агентно-сервисной системы; сформулированы достигнутые результаты и направления дальнейших исследований.

Архитектурная модель организационной системы, архитектурный взгляд, интеллектуальный агент, информационный сервис, лицо, принимающее решение, модель отношений, CASE-средство.

В планировании и реализации проектов создания и развития современных сложных организационных систем, в работах по автоматизации, аудиту или управлению их деятельностью принимают участие люди разных профессий, уровней компетенций и полномочий, имеющие различные интересы внутри этих систем или по отношению к ним. Для реализации своих интересов и согласования их с другими заинтересованными сторонами лицам, принимающим решения (далее – ЛПР) в отношении организационной системы (далее – ОС), необходимо иметь понятное, непротиворечивое и достаточное для принятия решения представление об ОС. Формирование таких представлений является основной задачей архитектурного моделирования сущности ОС.

Известны различные методологии представления сущности предприятия (EAM NIST, методики Gartner Group, Giga Group, META Group, TOGAF, POSIX 1003.23, GERAM, матрица Дж. Захмана и проч.), позволяющие моделировать организационные системы с разной степенью детальности представлений и интеграции их в единый сбалансированный набор моделей. В Российской Федерации действуют ГОСТ Р ИСО 15704-2008 [1] и ГОСТ Р 57100-2016 [2], рекомендуемые в качестве методологической основы архитектурного моделирования методика GERAM, которая предполагает формирование следующих видов представлений: функционального, информационного, ресурсного и организационного, а также представления целей, характерных для текущего этапа жизненного цикла предприятия. В этих представлениях задействованы основные группы элементов онтологии предприятия: активности и процессы, организация, стратегия, ресурсы, время. Основные правила применения языка описания предприятия изложены в ГОСТ

Р ИСО/МЭК 15414-2017 [3]. Компоненты указанных выше представлений, собранные в единое подмножество сообразно интересам и возможностям восприятия представителя конкретной роли ЛПР, образуют архитектурный взгляд (View) ЛПР на ОС.

На рынке программных продуктов представлены и успешно применяются в деятельности разработчиков системных и программных решений, консалтинговых и аудиторских фирм различные CASE-средства архитектурного моделирования (например, средства моделирования фирм BAAN, IBM, Software AG (поглотила IDC Scheer), Oracle и др.), которые позволяют не только строить модели ОС для целей их создания или автоматизации деятельности, но и вести репозитории модельных представлений на последующих стадиях жизненного цикла ОС. Средства моделирования и сами архитектурные модели всё в большей степени интегрируются в состав ресурсов корпоративных информационных систем, позволяя использовать их возможности не только при плановых работах по реинжинирингу ОС, но также при стратегическом и оперативном планировании и управлении. Актуальна и обратная задача: построение архитектурной модели ОС по следам активностей в её информационной системе [4].

Задавать параметры, формирующие взгляд ЛПР на ОС, в инструментальных средствах моделирования можно обычно на уровне настроек, которые выполняются в современных CASE-средствах (например, ARIS Business Architect [5]), как правило, вручную специалистом по моделированию и гораздо реже – самим пользователем, поскольку требуют понимания и навыка использования достаточно сложных инструментов, правил и зависимостей. В то же время, набор параметров архитектурного взгляда, отражающих



интересы представителя той или иной роли ЛПР, имеет достаточно широкие рамки (обычно существуют лишь ограничения по доступу к информации закрытых для него ресурсов хранилища архитектурной модели) и динамически меняется в зависимости от обстоятельств текущих отношений ЛПР с ОС: в одной ситуации нужен один набор параметров, в другой – иной.

Для того, чтобы не тратить время и силы ЛПР на углублённое изучение интерфейса CASE-средств и ручное конфигурирование параметров при переконфигурировании архитектурного взгляда, полезно использовать специальное программное средство, ведущее мониторинг ситуации в отношениях ЛПР с ОС и реагирующее на изменение этой ситуации созданием нового взгляда и представлением его ЛПР для принятия решения. В качестве такого программного средства может выступать интеллектуальный информационный агент (далее – ИИА) субъекта отношений, способный по значениям заданного набора параметров оценить характер изменения ситуации, и на основе определённой владельцем или выработанной самостоятельно политики поведения переконфигурировать набор параметров архитектурного взгляда на ОС, обратиться к среде ведения архитектурной модели ОС и предъявить полученное из неё архитектурное представление своему владельцу для оценки и принятия решения.

ИИА другого класса могут заниматься сбором и верификацией информации для пополнения хранилища данных архитектурной модели ОС. Есть в области моделирования сущности ОС и иные задачи,

для решения которых подходят агентные технологии искусственного интеллекта.

Архитектура интеллектуальной агентно-ориентированной системы ведения архитектурной модели ОС может быть построена на основе много-агентного и сервисно-ориентированного подходов. Преимущества такого комбинированного подхода, концептуальное решение и конкретный вариант реализации на примере интеллектуального агентно-ориентированного учебного комплекса описаны в [7]. По сравнению с известными вариантами [6], архитектурное решение [7] является более детализированным и прагматичным, а его программная реализация проверена на практике в Вологодском государственном университете. Для ведения архитектурной модели ОС может быть использовано программное решение близкой к [7] архитектуры. Рассмотрим далее некоторые аспекты такого решения.

На рис. 1 представлен эскиз модели среды существования интеллектуального агента, взаимодействующего в интересах ЛПР со средой ведения архитектурной модели ОС.

В правой части рисунка представлена работа ЛПР с архитектурной моделью ОС. В отсутствие активности ИИА настройка модели выполняется ЛПР вручную по собственной инициативе, что достаточно трудоёмко и проблематично при дефиците времени на принятие решения. Заданные средствами настройки параметры архитектурного взгляда позволяют сформировать запросы к хранилищу данных архитектурной модели и представить полученную из него информацию в виде, удобном для восприятия ЛПР.

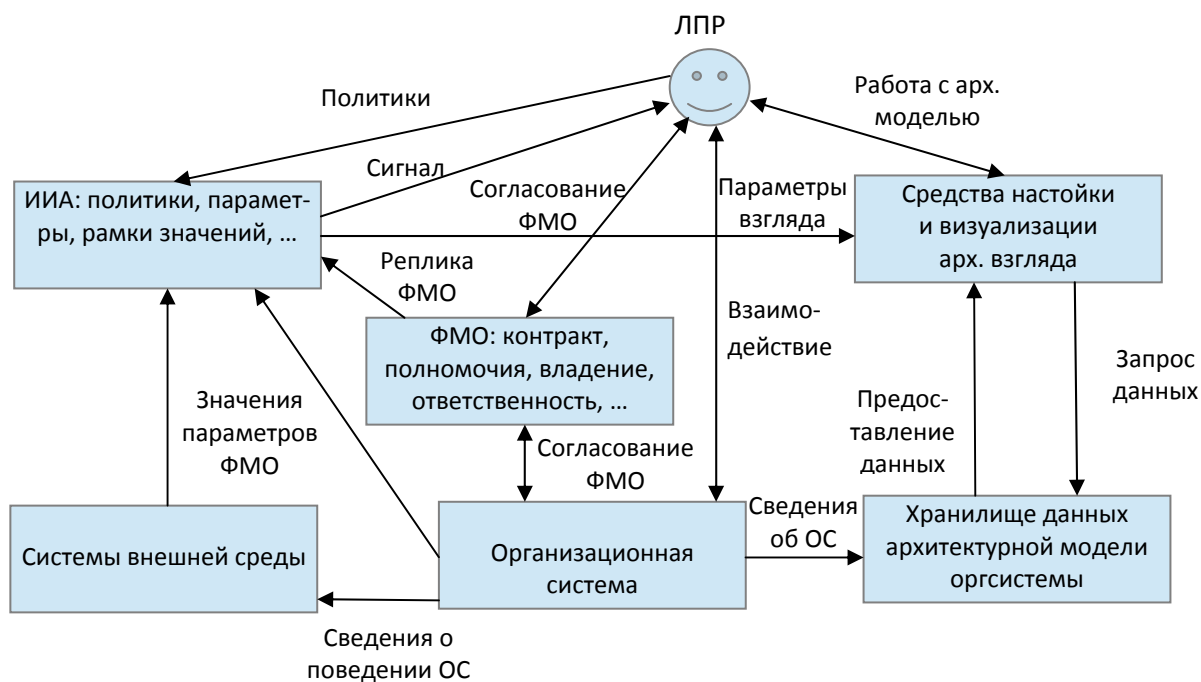


Рис. 1. Модель среды существования интеллектуального агента

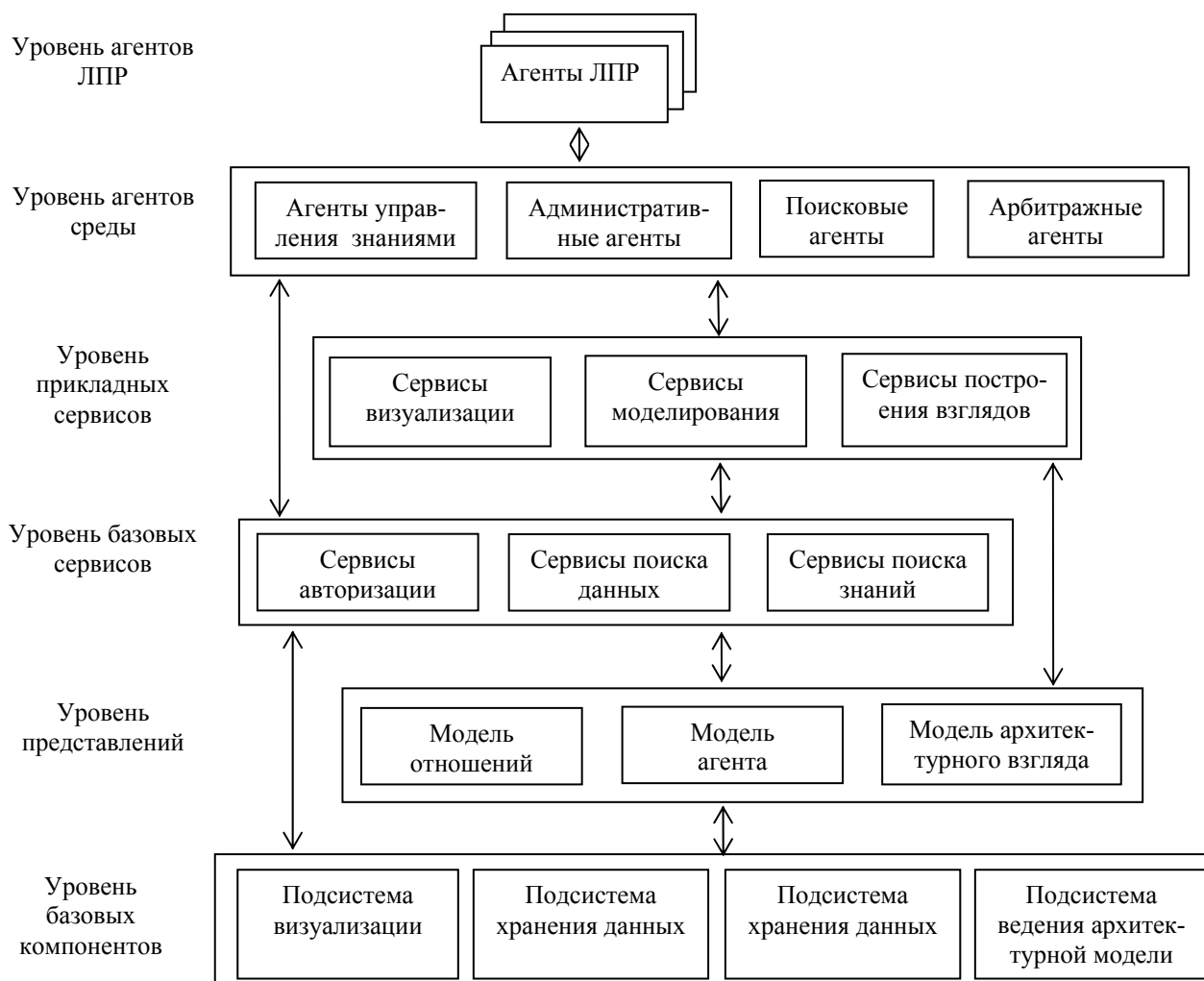


Рис. 2. Архитектура интеллектуальной агентно-сервисной системы

Система интересов и отношений между ЛПР и ОС должна быть описана формальным образом, понятным для программы-агента. Формальная модель отношений (далее – ФМО) включает в себя контракт, полномочия, ответственность, участие ЛПР в деловых процессах, владение объектами ОС. Модель отношений – внешняя сущность для программы-агента, поскольку меняется по воле внешних обстоятельств (например, по решениям ЛПР и других субъектов отношений), не контролируемых агентом, однако может создаваться её внутренняя реплика для наполнения текущей информацией по контролируемым параметрам ситуации, описываемой ФМО. При активации ИИА ЛПР задаёт политики поведения и рамки изменений параметров, при выходе за которые возникает новая ситуация, требующая обращения ЛПР к архитектурной модели ОС.

ИИА ведёт мониторинг параметров текущей ситуации в отношениях ЛПР и ОС, например, по корреспонденции и поручениям, обрабатываемым системой электронного документооборота (далее – СЭД), выявляя информацию, способную вызвать изменения в модели отношений. Источники информации могут находиться внутри (например, в СЭД) или за пределами ОС (например, в социальных сетях).

Допустим, в СЭД для ЛПР поступило поручение вышестоящего лица, исполнение которого выходит за рамки полномочий или не входит в круг установленных обязанностей ЛПР. ИИА диагностирует новую ситуацию в отношениях ЛПР и ОС и выявляет повод обратиться к архитектурной модели ОС на предмет того, чьи интересы ЛПР затронет, выполняя поручение, и какие могут быть последствия; что будет, если от поручения отказаться. Сформированные ИИА параметры взгляда передаются в виде настроек в среду ведения архитектурной модели ОС, а ЛПР получает сигнал об изменении ситуации и необходимости оценить её на основе подготовленного модельного представления.

Интерфейс между ИИА и средой ведения архитектурной модели должен обеспечить корректное и полное восприятие средой сформированного агентом набора параметров для построения архитектурного взгляда (или генерировать сообщение об ошибке, если агент претендует на область модели, ограниченную для его доступа). Это потребует разработки ряда информационных сервисов, которые могли бы взаимодействовать со средой ведения архитектурной модели.

Для визуализации и представления архитектурного взгляда ЛПР предпочтительно использовать штат-

ные средства из среды ведения модели ОС, хотя большинство современных CASE-средств имеют сервисы экспорта моделей в стандартных форматах. Использование штатных средств позволит опираться на уже сформированные у ЛПР навыки работы в среде ведения архитектурной модели.

Сценарий работы ИИА и его окружения выглядит следующим образом:

1. Агент актуализирует внутреннюю реплику ФМО.
2. Агент ведёт мониторинг параметров ситуации по данным из информационных систем ОС и внешних источников.
3. Агент сопоставляет текущие значения параметров с заданными рамками их изменения.
4. Агент возвращается на шаг 2 или 1 в соответствии с политиками поведения по таймерам или по событиям (например, изменение ФМО субъектами, активные действия ЛПР или субъектов ОС в отношении ЛПР), если значения параметров остаются в заданных пределах; если значения параметров выходят за рамки, установленные ЛПР, агент идентифицирует новую ситуацию, выбирает политику поведения.
5. В зависимости от выбранной политики агент сигнализирует ЛПР об изменении ситуации, формирует набор параметров взгляда и обращается с ними к среде ведения архитектурной модели ОС.
6. Среда ведения архитектурной модели перестраивает параметры взгляда и представляет его по запросу ЛПР.
7. ЛПР принимает решение о своём поведении, возможно – изменение модели отношений с ОС, возможно – смена набора параметров взгляда или рамок их изменения, политики поведения агента или сохранение статус-кво.
8. ЛПР при необходимости вносит изменения в конфигурацию агента или ФМО.

Для упрощения структуры и функций ИИА во взаимодействии со средой ведения архитектурной модели ОС возможно использование специализированных ИИА и информационных сервисов, решающих общие для ИИА различных субъектов взаимодействия задачи. Тогда архитектура агентно-сервисной системы примет вид, представленный на рис. 2 и близкий к решению, представленному в [7].

Рассмотрим основные уровни архитектурной модели предлагаемого программного решения. Ввиду значительного разнообразия функций и уровней сложности интеллектуальных агентов предлагается гибридная архитектура системы. Среди подмножества агентов ЛПР каждый ИИА реализует логику взаимодействия с пользователем и архитектурной моделью ОС в зависимости от роли ЛПР и присущих ей возможностей и полномочий. Среди агентов среды могут быть выделены виды агентов управления знаниями архитектурной модели ОС, административных и поисковых агентов. Представляется полезным использовать горизонтальные связи между агентами ЛПР для снятия части противоречий без обращения к ЛПР, если они касаются формальных вопросов типа согласования расписаний, рассылки уведомлений и проч. Для регулирования отношений между агентами ЛПР выделен отдельный вид арбитражных агентов.

Уровни сервисов обеспечивают исполнение запросов агентов по работе с данными и знаниями архитектурной модели ОС, ведение истории работы ЛПР с архитектурными взглядами и их модификаций, преобразование форматов представления информации и пр. По аналогии с [7] предлагается использовать уровень базовых и уровень прикладных сервисов. Уровень базовых сервисов отвечает за выполнение запросов агентов к низкоуровневым компонентам модели (авторизация, поиск данных и знаний в хранилище), уровень прикладных сервисов применяется для решения задач бизнес-логики: конструирование элементов архитектурного взгляда, построение модельных представлений по заданным агентами параметрам и зависимостям, формирование визуальных представлений результатов моделирования в удобной для ЛПР форме (текст, таблицы, графика, анимация и т. п.).

Компоненты уровня представлений позволяют абстрагироваться от особенностей конкретных СУБД и физических моделей данных и знаний. В первую очередь это формальная модель отношений ЛПР и ОС, модели агента ЛПР и других видов агентов, модель архитектурного взгляда, интегрированная архитектурная модель ОС и, возможно, ряд других моделей.

Уровень базовых компонентов предлагаемого решения включает элементы операционной системы, СУБД, CASE-средства, офисный пакет продуктов и ряд специфических для решения приложений.

Рис. 2 даёт лишь самое общее представление об архитектуре предлагаемого решения, которая требует дальнейшей детализации в части элементов модели и связей между ними.

Представленное выше концептуальное решение задачи предполагает дальнейшую разработку и конкретизацию по следующим основным направлениям:

1. Детальная архитектура интеллектуальной агентно-ориентированной системы ведения архитектурной модели ОС.
2. Архитектуры и уровни интеллекта различных классов агентов.
3. Система информационных сервисов взаимодействия со средой ведения модели ОС.
4. Формальные модели отношений между ЛПР и ОС, политики поведения.
5. Модели взаимодействия между агентами различных уровней и со средой ведения архитектурной модели ОС.
6. Возможности интеграции разрабатываемой системы с существующими CASE-средствами, системами поддержки принятия решений и оперативного управления, ERP-системами.

## Литература

1. ГОСТ Р 15704-2008. Промышленные автоматизированные системы. Требования к стандартным архитектурам и методологиям предприятия. – Введ. 01.01.2010. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 50 с.
2. ГОСТ Р 57100-2016. Системная и программная инженерия. Описание архитектуры. – Введ. 01.09.2017. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 36 с.

3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15414-2017 Информационные технологии. Открытая Распределительная обработка. Эталонная модель. Язык описания предприятия. – Введ. 01.01.2018. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 54 с.

4. Полянский, А. М. Построение архитектурной модели предприятия на основе данных её планово-учётных систем / А. М. Полянский, Е. А. Смирнова // Бизнес. Наука. Образование: Проблемы, перспективы, стратегии: материалы российской заоч. науч.-практич. конф. – Вологда, 2015. – Т. 2. – С. 451–456.

5. Сайт компании SoftwareAG [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://resources.softwareag.com/aris>.

6. Швецов, А. Н. Агентно-ориентированные системы: методологии проектирования [Электронный ресурс]: монография / А. Н. Швецов. – Вологда: ВоГУ, 2016. – 191 с.: ил. – Режим доступа: [http://www.library.vstu.edu.ru/biblio/shvetsov/book8/2016\\_shvetsov\\_ag\\_or\\_sist.pdf](http://www.library.vstu.edu.ru/biblio/shvetsov/book8/2016_shvetsov_ag_or_sist.pdf).

7. Архитектура интеллектуального агентно-ориентированного учебного комплекса для подготовки специалистов технического профиля / А. Н. Швецов, С. Ю. Ржеуцкая, А. П. Сергушичева, А. А. Суконщиков // Открытое образование. – Москва: РЭУ им. Плеханова, 2018. – Т. 2, № 3. С. 14–24.

**A.M. Polyanskiy, E.A. Smirnova**  
Vologda State University

#### **APPLICATION OF AGENT-BASED APPROACH IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS ARCHITECTURAL MODELING**

The purpose of the study presented in the article is to develop a multi-level architecture of intelligent agent-based software system that allows stakeholders to use the views formed on the basis of the architectural model of the organizational system in the preparation and decision-making processes. In the course of the study, a conceptual multi-level architecture was developed and grounded; it combines multi-agent and service-oriented approaches to the design of software products. The presented solution defines the levels of model representations, services and intelligent agents; each level is relatively independent of the others and the ways of interaction between them can be unified in accordance with the recommendations of international standards. The model of the intelligent agent environment, the scenario of the intelligent agent work and its environment, the architecture of the intelligent agent-service system are presented. The achieved results and directions of further research are defined.

Architectural model of organizational system; architectural view; intellectual agent; information service; decision maker; model of relations; CASE-tool.



## УПРАВЛЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ НИЗКОЙ ЗАГРУЗКЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассматривается работа двигателей при низких коэффициентах загрузки. Обосновывается необходимость снижения питающего напряжения до уровня, обеспечивающего оптимальный КПД. Предлагается использовать для регулирования напряжения устройство «Normel» в режиме снижения напряжения в пределах 5%. С целью расширения диапазона регулирования предложено высшую обмотку трансформатора выполнять с отпайками в диапазоне 20% (2х10%). Коммутация отпайек осуществляется с помощью электронных IGBT-ключей, управляемых посредством микропроцессора. При таком способе регулирования достигается высокий КПД двигателя и, как следствие, снижение потребления электроэнергии.

Двигатель, регулирование напряжения, повышение КПД, IGBT-ключи.

Основными приемниками электроэнергии на промышленных предприятиях являются асинхронные двигатели, которые в процессе эксплуатации работают с нагрузками на валу отличными от номинальных. Это обусловлено как технологическим процессом производства, так и его организацией. При установленных показателях качества электроэнергии в питающей сети эффективность работы двигателей зависит от загрузки на валу. Анализ коэффициентов загрузки двигателей, используемых в различных отраслях промышленности, показывает, что только двигатели, работающие в длительном режиме, имеют высокие коэффициенты загрузки – это двигатели насосов, компрессоров, вентиляторов. Коэффициенты загрузки других потребителей варьируются в широких пределах. Так, исследования режимов работы электродвигателей технологических агрегатов бумагоделательной промышленности показали, что большинство из них имеют низкие коэффициенты загрузки: установка по производству технологической щепы – 0,3; цепной поперечный транспортер – 0,2; конвейер ленточный – 0,45; лесопильная рама первого ряда – 0,43; механизм поштучной выдачи досок – 0,3; дымососы – 0,54; бревно-поворотный станок – 0,2.

КПД электродвигателей зависит от степени их загрузки. Одним из наиболее простых способов повышения КПД при низкой загрузке является переключение обмоток статора двигателя с треугольника на звезду. Это приемлемо, если загрузка стабильно низкая и переключение обмоток обеспечивает высокий КПД. Однако при разных нагрузках КПД двигателя будет зависеть от потребляемой мощности и мощности на валу. При неизменно низкой нагрузке и постоянной частоте тока в сети способом, обеспечивающим повышение КПД двигателя, является понижение питающего напряжения.

В настоящее время известны принципы регулирования напряжения при переменной нагрузке – это применение стабилизаторов напряжения с нелинейными элементами, в качестве которых служит параллельный или последовательный резонансный контур, содержащий насыщенный дроссель и конденсатор. Широко известны тиристорные стабилизаторы напряжения, состоящие из ключей, схем сравнения и управления.

Известны также стабилизаторы со ступенчатой формой выходного напряжения, состоящие из сетевого трансформатора, коммутирующего устройства, схемы сравнения и управления.

Все перечисленные устройства обладают существенным недостатком – они искажают форму кривой напряжения питающей сети и имеют значительные массогабаритные характеристики.

Для регулирования напряжения предлагается использовать устройство «NORMEL», предназначенное для работы в сетях напряжением 400/230 В. Проведенные исследования [1] показали его высокие характеристики.

Изделие «NORMEL» обеспечивает контроль входного напряжения в диапазоне 170÷260 В и одноступенчатое регулирование ( $\pm 5\%$ ) по каждой фазе отдельно. При уровнях напряжения, выходящих за допустимые пределы, рекомендуется использовать последовательное включение нескольких устройств, что расширяет диапазон регулирования напряжения.

Изделие «NORMEL» может работать в следующих режимах: «ТРАНЗИТ», когда напряжения нагрузки и сети одинаковые; «ПОНИЖЕНИЕ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ» – в случае, когда напряжение сети выше напряжения нагрузки; «ПОВЫШЕНИЕ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ», когда напряжение сети ниже напряжения нагрузки. Мощность нагрузки может изменяться от 0 до 100%, что не сказывается на качестве нормализуемого напряжения.

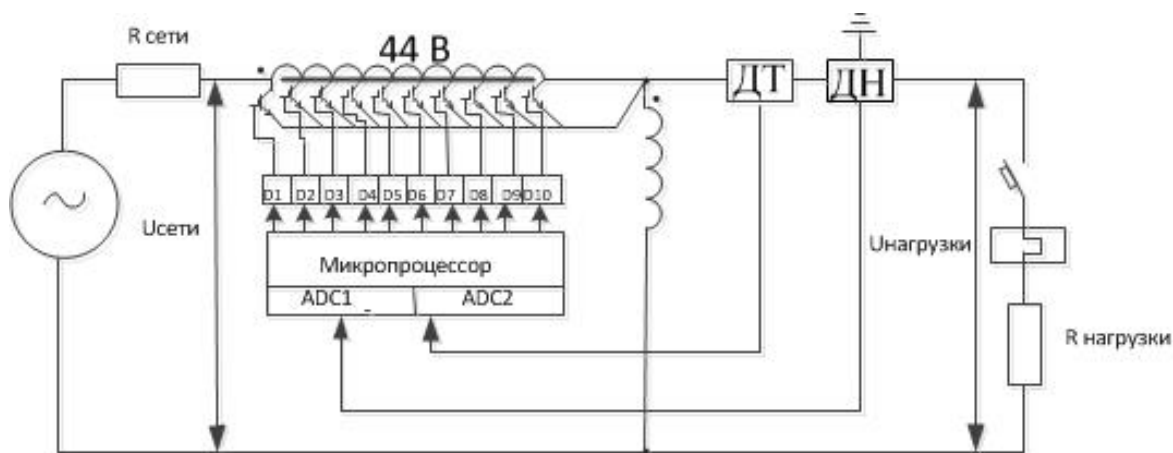


Рис. 1. Структурная схема автоматического регулирования напряжения двигателя при низкой нагрузке

Конструкция устройства не содержит в схеме силовых полупроводниковых элементов, т. е. не является источником высших гармоник. Процесс нормализации происходит без разрыва питающей цепи и искажения синусоид напряжения и тока.

Устройство препятствует проникновению в нагрузку из сети импульсных высокочастотных помех.

Основные отличия изделия «NORMEL» от общеизвестных стабилизаторов напряжения состоят в следующем:

- любой стабилизатор предназначен для удержания его выходного напряжения на заданном уровне с погрешностью  $\pm 1...2\%$  и, как правило, имеет низкий КПД и нелинейную вольтамперную характеристику, что приводит к искажению синусоидальной формы напряжения;

- стабилизаторы автотрансформаторного типа характеризуются быстрым изнашиванием кинематического механизма.

Принцип работы энергосберегающего устройства переменного напряжения «NORMEL» основан на применении трансформатора типа ОСМ, регулирующего напряжение и включаемого по различным схемам. Устройство не создает искажений формы кривой напряжения питающей сети. Недостатком устройства является одноступенчатое регулирование напряжения в пределах  $\pm 5\%$  в диапазоне 170–260 В, что не обеспечивает высокого КПД при низких коэффициентах загрузки потребителей электроэнергии [2].

С целью увеличения диапазона регулирования напряжения устройства в сетевой обмотке трансформатора предлагается предусмотреть автоматическое регулирование с шагом  $-20\%$  ( $-2\% \times 10$ ) посредством применения IGBT-ключей (рис. 1).

В каждую фазу сети включается трансформатор ОСМ как автотрансформатор с полярностью, обозначенной точками. Обмотка высшего напряжения  $W1$  индуцирует в обмотке низшего напряжения  $W2$  ЭДС численно равную напряжению  $U_2$ , направленному встречно напряжению сети. Напряжение на нагрузке равно разности сетевого напряжения и  $U_2$ . Основная мощность из сети в нагрузку передается за счет электрической связи. Доля мощности, передаваемой из сети в нагрузку за счет электромагнитной связи,

в  $K$  раз меньше мощности, передаваемой за счет электрической связи (здесь  $K=W1/W2$  – коэффициент трансформации трансформатора), это обеспечивает уменьшение мощности регулировочного трансформатора в  $K$  раз по сравнению с мощностью нагрузки.

В представленной схеме обмотка высшего напряжения имеет 10 отпаек с шагом  $2\%$  в сторону снижения напряжения. Коммутация отпаек осуществляется с помощью IGBT-ключей, управляемых посредством микропроцессора. Значения тока и напряжения в цепи питания нагрузки с датчиков тока (ДТ) и напряжения (ДН) подаются на аналого-цифровые преобразователи ADC1, ADC2. В памяти микропроцессора записана информация значений токов при различной нагрузке двигателей и значения напряжений, при которых КПД двигателя будет наивысшим. В результате сравнения полученной информации с микропроцессора через драйверы D1...D10 подается сигнал на открытие соответствующего IGBT-ключа, при этом часть обмотки трансформатора шунтируется. Напряжение на двигателе снижается на величину, определяемую напряжением зашунтированной части обмотки, КПД двигателя при этом повышается.

Применение устройства «NORMEL» с предложенным диапазоном изменения напряжения в каждой фазе двигателя позволяет также снизить несимметрию напряжения на обмотках, что приводит к дополнительному повышению КПД двигателя.

При работе двигателя с пониженным напряжением  $15\%$  и более возможно размыкание контактов пускателя. Во избежание этого предлагается использовать питание пускателей от источников постоянного тока.

#### Литература

1. Старкова, Л. Е. Экономия электроэнергии в низковольтных сетях / Л. Е. Старкова // Энергоэффективные технологии в современном учреждении: материалы Междунар. энергетического форума. – Вологда: ВоГТУ, 2013. – С. 113–118.
2. Старкова, Л. Е. Качество электрической энергии: учеб. пособие / Л. Е. Старкова. – Вологда: ВоГУ, 2015. – 87 с.

## **POWER CONSUMPTION MANAGING OF UNDERUSED ENGINES**

The article examines the performance of engines with the low use coefficient. It grounds the need to reduce the supply voltage to a level that provides optimal efficiency. The author proposes to use the device “NORMEL” in the voltage reduction mode, which regulates the voltage in the range of 5%. In order to expand the range of regulation, it was proposed to carry out the high winding of the transformer with tapings in the range of - 20% (2x10%). The switching of taps is performed using IGBT keys controlled by a microprocessor. With this method of regulation, a high engine efficiency and, as a result, a reduction in electricity consumption are achieved.

Engine, voltage regulation, efficiency increase, IGBT keys



**С.М. Шекин, М.М. Никифорова**  
Вологодский государственный университет

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Рассмотрены теоретические основы метода прогнозирования, заключающегося в том, что определяется будущее не самого прогнозируемого параметра, а его второй производной, которая несет в себе энергетический смысл процесса. Показано, что если определить оптимистический и пессимистический варианты развития, то управленческие решения позволят направить развитие процесса в нужном направлении.

Прогнозирование, вторая производная, управленческие решения, производство.

Прогнозирование в последние годы становится актуальным практически во всех областях деятельности и знаний. Самые разные технологии прогнозирования широко используются как частным сектором, так и государственными органами – от прогнозирования разработки новых продуктов или технических возможностей конкурентов до создания сценариев для прогнозирования воздействия отдельных факторов на будущие процессы.

Реальные процессы редко бывают детерминированы и зачастую именно отдельные факторы определяют дальнейший ход развития. Пригожин и Гленсдорф [1] сформулировали принцип: чем меньше производство энтропии в реальных процессах, тем более система организована. Следовательно, тем легче она поддается прогнозированию. В работах Пригожина [2] получен инструмент, с помощью которого можно отслеживать эволюцию системы. Рост хаоса, или наоборот, упорядоченность процесса зависит не только от изменений самой энтропии, но от флуктуаций ее второй производной. Увеличиваются ли флуктуации, остаются ли постоянными, уменьшаются ли – это определяет исход, победу, самоорганизацию и укрепление живучести или поражение, катастрофу или гибель.

Явления, описываемые в рамках понятий бифуркаций, самоорганизации и эволюции структур, относятся не только к физике. Они на самом деле присущи природе в целом и поэтому могут использоваться во всех других науках, которые ее описывают: химии, биологии, геологии, географии, экологии. Связано это с тем, что методы анализа таких структур и применение математического аппарата те же самые, что и для нелинейных открытых физических систем. Большое сходство уравнений для описания этих явлений указывает на структурный изоморфизм процессов эволюции, изучаемых в естественных и гуманитарных науках.

В подавляющем большинстве случаев, особенно для общественных и социальных систем, где понятие энтропия носит условный характер, необходимо и достаточно знать направление изменения энтропии, характер ее амплитудных изменений, скорость и ускорение их изменений, то есть не численное ее значение, а то, как она себя ведет во времени.

При невозможности подсчитать энтропию процесса численно, вполне допустимо в качестве определяющего и заменяющего энтропию параметра брать один или несколько таких, которые увеличиваются в процессе эволюции системы, ведут себя аналогично энтропии. Такой параметр может расти (или деградировать) вместе с ростом времени.

Мы предполагаем, что вторая производная какого-либо параметра по времени несет в себе «энергетический» смысл, она становится «аналогом энергии», и по ее изменению можно видеть направление развития системы – прогресс, деградация, рост, устойчивость и т. д.

Например, если дважды продифференцировать по времени график пройденного пути, то получим график изменения ускорения. Сопоставление их друг с другом хорошо отражает взаимосвязь: если кривая пути растет круто вверх, то на графике ускорения отражается скачок второй производной, а это значит, что в систему поступила энергетическая подпитка (если это автомобиль, то в его двигатель увеличилось поступление топлива). Вторая производная здесь играет роль «аналога энергии».

Некоторая функция  $s(t)$  может быть представлена бесконечным рядом Тейлора:

$$s(t) = s(t_1) + s'(t_1) t/1! + s''(t_1) t^2/2! + s'''(t_1) t^3/3! + \dots$$

Существо ряда Тейлора состоит в том, что сигнал сложной формы представляется взвешенной суммой простых стандартных степенных сигналов вида  $t_k$ . Если в какой-то момент времени  $t_1$  известны (измерены или вычислены) значение сигнала  $s(t_1)$ , его скорость  $s'(t_1)$ , ускорение  $s''(t_1)$  и более высокие производные по времени, то значения сигнала для последующих моментов времени  $t$  определяются как сумма исходного значения сигнала и его приращений, обусловленных скоростью, ускорением и т. д. [3].

Поэтому очень важно знать первичные (исходные, фактические) данные об изменяющейся системе, например: рост населения, пройденное расстояние, изменение рождаемости, рост экспорта товара, рост заработной платы и т. д. Причем интерес представляет не только сам изменяющийся параметр, но и очень



чувствительная функция, описывающая его изменение, – флуктуация второй производной [4].

В таких случаях интерес представляет использование возможности оценки эффекта управляющих решений и воздействий их величины, характера, направления и т. д. Поэтому для прогнозирования какого-либо развития прием в качестве исследуемого фактора численные значения параметра в их изменении по времени, дважды продифференцируем, построим картину изменений и установим ближайшее будущее значение второй производной, чтобы затем после интегрирования получить будущее значение исследуемого фактора.

Методика нового способа прогнозирования работает на ближайшую масштабную единицу – секунду, час, день, месяц. То есть, если временная ось построена в годах, то прогноз осуществляется на ближайший год, если в часах – то на ближайший час. Попытки увеличить глубину прогноза приводят не просто к большим погрешностям, но к совершенно неверному прогнозу.

Поэтому данная методика является тактическим инструментом прогноза для немедленных управленческих решений.

Рассмотрим такой показатель, как данные по прибыли предприятия, показанные в табл. 1.

В программе Excel производим построение ряда исходных данных по чистой прибыли. Затем формируем ряд первой производной. Для этого в ячейку D3 записываем функцию ( $=D2-C2$ ), то есть первая производная будет равна разности между следующим значением ряда и предыдущим, то есть  $4135 - (-352) = 4487$ . Затем с помощью курсора захватываем эту функцию и переносим на весь ряд № 3 (табл. 2).

Затем повторяем эту процедуру для построения второй производной, теперь в ячейке E4 записываем  $=E3-D3$ , переносим для ряда 4 и получаем таблицу, показанную в табл. 3.

Затем для этого ряда 4 задаем команду построения диаграммы (рис. 1).

Таблица 1

**Изменение чистой прибыли предприятия по годам**

Показатели/год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Прогноз
Чистая прибыль, тыс. руб	-352	4135	86131	53253	431734	82724	-

Таблица 2

**Получение первой производной функции «чистой прибыли» предприятия по годам**

Показатели/год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Прогноз
Чистая прибыль, тыс. руб.	-352	4135	86131	53253	431734	82724	-
Вторая производная, тыс. руб	-	4487	81996	32878	378481	-349010	-

Таблица 3

**Получение второй производной функции «чистой прибыли» предприятия по годам**

Показатели/год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Прогноз
Чистая прибыль, тыс. руб.	-352	4135	86131	53253	431734	82724	-
Первая производная, тыс. руб.	-	4487	81996	32878	378481	-349010	-
Вторая производная, тыс. руб.	-	-	77509	114874	411359	-727491	-

Тыс. руб.

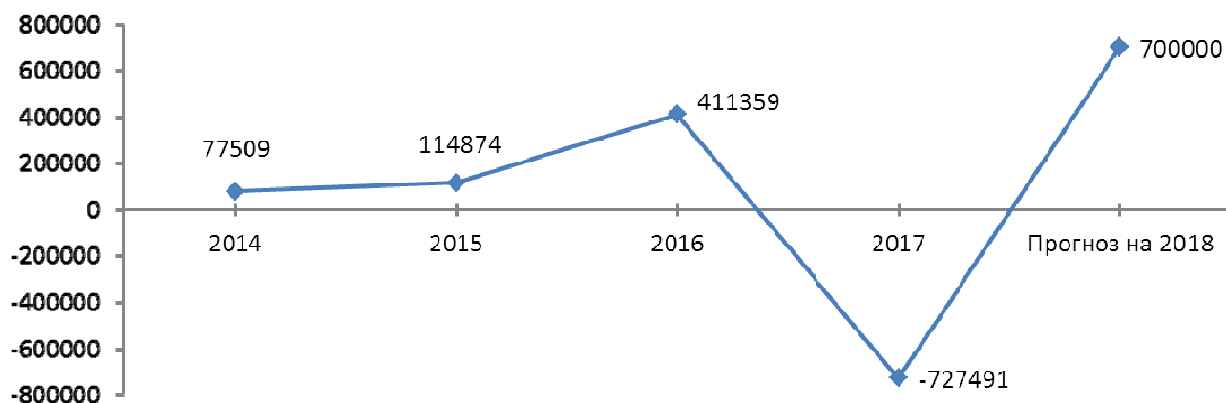


Рис. 1. График второй производной функции «чистая прибыль» и прогноз на 2018 год

Таблица 4

## Получение прогноза «чистой прибыли» предприятия на 2018 год

Показатели/год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Прогноз
Чистая прибыль, тыс. руб.	-352	4135	86131	53253	431734	82724	<b>433714</b>
Первая производная, тыс. руб.	-	4487	81996	32878	378481	-349010	350990
Вторая производная, тыс. руб.	-	-	77509	114874	411359	-727491	700000

Таблица 5

## Получение прогноза «чистой прибыли» предприятия на 2018-2023 годы (пессимистический прогноз)

Показатели/год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Чистая прибыль, тыс. руб.	-352	4135	86131	53253	431734	82724	<b>133714</b>	<b>-115296</b>	<b>-164306</b>	<b>-313316</b>	<b>-412326</b>	<b>-511336</b>
Первая производная, тыс. руб.	-	4487	81996	32878	378481	-349010	50990	-249010	-49010	-149010	-99010	-99010
Вторая производная, тыс. руб.	-	-	77509	114874	411359	-727491	400000	-300000	200000	-100000	50000	0

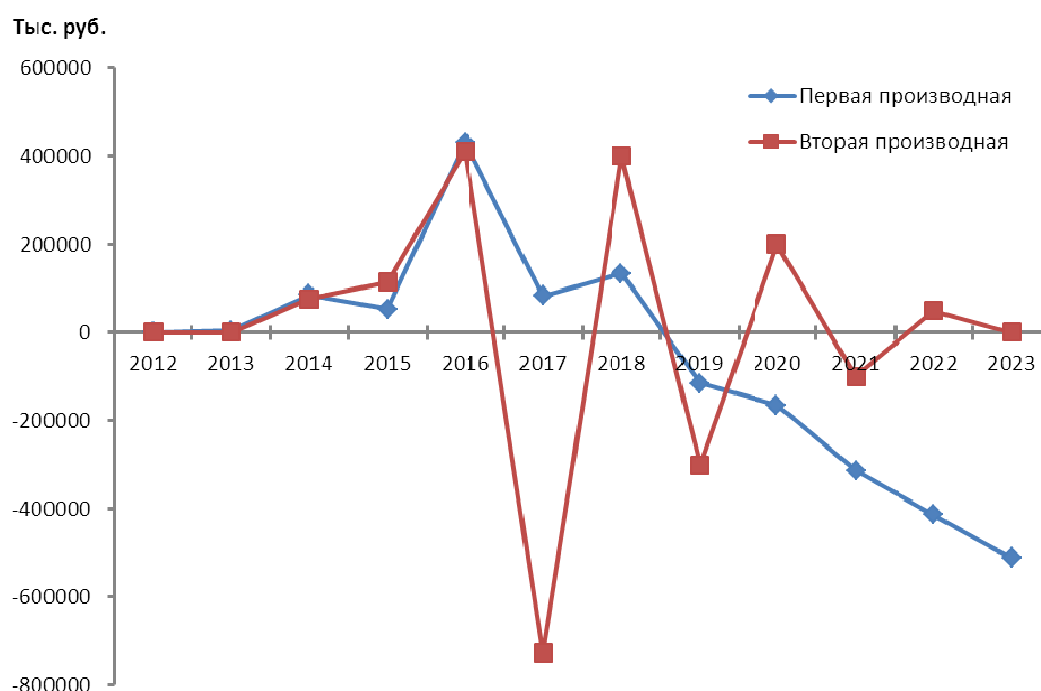


Рис. 2. Пессимистический прогноз, обусловленный постепенно уменьшающейся амплитудой второй производной, сводящейся в будущем к нулю

На этом графике хорошо видно, что вторая производная стремится к росту флюктуаций и следующее ее значение почти наверняка окажется в районе 700000 – это наш прогноз. Ставим это значение в ячейку I4. Затем в ячейку I3 записываем функцию  $=I4+I3$  – это операция интегрирования – и получаем прогноз первой производной. Далее интегрируем: в ячейку I2 записываем  $=I3+I2$  и получаем значение 433714 – это прогноз искомого параметра на 2018 год (табл. 4).

То есть на 2018 год чистая прибыль прогнозируется примерно на уровне 2016 года, а возможно и больше.

Можно произвести прогноз на более отдаленную перспективу, на несколько лет вперед. Но это отдельная работа, которая должна включать в себя анализ «окружающей среды» и факторов, сопутствующих данному

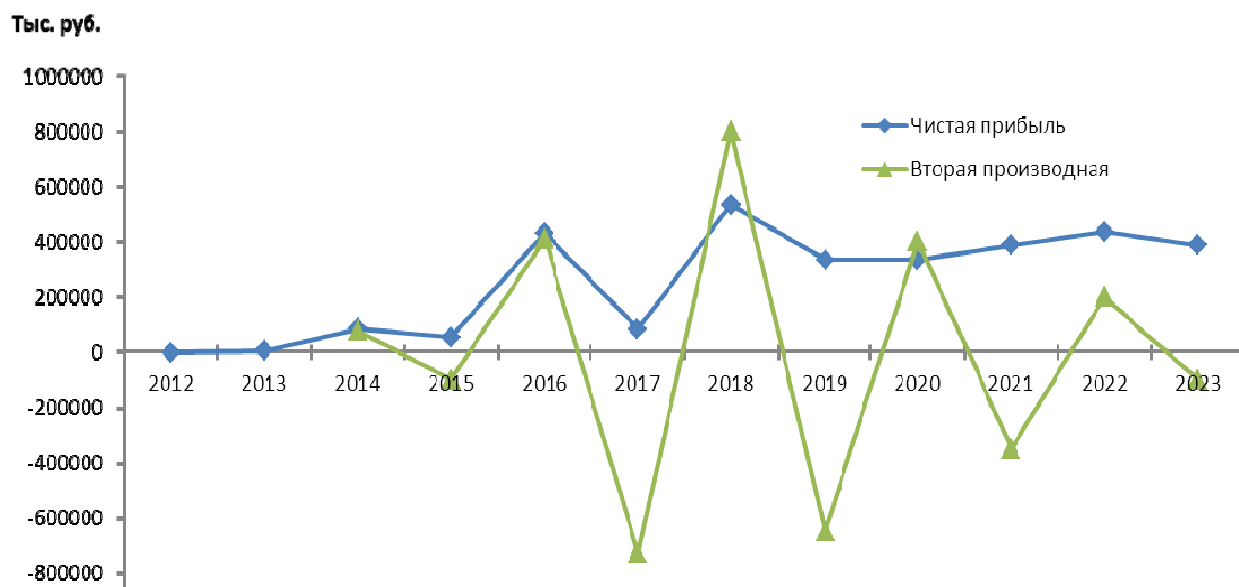
процессу, которые пока еще неизвестны. Поэтому описанную процедуру следует повторять два раза или более для разных вариантов развития сценария. Дальнюю перспективу следует прогнозировать в коридоре возможных вариантов с использованием инструментов прогнозирования.

Такое развитие процесса показано на рис. 2, 3 (пессимистический и оптимистический прогнозы).

На рисунках хорошо видно, что для обоих случаев исходные данные одинаковые, но в оптимистическом варианте (рис. 3) в 2018 году были предприняты усилия для поддержки, были произведены «вливания энергии» в процесс (число 800000), а в пессимистическом варианте (рис. 2) сэкономили на расходах, вторая производная в два раза меньше (400000), и на фоне больших амплитуд это сыграло ключевую роль – прибыль пошла в яму.

**Получение прогноза «чистой прибыли» предприятия  
на 2018-2023 годы (оптимистический прогноз)**

Показатели/год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Чистая прибыль, тыс. руб.	-352	4135	86131	53253	431734	82724	<b>533714</b>	<b>334704</b>	<b>335069</b>	<b>386684</b>	<b>437674</b>	<b>388664</b>
Первая производная, тыс. руб.	-	4487	81996	32878	378481	-349010	50990	-249010	-49010	-149010	-99010	-99010
Вторая производная, тыс. руб.	-	-	77509	-100000	411359	-727491	800000	-650000	400000	-350000	200000	-100000



*Рис. 3. Оптимистический прогноз. Показана постепенно уменьшающаяся амплитуда второй производной, но с гораздо большим размахом амплитуд и не сводящаяся к нулю*

Выявленный анализ показал, что в данном процессе 2018 год имеет решающее, ключевое значение, это шанс, который нельзя упускать и игнорировать.

Главный смысл решенной задачи не в том, что наблюдатель пассивно ждет наступления реальности, а в том, что наблюдатель может сам стать создателем той реальности, которая ему нужна, и он знает, что для этого надо сделать. Разработан новый способ прогнозирования эволюции для детерминированных и стохастических систем, и показана работоспособность методики прогнозирования в различных процессах, в том числе финансовых системах.

#### Литература

1. Пригожин, И. Хаос, время, квант / И. Пригожин; пер. с англ. — 3-е изд. — Москва: Эдиториал УРСС, 2001. — 250 с.
2. Пригожин, И. Порядок из хаоса / И. Пригожин; пер. с англ. — 3-е изд. — Москва: Эдиториал УРСС,

2001. — 312 с.

3. Федосов, Б. Т. Прогнозирование, анализ, синтез и моделирование сигналов управления [Электронный ресурс] / Б. Т. Федосов. — Режим доступа: [http://model.exponenta.ru/bt/bt\\_0005.html](http://model.exponenta.ru/bt/bt_0005.html).

4. Щекин, С. М. Прогнозирование эволюции системы по флуктуациям параметров / С. М. Щекин // Вузская наука — региону: материалы второй всероссийской науч.-технич. конф. — Вологда, ВоГТУ, 2004. — С. 106–109.

**S.M. Shchekin, M.M. Nikiforova**  
Vologda State University

**FORECASTING SYSTEMS DEVELOPMENT  
FOR GENERATING MANAGEMENT SOLUTIONS**

The theoretical basis of the method of forecasting, which doesn't determine the future of the parameter being predicted, but its second derivative which carries the energy meaning of the process is considered in the article. It is shown that if we determine the optimistic and pessimistic possibilities of development, the management decisions will allow us to direct the development of the process correctly.

Forecasting, second derivative, management decisions



**К.В. Кияненко**

Вологодский государственный университет

## СОЦИАЛЬНО-АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ СМЕШАННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В статье рассматриваются понятие, принципы и факторы формирования, структура и элементы социального компонента архитектурной программы жилых комплексов смешанного использования<sup>1</sup>.

Жилые комплексы, архитектурное программирование, социальные модели, методология проектирования.

Общественно-жилые комплексы (ОЖК) или «жилые комплексы смешанного использования», как их называют в мире (*англ.* residential mixed-use developments, MUD), – это один из самых сложных объектов предпроектного архитектурного программирования, особенно в отношении социального компонента программ. О том, что разработка социальных обоснований, концепций, моделей ОЖК/MUD сегодня становится самостоятельной исследовательской задачей говорят девелоперы, управляющие недвижимостью, архитекторы. Так, специалист сферы системного анализа В.Н. Волкова предлагает разрабатывать целостную *систему моделей* многофункционального комплекса, которая должна охватывать все уровни и этапы его формирования, в том числе теоретико-методологический или концептуальный, научно-исследовательский, проектный, инженерно-конструкторский, технологический и уровень материального воплощения/реализации здания [3]. О ведущей роли при формировании жилища *социальных моделей*, которые «должны быть осмыслены широким кругом людей, занятых в сфере планирования, архитектуры, строительства, жилищно-коммунального хозяйства» говорит И.П. Прядко [10, с. 1]. Экономика недвижимости обращается к *концепции* многофункциональных комплексов как к инструменту, который определяет «правильное сочетание востребованных форматов в едином комплексе, а также создание своего рода концептуальной идеи ... будущего проекта, которая позволит ему отличаться от уже существующих на рынке объектов и быть более конкурентоспособным» [11].

Заметен растущий интерес к социальным моделям ОЖК среди архитекторов. Канд. арх. А.В. Жоголева называет «проектирование моделей жилища как социальной категории ... важной задачей архитектурно-градостроительного проектирования» [6]. Методологическое значение СФМ подчёркивает проф.

В. М. Молчанов, говоря, что «социально-функциональное моделирование жилища представляет собой эффективный способ перевода социальных характеристик и параметров в пространственные» [9, с. 35]. Исследователь одного из типов ОЖК – офисно-жилых комплексов – канд. арх. В.А. Колгашкина говорит о *теоретических моделях* ОЖК, называя их разновидностями: «функциональная», «социокультурная» и «комбинированная». Выдвигается понятие «опорной функциональной программы», в котором воплощается комбинация функций и размеров комплексов [7, с. 30].

Идея разработки социальных моделей, концепций или программ как самостоятельной исследовательской задачи вообще и в отношении общественно-жилых комплексов в частности уже вполне овладела профессиональным сознанием архитекторов и связанных с ними смежных специалистов. Но что собой представляет упоминаемый комплекс социальных характеристик, каковы факторы, принципы, и процедуры разработки СФМ? Ответы на эти вопросы и являются целью и задачами настоящей статьи. Основные результаты получены на основе анализа литературных источников, в том числе сравнительного исследования отечественных и зарубежных текстов по теории архитектуры, теории рыночной недвижимости, социологии жилища и города.

Предпринятое исследование позволяет сделать выводы о доминирующих *принципах формирования* общественно-жилых комплексов/застройки смешанного использования. Одни из этих принципов культурно и идеологически детерминированы, отличаются в России и за рубежом, другие трактуются одинаково. В отношении первой группы принципов есть основания говорить о наличии двух стратегий в разработке социальных обоснований (программ) этих объектов: *сегрегационной* и *интеграционной* (табл. 1).

<sup>1</sup> Исследование выполнено по гранту РААСН в рамках темы № 1.7.1. / 2.1.2 «Предпроектные социальные обоснования и программирование архитектуры жилища и жилой среды: теоретические основания, методы, модели».

В российской архитектурной теории и практике заметно преобладают сегрегационные тренды – разделения, изоляции всего разнородного. Это относится и к функциональной, и к социальной составляющим в концепции ОЖК. Исследователи и эксперты декларируют принципы независимости спроса на отдельные услуги и функции, обособленности функциональных процессов, «однородного социального состава потребителя», «соблюдения (К – единого) социального уровня целевых групп» [8]. ОЖК считается решением, подходящим для домохозяйств с высокими доходами, и даже сегменту недорогого рыночного жилища эта форма считается недоступной [2]. В формировании отечественных ОЖК популярен принцип автономности их функционирования в городе за счёт «самообеспечения» их жителей всем необходимым в рамках комплекса [1].

Тем временем культурно детерминированные принципы формирования MUD зарубежными авторами трактуются иначе, зачастую прямо противоположным образом. С середины 1970-х годов известна формула *Института городской земли* (ULI), декларирующая «значительную функциональную и физическую интеграцию компонентов» принципом

MUD [16]. Стратегической тенденцией сегодня провозглашается переход от функционального зонирования и специализации к функциональному смешиванию и универсализации.

В такой же степени очевиден стратегический отказ от сегрегации населения по социально-имущественному статусу в пользу интеграции – объединения под одной крышей населения с разным уровнем доходов [14, р. 453]. Перспективными считаются объединение в составе MUD недвижимости разных форм собственности (частная, муниципальная, государственная) и предоставления (владение и аренда), а также комбинирование функций, ранее разделённых по экологическим критериям (жилище с производством и транспортом) [16, р. 967].

Принципами формирования MUD за рубежом называют сочетание коммерческой привлекательности их программ с интеграцией в жизнь местных сообществ, партнёрство застройщиков с муниципалитетами по вопросам использования участков и городской инфраструктуры, внедрение «гражданских функций», центров комьюнити, общественных пространств и ландшафтов [17].

Таблица 1

### Принципы формирования ОЖК/MUD

<b>А. Культурно и идеологически детерминированные</b>	
сегрегационные	интеграционные
функциональной независимости частей	функциональной и физической интегрированности частей; разнообразия и интеграции форм землепользования смешивания ранее разделённых по экологическим признакам функций (жилища, транспорта, производства)
социально-имущественной однородности (гомогенности) состава «потребителей»	социально-имущественного смешивания (гетерогенности) населения, вкл.: смешивание населения по доходам <sup>1</sup> ; смешивание населения по поколениям; смешивание жилищ по формам собственности и предоставления; баланса коммерческой привлекательности и социального качества проекта стимулирования социальных контактов, взаимодействия жителей
адресования ОЖК/MUD как формы жилища преимущественно категориям населения с высокими доходами	адресования ОЖК/MUD всем доходным категориям и их разнообразным сочетаниям
приоритета видения девелопера, инвестора в формировании концепции ОЖК/MUD	сотрудничества всех заинтересованных лиц в разработке концепции проекта, вкл. муниципалитет, местные комьюнити; согласование социально-профессиональной и социально-потребительской моделей
преимущественной ориентации на автомобильное обслуживание	вариативности транспортного обслуживания (автомобили, общественный транспорт, велосипед, пешеходное движение) с ограничением автомобильного
автономности в городе, «самообеспечения» жителей	интеграции в жизнь города, местного сообщества; внедрения «гражданских функций», «центров местного сообщества», общественных пространств
<b>Б. Универсальные</b>	
высокой интенсивности землепользования, компактности, плотности застройки	
целостности концепции проекта, развития по единому плану	
единства типологических характеристик комплекса и средовых условий	
адаптивности, резервирования ресурсов	
типологического разнообразия, приоритета сложности	

<sup>1</sup> Такого рода стратегии не являются сегодня за рубежом чем-то экзотическим. Например, одна из самых успешных жилищных программ США Норе VI, инициированная в 1992 году с целью решения проблем районов концентрированного общественного жилища, нацелена на объединение субсидируемых и рыночных жилищ на одной территории, в одном комплексе.

Факторная модель формирования ОЖК/MUD

Факторы	Характеристики
Градостроительные	величина города
	плотность застройки
	«текстура города» (размерность, плотность, проницаемость)
	местоположение в городе: размещение ОЖК относительно центра города; центр – город – пригород – загородная зона; центр – срединная зона – периферия; промышленная – складская зона – транспортно-пересадочные узлы – моно/полифункциональные зоны; типы территорий – от общегородских ТПУ до пригородных зон; от общественно-торговых кварталов, административных зон до внутриквартальных территорий; удалённость от исторического центра, близость к транспортной и обслуживающей инфраструктуре в шаговой доступности; транспортная доступность; условия строительства (новое или реконструкция); масштаб MUD: здание – квартал – улица – район – город
Социальные	требования потребителя; «потребности в услугах жителей и работников»; «потребности потенциальных пользователей»; «спрос» (для коммерческой подсистемы); «профессиональные требования и безопасность»; «интересы не только инвесторов, но и других стейкхолдеров»
	«социально-демографические (тип и размер семей), социально-экономические (экономический статус, род деятельности), социально-психологические (готовность воспринять нестандартные решения по плотности, составу, структуре) характеристики обитателя ОЖК»; «портрет потенциального пользователя»;
	«структура населения по доходу, возрасту, состоянию здоровья (физическим возможностям)»
	наличие маломобильных групп населения (ММГ); потребности ММГ в зависимости от «биосоциальной активности»; «уровня семейных связей»
Законодательные и нормативно-правовые	«согласование решений с программами верхних уровней», «связь МЖК с социальными программами обеспечения жильём граждан РФ»; «нормы жилищной обеспеченности» (для социального жилища)
	«налоговые льготы», «правила зонирования и землепользования», строительные нормы и правила ...
Фактор времени	«нестабильность рынка, модернизация технического оснащения, изменения обитателя»
	«гибкость и адаптируемость»

Ещё лет десять тому назад можно было утверждать, что интеграционных принципов формирования MUD в первую очередь придерживаются архитекторы, застройщики, власти в Европе и США, а отечественные ориентированы на сегрегацию. Но уже и в России формируется новое поколение специалистов, разделяющих ценности гуманной, демократически ориентированной архитектуры. Его представители выбирают приоритеты среды, «гетерогенной в социальном плане», создания в ОЖК пространств социальных контактов, стимулирования социальных коммуникаций, социального интегрирования домохозяйств с разными доходами, «сочетания обязательной социально значимой для города функции и более доходных функций», «компромисса между обременениями от города и коммерческой эффективностью проекта» [6, 7, 12].

В отношении некоторых ценностей формирования ОЖК/MUD среди авторов России и зарубежья существует высокая степень согласия. Общеизвестными, универсальными принципами считаются:

- высокая интенсивность освоения земельных участков, компактность и плотность застройки;
- целостность концепции проекта, отказ от механистического сложения социально-функциональных программ ОЖК как сумм отдельных компонентов;

- учёт взаимной связи типологической организации комплексов с градостроительными условиями;

- учёт фактора времени, неизбежных перемен, которые рано или поздно сделают стартовую СФМ непригодной, необходимость принимать меры адаптивности, резервирования ресурсов для развития;

- разнообразия форм и функций, сложности и разнокачественности как самостоятельных ценностей социальных и архитектурных решений [2, 15, 17].

Уже сам перечень принципов помогает продвигать понимание СФМ ОЖК с точки зрения её состава. Если, например, учёт фактора времени является принципом, то время – фактором разработки СФМ, а значит и элементом модели всякого ОЖК.

Хотя об отдельных предпосылках моделирования и проектирования рассуждают многие авторы, нам удалось обнаружить только одного, кто решился говорить об их системе. В.А. Колгашкина предположила в своём исследовании, что архитектурные решения ОЖК складываются под влиянием трёх групп факторов: градостроительных, социальных и временных [7, с. 23–26]. Рассуждения на данную тему других авторов хорошо согласуются с предлагаемой рубрикацией, но есть одно существенное дополнение – законодательные и нормативно-правовые факторы. С их учётом факторная модель формирования

ОЖК/MUD приобретает вид, представленный в таблице 2.

На решающую роль градостроительного фактора в формировании программы и архитектурного решения ОЖК/MUD указывают почти все исследователи – и отечественные, и зарубежные – к чьим трудам обратился автор. При разработке СФМ ОЖК следует принимать во внимание величину, плотность и морфотипы застройки города, местоположение комплекса в городской ткани и особенности последней в структурном и функциональном отношениях.

Частью модели СФМ должен стать учёт фактора времени – того обстоятельства, что все прочие – градостроительные, социальные, нормативно-правовые факторы – имеют тенденцию меняться, а значит архитектурной программе любого ОЖК прилечествует быть адаптивной, гибкой, открытой к развитию и переменам [14], учитывать при разработке ТЗ «последующие превращения объекта» [4].

Анализ текстов, посвящённых ОЖК/MUD, принципов и факторов разработки СФМ позволяет нам решить две задачи. Во-первых, оказывается предварительно очерченным круг тем, понятий, смыслов, информационных аспектов, с помощью которых в теории архитектуры и смежных областях знания описывается проблематика общественно-жилых комплексов с точки зрения социального моделирования последних. Назовём эту совокупность *семантическим полем*. У нас нет оснований считать данное поле обозначенным исчерпывающе точно, но его примерные понятийные границы определены. Во-вторых, данное поле уже по большому счёту структурировано. Его лексические единицы группируются вокруг выделенных ранее тематических ядер факторной модели СФМ ОЖК: градостроительного, социального, нормативно-правового и временного. В дополнение к этому рассмотренные ранее тексты подсказывают ещё два таких ядра: то, что относится к социальному моделированию *процесса создания* ОЖК, и то, что относится к социально-функциональному описанию ОЖК как

*объекта*. Таким образом, вся социальная по происхождению и содержанию информация об ОЖК может быть представлена как семантическое поле, разделённое на шесть таксонов по общности описываемых ими характеристик (рис.).

*Модель объекта* – общественно-жилого комплекса содержит целый ряд отдельных социальных признаков, овеществляемых в виде типов функционально-пространственной организации, специализации, структурирования, рыночного и нерыночного адресования. Все частные социальные характеристики объекта в общественно значимых и коммерчески успешных проектах подчиняются некоторому изначальному видению – социальной концепции объекта. И теоретически, и практически нельзя просто «сложить» объект из отдельных характеристик, они взаимосвязаны. Например, ОЖК с функциональной программой полного обслуживания может существовать не только в рыночном, но и в нерыночном (социальном) сегменте, однако потребуются организация открытого доступа к инфраструктуре со стороны города, то есть функционально интегрированное решение, как это делается, например, в социальных ОЖК Сингапура [5].

Наряду с чисто «рыночными» и «нерыночными» комплексами не только возможны, но и широко распространены «смешанные», социально интегрированные. Моделирование объекта предполагает тщательное адресование рыночных компонентов конкретным сегментам по стоимости и комфорту, а социальных – конкретным муниципальным, федеральным и иным программам поддержки. Формы собственности и формы предоставления сложно связаны между собой. Рыночно ориентированные частные ОЖК могут сдавать свои площади в аренду, а социально ориентированные – продавать на основе субсидируемой ипотеки. Доходные дома с арендуемыми квартирами могут быть бездотационными или финансироваться из бюджета (как в московской программе жилищного строительства).

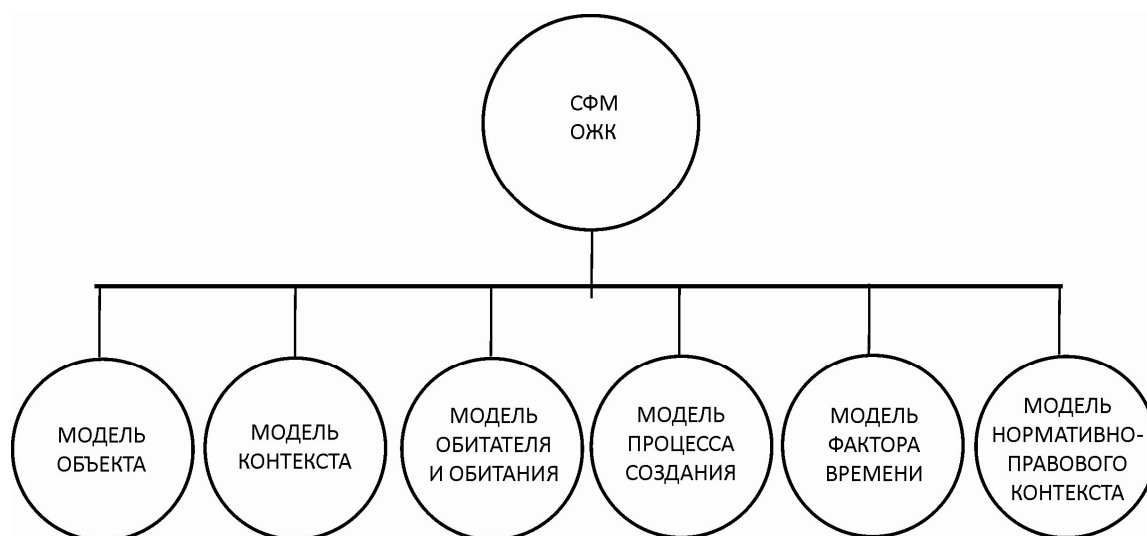


Рис. Социально-функциональная модель ОЖК



Всё более широкое распространение и сложное устройство получают кооперативные и коллективные формы ОЖК (кохаузинги, коммуны). Их временные формы делают картину ещё более пёстрой, а моделирование – требующим специальных знаний (коллективные/коммунальные квартиры, апарт-отели, центры временного пребывания и т. п.). Сложно дифференцированные структуры ОЖК, внутренне расчленённые по многим «водоразделам» (доходам и демографическим типам обитателей, уровням коллективности и степени транзитивности жизни, формам собственности и предоставления...), могут пространственно либо сегрегировать эти различия, либо, наоборот, интегрировать. В жизни сегрегационные и интеграционные стратегии сочетаются.

*Модель градостроительного контекста* – это совокупность признаков города как фактора формирования СФМ и среды её реализации в виде ОЖК. Даже композиционно-структурные характеристики города имеют свою социальную подоплёку. Размер, профиль, морфологические черты города (тип, величина, плотность, геометрия городских первоэлементов – кварталов, улиц, районов) влияют на возможные и продуктивные формы пространственной, а вслед за этим и социальной организации населения ОЖК, обладают определённым потенциалом коллективности, интегрированности или, напротив, индивидуальности дезинтегрированности жизни, через городскую инфраструктуру определяют функциональную программу ОЖК. Помимо общепризнанных доминант – функций и пространств места – СФМ складывается под влиянием социокультурных аспектов города: субкультурной, экономической специфики района, «духа», авторитета, деградированности или престижности места и других качеств. Для проектирования ОЖК важно интегральное выражение специфики контекста в виде некой обобщённой модели, как это предлагает, например, В.А. Колгашкина<sup>2</sup>.

*Модель обитателя и обитания* – является сердцевинной СФМ, поскольку потребности и возможности конечных пользователей определяют, в конечном итоге, все значимые параметры ОЖК. Как и другие элементы СФМ, данная модель не может быть получена в результате простого перечисления характеристик обитателя или последовательного описания потребностей в отношении отдельных аспектов архитектурного решения. В основе успешной СФМ лежит некий *целостный сценарий организации жизни*. Наличие подобного сценария легко диагностировать по возможности его краткой вербализации. Например, «приют для бывших бездомных с центром социальной реабилитации», «ведомственный комплекс для высших государственных служащих», «комплекс для работников дипломатического корпуса с полным циклом обслуживания и досуга». Обитатели и обитание задаются, во-первых, статистическими характери-

ками т. н. «целевых групп» (размером, социально-демографической структурой и уровнем дохода домохозяйств), а во-вторых, сведениями, получаемыми непосредственно от клиента: о потребностях, ценностях, культурных нормах, об образе жизни, о предпочтениях в отношении форм собственности и предоставления, об обслуживающей инфраструктуре, связи жилища с трудовыми и рекреационными ресурсами, о нацеленности на более или менее коллективные формы обитания, о перспективах самоорганизации и самоуправления в рамках ОЖК и др.

*Модель процесса создания ОЖК* задаёт технологию проектирования, эксплуатации, воспроизводства жизненно важных потребительских качеств объекта на всём протяжении жизненного цикла здания вплоть до утилизации по истечении срока морального и физического износа. И здесь в основе успеха – целостная концепция процесса. Например, идея «адресного создания комплекса по инициативе и под руководством коллективного заказчика, нацеленного на высокие экологические стандарты эксплуатации в режиме самоуправления» или «инициативы коммерческого застройщика, ориентированной на маркетинговый анализ рынка и последующую продажу ОЖК единому домовладельцу для сдачи в качестве доходно ориентированной недвижимости». Данная модель должна уточнять полный состав *проектной* и *программной команд*, адресный или массовый характер проектного продукта, роль конечного пользователя (обитателя) в разработке СФМ и проекта, в эксплуатации ОЖК. Здесь даются ответы на вопросы, кто и с какой целью инициирует проектирование и строительство, каковы источники предпроектной информации, перед кем ответственен архитектор, по каким критериям будет оцениваться конечный продукт. Для больших и сложных объектов создаются варианты сценария и поэтапные схемы реализации ОЖК.

*Модель нормативно-правового контекста* – это общий деноминатор, на который приходится «делить», с которым соотносить потребительскую модель ОЖК для придания ей жизнеспособности. Данная модель может быть и стимулом, и препятствием, и регулятором реализации требований обитателя/обитания и создания ОЖК в целом. Первый вариант упоминает Ш. Арентцен, когда ссылается на *законодательство США*, позволяющее владельцу жилища со встроенными офисами рассчитывать на скидки по налогообложению и поощряющее схемы типа *life-work* [13]. Второй вариант иллюстрируют *правила землепользования и застройки*, затрудняющие, а иногда исключаящие смешивание разных функций на одном земельном участке. А третий вариант – *отечественные строительные нормы*, позволяющие объединять жилые, гостиничные, офисные и торговые функции при условии реализации ряда специальных проектных мер.

*Модель фактора времени* – это предвидение трансформации в будущем всех пяти вышеописанных моделей. Очевидно, что ни одна из них не вечна. Частная собственность может быть национализирована, а муниципальная и государственная – приватизирована. Кондоминиум – выкуплен единым владельцем и переведён в статус арендуемой недвижимости.

<sup>2</sup> На основе комбинирования пяти градостроительных признаков, влияющих на ОЖК (функциональные и пространственные варианты расположения в городе, плотность застройки, транспортная доступность, условия строительства) она предлагает различать шесть «типичных градостроительных ситуаций».

Функции могут меняться. Единый владелец сменяться многими и наоборот. То, что изначально отводилось для внутреннего потребления жителями, может переориентироваться для внешнего пользователя. Изначально богатое население сменится бедным в результате процессов *резидьюализации*, изначально бедное – богатым вслед за процессами *джентрификации*<sup>3</sup>. Территория комплекса может быть переведена в другую категорию по зонированию с последующим пересмотром регламентов. Все эти трансформации – не просто гипотеза. Это процессы, реально протекающие в жизни. Предвидение их на стадии формирования модели ОЖК позволяет сделать недвижимость более эффективной, а жизнь – комфортной. Реакция архитектора на действие фактора времени может быть разной: в диапазоне от игнорирования и надежды на саморегулирование до сознательного принятия стратегий «универсального», «адаптируемого», «трансформируемого» пространства.

Разработка социально-функциональной модели общественно-жилого комплекса – это сложная интеллектуальная задача, предполагающая обширные знания и квалификацию исследователя в самых разных дисциплинах – от социологии города, жилища, культурной антропологии до менеджмента и экономики, от архитектурной типологии и градопланирования до землепользования и теории рынка недвижимости. Решение данной задачи требует значительных усилий и затрат времени. Учитывая её сложность и значимость для качества архитектурных решений, необходимо законодательное введение специальной предпроектной стадии – разработки социально-архитектурных моделей (концепций, обоснований) как самостоятельного этапа архитектурного программирования. Процесс социально-архитектурного программирования может быть формализован и представлен в виде поэтапной логической процедуры.

#### Литература

1. Алякрицкая, М. А. Принципы формирования жилых комплексов в современных условиях / М. А. Алякрицкая // *InnovativeProject*. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 132–133.
2. Благова, М. В. Градостроительные аспекты социально-функционального моделирования коммерческого жилища в современном городе / М. В. Благова // *Социология города*. – 2016. – № 2. – С. 22–33.
3. Волкова, В. Н. Модели для разработки системы управления проектированием многофункциональных комплексов / В. Н. Волкова, Б. Д. Микеладзе // *Вестник УМО. Экономика, статистика и информатика*. – 2012. – № 2. – С. 105–108.
4. Гельфонд, А. Л. Архитектурная типология в аспекте жизненного цикла здания / А. Л. Гельфонд // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2011. – № 2. – С. 40–47.

5. Генералов, В. П. Высотные жилые дома-комплексы как элемент создания высоко-комфортной жилой среды / В. П. Генералов, Е. М. Генералова // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. – 2013. – № 2 (10). – С. 12–16.

6. Жоголева, А. В. Архитектурно-градостроительное проектирование жилой группы как социального образования / А. В. Жоголева // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. – 2011. – № 3. – С. 36–40.

7. Колгашкина, В. А. Взаимосвязь типологических признаков офисно-жилых комплексов со специфическими условиями городских территорий / В. А. Колгашкина // *Архитектура и строительство России*. – 2013. – № 8. – С. 28–34.

8. Многофункциональные комплексы: особенности девелопмента [Электронный ресурс] // *StudFiles*. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/3609256>.

9. Молчанов, В. М. Социально-функциональное моделирование городского жилища для юга России / В. М. Молчанов // *Социология города*. – 2009. – № 2. – С. 35–40.

10. Прядко, И. П. Проблемы проектирования жилищных моделей с учётом социальной адаптации маломобильных категорий населения и условий жизни в современном городе / И. П. Прядко // *Строительство: наука и образование*. – 2013. – № 1. – С. 1.

11. Разработка концепции многофункционального комплекса [Электронный ресурс] // *WelhomeRealEstateConsulting*. – Режим доступа: <http://www.consultestate.ru/services/razrabotka-koncepcii-mnogofunkcionalnogo-kompleksa-mfk>.

12. Хегай, И. В. Градостроительные приёмы формирования социально-интегрированных комплексов жилой застройки / И. В. Хегай // *Известия КГА-СУ*. – 2013. – № 1 (23). – С. 91–98.

13. Ahrentzen, S. Hybrid Housing: A Contemporary Building Type for Multiple Residential & Business Use / S. Ahrentzen. – Milwaukee: University of Wisconsin-Milwaukee, 1991. – 148 p.

14. Carswell, A. Mixed-Use Development / A. Carswell // *The Encyclopedia of Housing*. – 2nd ed. – Los Angeles: Sage, 2012. – P. 453–458.

15. Defining Mixed-use Development [Электронный ресурс] / N. Miller, J. Miller // *SCRIBD*. University of Minnesota: Design Center for American Urban Landscape, 2003. – Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/27386335/Defining-Mixed-Use-Development-DCAUL-USA-2003>.

16. Hoppenbrouwer, E. Mixed-use Development: Theory and Practice in Amsterdam's Eastern Docklands / E. Hoppenbrouwer, E. Louw // *European Planning Studies*. – 2005. – Vol.13, No.7. – P. 967–983.

17. Multi-Family, Mixed Use and Mixed Income Housing Development [Электронный ресурс] // HUD user. – Режим доступа: [https://archives.huduser.gov/oup/conferences/presentations/hbcu/sanantonio/multifamily\\_development.pdf](https://archives.huduser.gov/oup/conferences/presentations/hbcu/sanantonio/multifamily_development.pdf).

<sup>3</sup> О процессах резидьюализации и джентрификации см.: Кияненко К. В. Введение в проблематику современного рыночного жилища: учебное пособие для архитектурных и строительных специальностей вузов / К. В. Кияненко. – Вологда: ВоГТУ, 2002. – 159 с.

**K.V. Kiyanenko**  
Vologda State University

**SOCIO-ARCHITECTURAL PROGRAMMING  
OF RESIDENTIAL MIXED-USE DEVELOPMENTS**

The paper considers the concepts, the principles and factors of elaboration, the structure and elements of social components of architectural programs for mixed-use residential developments.

Residential mixed-use developments, architectural programming, social models, design methodology



**С.А. Мясникова, В.А. Шорин**  
Вологодский государственный университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННЫХ И КОГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ

В статье рассматривается эффективность совместного использования металлургических шлаков и битум-полимерных вяжущих с адгезионными добавками для повышения качества асфальтобетона и поверхностной обработки.

Металлургический шлак, спектрофотометрический метод, адгезионные добавки, битумполимерные вяжущие.

В условиях непрерывно повышающейся интенсивности движения и увеличивающихся нагрузок от движущегося транспорта вяжущий материал должен быть достаточно прочным, деформационно-устойчивым и мало изменять свойства при воздействии внешних природных факторов, иметь высокую адгезию к различным каменным материалам и грунтам, применяемым в дорожном строительстве [1].

Одним из наиболее употребляемых и наиболее дорогих строительных материалов в дорожном строительстве является битум, который используют при строительстве и ремонте дорожных покрытий и оснований, изготовлении строительных материалов (асфальтобетонных смесей, черного щебня и др.), устройстве поверхностных обработок. Вяжущий материал должен быть эластичным в широком диапазоне температур. Этим требованиям будет удовлетворять модифицированный битум, структуру которого можно изменить в нужном направлении. Модифицированные битумы обладают более высоким уровнем физико-механических показателей по сравнению с дорожными битумами. Также возможно расширение интервала пластичности дорожных битумов.

Битумнополимерное вяжущее можно рассматривать как композиционный материал, в котором матрицей-средой служит битум, а дисперсной фазой является полимер [1, 2].

Данная работа посвящена исследованию влияния модифицирующих добавок на адгезионные и когезионные характеристики битумполимерного вяжущего к поверхности каменных материалов и возможности его использования в поверхностной обработке и ремонте автомобильных дорог [2].

Первоначально нами были определены физико-механические свойства битумполимерного вяжущего, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

### Физико-механические свойства битумполимерного вяжущего

Наименование свойств		Показатели
Пенетрация	25°C	70
	0°C	49
Растяжимость, см	25°C	47,7
	0°C	48
Температура размягчения, °C		87
Температура хрупкости, °C		-39
Эластичность, %		93
Гибкость, °C		-33
Водопоглощение		0,13

Особенно актуальным является определение показателя величины адгезии битумполимерных вяжущих к поверхности каменных материалов для композиционного материала, который активно влияет на качество и долговечность автомобильных дорог.

На первом этапе исследования определены адгезионные характеристики битумного вяжущего к каменному материалу. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

### Адгезионные характеристики битумного вяжущего

Вид каменного материала	Количество добавки, %	D <sub>опт</sub>	Площадь, покрытая битумом, %
Гранитный щебень	-	0,5	42
Сталеплавильный шлак	-	0,54	52
Доменный шлак	-	0,62	58

На основании проведенных исследований мы получили низкий показатель площади покрытия битумом к каменному материалу. Поэтому необходимо было рассмотреть возможность увеличения адгезионных свойств битумполимерного вяжущего. Исследование проводилось с использованием адгезионных добавок «Азол-1001» и «Дорос-АП». Измерения проводились с помощью фотоколориметрического метода на однолучевом спектрофотометре СФ-26. Спектрофотометр осуществляет фотометрирование – сравнение измеряемого потока с эталонным (референтным) для непрерывного или дискретного ряда длин волн излучения [2, 3].

Влияние добавок «Азол-1001» и «Дорос-АП» на адгезионные характеристики первоначально определено по отношению к гранитному щебню. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Влияние адгезионных добавок  
к гранитному щебню**

Вид каменного материала	Вид адгезионной добавки	Количество добавки, %	$D_{\text{опт}}$	Площадь, покрытая битумом, %
Гранитный щебень	Азол-«1001»	0,5	0,53	48
		1,0	0,54	52
		1,5	0,54	52
	«Дорос-АП»	0,5	0,55	64
		1,0	0,58	80
		1,5	0,6	94

В свете поставленных задач актуальным становится исследование способов увеличения адгезии битумполимерного вяжущего к металлургическим шлакам. Металлургические шлаки – это эффективные заменители природных каменных материалов для строительства и ремонта автомобильных дорог. Нами были проведены исследования величины адгезии битумполимерного вяжущего к сталеплавному и доменному шлакам. Результаты исследований представлены в таблицах 4, 5.

Таблица 4

**Влияние адгезионных добавок  
к сталеплавному шлаку**

Вид каменного материала	Вид адгезионной добавки	Количество добавки, %	$D_{\text{опт}}$	Площадь, покрытая битумом, %
Сталепла- вильный шлак	Азол-«1001»	0,5	0,56	58
		1,0	0,56	58
		1,5	0,56	58
	«Дорос-АП»	0,5	0,55	58
		1,0	0,6	74
		1,5	0,65	90

Таблица 5

**Влияние адгезионных добавок  
к доменному шлаку**

Вид каменного материала	Вид адгезионной добавки	Количество добавки, %	$D_{\text{опт}}$	Площадь, покрытая битумом, %
Доменный шлак	Азол-«1001»	0,5	0,66	72
		1,0	0,66	72
		1,5	0,66	72
	«Дорос-АП»	0,5	0,64	64
		1,0	0,68	76
		1,5	0,72	86

При исследовании адгезионных и когезионных характеристик битумполимерного вяжущего определяли показатель приживаемости зерен каменного материала с использованием адгезионных добавок «Азол-1001» и «Дорос-АП» [2]. Когезия (внутреннее сцепление) характеризует разрыв вяжущего под действием различных усилий в самой его массе. Такой разрыв противопоставляется адгезии – отрыву вяжущего от минеральных материалов, которые оно должно склеивать [2, 3].

Таблица 6

**Определение показателя приживаемости доменного шлака**

Вид вяжущего	Вид адгезионной добавки	Количество добавки, %	Количество щебенки, оставшихся на диске после его вращения за время, с:					
			10	12	14	16	18	20
Битум БНД 60/90, 2,5%	-	-	20	20	18	17	15	11
Битумполимерное вяжущее, 2,5%	-	-	20	20	20	17	16	15
Битумполимерное вяжущее, 3%	«Азол- 1001»	0,5%	20	19	19	18	17	17
		1,0%	20	20	20	18	18	18
		1,5%	20	19	19	18	18	18
	«Дорос-АП»	1,0%	20	20	20	20	20	20
		1,5%	20	20	20	20	20	20
		1,5%	20	20	20	20	20	20

Определение показателя приживаемости сталеплавильного шлака

Вид вяжущего	Вид адгезионной добавки	Количество добавки, %	Количество щебенки, оставшихся на диске после его вращения за время, с:					
			10	12	14	16	18	20
Битум БНД 60/90, 2,5%	-	-	20	18	16	12	10	7
Битумполимерное вяжущее, 2,5%	-	-	20	20	18	18	16	15
Битумполимерное вяжущее, 3%	«Азол-1001»	0,5%	20	18	18	18	17	17
		1,0%	20	20	18	18	18	17
		1,5%	20	18	18	18	18	18
	«Дорос-АП»	1,0%	20	20	19	19	18	18
		1,5%	20	20	20	20	20	20

Для определения показателя приживаемости зерен использовали каменный материал фракцией 5–10 мм. На специальный диск прибора наносили каменный материал в количестве 20 штук. Испытания проводились через 24 часа после нанесения на диск битумной плёнки толщиной 2–3 мм. Скорость вращения диска составляла 3000 об/мин. После завершения испытания по количеству оставшихся зёрен на диске определяли величину «приживаемости» щебня. Результаты исследований представлены в таблицах 6, 7.

Проведенные исследования свидетельствуют об увеличении адгезионных характеристик промышленных адгезионных добавок. Особенно высокие показатели наблюдаются для адгезионной добавки «Дорос-АП», где при концентрации 1,5% наблюдается двукратное увеличение адгезионных характеристик. Результаты исследований по величине приживаемости сталеплавильного и доменного шлака показывают, что адгезионно-когезионные характеристики хорошо коррелируют с аналогичными результатами, полученными с использованием спектрофотометрического метода.

Композиционные материалы позволяют повысить

качество и долговечность покрытия автомобильной дороги, увеличить сроки службы дорожных покрытий, а также сократить расходы на ремонтные работы и повысить безопасность движения автомобилей.

#### Литература:

1. Илиополов, С. К. Органические вяжущие для дорожного строительства: учебное пособие для вузов по специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» / С. К. Илиополов, И. В. Мардиросова. – РГСУ, 2003. – 428 с.
2. Мясникова, С. А. Разработка и исследование материалов на основе металлургических шлаков в сочетании с модифицированными битумами и битумполимерными вяжущими / С. А. Мясникова, В. А. Шорин // Известия ОрелГТУ. Строительство. – 2007. – № 1/13 (529). – С. 62–65.
3. Мясникова, С. А. Поверхностная обработка покрытия автомобильных дорог на основе металлургических шлаков: монография / С. А. Мясникова, В. А. Шорин; под общ. ред. В. А. Шорина. – Вологда: ВоГТУ, 2011. – 123 с.

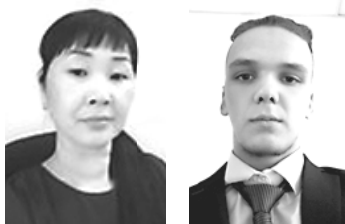
**S.A. MYASNIKOVA, V.A. SHORIN**

Vologda State University

#### STUDY OF ADHESIVE AND COHESIVE PROPERTIES IN COMPOSITE MATERIAL

The article discusses the effectiveness of the joint use of metallurgical slag and bitumen polymer binders with to improve the quality of asphalt concrete and surface treatment.

Metallurgical slag, spectrophotometric method, adhesive additives, bitumen polymer binders



**А.П. Очур-оол, С.С. Севен**  
 Тувинский государственный университет, г. Кызыл,  
 Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
 университет (Сибстрин), г. Новосибирск

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЫЗЫЛСКОГО ЗОЛООТВАЛА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

В данной статье рассмотрены исследования Кызылского золоотвала, элементный состав углей, содержание тяжелых элементов, драгоценных металлов, радиоактивных металлов от высоты горизонта, а также решение проблемы утилизации золошлаковых отходов для производства строительных материалов.

Отходы, зола, элементный состав, уголь, шлак, исследования, строительный материал.

Характерная особенность современных городов заключается в наличии промышленных предприятий, которые играют не последнюю роль в формировании ландшафтов. Спецификой работы любого предприятия является образование побочных продуктов, которые не находят применения и идут в отходы. Эти отходы складываются в отвалах, хранилищах, как правило, находящихся вблизи или на территории города.

В городе Кызыле основным источником загрязнения является Кызыльская ТЭЦ, работающая с 1975 г. В то же время начал функционировать золошлаковый отвал, расположенный в непосредственной близости от предприятия на стыке города и п. Каа-Хем (рис. 1). На момент исследования емкость золоотвала составила около 300 тыс. т. Его площадь составляет 10 га. Кызыльский золоотвал условно можно разделить

на три секции: с северной стороны расположены два водоотстойника, с южной стороны – сам отвал. Продукт сгорания в виде золошлаковой пульпы транспортируется по трубопроводу в один из двух водоотстойников. По мере накопления одного, во втором происходит отстаивание и высыхание золошлаков, которые затем перемещают бульдозерами в отвал. Высота отвала достигает 10 м. По периметру золоотвал укреплен ограждающей земляной дамбой.

Ежегодно в отвал поступает в среднем 18 тыс. т золошлака, являющегося продуктом сгорания углей Каа-Хемского месторождения. Данные угли характеризуются как низко- и среднезольные (13%); низкосернистые и малофосфористые (0,0054%); обладающие высокой спекаемостью (22 мм) [1]. Элементный состав углей на Каа-Хемском участке характеризуется следующими показателями (табл. 1).

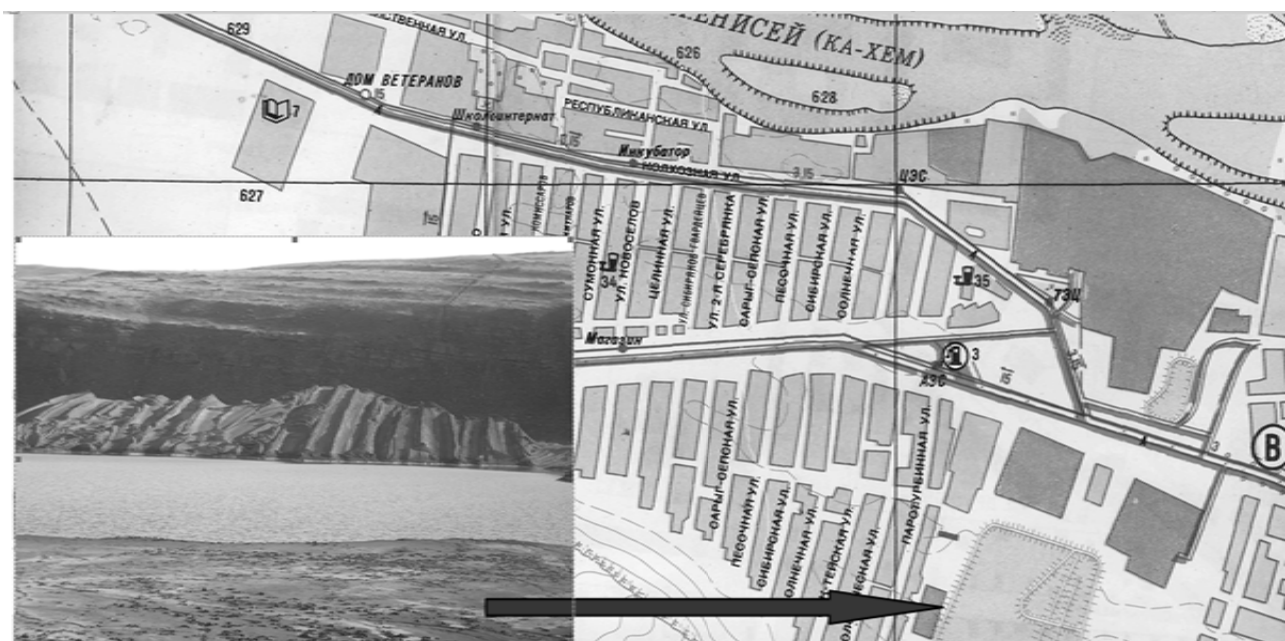


Рис. 1. Карта расположения Кызыльского золоотвала

Таблица 1

## Элементный состав углей Каа-Хемского месторождения

Наименование пласта	Элементный состав углей, %				
	Углерод, C <sub>t</sub>	Водород, H	Азот, N	Кислород, O <sub>2</sub>	Сера, S <sub>t</sub> <sup>d</sup>
1	2	3	4	5	6
«улуг» (2.2)	83,4	6,0	1,5	9,0	0,42

Таблица 2

## Перераспределение металлов в пробах по номеру горизонта

Номер горизонта	Содержание элементов, %										
	Тяжелые металлы					Радиоактивные металлы				Драгоценные металлы	
	Cu, %	Pb, %	Zn, %	Co, %	Ni, %	U	Th	Rb	Sr	<0,05	0,0002
I	0,0038	0,02	0,0093	0,003	0,004	0,0007	0,0008	0,0045	0,0693	<0,05	<0,0001
II	0,0050	0,02	0,0165	0,003	0,006	0,0007	0,0005	0,0044	0,0685	<0,05	<0,0001
III	0,0065	<0,02	0,0137	0,003	0,006	0,0004	0,0007	0,0054	0,0652	<0,05	<0,0001
IV	0,0048	<0,02	0,0278	0,003	0,005	0,0004	0,0011	0,0051	0,0748	<0,05	<0,0001
V	0,0051	<0,02	0,0098	0,003	0,005	0,0005	0,0005	0,0054	0,0704	<0,05	<0,0001
VI	0,0055	<0,02	0,0152	0,003	0,008	0,0011	0,0007	0,0052	0,0697	<0,05	<0,0001
VII	0,0097	<0,02	0,0099	0,003	0,005	0,0007	0,0008	0,0054	0,0669	<0,05	<0,0001
VIII	0,0095	<0,02	0,0200	0,003	0,004	0,0009	0,0010	0,0058	0,0662	<0,05	<0,0001

В результате термохимических превращений в котлоагрегатах БКЗ-75-39ФБ Кызылской ТЭЦ образуется материал, в состав которого входит шлак (13%) и зола-унос (87%). Существует зависимость между дисперсностью и химическим составом золы и шлака: чем меньше частицы золы, тем больше на них происходит концентрирование микроэлементов, в том числе и токсичных. Так как зола в золоотвале находится длительное время в контакте с водой, что ведет к вымыванию микроэлементов, то для оценки токсичности Кызылских зол пробы отбирались в газоходах на выходе из котлов и золы из бункера, уловленной циклонами. Всего было проанализировано содержание 19 элементов (As, Pb, Cr, Cu, Ni, Co, V, Cd, Zn, Se, Mn, Fe, K, Ba, Na, Ca, Mg, Be, F), которые являются опасными для здоровья людей.

Исследования показали, что происходит концентрирование в золе всех элементов в 1,5–5 раз и их содержание в золе практически становится равным кларку. Еще большее концентрирование элементов происходит в летучей золе, выбрасываемой в атмосферу. Концентрация почти всех элементов в летучей золе превышает кларк. Высокодисперсная зола концентрирует элементы еще более значительно: от 3 раз (магний) до 15 раз (цинк), в среднем – в 10 раз. Кроме цинка происходит значительное концентрирование свинца, меди, никеля, ванадия, кадмия, бария, натрия, бериллия, кобальта [2, 3].

Исследование состава золообразующих оксидов показало высокое содержание кремнезема (43,77%), глинозема (14,51%) и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9,86%). Согласно содержанию оксида кальция (9,51%) золошлаки являются кислыми. Известно, что подвижность микроэлементов зависит от кислотности среды. Низкая плотность (2,36 г/см<sup>3</sup>) и высокая пористость (74,9%) способствуют увеличению водопроницаемости золошлаков, поэтому можно ожидать активное выщелачивание Zn, Pb, Co, Mn, Sr и пр. [4, 5].

Для оценки распределения микроэлементов в массиве золошлаков были отобраны пробы по восьми горизонтам с восточной стороны отвала. Расстояние между горизонтами составляет 1 м, нумерация горизонтов идет от основания отвала. Отбор проб проводился методом вычерпывания в шахматном порядке. Разделка проб включала в себя несколько этапов: объединение точечных проб по горизонтам; высушивание при 24°C в течение 48 часов; просеивание через сита с размером ячеек 5 и 2 мм для удаления крупных фракций; перемешивание и квартование проб каждого горизонта. В результате получили восемь лабораторных проб по 0,5 кг, из которых отбирались навески 10 г. Каждая навеска анализировалась на содержание тяжелых, радиоактивных и драгоценных металлов. Измерения проводились на атомно-абсорбционном спектрофотометре AAS5FL и на рентгено-флуоресцентном анализаторе АРФ-6.

Результаты исследований радиоактивных элементов (табл. 2, рис. 2) показали, что содержание урана в золошлаковых отходах превышает кларк в среднем по линиям в 2,8 раз и общей пробе в 4,58 раза; содержание тория в среднем по линиям (0,00076%) и в общей пробе не превышает кларка; содержание рубидия в среднем по линиям (0,00515%) и общей пробе не превышает кларка; концентрация стронция в золошлаковых отходах в среднем по линиям превышает кларк в 2,02 раза и общей пробы в 2,07 раза. Явной миграции радиоактивных элементов в толще отвала не прослеживается. Содержание тяжелых элементов (табл. 2, рис. 3) в золошлаках минимально, но прослеживается незначительное снижение содержания элементов от восьмого горизонта к первому. Содержание элементов драгоценных металлов очень низко и не меняется (табл. 2, рис. 4).



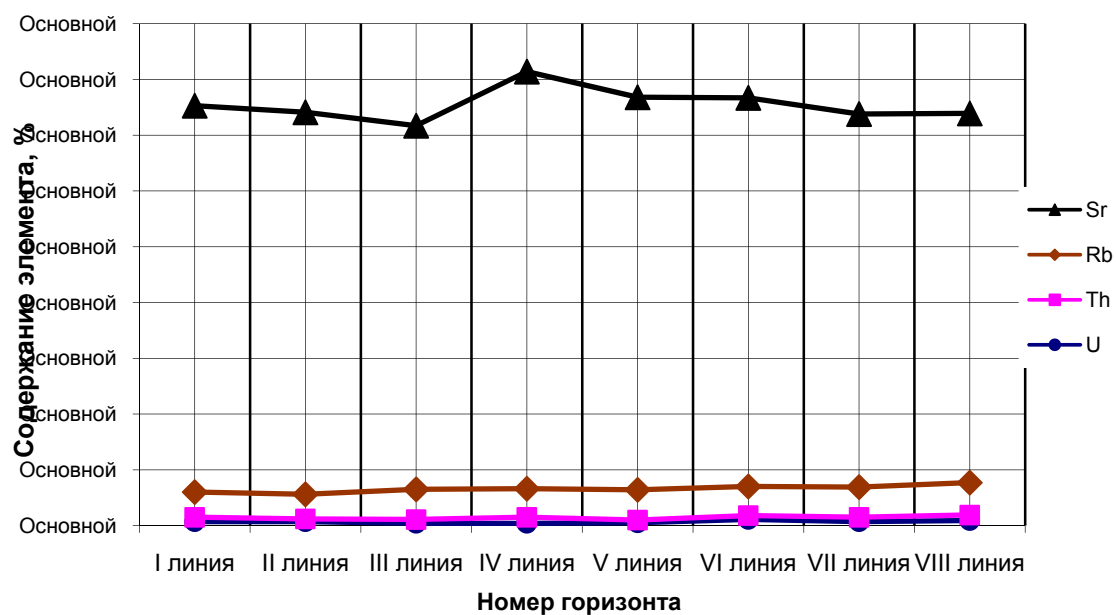


Рис. 2. Зависимость содержания радиоактивных металлов от высоты горизонта

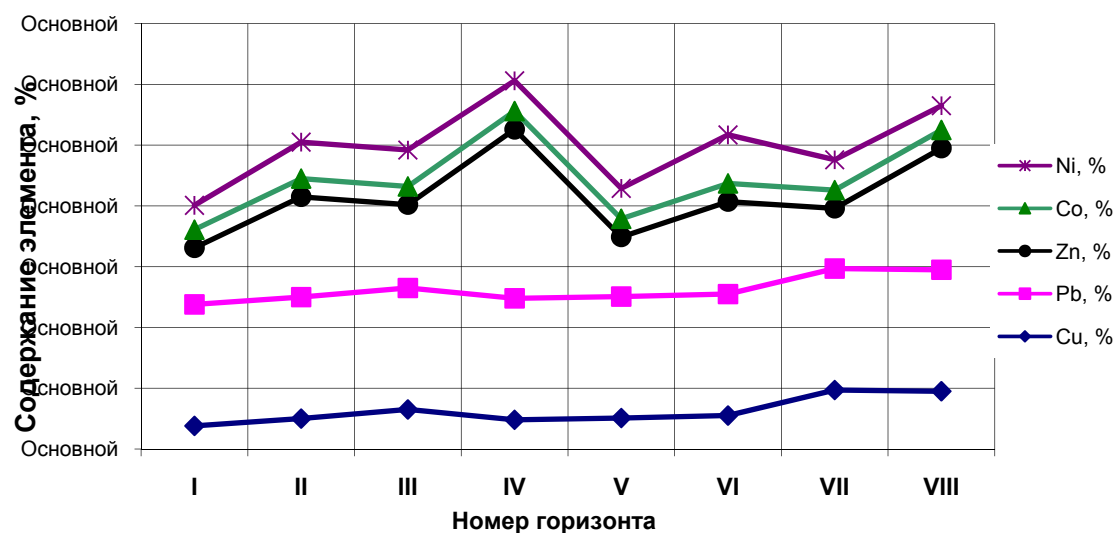


Рис. 3. Зависимость содержания тяжелых элементов от высоты горизонта

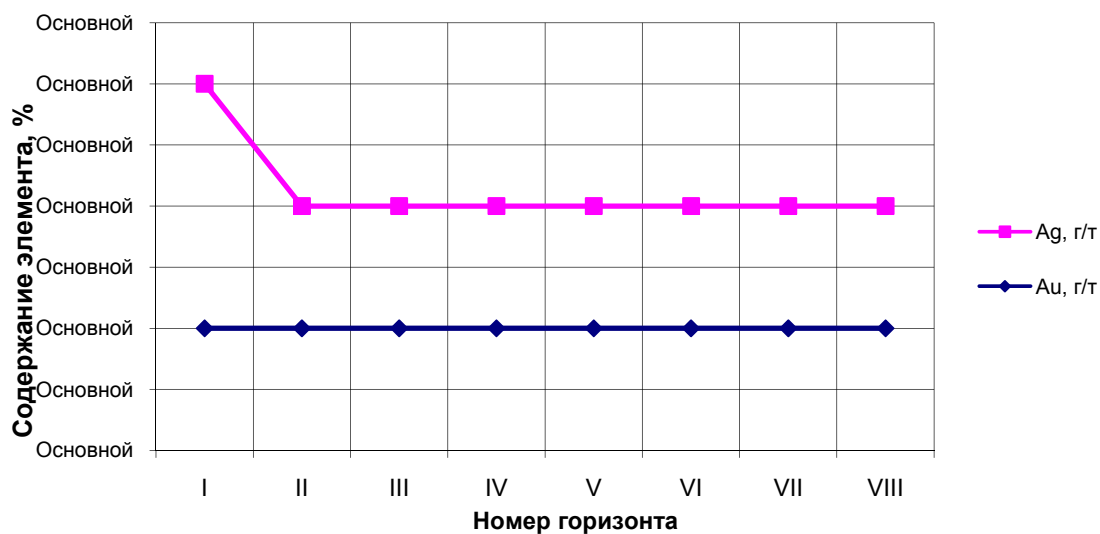


Рис. 4. Зависимость содержания элементов драгоценных металлов от высоты горизонта

При проектировании и строительстве Кызылского золоотвала не был предусмотрен противофильтрационный экран, в результате чего происходит фильтрация загрязненных вод, ухудшая геохимические характеристики почв и гидрохимические свойства грунтовых вод.

Учитывая высокое содержание в гранулометрическом составе золы пылящей фракции, можно предположить, что поступление микроэлементов золы в природную среду происходит и воздушным путем. Из-за воздушного переноса и частых бурь в летнее время происходит загрязнение воздушного бассейна пылью. У людей, постоянно проживающих в запыленной местности, наблюдаются фиброзные нарушения в легких.

Решение проблемы утилизации золошлаковых отходов видится в производстве строительных материалов, поэтому проведено исследование золошлаков на величину удельной эффективной активности. Суммарная эффективная удельная активность золошлаков Кызылской ТЭЦ равна 206,0 Бк/кг, что соответствует первому классу строительных материалов, т. е. они пригодны для любых видов строительства.

Использование золошлаковых отходов в производстве строительных материалов позволит снизить их количество в золоотвале, что приведет к снижению сброса тяжелых металлов с паводковыми водами, снижению запыленности воздуха городской зоны токсичными частицами золы. Это позволит в целом оздоровить экологическую ситуацию города.

#### Литература

1. Угольная база России: в IV т.: Т. III: Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири (Красноярский край, Канско-Ачинский бассейн; Республика Тыва, Улуг-Хемский бассейн и др. месторождения; Иркутская область, Иркутский бассейн и угольные месторождения Предбайкалья). – Москва: ООО «Геоинформцентр», 2002. – 488 с.

2. Отчет о НИР НПО «Тайфун». – Обнинск: [б.и.], 1995. – 205 с.

3. Энергохимическая переработка каменных углей Тывы – основа устойчивого развития республики / М. П. Куликова, В. И. Лебедев, Ю. Д. Каминский, В. И. Котельников // Химия в интересах устойчивого развития. – 2004. – № 12. – С. 541–554.

4. Компоненты зол и шлаков ТЭЦ / Л. Я. Кизильштейн, И. В. Дубов, А. Л. Шпицглюз, С. Г. Парада. – Москва: Энергоатомиздат, 1995. – 176 с.

5. Кизильштейн, Л. Я. Магнетитовые микрошарики из золы-уноса пылеугольного сжигания углей на ТЭС / Л. Я. Кизильштейн, А. С. Калашников // Химия твердого топлива. – 1991. – № 6. – С. 128–134.

**A.P. Ochur-ool, S.S. Seven**

Tuva State University, Kyzyl, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk

#### ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE KYZYL ASH DUMP

This article describes the study of the Kyzyl ash dump, the elemental composition of coal, the content of heavy elements, precious metals, radioactive metals from the height of the horizon. Solution of the problem of ash and slag waste utilization for the production of building materials is considered.

Waste, ash, elemental composition, coal, slag, research, building material.



## АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ ПО ШИРИНЕ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН НА ОСНОВЕ АСІ 224R-01

В работе рассматривается проблема анализа надежности железобетонной балки по ширине раскрытия трещин на основе американского стандарта АСІ 224R-01 вероятностно-статистическим методом расчета. Графически проанализировано влияние коэффициентов вариации параметров в расчетной математической модели предельного состояния на вероятность безотказной работы железобетонной балки. Представлен метод расчета надежности эксплуатируемой железобетонной балки по критерию ширины раскрытия нормальной трещины в вероятностно-статистической постановке задачи.

Железобетонная балка, надежность, вероятность безотказной работы, АСІ, ширина раскрытия трещин, безопасность.

Железобетонные балки зачастую применяются в качестве различных несущих элементов сооружений. В практике обследований и выявлений категории технического состояния несущих элементов сооружений зачастую требуется оценивать безопасность эксплуатации изгибаемых железобетонных элементов, в частности железобетонных балок. Объективным количественным показателем и мерой безопасности эксплуатации железобетонных балок может служить их надежность. В качестве количественной меры значений показателей надежности в соответствии с ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения» можно принять гамма-процентную наработку между отказами, вероятность безотказной работы, вероятность восстановления, среднее время между отказами, интенсивность отказов и др. В данной работе будем придерживаться показателя надежности в виде вероятности безотказной работы как наиболее распространенного показателя надежности в академической среде [1, 2, 3 и др.]. Межгосударственным стандартом ГОСТ 27751-2014 рекомендовано применять вероятностно-статистические методы расчетов надежности при наличии полной статистической информации об изменчивости исходных данных.

Оценка безопасности эксплуатации несущих элементов, в том числе железобетонных балок, на данный момент является актуальной задачей. Это обусловлено авариями железобетонных балок: обрушение железобетонной балки в 2014 году во Флориде стоило жизни рабочего; а при обрушении железобетонной балки в Индии в 2018 году погибло 16 человек. Своевременная количественная оценка и контроль безопасности эксплуатации железобетонных балок позволит предупреждать и предотвращать их аварии.

Согласно статистическим данным отчетов «European Ready Mixed Concrete Organization» (ERMCO) [4], лидирующую позицию по производству бетона занимают США, производя более 200 млн. м<sup>3</sup> бетона в год (в данную статистику не включены Ин-

дия и Китай), что в 2 раза больше Японии и в 4 раза больше России. Повышенное производство конструкционного бетона требует повышенных мер контроля его безопасности при эксплуатации сооружений.

Нормальные трещины в железобетонных балках – распространенная неисправность элемента. Доктор технических наук, профессор К.А. Пирадов отмечает, что «железобетона без трещин не бывает» [5]. Нормальные трещины в растянутой зоне бетона балки снижают ее жесткость, увеличивают напряжения в рабочей арматуре балки, уменьшают высоту сжатой зоны бетона балки, а также являются причиной коррозии арматуры. В связи с этим в данной работе предлагается рассмотреть надежность железобетонной балки на основе американского стандарта АСІ 224R-01 «Control of cracking».

В России ширина раскрытия трещин ограничивается по СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» и СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии». В практических целях обычно принимается предельное значение ширины раскрытия трещины 0,3 мм при продолжительном раскрытии и 0,4 мм – при непродолжительном раскрытии. В американском стандарте АСІ 224R-01 приведены похожие ограничения (табл. 1).

Таблица 1

### Предельная (рациональная) ширина раскрытия трещин по АСІ 224R-01

Условия эксплуатации	Предельная (рациональная) ширина раскрытия, мм
Сухой воздух/Защитная мембрана	0,41
Влажный воздух, контакт с грунтом	0,30
При использовании антигололедных химикатов	0,18
Контакт с морской водой	0,15
Влагоудерживающие конструкции	0,10

Ширина раскрытия трещины по ACI 224R-01 определяется по формуле (в обозначениях СП 63.13330.2012):

$$a_{crc} = 2,2 \frac{h-x}{h_0-x} \frac{R_s}{E_s} \sqrt[3]{2a^2 \frac{b}{n}}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество стержней рабочей арматуры в балке.

Рассмотрим вариант, предложенный в [6], когда напряжение в рабочей арматуре балки в (1) заменяется предельным напряжением стали арматуры  $\sigma_{s,ult}$ , и полученная ширина раскрытия трещины считается предельной. В таком подходе ширина раскрытия нормальных трещин ограничивается исходя из достижения рабочей арматурой предела текучести, а не исходя из эстетико-психологических требований и требований коррозионной стойкости. Тогда математическую модель предельного состояния для расчета надежности можно записать в виде:

$$\tilde{a}_{crc} \leq 2,2 \frac{h-x}{h_0-x} \frac{\sigma_{s,ult}}{E_s} \sqrt[3]{2a^2 \frac{b}{n}}, \quad (2)$$

где  $\tilde{a}_{crc}$  – измеряемая ширина раскрытия трещины (случайная величина, что отмечено волнистой линией над символом).

Рассмотрим влияние коэффициента вариации ширины раскрытия трещины на вероятность безотказной работы балки. Математическую модель предельного состояния (2) запишем в виде:

$$\tilde{a}_{crc} \leq a_{crc,ult}, \quad (3)$$

$$\text{где } a_{crc,ult} = 2,2 \frac{h-x}{h_0-x} \frac{\sigma_{s,ult}}{E_s} \sqrt[3]{2a^2 \frac{b}{n}}.$$

Основные положения расчета надежности вероятностно-статистическими методами расчета можно найти в [1]. Надежность железобетонной балки по математической модели (3) можно определить по формуле:

$$P = \Phi(\beta) = \Phi\left(\frac{a_{crc,ult} - m_{a,crc}}{S_{a,crc}}\right), \quad (4)$$

где  $\Phi(\beta)$  – табличное значение функции Лапласа;  $m_{a,crc}$  – математическое ожидание ширины раскрытия трещины, в качестве оценки которого можно использовать среднее арифметическое значение;  $S_{a,crc}$  – среднее квадратическое отклонение ширины раскрытия трещины по результатам измерений.

**Пример 1.** Пусть условно известны значения:  $h=0,5$  м,  $b=0,2$  м,  $h_0=0,47$  м,  $a=0,03$  м,  $n=4$ ,  $E_s=2 \cdot 10^{11}$  Па,  $\sigma_{s,ult}=400$  МПа. Тогда  $a_{crc,ult}=0,232$  мм. Пусть измеряемая ширина раскрытия трещины характеризуется параметрами (при нормальном законе распределения):  $m_{a,crc}=0,17$  мм;  $S_{a,crc}=0,03$  мм (коэффициент вариации  $v_{a,crc}=0,176$ ). В этом случае надежность по (4) составит 0,981.

На рис. 1 приведен график функции зависимости надежности (вероятности безотказной работы) от коэффициента вариации ширины раскрытия трещины.

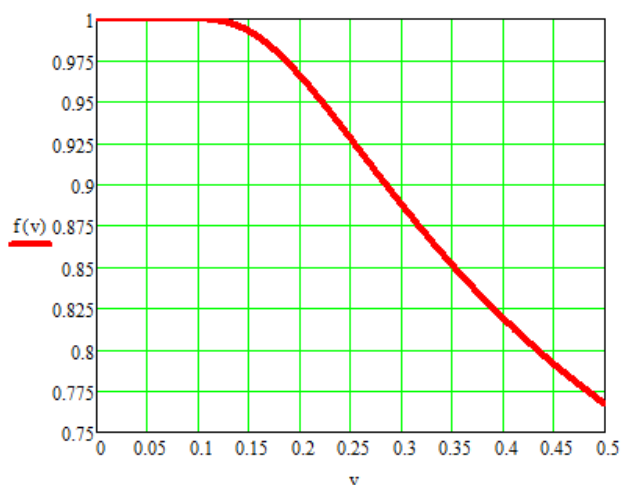


Рис. 1. Зависимость вероятности безотказной работы от коэффициента вариации ширины раскрытия трещины по исходным данным примера 1

Как видно на рис. 1, после превышения коэффициента вариации значения 0,15 значение надежности (вероятности безотказной работы) начинает резко снижаться.

Рассмотрим вариант, когда предельное напряжение стали арматуры (предел текучести) определяется по результатам испытаний и также является случайной величиной. В этом случае надежность можно рассчитать по формуле:

$$P = \Phi(\beta) = \Phi\left(\frac{m_{a,crc,ult} - m_{a,crc}}{\sqrt{S_{a,crc}^2 + S_{a,crc,ult}^2}}\right), \quad (5)$$

где  $m_{a,crc,ult} = m_{\sigma,s,ult} \cdot k$ ;  $S_{a,crc,ult} = S_{\sigma,s,ult} \cdot k$ ;

$$k = 2,2 \frac{h-x}{(h_0-x)E_s} \sqrt[3]{2a^2 \frac{b}{n}}.$$

**Пример 2.** Воспользуемся данными примера 1. Пусть про предел текучести стали получена следующая статистическая информация:  $m_{\sigma,s,ult}=400$  МПа;  $S_{\sigma,s,ult}=30$  МПа. При этих данных надежность по (5) составит  $P = \Phi(1,79) = 0,963$ .

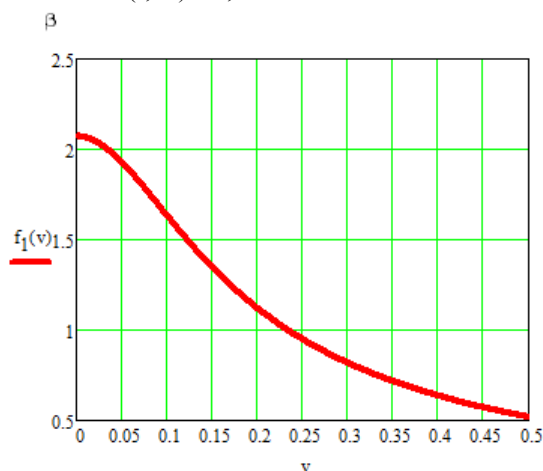


Рис. 2. Зависимость индекса надежности  $\beta$  от коэффициента вариации предела текучести стали арматуры балки

Как следует из примера 2, введение еще одной случайной величины снижает надежность железобетонной балки, т. к. в математическую модель предельного состояния добавляется некоторая неопределенность. Проанализируем влияние коэффициента вариации предела текучести стали арматуры на надежность железобетонной балки по примеру 2 (рис. 2).

Как видно на рис. 2, рост коэффициента вариации предела текучести стали арматуры оказывает серьезное влияние на индекс надежности  $\beta$ , что свидетельствует о необходимости статистического контроля производства и приемки стальной арматуры для железобетонных балок.

Можно сделать вывод, что с увеличением количества случайных величин в расчетных математических моделях предельных состояний снижается надежность элемента, т. к. вносится дополнительная неопределенность.

В работе представлены вероятностно-статистические методы расчета вероятности безотказной работы железобетонной балки по критерию ширины раскрытия нормальных трещин на основе стандарта ACI 224R-01.

Рассмотренный подход можно использовать для оценки влияния коэффициентов вариации параметров в математических моделях на надежность элементов, а также для расчетов надежности других несущих элементов сооружений.

## Литература

1. Райзер, В. Д. Теория надежности сооружений / В. Д. Райзер. – Москва: АСВ, 2010. – 384 с.
2. Utkin, V. S. Reliability analysis of existing reinforced concrete beams on normal crack length criterion / V.S. Utkin, S. A. Solovyev // International journal for computational civil and structural engineering – 2017. – No. 2. – P. 56–63.
3. Соловьев, С. А. Расчет надежности железобетонной балки по критерию прочности бетона на стадии эксплуатации / С. А. Соловьев // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2018. – № 3. – С. 17–22.
4. STATISTICS 2003-2006-ERMCO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ermco.eu/new/statistics-2003-2016/>.
5. Пирадов, К. А. Механика разрушения и теория железобетона / К. А. Пирадов, Н. В. Савицкий // Бетон и железобетон. – 2014. – № 4. – С. 23–25.
6. Уткин, В. С. Расчет надежности железобетонных балок по раскрытию трещин в бетоне при аварийных воздействиях / В. С. Уткин, С. А. Соловьев // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия: сб. докладов Междунар. науч. конф., посвящ. 85-летию кафедры желез. и каменных конструкций и 100-летию со дня рождения Н. Н. Попова (Москва, 19-20 апр. 2016 г.). – Москва: НИУ МГСУ. – 2016. – С. 472–477.

S.A. Solovyev, L.S. Shevcov  
Vologda State University

## RELIABILITY ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAM ON CRACK WIDTH BASED ON ACI 224R-01

The article describes the problem of reliability analysis of reinforced concrete beams on crack width based on the American Standard ACI 224R-01 by probabilistic and statistical method. Influence of variation coefficients of the parameters on failure probability were analyzed in the design mathematical model of limit state for reinforced concrete beam. The method of reliability analysis was offered for existing RC beams according to the criterion of normal crack width in probabilistic and statistical formulation of the problem.

Reinforced concrete beam, reliability, probability of failure, ACI, crack width, safety.



## ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗУПРОЧНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данной статье рассмотрены общие подходы к термомеханической модели разупрочнения композиционных материалов, содержатся сведения о возможном поведении материалов под воздействием тепла и полученная экспериментальным путем линейная скорость абляции различных видов полимеров. Данные, приведенные в статье, необходимы для определения силовых возможностей полимерных материалов.

Термомеханическая модель, температурное поле, полимеры, абляция.

В основу теории термомеханической модели разупрочнения положены принципы термической и механической неоднородности свойств композиционных материалов, к которым относятся стеклопластики и армированные полимеры [1–4].

Большой вклад в изучение данного вопроса внесли ученые Хитрин Л.Н., Седов Л.И., Исаханов Г.В., Журавель А.Е., Асиева А.А., Заиков Г.Е., Берлин А.А., Халтуринский Н.А. и др. Вопрос остается актуальным прежде всего потому, что современные возможности применения в качестве сырья отходов полимеров влияют на параметры процессов теоретических и прочностных свойств композиционных материалов. А в связи с принятием в ближайшее время запрета утилизировать отходы полимеров методами захоронения, еще более остро ставится задача исследования влияния структуры вторичных материалов на их физико-механические свойства.

Если композиционный материал с начальной толщиной  $h_0$  подвержен нагреву с потерей массы в соответствии с законом:

$$q_{wt} = \lambda * grad * T_{wt},$$

где  $\lambda$  – теплопроводность;

$T_{wt}$  – температура нагреваемой поверхности;

$t$  – время нагрева,

то распределение температуры по толщине материала в каждый момент времени может быть получено расчетным путем и экспериментально на установках, моделирующих натурные условия нагрева. При этом неоднородное температурное поле, которое влияет на механические характеристики каждого слоя материала, различны. Прочность изменяется от минимального значения нагреваемой поверхности с температурой  $T_w$  до максимального при наименьшей температуре  $T$ . При неполном прогреве  $T = T_0$ ,  $T_0$  – начальная температура.

Максимально допустимая прочность весь материал условно делит на две зоны: высокотемпературную, где пограничный слой обладает прочностью, которую в конструктивных расчетах возможно не учитывать ( $T_w > T(x, t)$ ), и менее нагретую  $T_w < T(x, t)$ , т. к. несущая часть толщиной  $h_t$  полностью определяет несущую способность материала.

Под несущей способностью образца при нестационарном интенсивном нагреве понимается предельная нагрузка, при которой происходит разрушение.

Толщина несущей части уменьшается вследствие уноса и прогрева материала при выбранной температуре. Температурное поле несущей части материала зависит от начальной температуры  $T_0$  и переменных граничных условий теплообмена на поверхности с температурой  $T$ . Граничные условия на поверхности с температурой  $T$  определяются динамикой изменения температурного поля всего материала, которая обусловлена особенностями режима тепло- и массопереноса в структурно неоднородном материале. Несущая часть подчиняется условиям непрерывности:

- при теплопередаче без термической деструкции связующего:

$$T(-0, t) = T(+0, t) = T, \quad (1)$$

$$[\lambda(T) \frac{dT}{dx}]_{-0} = [\lambda(T) \frac{dT}{dx}]_{+0}; \quad (2)$$

- при теплопередаче в условиях термической деструкции связующего:

$$[\lambda(T, \eta) \frac{dT}{dx}]_{-0} = [\lambda(T, \eta) \frac{dT}{dx}]_{+0}, \quad (3)$$

где  $\eta$  – степень разложения связующего.

Последовательность прогрева пластины из армированного композиционного материала при интенсивном нагреве начинается с момента, когда температурный фронт достигает поверхности ( $x=0$ ). В результате температура этой поверхности повышается до  $T$ , когда  $T < T_w$ , в то же время по толщине всей несущей части устанавливается температурный профиль, который определяется заданным распределением температуры на нагреваемой поверхности в любой момент времени, т. е. граничным условиям первого рода:

$$T_n(0, t) = T(t). \quad (4)$$

При  $T = T_w$  и  $x=0$  на поверхности, которая непосредственно подвергается нагреву высокотемпературной средой, рассматривают граничное условие второго рода, которое задает распределение плотности

теплового потока для каждой точки нагреваемой поверхности тела как функции времени, т. е.:

$$g_w(0,t) = g(t). \quad (5)$$

Прогрев и унос материала представляются как продвижение изотермической поверхности  $x=0$  с температурой  $T$  в глубь материала со скоростью, которая зависит от внешнего нагрева, характера теплообмена в пограничном слое и условий теплоотдачи в высоко-температурной части материала.

Как уже описывалось выше, прогрев армированного композиционного материала рассматривается как двухэтапный:

- прогрев, заканчивающийся при достижении температурного слоя тыльной поверхности;
- повышение температуры тыльной поверхности до критической температуры. Критическая температура  $T_{кр}$  задается исходя из следующих условий: несущая способность материала конструкции не ниже допустимой, а внутри изделия соблюдается эксплуатационный тепловой режим работы.

Относительная толщина прогретого слоя материала на первом этапе при толщине несущей части определяется условием:

$$x_t/h_t < 1, \quad (6)$$

где  $x_t$  – текущая глубина прогрева на первом этапе;

$t$  – время, в течение которого поверхность  $x=0$  нагревается до температуры  $T$ .

Если в начальный период нагрева толщина прогретого слоя значительно меньше единицы, то несущая способность материала в целом определяется прочностью исходного материала и его начальной температурой.

На втором этапе при толщине несущей части материала выполняется неравенство:

$$x_{t1}/h_t > 1, \quad (7)$$

где  $x_{t1}$  – условная текущая глубина прогрева на втором этапе.

Если тыльная сторона элемента из армированного композиционного материала теплоизолирована, можно предположить, что на втором этапе температурное поле в несущей части материала соответствует нагреву полупространства со свойствами данного материала, т. е. на поверхности  $x=h_t$  соблюдаются условия

$$T_0 < T(h_t, t) < T_{кр}, \quad (8)$$

$$g(h_t, t) = -\lambda dt(h_t, t)/dx, \quad (9)$$

где  $g(h_t, t)$  – плотность теплового потока, проходящего через тыльную поверхность.

Зависимость прочности от температуры для композиционных материалов разделяются на классы.

1 класс – это материалы (стекло, некоксобразующие пластики), прочность которых при температуре, близкой температуре абляции – результата суммарного воздействия механических сил, тепла и агрессивных сред потока, – падает до нуля;

2 класс – это материалы (стеклопластики, углепластики), имеющие конечное значение прочности вплоть до температуры абляции.

Температура абляции полимерных материалов, широко применяемых в строительстве, не превышает 900°C, а их низкая абляционная стойкость определя-

ется, как правило, устойчивостью к деструкции как механической, так и термической. Это объясняется тем, что полимеры с линейным строением легко деполимеризуются с разрывом основной цепи макромолекул и образованием низкомолекулярных осколков.

Абляционно стойкие полимерные материалы широко применяются для тепловой защиты конструктивных элементов различных конструкций. Эффективность применения обусловлена их высокой прочностью, низкой теплопроводностью, низкой плотностью, высокой удельной теплоемкостью, легкостью изготовления изделий заданных размеров и конфигурации, относительной дешевизной и доступностью.

Основным параметром абляционных свойств полимеров является линейная скорость абляции. Для полимеров, являющихся основными для производства строительных материалов, линейная скорость абляции полимеров (мм/сек) приведена в таблице [1].

Таблица

Линейная скорость абляции полимеров

Полимеры	Линейная скорость абляции, мм/сек
Фенольная смола	0,157
Кремнийорганический полимер	0,378
Полиметилметакрилат	0,446
Поликарбонат	0,487
Политетрафторэтилен	0,523
Полипропилен	0,597
Полистирол	0,645
Полиэтилен	0,673

Предельная температура выбирается по результатам испытаний материалов на растяжении или сжатии. Обоснованный выбор более высокой температуры позволяет полнее учесть силовые возможности материала. Термомеханическая модель разрушения композиционных материалов, обладающих неоднородностью, при правильном выборе предельных температур позволяет более полно оценить максимальные прочностные и термо-механические характеристики армированных композиционных материалов.

#### Литература

1. Исаханов, Г. В. Прочность армированных пластиков и ситаллов / Г. В. Исаханов, А. Е. Журавель. – Москва: Машиностроение, 1981. – 234 с.
2. Асеева, Р. М. Горение полимерных материалов / Р. М. Асеева, Г. Е. Заиков. – Москва: Наука, 1981. – 280 с.
3. Халтуринский, Н. А. Горение полимеров и механизмы действия антипиренов / Н. А. Халтуринский, А. А. Берлин, Т. В. Попова // Успехи химии. – 1984. – Т. 53, № 2. – С. 326.
4. Берлин, А. А. Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючестью / А. А. Берлин // Соросовский образовательный журнал. Химия. – 1996. – Т. 2, № 9. – С. 57.
5. Материалы из вторичного ПВХ пониженной горючести / Н. А. Халтуринский, А. В. Голованов, М.Н. Попова, Е. В. Соловьева, Ю. А. Пелевин // Известия ЮФУ. Тематический выпуск: Полимерные материалы пониженной горючести. – 2013. – № 8 (145). – С. 120–124.

**E.V. Solovyeva**  
Vologda State University

### **THERMOCHEMICAL MODEL OF WEAKENING IN COMPOSITE MATERIALS**

This article describes the General approaches to the thermomechanical model of softening of composite materials. The article contains information about the possible behavior of materials under the influence of heat and experimentally obtained linear ablation rate of different types of polymers. The data given in the article are necessary to determine the power capabilities of polymer materials.

Thermomechanical model, temperature field, polymers, ablation.





## УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОСАДКИ СВАЙ-СТОЕК В ГРУНТЕ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТА

Рассмотрена новая расчетная схема работы свай-стойки в грунте основания при расчете ее осадки, заключающейся, в отличие от расчета по СП 24.13330.2011, в учете сил трения-сцепления на поверхности сваи, находящейся в контакте с грунтом верхнего слоя выше скального грунта. На этой основе разработана расчетная формула осадки свай-стойки. Благодаря учету сил трения-сцепления расчетное значение осадки более достоверное по сравнению с существующими результатами расчетов по нормативным документам и меньше по значению, что позволяет повысить на сваю эксплуатационную нагрузку при расчетах по осадке или уменьшить размеры поперечного сечения сваи по условию ее предельной осадки и получить экономический эффект.

Свая-стойка, расчет осадки, работа сваи в грунте, силы трения-сцепления, расчетная формула осадки, экономический эффект.

Свай-стойки рассчитываются по прочности материала сваи, по несущей способности грунта основания и по осадке. Расчет свай-стоек по СП 24.13330.2011 «Свайные основания» предусмотрена проверка свай-стоек на их осадку в грунте основания фундаментов. В этом нормативном документе приведена расчетная формула для определения значения осадки свай-стойки. По ней осадка сваи определяется свойствами скального или малосжимаемого грунта основания под нижним концом сваи-стойки и свойствами материала сваи и ее размерами и формой. При этом влияние слоя грунта основания выше скального или малосжимаемого на значение осадки сваи в расчетах не учитывается. Однако это влияние имеется, и оно снижает значение осадки сваи, что чрезвычайно важно при большой длине сваи и высокой прочности слоя грунта основания выше скального. Это свидетельствует о том, что существующий метод расчетов свай-стоек на осадку нуждается в дальнейшем совершенствовании.

В работе [1] приведено усовершенствованное решение для количественной оценки осадки длинной сваи глубокого заложения и большого диаметра для висячей сваи. В [2] учтена сжимаемость материала висячей сваи при определении ее осадки в грунте основания фундамента. В [3] осадка сваи за счет сжатия определена исходя из закона Гука по формуле  $\Delta l = (l \cdot \Delta \sigma) / E_{\text{мат}}$ , где  $\Delta \sigma$  – разность напряжений на оголовке сваи и ее пяте,  $E_{\text{мат}}$  – модуль упругости материала сваи, т. е.  $\Delta \sigma = (F - \sigma_{\text{тр}} A) / A$ . В расчете не присутствует учет закономерностей распределения нагрузки по длине сваи от сил трения-сцепления и не учитываются силы отрицательного сопротивления.

В работе [4] найдена закономерность распределения сил трения-сцепления для висячих свай по длине сваи, приведено ее описание кубической параболой. Упругое сжатие на участке сваи длиной  $dz$  определено формулой  $dS = (N(z) / E_c A) dz$  для буронабивных висячих свай большой длины и большого диаметра. Расчет осадки висячих свай с учетом распределения сил

трения-сцепления по боковой поверхности по длине сваи был опубликован в [5] при различной нагруженности висячей сваи. В предлагаемой работе рассматривается проблема расчета осадки свай-стойки с учетом воздействия на сваю сил трения-сцепления на ее боковой поверхности в верхнем слое грунта основания выше скального.

В [6] приведено обоснование образования сил трения-сцепления на поверхности сваи в результате микроперемещений (деформаций) поверхностных слоев материала сваи в контакте с грунтом, приведен расчет несущей способности висячих свай с учетом этих сил.

По СП 24.13330.2011 расчет свай и свайных фундаментов по деформациям проводится исходя из условия:

$$S \leq S_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где  $S$  – по СП «деформация» сваи,  $S_{\text{пр}}$  – предельное значение деформации сваи. По [1] расчет свай-стоек и фундаментов из них по деформациям не производится, а по СП 24.13330.2011 расчет осадки одиночной сваи-стойки производится по формуле:

$$S = 0,22N / G_2 d + Nl / EA, \quad (2)$$

где обозначим  $S_2 = Nl / EA$ , составляющую часть осадки сваи в виде ее укорочения от сжимающей сваю нагрузки  $N$ , независимо от  $\varepsilon_1 = 0,22N / G_2 d$  в (2);  $l$  – длина сваи;  $E$  – модуль упругости материала сваи;  $A$  – площадь поперечного сечения сваи. В (2) считается, что осадка сваи  $S_2$  происходит за счет деформации материала сваи как стойки, опирающейся на скальный или малосжимаемый грунт под нижним концом сваи по схеме, представленной на рис. 1. Несущая способность грунта выше скального в работе сваи при расчете на осадку по СП 24.13330.2011 не учитывается. Предлагается новый более достоверный подход к расчету части осадки  $S_2$  сваи в (2).

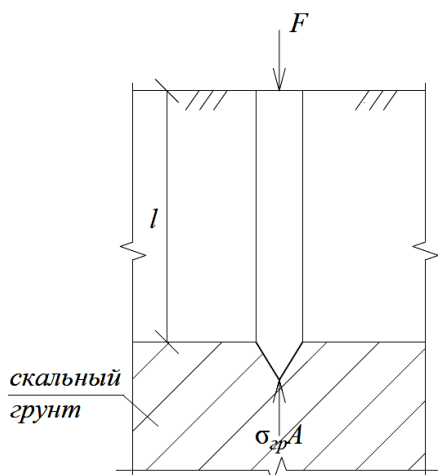


Рис. 1. Расчетная схема сваи-стойки при проверке на осадку  $S$  по СП 24.13330.2011

Фактически на поверхности сваи в контакте с грунтом возникают силы трения-сцепления  $f(x)$ , как показано на рис. 2.

Расчетная схема такой сваи-стойки представлена на рис. 2, где по [5, 6] силы трения-сцепления  $f(x)$  возникают в результате микроперемещений  $\varepsilon(x)$  поверхностных слоев (деформаций) материала сваи, находящихся в контакте с грунтом основания выше скального грунта. Участие этих сил трения-сцепления в работе сваи должно учитываться в расчетах сваи-стойки на осадку сваи, особенно при большой длине сваи, когда их влияние значимо.

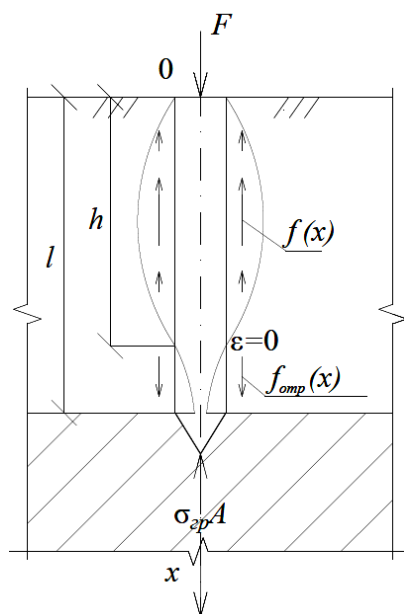


Рис. 2. Расчетная схема работы сваи-стойки в расчетах на осадку

В условии (1) и в формуле (2) осадки сваи использован принцип независимости действия сил. Осадка сваи за счет ее укорочения как упругого тела определяется по формуле  $S_2 = Nl/EA$ , что завышает значения осадки сваи.

Предлагается уточнить расчет осадки сваи за счет учета сил трения-сцепления  $f(x)$  на поверхности сваи, которые противодействуют силе  $N$  в формуле (2) и уменьшают ее влияние в укорочении сваи.

Представим процесс нагружения сваи в виде последующих этапов. Свая погружается в грунт до скального грунта. Затем к свае прикладывается нагрузка  $F$ , которая вызывает деформацию материала сваи. Благодаря этим деформациям сваи в контакте с грунтом на поверхности сваи образуются силы трения-сцепления  $f(x)$ , препятствующие нагрузке  $F$ . С увеличением нагрузки  $F$  на сваю возникает реакция  $\sigma_{гр}A$  на нижнем конце сваи от скального грунта основания, которая не должна превышать значения  $R_{гр}A$ , где  $R_{гр}$  – расчетное сопротивление скального грунта,  $A$  – площадь поперечного сечения сваи. Нагрузка  $f(x)$  при этом увеличивается, т. к. увеличиваются деформации материала сваи и в верхнем конце сваи нагрузка достигнет значения  $F = R_{гр}A + u \int_0^l f(x)dx$ , где  $u$  – периметр поперечного сечения сваи.

Реакция  $R_{гр}A$  совместно с нагрузкой  $F$  вызовет укорочение сваи по закону Гука в виде  $S_1 = \Delta l = R_{гр}A \cdot l / EA = R_{гр}l / E$ . Это будет часть от общей осадки сваи, вызванной деформацией (укорочением) сваи. Вторая часть осадки будет вызываться нагрузкой равной  $(F - R_{гр}A) = F_1$ , которой противодействуют силы  $f(x)$  на поверхности сваи. По работам [5, 6] принято  $f(x) = \varepsilon(x)q(x)\varphi_0$ , где  $\varepsilon(x)$  – деформация сваи, вызванная нагрузкой  $F$ , с учетом противодействия сил  $f(x)$ ;  $q(x)$  – боковое давление грунта на поверхности сваи. По [7]  $q(x) = \gamma \xi_0 x$ , где  $\gamma$  – объемный вес грунта,  $\xi_0$  – коэффициент бокового давления. По [6]

$\xi_0 = \frac{\mu_0}{1 - \mu_0}$ , для глин и суглинков  $\mu_0 = 0,10 \div 0,15$ .  $\varphi$  –

безразмерный коэффициент, зависящий от вида и материала сваи, вида грунта и т. д. На рис. 3 показана расчетная схема сваи и эпюра усилий  $N(x)$  в свае от  $F$ ,

отдельно в виде  $R_{гр}A$  и  $F_1 = u \int_0^l f(x)dx$  в процессе

включения ее в работу погружения в грунт от нагрузки  $F$ .

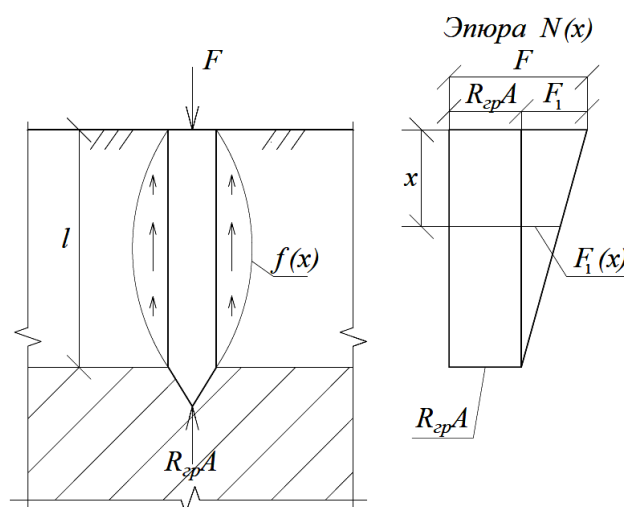


Рис. 3. Расчетная схема сваи и эпюра  $N(x)$  от  $R_{гр}A$  и  $f(x)$

Найдем укорочение  $S_2$  сваи от нагрузки  $F$ , в верхней части сваи в виде  $S_2 = \int_0^l \frac{F_1(x)dx}{EA}$ . Примем для

упрощения  $F_1(x) = F_1 \frac{l-x}{l}$  в запас надежности, тогда

$$S_2 = \int_0^l F_1 \frac{(l-x)}{l \cdot EA} dx = F_1 l / 2EA. \text{ Общая осадка сваи}$$

от предельной нагрузки в виде укорочения сваи составит:  $S_N = S_1 + S_2 = R_{гп}/E + F_1 l / 2EA$ . Формула (2) примет вид:  $S = 0,22N/G_2 d + R_{гп}/E + F_1 l / 2EA$ .

Пример. Пусть известны значения  $R_{гп} = 10 \cdot 10^6$  Па,  $l = 6$  м,  $E = 30 \cdot 10^9$  Па,  $A = 0,09$  м<sup>2</sup>, предельная нагрузка  $F_d = 2,5 \cdot 10^6$  Н получена по условию прочности материала сваи (бетона) или несущей способности грунта основания. Требуется определить осадку сваи, вызванную силой  $F_d$  только за счет ее укорочения от сжатия сваи этой силой.

$$S_{1,2} = 10 \cdot 10^6 \cdot 6 / 30 \cdot 10^9 + (2,5 \cdot 10^6 - 10 \cdot 10^6 \cdot 0,09) / 30 \cdot 10^9 = 2,05 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 2,05 \text{ мм}.$$

Расчет этой части осадки по нормам СП 24.13330.2011 составляет

$$S_{1,2} = 2,5 \cdot 10^6 \cdot 6 / 0,09 \cdot 30 \cdot 10^9 = 5,56 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5,56 \text{ мм}.$$

Результат в два раза больше, чем по предложенному методу. К значениям  $S$  по СП 24.13330.2011 добавляется осадка сваи как абсолютно твердого тела в скальном грунте по формуле  $S_{тв.т.} = 0,22N/G_2 d$ , где  $G$  – характеристика грунта расстояния от  $l$  до  $1,5l$  от верха сваи,  $d$  – расчетный диаметр сваи. Для некруглого сечения сваи  $d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$ , где  $A$  – площадь поперечного сечения сваи.

В данной работе предложен новый метод расчета осадки свай-стоек, отличающийся от метода по СП 24.13330.2011 учетом сопротивления свай-стоек за счет несущей способности верхнего слоя грунта над скальным грунтом, что приводит к уменьшению расчетного значения осадки сваи-стойки.

Благодаря уменьшению расчетной осадки сваи-стойки в грунте основания можно увеличить нагрузку на сваю в расчетах по осадке сваи или уменьшить ее

размеры в поперечном сечении, что приводит к экономическому эффекту.

Результаты работы могут быть использованы при разработке норм проектирования свайных оснований с применением свай-стоек. Кроме того, работа будет полезной в учебном процессе вузов со строительными специальностями.

## Литература

1. Осадка и несущая способность длинной сваи / А. З. Тер-Мартirosян, З. Г. Тер-Мартirosян, ЧиньТуан Вьет, И. Н. Лузин // Вестник МГСУ. – 2015. – № 5. – С. 52–60.
2. Тер-Мартirosян, З. Г. Сжимаемость материала сваи при определении осадки в свайном фундаменте / З. Г. Тер-Мартirosян, П. В. Струнин, ЧиньТуан Вьет // Жилищное строительство. – 2012. – № 10. С. 13–15.
3. Тер-Мартirosян, З. Г. Теоретические основы расчета фундаментов глубокого заложения - свай и баррета / З. Г. Тер-Мартirosян, В. В. Сидоров, П. В. Струнин // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 190–206.
4. Zhon, Z. Determination of large diameter bored pile's effective length based on Mindlin's solution / Z. Zhon, D. Wang, L. Zhang // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2015. – Vol. 2, Is. 6. – P. 422–428.
5. Уткин, В. С. Работа висячих свай в грунте основания и их расчет по осадке / В. С. Уткин // Вестник МГСУ. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 13. – Вып. 9. – С. 1125–1132.
6. Уткин, В. С. Работа висячей сваи в грунте основания фундамента зданий и сооружений и определение рабочей длины сваи по несущей способности грунта основания / В. С. Уткин // Транспортное строительство. – 2017. – № 10. – С. 17–19.
- Цытович, Н. А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для вузов / Н. А. Цытович. – 3-е изд. – Москва: Высшая школа, 1979. – 272 с.

V.S. Utkin

Vologda State University

## IMPROVED CALCULATION METHOD OF POINT-BEARING PILES SETTING IN FOUNDATION SOIL

A new design scheme of the point-bearing piles operation in foundation soil when calculating its setting which, unlike the calculation by SP 24.13330.2011, takes into account the friction-adhesion forces on the pile surface in contact with the top layer above the rocky soil is considered. On this basis, the calculation formula of point-bearing pile setting has been developed. By taking into account the friction-adhesion forces, the calculated setting value is more reliable compared to the existing calculation results by regulatory documents and less in value, which makes it possible to increase the operational load in setting calculations or reduce the cross section of the pile for the condition of its maximum setting and get an economic effect.

Point-bearing piles, setting calculation, pile performance in the ground, friction-adhesion forces, calculation formula of setting, economic effect.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Алюнов Александр Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
alyunov@mail.ru

### **Бакаев Владимир Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bvn46@mail.ru

### **Баранов Вячеслав Викторович**

доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры бизнеса и делового администрирования РАНХ и ГС при Президенте РФ (Москва, Россия)  
yar.baranow@gmail.com

### **Бормосов Николай Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bormosovna@vogu35.ru

### **Булавин Вячеслав Федорович**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bulavin35@mail.ru

### **Вяткина Ольга Сергеевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
olga-vyatkina@mail.ru

### **Жаравин Дмитрий Евгеньевич**

студент кафедры управляющих и вычислительных систем Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
zharavin.dima@yandex.ru

### **Звонарев Антон Алексеевич**

младший разработчик программного обеспечения ООО «Яндекс» (Москва, Россия)  
shotinleg@yandex.ru

### **Казакова София Алексеевна**

инженер-технолог Вологодского оптико-механического завода (Вологда, Россия)  
sony21099@yandex.ru

### **Кияненко Константин Васильевич**

доктор архитектуры, профессор кафедры архитектуры и градостроительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
kiyanenko\_k@yahoo.com

### **Козин Дмитрий Юрьевич**

студент кафедры управляющих и вычислительных систем Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
dimakozin@gmail.com

### **Мартыненко Данила Вадимович**

студент кафедры водоснабжения и водоотведения Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
danilamonstr35@yandex.ru

**Мясникова Светлана Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
lana-m-11@mail.ru

**Никифорова Мария Михайловна**

студент кафедры управления инновациями и организации производства Института управления, экономики и юриспруденции Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
tigr.2010@mail.ru

**Осипов Юрий Романович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета, заслуженный деятель науки и техники РФ (Вологда, Россия)  
iur.osipov2011@yandex.ru

**Очур-оол Аржана Петровна**

старший преподаватель кафедры общепрофессиональных дисциплин Тувинского государственного университета, аспирант кафедры строительных материалов, стандартизации и сертификации НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск (Кызыл, Республика Тува)  
adacka@mail.ru

**Пивень Галина Юрьевна**

магистрант кафедры машиностроения Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
ms.piven@inbox.ru

**Полянский Андрей Михайлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
ampol@yandex.ru

**Попов Игорь Павлович**

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов Курганского государственного университета (Курган, Россия)  
ip.porow@yandex.ru

**Севен Сергей Сергеевич**

студент инженерно-технического факультета Тувинского государственного университета (Кызыл, Республика Тува)  
7sergeyseven7@gmail.com

**Смирнова Екатерина Андреевна**

аспирант кафедры автоматизации и вычислительной техники Института математических, естественных и компьютерных наук Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
kimberly1991@yandex.ru

**Соловьев Сергей Александрович**

старший преподаватель, аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
ser6sol@yandex.ru

**Соловьева Екатерина Вячеславовна**

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
evsvologda@mail.ru

**Старкова Лариса Евгеньевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
star.53@mail.ru

**Степанов Александр Сергеевич**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
alex.stepanov@mail.ru

**Уткин Владимир Сергеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета, заслуженный работник высшей школы (Вологда, Россия)  
utkinvogtu@mail.ru

**Федотовский Сергей Борисович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
fsb1960@yandex.ru

**Фомичев Дмитрий Юрьевич**

студент кафедры управляющих и вычислительных систем института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
qwerty12345987655@mail.ru

**Чжао Кай**

аспирант кафедры управления и информатики в технических системах Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Москва, Россия)  
zhaokaikimi@gmail.com

**Шевцов Леонид Сергеевич**

студент кафедры промышленного и гражданского строительства инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
leonid98burner@gmail.com

**Шорин Владимир Александрович**

доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
ad@vogu35.ru

**Щекин Сергей Михайлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
ship12g@gmail.com

**Яняк Сергей Владимирович**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
tms@vogu35.ru

**Яхричев Виктор Васильевич**

ведущий инженер кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
yahrichev@yandex.ru

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Alyunov Alexander Nikolaevich**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment, Vologda State University (Vologda, Russia)  
alyunov@mail.ru

**Bakaev Vladimir Nikolaevich**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Control and Computer Systems, Vologda State University (Vologda, Russia)  
alyunov@mail.ru

**Baranov Vyacheslav Viktorovich**

Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Business Administration, Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation (Moscow, Russia)  
yar.baranow@gmail.com

**Bormosov Nikolay Aleksandrovich**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Automobiles and Automobile Industry, Vologda State University (Vologda, Russia)  
bormosovna@vogu35.ru

**Bulavin Vyacheslav Fyodorovich**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
bulavin35@mail.ru

**Vyatkina Olga Sergeevna**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment, Vologda State University (Vologda, Russia)  
olga-vyatkina@mail.ru

**Zharavin Dmitry Evgenievich**

Bachelor student of the Department of Control and Computer Systems, Institute of Mechanical Engineering, Energetics and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)  
zharavin.dima@yandex.ru

**Zvonaryov Anton Alekseevich**

Junior software developer of Yandex LLC (Moscow, Russia)  
shotinleg@yandex.ru

**Kazakova Sofia Alekseevna**

Manufacturing process engineer of Vologda Optomechanical Plant (Vologda, Russia)  
sony21099@yandex.ru

**Kiyanenko Konstantin Vasilyevich**

Doctor of Architecture, Professor of the Department of Architecture and Urban Planning, Vologda State University (Vologda, Russia)  
kiyanenko\_k@yahoo.com

**Kozin Dmitry Yuryevich**

Bachelor student of the Department of Control and Computer Systems, Institute of Mechanical Engineering, Energetics and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)  
dimakozin@gmail.com

**Martynenko Danila Vadimovich**

Student of the Department of Water Supply and Wastewater Engineering, Engineering Construction Institute, Vologda State University (Vologda, Russia)  
danilamonstr35@yandex.ru

**Myasnikova Svetlana Alexandrovna**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Motor Roads, Vologda State University (Vologda, Russia)  
lana-m-11@mail.ru

**Nikiforova Maria Mikhailovna**

Student of the Department of Innovation Management and Production Organization, Institute of Management, Economics and Law, Vologda State University, (Vologda, Russia)  
tigr.2010@mail.ru

**Osipov Yuriy Romanovich**

Doctor of Sciences in Technology, Professor of the Department of Mechanical Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
iur.osipov2011@yandex.ru

**Ochur-ool Arzhana Petrovna**

Senior Lecturer of the Department of General Engineering, Tuva State University, Kyzyl; post-graduate student of the Department of Building Materials, Standardization and Certification, NGASU (Sibstrin), Novosibirsk (Kyzyl, the Republic of Tuva)  
adacka@mail.ru

**Piven Galina Yurievna**

Master student of the Mechanical Engineering Department, Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)  
ms.piven@inbox.ru

**Polyansky Andrei Mikhailovich**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University, (Vologda, Russia)  
ampol@yandex.ru

**Popov Igor Pavlovich**

Senior Lecturer of the Department of Machine Building Technology, Metal-cutting Machines and Tools, Kurgan State University (Kurgan, Russia)  
ip.popov@yandex.ru

**Seven Sergey Sergeevich**

Student of Engineering and Technical Faculty, Tuva State University (Kyzyl, the Republic of Tuva)  
7sergeyseven7@gmail.com

**Smirnova Ekaterina Andreevna**

Post-graduate student of the Department of Automation and Computer Engineering, Institute of Mathematical, Natural and Computer Sciences, Vologda State University (Vologda, Russia)  
kimberly1991@yandex.ru

**Solovyev Sergey Alexandrovich**

Senior Lecturer, post-graduate student of the Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
ser6sol@yandex.ru

**Solovyova Ekaterina Vyacheslavovna**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
evsvologda@mail.ru

**Starkova Larisa Evgenievna**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Control and Computing Systems, Vologda State University (Vologda, Russia)  
star.53@mail.ru



**Stepanov Alexandr Sergeevich**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
alex.stepanov@mail.ru

**Utkin Vladimir Sergeevich**

Doctor of Sciences in Technology, the honored worker of the higher school of the Russian Federation, Professor of the Department of Industrial and Civil Construction, Vologda State University (Vologda, Russia)  
utkinvogtu@mail.ru

**Fedotovskij Sergey Borisovich**

Candidate of Sciences in Technology, Associate professor of the Department of Control and Computing Systems, Institute of Mechanical Engineering, Energetics and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)  
fsb1960@yandex.ru

**Fomichev Dmitry Yuryevich**

Bachelor student of the Department of Control and Computing Systems, Institute of Mechanical Engineering, Energetics and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)  
qwerty12345987655@mail.ru

**Zhao Kai**

Postgraduate student of the Department of Management and Informatics in Technical Systems, Moscow State Technological University STANKIN (Moscow, Russia)  
zhaokaikimi@gmail.com

**Shevtsov Leonid Sergeevich**

Student of the Department of Industrial and Civil Construction of Institute of Engineering Construction, Vologda State University (Vologda, Russia)  
leonid98burner@gmail.com

**Shorin Vladimir Aleksandrovich**

Doctor of Sciences in Chemistry, Professor, the head of the Department of Motor Roads, Vologda State University (Vologda, Russia)  
ad@vogu35.ru

**Shchekin Sergey Mikhailovich**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
ship12g@gmail.com

**Yanyak Sergey Vladimirovich**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
tms@vogu35.ru

**Yakhrichev Victor Vasilievich**

Leading Engineer of the Department of Mechanical Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
yahrichev@yandex.ru

*Научное издание*

ВЕСТНИК ВОЛОГОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Технические науки  
№ 2 (4) / 2019

Главный редактор А. А. Кочкин

Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС77-75456 от 05.04.2019 г.  
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор)

Подписано в печать 24.09.2019. Выпуск в свет                      Формат 60 x 84/8  
Уч.-изд. л. 8,12. Усл. печ. л. 11,25. Тираж 70 экз. Заказ №                      . Бесплатно

---

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»  
160000, Вологодская область, город Вологда, улица Ленина, дом 15

Отпечатано: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Вологодский научный центр Российской академии наук»  
(ФГБУН ВолНЦ РАН)

160014, г. Вологда, ул. Горького, 56а  
Тел.: 59-78-03, e-mail: common@vscc.ac.ru