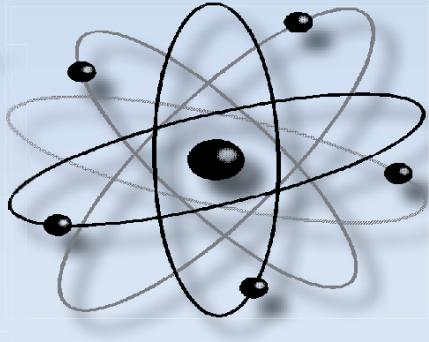


# Учёные записки

ISSN 2076-4359

№ 1 (65)  
2023

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.  
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций России. Свидетельство ПИ № ФС7738212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Ученые записки Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, прсылайте свои материалы на адрес электронной почты:  
[journal@knastu.ru](mailto:journal@knastu.ru)

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КнАГТУ», находящейся на сайте  
<http://www.knastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и издателя:  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,  
пр. Ленина, д. 27  
Телефон для справок:  
+7 (4217) 24-13-48

Адрес редакции: 681013,  
г. Комсомольск-на-Амуре,  
ул. Комсомольская, д. 50, ауд.508  
Телефон для справок:

+7 (4217) 24-13-48

Индекс журнала  
в каталоге Роспечать: 66090.

Цена свободная.

© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КнАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

**Учредитель:**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»**

Журнал основан в 2010 году

#### Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:

**Алексей Иванович Евстигнеев,**  
д-р техн. наук, проф.

Заместитель главного редактора:

**Александр Витальевич Космынин,**  
проректор по научной работе,  
д-р техн. наук, проф.

Выпускающий редактор серии  
«Науки о природе и технике»:

**Сергей Николаевич Иванов,**  
д-р техн. наук, доц.

Выпускающий редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:

**Галина Алексеевна Шушарина,**  
канд. филол. наук, доц.

Технический редактор:

**Татьяна Николаевна Карпова**

Дизайн и верстка:

**Оксана Вадимовна Приходченко,**  
канд. техн. наук

Менеджер информационных ресурсов:

**Иван Константинович Андрианов,**  
канд. техн. наук

#### Серия: «Науки о природе и технике»

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (**Сергей Иванович Феоктистов**,  
д-р техн. наук, проф.);
2. Энергетика (**Сергей Николаевич Иванов**, д-р техн. наук, доц.);
3. Управление, вычислительная техника и информатика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф., **Anatoliy Alexandrovich Burenin**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, **Konstantin Sergeevich Bormotin**, д-р физ.-мат. наук, доц.);
4. Математика и механика (**Anatoliy Alexandrovich Burenin**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
5. Машиностроение (**Vladimir Sergeevich Shetinin**, д-р техн. наук, доц., **Boris Yakovlevich Mokrițkiy**, д-р техн. наук, доц.);
6. Металлургия и металловедение (**Oleg Viktorovich Bashkov**, д-р техн. наук, доц.);
7. Флот и кораблестроение (**Viktor Mihalovich Kozin**, д-р техн. наук, проф.);
8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (**Oльга Григорьевна Шакирова**, д-р хим. наук, доц.);
9. Строительство и архитектура (**Nikolai Petrovich Kradin**, д-р архитектуры, проф., член-корреспондент РААСН, **Oleg Evgen'evich Sisoev**, д-р техн. наук, доц.).

#### Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:

1. Философия, социология и культурология (**Яна Станиславовна Крыжановская**,  
д-р культурологии, доц.; **Евгения Валерьевна Савелова**, д-р философских наук,  
кандидат культурологии, доц., **Виктория Юрьевна Прокофьева**, д-р филол. наук,  
проф., **Илья Игоревич Докучаев**, д-р филос. наук, проф.);
2. Филология и искусствознание (**Oleg Aleksandrovich Buzuev**, д-р филос. наук,  
проф.);
3. Психология и педагогика (**Tatyana Evgen'evna Nalivajko**, д-р пед. наук, проф.);
4. История (**Жанна Валерьевна Петрунина**, д-р ист. наук, проф.);
5. Экономика (**Геннадий Иванович Усанов**, д-р экон. наук, проф.).

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА  
«УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»**

**СЕРИЯ: «НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ»**

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦҮЙ СЮЙ, профессор Шенъянского аэрокосмического университета (КНР)

**ЭНЕРГЕТИКА**

АЛЕКСАНДР ЛООС, доктор философии, профессор Академии Грюндига в Нюрнберге (Германия)

ИШТВАН ВАЙДА, доктор технических наук, профессор, директор Института автоматики Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

ШАНДОР ХАЛАС, доктор технических наук, профессор Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ КУЛЬЧИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Миякизи (Япония)

**МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА**

НИКИТА ФЁДОРОВИЧ МОРОЗОВ, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости Санкт-Петербургского государственного университета

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ ЛЕВИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математического моделирования, механики и мониторинга природных процессов Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

БОРИС ДМИТРИЕВИЧ АННИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом механики деформируемого твёрдого тела Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

ЭДУАРД СТЕПАНОВИЧ ГОРКУНОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института машиноведения УрО РАН

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ХОЛЬКИН, академик РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова

СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ГРИГОРЬЕВ, доктор технических наук, профессор, ректор Московского государственного технологического университета «Станкин»

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ**

ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ КАБЛОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского института авиационных материалов

КОНСТАНТИН ВСЕВОЛОДОВИЧ ГРИГОРОВИЧ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией диагностики материалов Института metallurgии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

**ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

ЛЕОНID АНАТОЛЬЕВИЧ НАУМОВ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем морских технологий ДВО РАН

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ**

ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ КИСЕЛЕВ, академик РАСХН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник Дальневосточного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института сельского хозяйства РАСХН

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

ШИ ТИЕМАО, доктор философии, профессор, проректор Шенъянского архитектурно-строительного университета (КНР)

**СЕРИЯ: «НАУКИ О ЧЕЛОВЕКЕ, ОБЩЕСТВЕ И КУЛЬТУРЕ»**

**ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ**

ДАВИД ИЗРАИЛЕВИЧ ДУБРОВСКИЙ, доктор философских наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института философии РАН

ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ СЕРДЮКОВ, доктор философских наук, профессор, профессор кафедры философии, социологии и права Дальневосточного государственного университета путей сообщения

**ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОЗНАНИЕ**

СВЕТЛANA ГРИГОРЬЕВНА ТЕР-МИНАСОВА, доктор филологических наук, профессор, президент факультета иностранных языков и регионоведения Московского государственного университета

ВАН ЦЗИНЬЛИН, доктор философии, профессор, директор Института международного образования Чанчуньского университета (КНР)

**ПСИХОЛОГИЯ И ПЕДАГОГИКА**

ЕКАТЕРИНА ИОСИФОВНА АРТАМОНОВА, доктор педагогических наук, профессор кафедры педагогики высшей школы Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

**ПОЛИТОЛОГИЯ И ПРАВО**

НИКОЛАЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ МЕРЕЦКИЙ, доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовно-правовых дисциплин Дальневосточного государственного университета путей сообщения

**ИСТОРИЯ**

АЛЕКСАНДР МАНУЭЛЬЕВИЧ РОДРИГЕС-ФЕРНАНДЕС, доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой новой и новейшей истории Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

**ЭКОНОМИКА**

АЛЕКСАНДР ЕВСТРАТЬЕВИЧ ЗУБАРЕВ, доктор экономических наук, профессор, первый проректор по стратегическому развитию и международному сотрудничеству Тихоокеанского государственного университета

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА  
MANAGEMENT, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

**Андианов И. К., Палков К. А., Чепурнова Е. К.**  
**I. K. Andrianov, K. A. Palkov, E. K. Chepurnova**

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ  
В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛОВ ЛОПАТОК ТУРБИН, НА ПРОЦЕСС РАСКРЫТИЯ  
ТРЕЩИН ОТРЫВА**

**EFFECT OF IMPURITIES IN HEAT RESISTANT NICKEL ALLOYS USED AS TURBINE  
BLADE MATERIALS ON THE CRACK OPENING PROCESS**

**Андианов Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Ivan K. Andrianov** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Палков Константин Алексеевич** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: pka.knastu@gmail.com.

**Konstantin A. Palkov** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: konstantin.palkov01@gmail.com.

**Чепурнова Елена Константиновна** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: el.chep@bk.ru.

**Elena K. Chepurnova** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: el.chep@bk.ru.

**Аннотация.** В работе проведено исследование влияния примесей в составе жаропрочных никелевых сплавов на процесс раскрытия трещины в пластине на примере задачи А. Гриффитса. Получены значения вертикальных перемещений берегов трещины. Проведена оценка способности различных никелевых сплавов сопротивляться развитию трещин при действии растягивающей нагрузки. Результаты исследования имеют важное значение для оценки трещиностойкости материалов лопаток газовых турбин.

**Summary.** The study of the influence of impurities in the composition of heat-resistant nickel alloys on the crack opening process in the plate on the example of the A. Griffiths problem has been carried out. The values of vertical displacements of the crack banks have been obtained. An estimation of the ability of various nickel alloys to resist crack development under tensile load has been carried out. The results of the research are important for estimating crack resistance of gas turbine blades materials.

**Ключевые слова:** трещина, никелевые сплавы, трещиностойкость, лопатка турбины.

**Key words:** crack, nickel alloys, crack resistance, turbine blade.

*Научное исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10114 «Разработка системы диагностирования повреждений турбинных лопаток и способа оптимизации теплоотвода в условиях термической усталости».*

УДК 629.7

**Введение.** На сегодняшний день активное развитие турбомашиностроения направлено не только в сторону увеличения рабочих температур с целью повышения КПД турбины, но и в сторону выбора жаропрочных сплавов, способных выдерживать многоциклочное нагружение в условиях высоких температур. Наибольшее распространение среди материалов лопаток турбин полу-

чили жаропрочные никелевые сплавы, способные выдерживать длительное силовое и тепловое воздействия [1]. При этом, несмотря на общую никелевую основу, механические свойства сплавов отличаются ввиду наличия примесей, соответственно, поведение данных сплавов при нагружении будет различаться. Особенno важен данный вопрос при исследовании дефектов лопаток турбин. Следует подчеркнуть, что от выбора материала лопаток зависит длительность безотказной эксплуатации газовой турбины. Выход из строя лопаток раньше эксплуатационного срока недопустим, поскольку может привести к большим временным и финансовым потерям.

Таким образом, *объектом исследования* являлись жаропрочные никелевые сплавы, используемые при изготовлении элементов газотурбинных двигателей, в частности лопаток турбин, работающих при повышенных температурах. *Предмет исследования* – влияние примесей никелевых сплавов на поведение материалов в процессе раскрытия трещин.

Согласно анализу литературных источников особенности распространения трещин рассмотрены в работах [2–6], вопросы диагностирования дефектов исследованы в трудах [7–13]. Проблемы расчёта напряжённо-деформированного состояния в окрестности трещины решались в работах [14; 15]. Зарубежные исследования в области жаропрочных никелевых сплавов проведены в работах [16–18], вопросы состава никелевых сплавов в качестве материалов лопаток турбин исследованы в трудах [19; 20]. Следует отметить, что во многих работах, в частности в области материаловедения, как правило, оценивается влияние примесей на процесс трещинообразования, зарождения дефектов. В данном же исследовании предложено оценить влияние примесей на процесс развития уже имеющейся трещины, что обуславливает новизну работы в рамках исследований о трещиностойкости жаропрочных никелевых сплавов. *Актуальность исследования* обусловлена тем, что на сегодняшний день достаточно активно развиваются технологии диагностирования трещин в лопатках турбин, предлагаются методы повышения их тепловой защиты с целью снижения вероятности трещинообразования. Соответственно, важной представляется оценка влияния материала на процесс распространения трещин в никелевых сплавах.

Цель работы заключалась в оценке влияния примесей в составе жаропрочных никелевых сплавов на процесс раскрытия трещин в материале. В соответствии с целью работы были определены задачи исследования, а именно: провести статическую постановку задачи линейной теории упругости для пластины с трещиной; провести сравнительный анализ перемещений берегов трещины при действии растягивающей нагрузки для никелевых жаропрочных сплавов с различным содержанием примесей; оценить различия для каждого из рассматриваемых сплавов.

Для решения поставленных задач использовались *методы исследований* в области механики разрушений: применялся принцип суперпозиции, позволяющий рассмотреть действие нагрузки, приложенной по берегам трещины отрыва в пластине из изотропного упругого материала; для оценки перемещений и напряжений использовалась модель Л. Я. Леонова, В. В. Панасюка. Выбор в качестве постановки задачи растяжения пластины с трещиной обусловлен *практической значимостью исследования*, поскольку результаты работы могут быть использованы при оценке развития трещин в лопатках турбин, находящихся под воздействием растягивающей центробежной силы, в процессе эксплуатации.

**Материалы и методы исследования.** На основании анализа справочной информации о жаропрочных никелевых сплавах [13] была составлена табл. 1, отражающая средние значения двух основных компонентов примесей в сплавах ЭИ437А, ВЖ136, ЭК79, ЭП742, ЭП741, ЭИ698, ЭИ437БУ, помимо основы (никеля); название и процент содержания компонентов в сплаве, а также значения модулей упругости I рода  $E$  для температур: 20 °C, 650 °C. Данный выбор обусловлен тем, что при температуре 20 °C механические свойства представленных никелевых сплавов практически не отличаются, наибольшие различия наблюдаются при повышенных температурах. Кроме того, лопатки газовых турбин в процессе эксплуатации испытывают высокотемпературное нагружение.

Постановка задачи для плоского напряжённого состояния при растяжении пластины с трещиной [14] в области  $-l \leq x \leq l$ , где  $2l$  – длина трещины, представлена на рис. 1. Вертикальные



перемещения и берегов трещины будем определять с помощью модели Л. Я. Леонова, В. В. Панасюка [15]:

$$u(x) = -\frac{1}{\pi E} \int_{-l}^l p(\xi) \Gamma(x, \xi) d\xi \quad (1)$$

где  $\Gamma(x, \xi)$  – функция Грина:

$$\Gamma(x, \xi) = \ln \left( \frac{l^2 - x\xi - \sqrt{(l^2 - x^2)(l^2 - \xi^2)}}{l^2 - x\xi + \sqrt{(l^2 - x^2)(l^2 - \xi^2)}} \right).$$

Таблица 1

Примеси и механические свойства жаропрочных никелевых сплавов

Сплав	Средние зна- чения приме- сей, %	Основные компоненты примесей (%)	$E$ , МПа, при $t = 20^\circ\text{C}$	$E$ , МПа, при $t = 650^\circ\text{C}$
ЭИ437А	25,8	Cr (20,5 %)	$1,9 \cdot 10^5$	$1,52 \cdot 10^5$
ВЖ136	30,5	Cr (16,5 %)	$2 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$
ЭК79	38,1	Co (13,7 %)	$2 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$
ЭП742	38,9	Cr (14 %)	$2,1 \cdot 10^5$	$1,83 \cdot 10^5$
ЭП741	43,8	Co (15,7 %)	$2 \cdot 10^5$	$1,74 \cdot 10^5$
ЭИ698	26,5	Cr (14,5 %)	$2 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$
ЭИ437БУ	26,5	Cr (20,5 %)	$2 \cdot 10^5$	$1,55 \cdot 10^5$

Нормальные напряжения в области вне трещины  $|x| > l$  вследствие действия поверхностной нагрузки  $p = p(x)$  определяются согласно [15]:

$$\sigma_y(x) = -\frac{1}{\pi \sqrt{x^2 - l^2}} \int_{-l}^l \frac{p(\xi) \sqrt{l^2 - x^2}}{(x - \xi)} d\xi, \quad x > l. \quad (2)$$

Коэффициент интенсивности напряжений для трещины отрыва определяется согласно [15]:

$$K_I = -\frac{1}{\pi l} \int_{-l}^l \frac{\sigma_y(x) \sqrt{l+x}}{(l-x)} dx. \quad (3)$$

**Результаты исследования.** На основании соотношений (1), (2) проведён расчёт задачи А. Гриффитса для трещины эллиптического типа с малой полуосью начального раскрытия  $h = 0,01$  мм в пластине длиной  $2l = 10$  мм для жаропрочных никелевых сплавов ЭИ437А, ВЖ136, ЭК79, ЭП742, ЭП741, ЭИ698, ЭИ437БУ (см. табл. 1). Пластина нагружена давлением:  $p = \sigma = 200$  МПа, что с практической стороны обусловлено возникающими растягивающими напряжениями в лопатках турбин от действия центробежных сил. Температурное условие:  $t = 650^\circ\text{C}$ .

Нормальные напряжения  $\sigma_y$  вне трещины при  $|x| > l$ , вызванные действием давления  $\sigma$  на берегах трещины, представлены на рис. 2, согласно которому по мере приближения к вершине трещины напряжения возрастают, стремясь к бесконечности. Согласно (3) коэффициент интенсивности напряжений при заданных условиях задачи  $K_I = 25$  МПа · м $^{1/2}$ , что меньше вязкости разрушения для данных сплавов, следовательно, ускоренного роста трещины наблюдаться в данной задаче не будет.

Результаты вертикальных перемещений берегов трещины при растягивающем нагружении для исследуемых сплавов представлены на рис. 3.

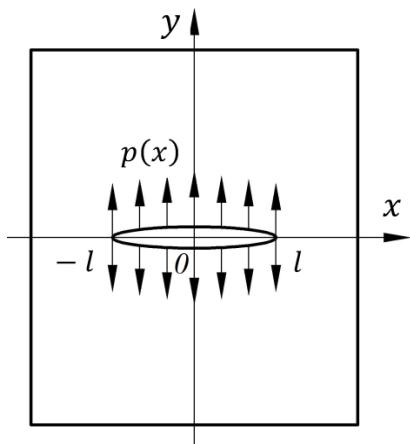


Рис. 1. Постановка задачи  
для пластины с трещиной

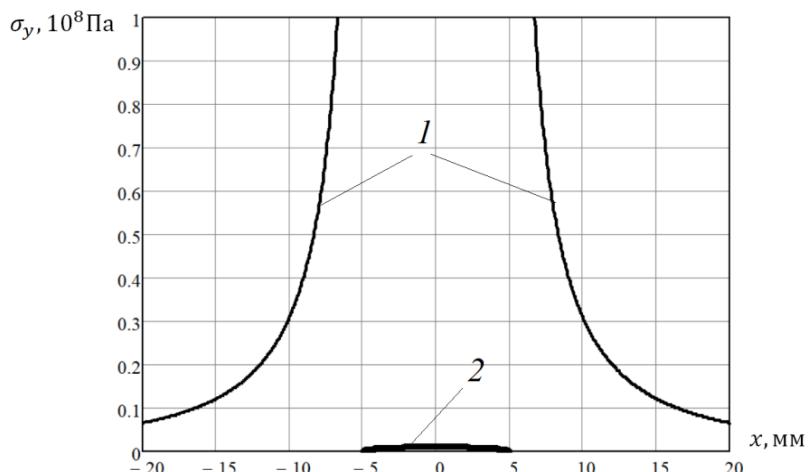


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений вблизи  
трещины: 1 – напряжения  $\sigma_y$  при  $x < -l, x > l$ ;  
2 – верхний берег трещины

**Обсуждение и заключение.** Согласно результатам перемещений верхнего берега трещины (см. рис. 3) наибольшие перемещения наблюдаются у сплавов ЭИ437А, ЭИ437БУ, ВЖ136, ЭИ698; данные сплавы содержат наименьшее количество примесей из исследуемых сплавов (см. табл. 1). В отношении сплавов ЭК79, ЭП742, ЭП741, содержащих, помимо никелевой основы, примеси других веществ более 35 %, в частности кобальта и хрома, отмечается наименьшее отклонение берегов трещины при растяжении. Наибольшее отличие в вертикальных перемещениях берегов трещин наблюдается у сплавов ЭИ437А ( $u|_{x=0} = 13,2$  мкм) и ЭП742 ( $u|_{x=0} = 10,9$  мкм) – оно составляет около 20 %. Отличием сплавов ЭК79, ЭП742, ЭП741, которые лучше всего сопротивляются раскрытию трещин, является одновременное наличие в составе сплавов двух компонентов: кобальта и хрома.

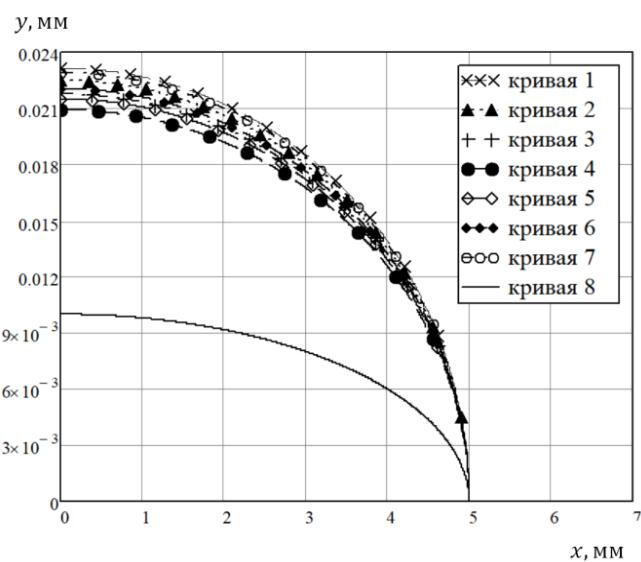


Рис. 3. Положение верхнего берега трещины при  $0 \leq x \leq l$  после перемещения вследствие  
нагрузки: 1 – сплав ЭИ437А; 2 – сплав ВЖ136; 3 – сплав ЭК79; 4 – сплав ЭП742; 5 – сплав ЭП741;

6 – сплав ЭИ698; 7 – сплав ЭИ437БУ; 8 – начальное раскрытие трещины без нагрузки

Таким образом, выбор жаропрочного никелевого сплава влияет на сопротивление материала нагружаемого элемента в процессе развития трещины при наличии растягивающего усилия. По



результатам исследования наблюдается корреляция между процентом примесей кобальта и хрома в составе никелевых сплавов и поведением материалов при перемещении берегов трещин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жаропрочные сплавы для промышленных газовых турбин // Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». – URL: <https://viam.ru/review/3800> (дата обращения: 12.10.2022). – Текст: электронный.
2. Дуб, А. В. Исследование механизма образования трещин и разрушения рабочих лопаток турбин АЭС / А. В. Дуб, А. Е. Корнеев, А. С. Гуденко // Тяжёлое машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 2-5.
3. Разрушение рабочих лопаток турбины вследствие высокотемпературной усталости / Ю. П. Тарабенко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4 (8). – С. 132-138.
4. Людинецкий, С. С. Предупреждение образования трещин на деталях паровых турбин из высокохромистых сталей при ручной аргонодуговой сварке / С. С. Людинецкий // Энергетик. – 2007. – № 2. – С. 22-23.
5. Обнаружение поверхностных трещин в роторах паровых турбин методом акустической эмиссии без демонтажа ротора / В. Ф. Резинских [и др.] // Энергетик. – 2007. – № 5. – С. 9-10.
6. Моделирование устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины авиадвигателей при простом и сложном циклах нагружения / Н. В. Туманов [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. – 2009. – № 3-1 (19). – С. 188-199.
7. Туманов, Н. В. Прогнозирование остаточного ресурса дисков турбины авиадвигателей на основании расчёта периода устойчивого роста трещин малоцикловой усталости / Н. В. Туманов, М. А. Лаврентьева, С. А. Черкасова // Вестник Московского авиационного института. – 2011. – Т. 18. – № 5. – С. 33-41.
8. Орлов, М. Р. Развитие водородных трещин в монокристаллических отливках охлаждаемых рабочих лопаток турбины ГТД / М. Р. Орлов // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2000. – № 2. – С. 23-27.
9. Гладштейн, В. И. Кинетика роста трещин на литых корпусных деталях турбин в процессе эксплуатации / В. И. Гладштейн, В. П. Плотников // Теплоэнергетика. – 2000. – № 4. – С. 22-26.
10. Закономерности развития поверхностных трещин в материале лопаток паровых турбин / А. П. Захаров [и др.] // Труды Академэнерго. – 2019. – № 3 (56). – С. 107-121.
11. Нгуен, Нгок Т. Анализ механики разрушения и работоспособности лопатки газовой турбины при наличии трещины / Т. Нгуен Нгок, Г. С. Коленько // Материаловедение. Энергетика. – 2020. – Т. 26. – № 3. – С. 56-69.
12. Яруллин, Р. Р. Развитие трещины в имитационной модели диска турбины ГТД при эксплуатационных условиях нагружения / Р. Р. Яруллин, В. Н. Шлянников, А. Г. Суламанидзе // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 2. – С. 203-217.
13. Сплав ЭИ437БУ (ХН77ТЮР) жаропрочный на никелевой основе // Inzhener-Info, 2016 – 2022. – URL: <https://inzhener-info.ru/razdely/materialy/zharoprovchnye-stali-i-splavy/splavy-na-nikelevoj-osnove/zharoprovchnye/splav-ei437bu-khn77tyur-zharoprovchnyj-na-nikelevoj-osnove.html> (дата обращения: 12.10.2022). – Текст: электронный.
14. Биргер, И. А. Сопротивление материалов / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 561 с.
15. Пестриков, В. М. Механика разрушения / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2012. – 552 с.
16. Glotka, A. & Haiduk, S. Mathematical modelling of heat-resistant nickel alloys high temperature corrosion. Reporter of the Priazovsky State Technical University. Section: Technical sciences. – 2019. – N 1. – P. 30-38. DOI: 10.31498/2225-6733.38.2019.181273.
17. Tyagunov, A. Structural changes in melts of heat-resistant nickel alloys. – 2016. – N 16. – P. 16-22. DOI:10.14529/met160402.
18. Russikh, Andrey, Krasikov, Sergey & Zhilina, Ekaterina & Podkorytov, Sergey. Thermodynamic modeling of the rare elements behavior during the dissolution of heat-resistant nickel alloys waste in mineral acids. Butlerov Communications. – 2019. – N 59. – P. 99-103. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/19-59-7-99.
19. Nanaware, Animesh, Pawar, Shivam, Manickam, Ramachandran. Mechanical Characterization of Nickel Alloys on Turbine Blades // REST Journal on Emerging trends in Modelling and Manufacturing. – 2015. – N 11. – P. 15-19.
20. Sahoo, Benudhar, Panigrahi, Sashi Kanta, Satpathy, Shri. Effect of aluminising on the low cycle fatigue life of a directionally solidified nickel-base alloy used for manufacturing turbine blade // International Journal of Materials and Structural Integrity. – 2018. – N 12. – P. 58. – DOI 10.1504/IJMSI.2018.093894.

**Андианов И. К., Палков К. А., Чепурнова Е. К.  
I. K. Andrianov, K. A. Palkov, E. K. Chepurnova**

## **ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ПРИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАДАЧИ О ТРЕЩИНЕ**

### **THE PRINCIPLE OF SUPERPOSITION IN FINITE ELEMENT MODELING OF THE CRACK PROBLEM**

**Андианов Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Ivan K. Andrianov** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Палков Константин Алексеевич** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: pka.knastu@gmail.com.

**Konstantin A. Palkov** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: konstantin.palkov01@gmail.com.

**Чепурнова Елена Константиновна** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: el.chep@bk.ru.

**Elena K. Chepurnova** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: el.chep@bk.ru.

**Аннотация.** В исследовании проведено конечно-элементное моделирование задачи о трещине отрыва с использованием принципа суперпозиции. Задача о растяжении пластины с трещиной была заменена простыми схемами нагружения: растяжением полосы без дефекта и нагружением поверхности трещины пластины. Сравнительный анализ для различных схем нагружения проводился для интенсивности напряжений, интенсивности относительных деформаций и результирующих перемещений. Представлены результаты использования принципа суперпозиции для линейно-упругой модели материала и упругопластичной модели с линейным упрочнением.

**Summary.** In the study, finite element modeling of the crack problem using the superposition principle was carried out. The problem of stretching a plate with a crack was replaced by simple loading schemes: stretching a strip without a defect and loading the crack surface of the plate. A comparative analysis for various loading schemes was carried out for the intensity of stresses, the intensity of relative deformations and the resulting displacements. The results of using the superposition principle for a linear elastic model of a material and an elastic-plastic model with linear hardening are presented.

**Ключевые слова:** трещина, пластина, принцип суперпозиции, конечно-элементная модель.

**Key words:** crack, plate, superposition principle, finite element model.

*Научное исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10114 «Разработка системы диагностирования повреждений турбинных лопаток и способа оптимизации теплоотвода в условиях термической усталости».*

УДК 629.7

Современное развитие методов повышения прочности изделий и конструкций неразрывно связано с оценкой трещиностойкости материалов. Первыми исследованиями в области механики разрушения занимался учёный А. А. Гриффитс [1], внёсший наибольший вклад в развитие теории

разрушения. Стоит отметить, что вопрос разрушения во многих исследованиях связывают с достижением эквивалентными напряжениями некоторого предельного значения. Однако вследствие сложного нагружения, длительного силового или теплового воздействия, а также вследствие неоднородностей самого материала причинами разрушения могут являться появление или развитие уже имеющихся трещин в материале. Данный подход к оценке прочностного ресурса изделия особенно важен при исследовании напряжённо-деформированного состояния лопаток турбин, которые разрушаются вследствие зарождения трещины и последующего отрыва части лопатки. Турбинные лопатки в процессе эксплуатации подвергаются воздействию различного рода нагрузок, соответственно, для разработки методов термопрочностной защиты лопаток, а также подходов для диагностирования трещин в этих элементах турбомашин необходима методика, адекватно отражающая напряжённо-деформированное состояние тел с трещинами [2–7]. В этой связи становится актуальным вопрос о системе допущений, позволяющих упростить постановку исследуемой задачи. Одним из эффективных подходов при решении задач о трещинах является использование принципа суперпозиции. Поэтому в данной работе требовалось провести конечно-элементное моделирование задачи о трещине и оценить допустимость использования принципа суперпозиции для модели линейно-упругого материала и упругопластического материала с линейным упрочнением.

Согласно анализу литературных источников на сегодняшний день при решении задач о трещинах достаточно часто используют принцип суперпозиции, который позволяет существенно упростить решение задачи, в частности задачи линейной теории упругости. Согласно данному принципу сложная система нагрузок заменяется суммой более простых. Результат для сложной задачи будет равен сумме результатов отдельных простых задач [1]. Известно, что при решении задачи о трещине напряжения вне области трещины возрастают, устремляясь к бесконечности по мере приближения к вершине трещины, поэтому в вершине трещины практически всегда развивается пластическая область деформирования. Однако в инженерной практике ввиду простоты методов расчёта линейной механики разрушения используется теория А. Гриффитса. Кроме того, данная теория может быть использована для упругопластичного материала в том случае, если зона пластичности в вершине трещины не превышает её берегов.

Рассмотрим применение принципа суперпозиции для пластины с трещиной, нагруженной напряжением  $\sigma$  (схема I на рис. 1). Данную задачу можно представить в виде суммы двух простых задач. По схеме III (см. рис. 1) рассматривается растяжение пластины без дефекта, а по схеме II нагружка приложена по поверхности трещины [1].

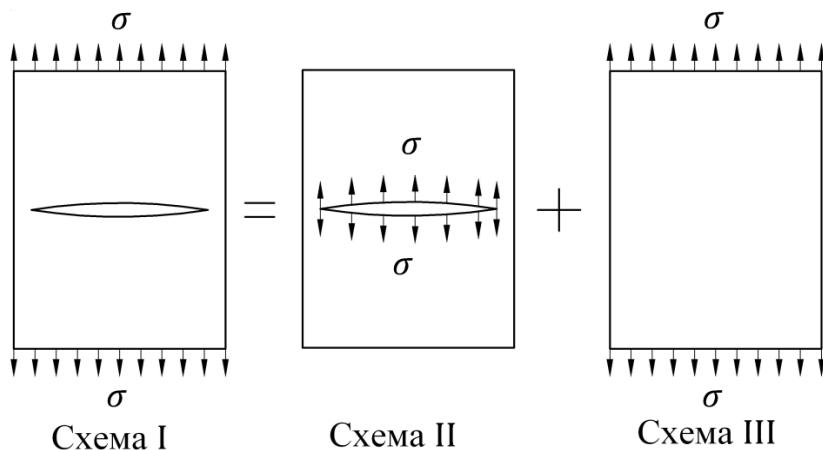


Рис. 1. Использование принципа суперпозиции в задаче о трещине

Активное развитие и внедрение в производство программных пакетов конечно-элементного анализа даёт возможность провести численный расчёт задачи о трещине. С этой целью будем использовать САЕ-программную систему ANSYS 19.

Ввиду наличия осей симметрии задачи будем строить конечно-элементную модель для четверти пластины с трещиной при следующих граничных условиях (см. рис. 2):

$$\begin{aligned}\Omega_{AB}: u_z &= u_y = 0, & \theta_{xy} = \theta_{zy} = \theta_{zx} &= 0, \\ \Omega_{CD}: u_x &= u_y = 0, & \theta_{xy} = \theta_{zy} = \theta_{zx} &= 0,\end{aligned}$$

где  $u_x, u_y, u_z$  – перемещения вдоль осей  $Ox, Oy, Oz$ ;  $\theta_{xy}, \theta_{yz}, \theta_{zx}$  – вращения в плоскостях  $xOy, yOz, zOx$ .

В случае схем нагружения I и III (см. рис. 1) напряжение прикладывалось по краям пластины:  $\sigma_z = p$ , где  $p$  – внешнее давление, а в схеме II – по берегам трещины  $\sigma_z = -p$ .

Для проведения сравнительного анализа напряжённо-деформированного состояния для схем нагружения I, II, III (см. рис. 1) введём  $\xi\{\sigma_i; \varepsilon_i; u\}$  – вектор результатов расчёта, где искомыми величинами являются:

– интенсивность напряжений:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2},$$

здесь  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;

– интенсивность относительных деформаций:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{2}(1 + \mu')} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2},$$

здесь  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – главные относительные деформации;  $\mu'$  – эффективный коэффициент Пуассона,  $\mu' = \mu$  при  $\varepsilon_i \leq \varepsilon_T$ ,  $\mu' = 0,5$  при  $\varepsilon_i > \varepsilon_T$ , здесь  $\mu$  – коэффициент Пуассона при упругом деформировании,  $\varepsilon_T$  – относительная деформация, соответствующая пределу текучести;

– результирующие перемещения:

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}.$$

Погрешность применения принципа суперпозиции при оценке напряжённо-деформированного состояния пластины с трещиной будем определять следующим образом:

$$\delta = \left| \frac{\xi^{(I)} - (\xi^{(II)} + \xi^{(III)})}{\xi^{(I)}} \right| \cdot 100\%,$$

где  $\xi^{(I)}, \xi^{(II)}, \xi^{(III)}$  – результаты исследуемой величины по схемам нагружения I, II, III.

Условие перехода материала в стадию пластичности согласно критерию Губера-Мизеса:  $\sigma_i = \sigma_T$ , где  $\sigma_T$  – предел текучести материала.

Для контроля возможного неустойчивого развития трещины отрыва коэффициент интенсивности напряжений будем определять согласно формуле А. Гриффитса с поправкой Ирвина для геометрии данной задачи [1]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\frac{\pi l}{2}} \cdot \frac{2b}{\pi l} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi l}{2b} \right),$$

где  $b$  – ширина пластины.

Условие начала быстрого роста трещины  $K_I \geq K_{IC}$ , где  $K_{IC}$  – вязкость разрушения.

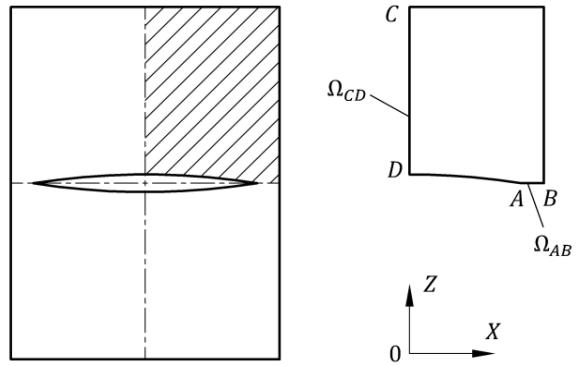


Рис. 2. Пластина с трещиной

В исследовании требовалось проверить принцип суперпозиции при упругом и упругопластическом деформировании. С этой целью рассмотрим на первом этапе расчёт напряжённо-деформированного состояния тела с трещиной при поверхностной нагрузке  $p = 30$  МПа. При такой нагрузке напряжённо-деформированное состояние остаётся в пределах упругого деформирования пластины, остаточные деформации не возникают. На втором этапе исследования рассмотрим напряжённо-деформированное состояние тела при нагрузке  $p = 170$  МПа. Для данного числового значения нагрузки обеспечивается переход материала в область пластического деформирования.

В качестве материала использовался жаропрочный высоколегированный сплав 15Х12ВНМФ, широко используемый в качестве материала лопаток турбин. Механические характеристики сплава 15Х12ВНМФ: плотность  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>, модуль упругости I рода  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $\sigma_T = 510$  МПа, предел прочности  $\sigma_B = 690$  МПа, относительное остаточное удлинение после разрыва  $\delta = 18\%$ . Для построения модели материала в ANSYS будем использовать упругопластическую модель с линейным упрочнением, в этом случае тангенциальный модуль  $E_t = 1011$  МПа. Геометрические характеристики пластины: высота 40 мм, ширина 60 мм, толщина 1 мм. Длина трещины  $l = 40$  мм. При создании конечно-элементной сетки четверти пластины было создано 1576 узлов и 204 элемента.

Результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния пластины с трещиной для линейной упругой модели материала представлены на рис. 3-5, табл. 1. При проведении численных расчётов сходимость итерационных процессов в случаях упругого деформирования при  $p = 30$  МПа достигалась за 7 итераций. Коэффициент интенсивности напряжений  $K_I = 6$  МПа · м<sup>1/2</sup>, что существенно ниже вязкости разрушения стальных сплавов согласно [9], где  $K_{IC} \geq 70$  МПа · м<sup>1/2</sup>.

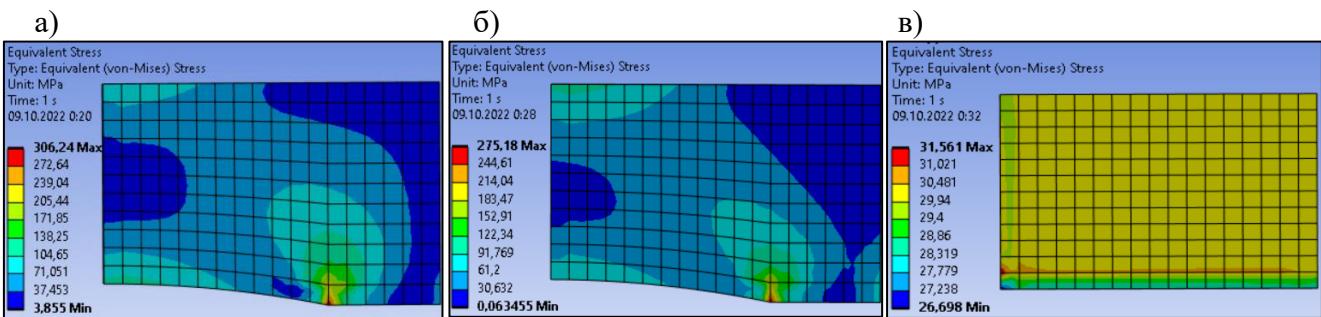


Рис. 3. Напряженное состояние (МПа) при поверхностной нагрузке 30 МПа:  
 а – схема нагружения I; б – схема нагружения II; в – схема нагружения III

Оценку напряжённо-деформированного состояния будем проводить для точки  $A'$  вблизи вершины трещины при  $x = l/2 + 0,1l$  и точки  $D$  (см. рис. 2), которой соответствуют максимальные перемещения берега трещины.

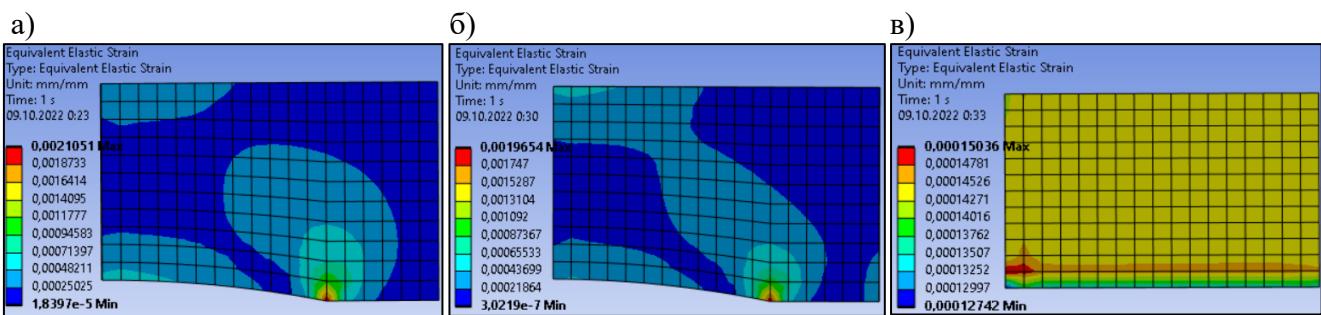


Рис. 4. Деформированное состояние при поверхностной нагрузке 30 МПа:  
 а – схема нагружения I; б – схема нагружения II; в – схема нагружения III

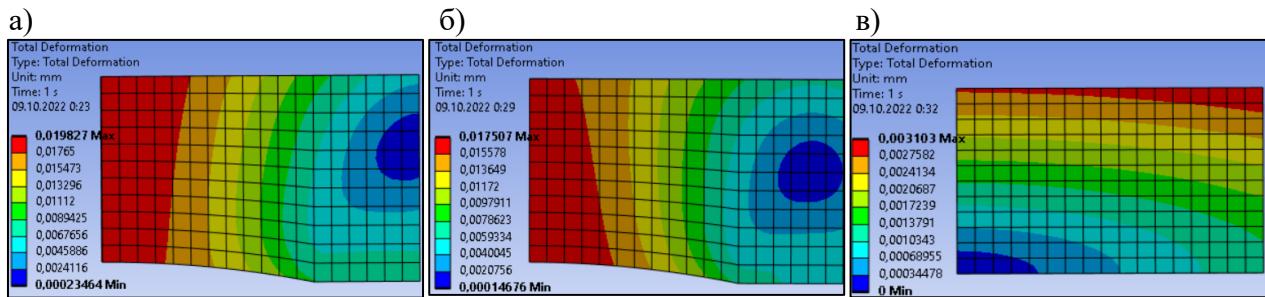


Рис. 5. Распределение перемещений (мм) при поверхностной нагрузке 30 МПа:  
а – схема нагружения I; б – схема нагружения II; в – схема нагружения III

Таблица 1

Результаты напряжённо-деформированного состояния для точек  $A'$  и  $D$  при линейно-упругом деформировании пластины с трещиной

Результаты	Результат $\xi^{(I)}$ при схеме I		Результат $\xi^{(II)}$ при схеме II		Результат $\xi^{(III)}$ при схеме III		Относительная по- грешность $\delta$ , %	
	$A'$	$D$	$A'$	$D$	$A'$	$D$	$A'$	$D$
Интенсивность напряжений $\xi = \sigma_i$ , МПа	68,8	124	42,5	100	27,5	27	1,7	2,4
Интенсивность деформаций $\xi = \varepsilon_i$ , %	0,032	0,04	0,018	0,03	0,013	0,01	3	0
Результирующие перемещения $\xi = u \cdot 10^2$ , мм	0,65	0,019	0,57	0,017	0,07	0	1,5	6

Согласно результатам расчёта интенсивности напряжений, интенсивности относительных упругих деформаций использование принципа суперпозиции в задаче о трещине при линейно-упругом деформировании даёт небольшую погрешность – не более 3 %, для перемещений – 6 %. Следует отметить, что при использовании принципа суперпозиции основное влияние на суммарный результат расчёта напряжённо-деформированного состояния оказывают результаты при нагружении поверхности трещины согласно схеме II.

Результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния пластины с трещиной для упругопластической модели материала при нагрузке  $p = 170$  МПа представлены на рис. 6-8, табл. 2. При проведении численных расчётов сходимость итерационных процессов в случаях упругопластического деформирования достигалась за 16 итераций. Коэффициент интенсивности напряжений:  $K_I = 33$  МПа · м $^{1/2}$ , что меньше вязкости разрушения материала.

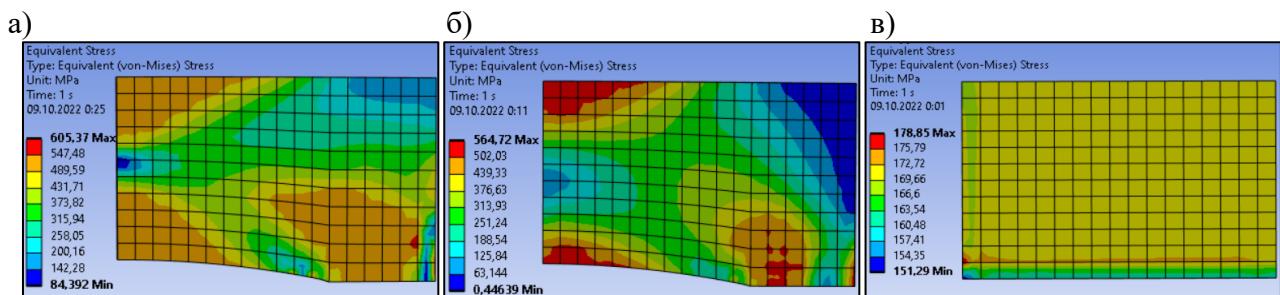


Рис. 6. Напряжённое состояние (МПа) при поверхностной нагрузке 170 МПа:  
а – схема нагружения I; б – схема нагружения II; в – схема нагружения III

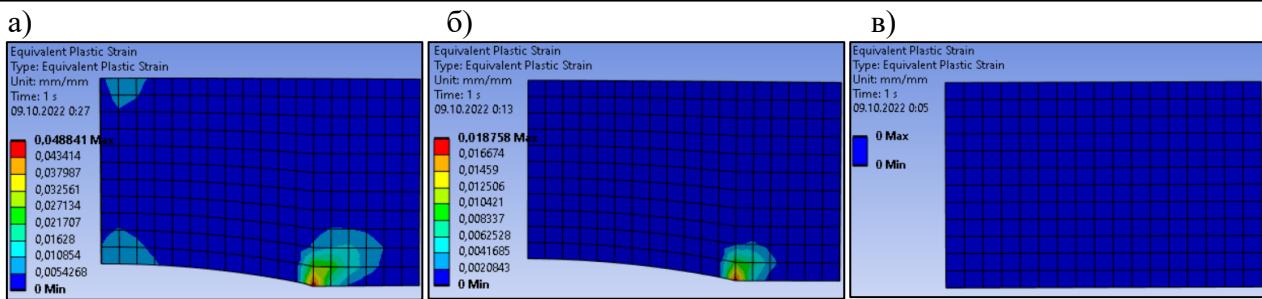


Рис. 7. Деформированное состояние при поверхностной нагрузке 170 МПа:  
а – схема нагружения I; б – схема нагружения II; в – схема нагружения III

Согласно результатам расчёта напряжённо-деформированного состояния пластины с трещиной в области упругопластического деформирования использование принципа суперпозиции приводит к значительным погрешностям (более 20 %) для интенсивности напряжений, интенсивности относительных пластических деформаций и результирующих перемещений.

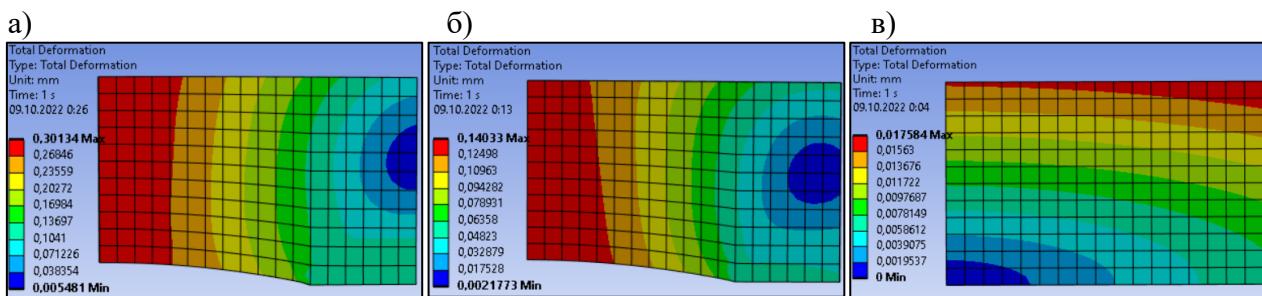


Рис. 8. Распределение перемещений (мм) при поверхностной нагрузке 170 МПа:  
а – схема нагружения I; б – схема нагружения II; в – схема нагружения III

Таблица 2

Результаты напряжённо-деформированного состояния в точках  $A'$  и  $D$  для упругопластического материала с линейным упрочнением

Результаты	Результат $\xi^{(I)}$ при схеме I		Результат $\xi^{(II)}$ при схеме II		Результат $\xi^{(III)}$ при схеме III		Относительная по- грешность $\delta, \%$	
	$A'$	$D$	$A'$	$D$	$A'$	$D$	$A'$	$D$
Интенсивность напряжений $\xi = \sigma_i, \text{ МПа}$	518	518	470	505	160	152	21,6	30,7
Интенсивность пла- стических дефор- маций $\xi = \varepsilon_i, \%$	0,8	0,75	0,2	0	0	0	75	100
Результирующие пе- ремещения $\xi = u, \text{ мм}$	0,12	0,28	0,06	0,13	0,004	0	47	53

Таким образом, представленные результаты исследования конечно-элементного моделирования задачи о трещине позволяют сделать вывод о допустимости использования принципа суперпозиции в том случае, если рассматривается модель линейно-упругого материала или напряжения, возникающие в теле, не превосходят предела текучести. Однако в случае, если приложенные к телу нагрузки вызывают напряжения и деформации, соответствующие переходу тела в ста-

дию пластичности, применение принципа суперпозиции может привести к неадекватному результату ввиду большой погрешности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пестриков, В. М. Механика разрушения / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2012. – 552 с.
2. Анализ кинетики роста трещин усталости, ползучести и термоусталости в лопатках ГТУ / А. А. Назаренко, С. Г. Семёнов, А. С. Семёнов, Л. Б. Гецов // Морские интеллектуальные технологии. – 2011. – № S3. – С. 90-93.
3. Расчёто-экспериментальная методика определения кинетики роста трещин усталости, ползучести и термической усталости в лопатках ГТУ / А. С. Семёнов, С. Г. Семёнов, А. А. Назаренко, Л. Б. Гецов // Тяжёлое машиностроение. – 2013. – № 11-12. – С. 7-20.
4. Лимарь, Л. В. О скачкообразном росте усталостной трещины в компрессорных лопатках / Л. В. Лимарь, Ю. А. Демина, Л. Р. Ботвина // Деформация и разрушение материалов. – 2013. – № 2. – С. 36-41.
5. Закономерности развития поверхностных трещин в материале лопаток паровых турбин / А. П. Захаров, Д. А. Косов, Д. И. Федоренков, Д. В. Федотова // Труды Академэнерго. – 2019. – № 3 (56). – С. 107-121.
6. Замилев, Н. О. Моделирование развития трещины в лопатке турбины / Н. О. Замилев // Энергия-2021: тезисы докладов Шестнадцатой всероссийской (восьмой международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Иваново, 06-08 апреля 2021 года. В 6 т. Т. 4. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2021. – С. 98.
7. Замилев, Н. О. Моделирование развития трещины в лопатке турбины / Н. О. Замилев, М. А. Шилов // Энергия-2022: Семнадцатая всероссийская (девятая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных: материалы конференции, Иваново, 11-13 мая 2022 года. В 6 т. Т. 4. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2022. – С. 92.
8. Крыжевич, Г. Б. Механика разрушения металлических конструкций: моногр. / Г. Б. Крыжевич. – СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2021. – 184 с.
9. Физические величины: справочник / А. П. Бабичев [и др.]: под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.



Чепурнова Е. К., Андрианов И. К.  
E. K. Chepurnova, I. K. Andrianov

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИБЫЛИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА СТОИМОСТЬ И КОЛИЧЕСТВО ПРОДАВАЕМЫХ УСЛУГ

## MATHEMATICAL MODEL OF PROFIT OPTIMIZATION WITH RESTRICTIONS ON THE COST AND NUMBER OF SOLD SERVICES

**Чепурнова Елена Константиновна** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: el.chep@bk.ru.

**Elena K. Chepurnova** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: el.chep@bk.ru.

**Андринов Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Ivan K. Andrianov** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Аннотация.** В исследовании построена математическая модель условной оптимизации прибыли при ограничениях на количество продаваемых услуг, стоимость единицы услуги. При построении модели оптимизации учитывалась предыстория продаж услуг. Ввиду нелинейности системы уравнений оптимизации целевой функции использовался метод множителей Лагранжа. Поиск оптимальных значений количества продаваемых услуг проводился в последовательных приближениях с помощью метода Ньютона-Рафсона. С целью проверки сходимости итерационного алгоритма решения проведена серия численных экспериментов для заданных условий продаж, найдены оптимальные значения стоимости и количества продаваемых услуг, обеспечивающих максимум функции прибыли.

**Summary.** In the study, a mathematical model of conditional profit optimization is constructed with restrictions on the number of services sold and the cost of a unit of service. When building the optimization model, the background of sales of services was taken into account. Due to the nonlinearity of the system of equations for optimizing the objective function, the Lagrange multiplier method was used. The search for optimal values of the number of services sold was carried out in successive approximations using the Newton-Raphson method. In order to verify the convergence of the iterative algorithm of the solution, a series of numerical experiments were carried out for given sales conditions, optimal values of the cost and quantity of services sold were found, providing the maximum profit function.

**Ключевые слова:** прибыль, сфера услуг, условная оптимизация, метод множителей Лагранжа, метод Ньютона-Рафсона.

**Key words:** profit, services, conditional optimization, Lagrange multiplier method, Newton-Raphson method.

УДК 519.8

На сегодняшний день в экономической сфере всё активнее продаются юридические, образовательные, психологические и прочие виды услуг. Особенностью этих услуг является то, что они требуют меньшее количество затрат по сравнению с продажей товаров, а в некоторых случаях затраты вообще отсутствуют. В результате возникает проблема: какую стоимость должна иметь услуга, чтобы обеспечить достаточный спрос и максимальную прибыль? При этом, как правило, количество продаваемых услуг за фиксированный промежуток времени ограничено, что с практической стороны обусловлено физическими возможностями продавца оказать  $n$ -е количество услуг

за день, неделю, месяц или другой временной промежуток. В большинстве случаев продавец ориентируется на среднерыночную стоимость услуги. Однако многое зависит от качества выполняемых услуг и спроса. При небольшой стоимости спрос на услугу вырастет, и продавец, ввиду ограничений на количество оказываемых услуг, не сможет обеспечить баланс спроса и предложения. В противоположной ситуации, при высокой стоимости услуги, предложение превысит спрос и продавец потеряет потенциальных покупателей и возможный доход. Соответственно, возникает проблема оптимального выбора стоимости и количества услуг при максимизации прибыли.

Описанная проблема требует применения методов экономического анализа, которые неразрывно связаны с областью математического моделирования. Актуальность исследования обусловлена тем, что сфера услуг стала активно развиваться в последнее десятилетие. Динамично развивающиеся экономические процессы требуют быстрой реакции и эффективных алгоритмов для принятия решений в вопросе конкурентной борьбы за место на рынке услуг. Практическая значимость математических моделей оптимизации в области сферы услуг обусловлена тем, что их применение позволит существенно рационализировать затраты и количество продаваемых услуг.

*Новизна исследования* обусловлена новой постановкой задачи оптимизации, где предложенная целевая функция оптимизации прибыли, которая зависит от предыстории продаж, ограничений на стоимость единицы услуги и количество продаваемых услуг. В рамках исследования разработаны численная методика, новая программа для ЭВМ и получены новые результаты, позволяющие сопоставить различные варианты продаж услуг с целью максимизации прибыли. Следует отметить, что в современных экономических исследованиях, как правило, основные вопросы оптимизации прибыли решаются с помощью прикладных методов для конкретных объектов исследования [1–14]. Согласно анализу современного состояния вопроса исследования, методы математического анализа, моделирования и прогнозирования в сфере экономики и других областях рассмотрены в трудах [15–17]. Среди зарубежных исследований, посвящённых вопросам моделирования оптимизационных процессов экономики, можно отметить работы [18–20]. Отличием данного исследования является предложенная постановка задачи оптимизации прибыли в обобщённой формулировке, что обеспечивает применимость предложенной модели условной оптимизации в любой из областей сферы услуг, а именно продаже юридических, образовательных, психологических услуг, а также услуг индустрии красоты и т. д.

Таким образом, *объектом исследования* являлась сфера продажи услуг, *предметом исследования* – соотношение между стоимостью и количеством продаваемых услуг, оптимизирующее прибыль. Цель исследования заключалась в оптимизации прибыли при продаже услуг с ограничениями на стоимость за единицу услуги и возможное количество оказываемых услуг за фиксированный промежуток времени. В соответствии с поставленной целью определены *задачи исследования*: построение модели условной оптимизации прибыли, разработка численного подхода для решения задачи нелинейной оптимизации с помощью *методов исследования* (метода множителей Лагранжа и метода Ньютона-Рафсона); разработка программного алгоритма и проведение серии расчётов для оценки сходимости предложенной численной методики оптимизации прибыли.

При рассмотрении задачи условной оптимизации целевой функцией являлась прибыль  $\Pi$ , определяемая разностью дохода и затрат на продажу услуг:

$$\Pi = (S - Z)n - P, \quad (1)$$

где  $S$  – стоимость единицы услуги;  $Z$  – затраты продавца на продажу единицы услуги;  $n$  – количество проданных услуг за фиксированное время  $t$ ;  $P$  – прочие расходы.

Поскольку оптимизация прибыли (1) зависит от качества оказываемых услуг и спроса, важной представляется предыстория продаж. Поскольку с ростом стоимости количество продаваемых услуг снижается ввиду снижения потребительского спроса, опишем изменение стоимости  $S$  от количества проданных услуг  $n$  убывающей показательной функцией:

$$S = S_0 a^{-n}, \quad (2)$$

где  $S_0, a$  – константы, определяемые из предыстории продаж.



Рассмотрим смысл констант, входящих в уравнение (2):  $S_0$  представляет собой критическую стоимость, выше которой отсутствует потребительский спрос (при  $n = 0, S = S_0$ ). Константа  $a$  определяется отношением критической стоимости  $S_0$  к стоимости  $S_1 = S_0 a^{-1}$ , при которой обеспечивается единичный спрос на услугу за время  $t$ :

$$a = \frac{S_0}{S_1}. \quad (3)$$

Если известна информация о том, при какой стоимости нет спроса  $S_0$  и при каком снижении цены на  $r$ , %, будет обеспечен единичный спрос  $S_1$  на услугу, то константа  $a$  может быть определена согласно табл. 1.

Таблица 1  
Соотношение снижения  $r$  критической стоимости для обеспечения единичного спроса от основания  $a$  показательной функции (3)

Процент снижения критической стоимости для обеспечения единичного спроса: $r = (S_0 - S_1) \cdot 100\% / S_0$	Основание $a$ функции (2)
1 %	1,01
10 %	1,11
20 %	1,25
50 %	2

Если информация о единичном спросе отсутствует, но имеются данные о спросе  $m$  покупателей при стоимости услуги  $S_m$  и спросе  $l$  покупателей при стоимости услуги  $S_l$  константы  $a$ ,  $S_0$  могут быть определены из условий

$$\begin{aligned} S_m &= S_0 a^{-m} \\ S_l &= S_0 a^{-l} \end{aligned} \quad (4)$$

Решая систему (4), получим значения требуемых констант:

$$a = \left( \frac{S_m}{S_l} \right)^{\frac{1}{l-m}}, \quad S_0 = S_m \left( \frac{S_m}{S_l} \right)^{\frac{m}{l-m}}.$$

Согласно максимизации целевой функции  $\Pi$ , переменными оптимизации являются стоимость единицы услуги  $S$  и количество  $n$  проданных услуг:

$$\Pi_{\max} = \max_{S,n} \Pi.$$

Поскольку количество проданных услуг  $n$  за фиксированный промежуток времени не может превышать предельное значение  $n^*$ , а стоимость товаров не может быть меньше затрат на реализацию услуги  $Z < S$ , постановка задачи условной оптимизации примет вид

$$\begin{aligned} \Pi &= (S - Z)n - P \rightarrow \max, \\ S - S_0 a^{-n} &= 0, \\ n - n^* &\leq 0, \\ Z - S &< 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для решения задачи оптимизации с ограничениями вида равенств и неравенств (5) применим метод множителей Лагранжа [17]. Функция Лагранжа в данном случае примет вид

$$L(S, n, \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \lambda_0(Sn - Zn - P) + \lambda_1(S - S_0 a^{-n}) + \lambda_2(n - n^*) + \lambda_3(Z - S), \quad (6)$$

где  $\lambda\{\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\}$  – множители Лагранжа.

Для удовлетворения необходимого условия экстремума найдём частные производные функции (6) по  $S, n$  и составим систему для поиска оптимального решения:

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_0 n + \lambda_1 - \lambda_3 = 0 \\ \lambda_0(S - Z) + \lambda_1 S_0 a^{-n} \ln a + \lambda_2 = 0 \\ S - S_0 a^{-n} = 0 \\ \lambda_2(n - n^*) = 0 \\ \lambda_3(Z - S) = 0 \end{array} \right\}. \quad (7)$$

Решением системы (7) будет являться точка  $X(S; n; \lambda_0; \lambda_1; \lambda_2; \lambda_3)$ . Рассмотрим случаи при  $\lambda_0 = 0$  и  $\lambda_0 \neq 0; n \neq n^*$  и  $n = n^*$ :

1. Если  $\lambda_0 = 0, n \neq n^*$ , учитывая, что  $S \neq Z$ , получим, что весь вектор  $\lambda\{\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\}$  является нулевым. Соответственно, единственность решения задачи (7) не достигается.

2. Если  $\lambda_0 = 0, n = n^*$ , то искомое решение достигается на границе допустимой области  $n \leq n^*$  в точке

$$X(S_0 a^{-n^*}; n^*; 0; 0; 0; 0).$$

Тогда эффективная прибыль согласно (5) будет определяться соотношением

$$\Pi_{\max} = (S_0 a^{-n^*} - Z)n^* - P. \quad (8)$$

3. Если  $\lambda_0 = 1, n \neq n^*$  система (7) примет вид

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_1 = -n \\ (S - Z) - nS_0 a^{-n} \ln a = 0 \\ S - S_0 a^{-n} = 0 \\ \lambda_2 = 0 \\ \lambda_3 = 0 \end{array} \right\}. \quad (9)$$

Решение системы (9) сводится к решению нелинейного уравнения относительно  $n$ :

$$S_0 a^{-n} (1 - n \ln a) - Z = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) ввиду нелинейности не имеет аналитического решения, поэтому решение будем проводить в последовательных приближениях с помощью метода Ньютона-Рафсона [17], согласно итерационной схеме:

$$\begin{aligned} n^{(k+1)} &= n^{(k)} + \psi^{(k)}, \\ \psi^{(k)} &= \gamma \left( \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)^{-1} \left[ S_0 a^{-n^{(k)}} (1 - n^{(k)} \ln a) - Z \right], \end{aligned} \quad (11)$$

где  $k$  – номер итерации;  $\varphi$  – левая часть уравнения (10) в  $k$ -м приближении;  $\gamma$  – коэффициент  $-1 < \gamma < 0$  для обеспечения сходимости итерационного процесса согласно условию  $|1 + \gamma \partial \varphi / \partial n| < 1$ .

Критерий остановки итерационного процесса

$$\left| \frac{n^{(k+1)} - n^{(k)}}{n^{(k+1)}} \right| < \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – заданная точность расчёта.

Для проверки условия максимума целевой функции используем критерий Сильвестра, согласно которому матрица Гессе в найденной точке должна быть определена отрицательно. Построим матрицу Гессе используя вторые частные производные функции Лагранжа (6):



$$L'' = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial S^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial S \partial n} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial n \partial S} & \frac{\partial^2 L}{\partial n^2} \end{pmatrix} \rightarrow L'' = \begin{pmatrix} 0 & \lambda_0 \\ \lambda_0 & -\lambda_1 S_0 a^{-2n} \ln^2 a \end{pmatrix}.$$

При  $\lambda_0 \neq 0$  определитель матрицы Гессе  $|L''| = -(\lambda_0)^2 < 0$ , соответственно, условие максимума функции прибыли выполняется.

4. Если  $\lambda_0 = 1, n = n^*$ , тогда оптимальное решение достигается в граничной точке:

$$X(S_0 a^{-n^*}; n^*; 1; -n^*; Z - S_0 a^{-n^*} (1 + n^* \ln a); 0).$$

В этом случае максимум функции прибыли аналогичен соотношению (8).

При решении задачи оптимизации прибыли оптимальное значение  $n$  может оказаться нецелым, однако из физического смысла  $n$  как количества услуг, следует что  $n \in \mathbb{N}$ . Соответственно, необходимо округлить полученное оптимальное решение  $\hat{n}$  до ближайшего целого в меньшую и большую сторону, применив функции «пол»  $\lfloor \hat{n} \rfloor$  и «потолок»  $\lceil \hat{n} \rceil$ , и сравнить значения прибыли при данных значениях:

$$\begin{aligned} \lfloor \hat{n} \rfloor &= \max\{h \in \mathbb{N} \mid h \leq \hat{n}\}, \\ \lceil \hat{n} \rceil &= \min\{h \in \mathbb{N} \mid h \geq \hat{n}\}. \end{aligned} \quad (12)$$

По найденным значениям  $\lfloor \hat{n} \rfloor$  и  $\lceil \hat{n} \rceil$  согласно (12) определяются значения функции прибыли и выбирается оптимальное значение из условия

$$\Pi_{\max} = \max\{(S_0 a^{-\lfloor \hat{n} \rfloor} - Z)\lfloor \hat{n} \rfloor - P; (S_0 a^{-\lceil \hat{n} \rceil} - Z)\lceil \hat{n} \rceil - P\}.$$

Стоимость единицы услуги из условия максимизации прибыли определяется

$$S_{\text{opt}} = \frac{\Pi_{\max} + P}{n_{\text{opt}}} + Z, \quad n_{\text{opt}} = \lfloor \hat{n} \rfloor|_{\Pi \rightarrow \max},$$

где  $\lfloor \hat{n} \rfloor|_{\Pi \rightarrow \max}$  – округлённое до целого количество услуг, доставляющее максимум функции.

Если оптимальное решение для количества услуг превышает предельное значение  $\hat{n} \geq n^*$ , то максимальная прибыль будет достигаться при  $n_{\text{opt}} = n^*$ :

$$\Pi_{\max} = (S_0 a^{-n^*} - Z)n^* - P, \quad S_{\text{opt}} = S_0 a^{-n^*}.$$

Кроме того, интерес представляет частный случай оптимизации функции прибыли, когда затраты несущественны и ими можно пренебречь в формуле (5) при  $Z = 0, P = 0$ :

$$\Pi = S_0 a^{-n} n. \quad (13)$$

Используя необходимое и достаточное условия экстремума функции (13), получим

$$\frac{\partial \Pi}{\partial n} = (1 - n \ln a)S_0 a^{-n} = 0 \rightarrow \hat{n} = \frac{1}{\ln a}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial n^2} = [a^{-n}(\ln a^n - 1) - 1]a^{-n}S_0 \ln a < 0. \quad (15)$$

Подставим найденное значение  $\hat{n}$  из (14) в соотношение (15):

$$\left. \frac{\partial^2 \Pi}{\partial n^2} \right|_{n=\hat{n}} = -\frac{S_0 \ln a}{e} < 0. \quad (16)$$

Отрицательность соотношения (16) следует из  $\ln a > 0$ , т. к.  $a > 1$ . Соответственно, требуемые условия достижения максимума функции прибыли выполняются, и оптимальная прибыль может быть определена из условий

$$\Pi_{\max} = \max \left\{ S_0 a^{-\left[\frac{1}{\ln a}\right]} \left| \frac{1}{\ln a} \right|; S_0 a^{-\left[\frac{1}{\ln a}\right]} \left[ \frac{1}{\ln a} \right] \right\}. \quad (17)$$

Представленная математическая модель (5) и численная методика расчёта оптимизации прибыли были запрограммированы в среде MathCad 15 согласно алгоритму, представленному на блок-схеме (см. рис. 1).

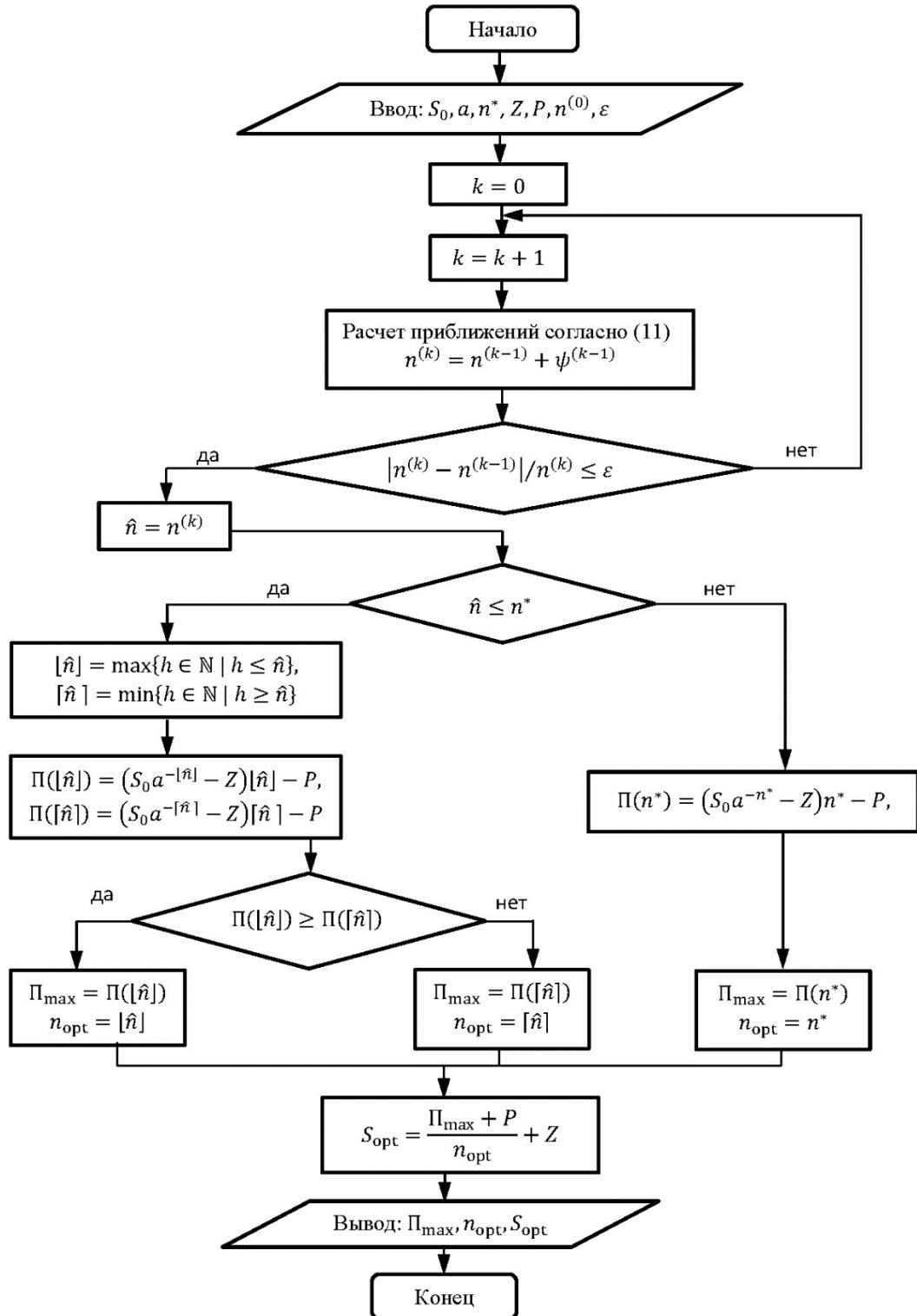


Рис. 1. Блок-схема расчёта условной оптимизации прибыли

Сопоставим результаты расчётов, задав условия оптимизации: пусть стоимость услуги, начиная с которой нет спроса  $S_0 = 1$ ; затраты на расходы составляют 10 % от критической стоимости, т. е.  $Z = 0,1$ . Ограничение по количеству продаваемых услуг за рассматриваемый период:  $n^* = 100$ . Для проведения итерационного процесса: начальное приближение  $n^{(0)} = 0$ ,  $\gamma = -0,9$ ,  $\varepsilon = 0,01$ .

Результаты расчёта проведены при различных условиях снижения критической стоимости для обеспечения единичного спроса  $r\{1\%; 10\%; 20\%; 50\%\}$  (см. табл. 2 и рис. 2).

Таблица 2  
Результаты условной оптимизации прибыли

$r, \%$	$\hat{n}$	$ \hat{n} $	$[\hat{n}]$	$S( \hat{n} )$	$S([\hat{n}])$	$\Pi_{\max}$	$S_{opt}$	$n_{opt}$
1	78,5	78	79	0,460	0,456	28,09	0,456	79
10	7,49	7	8	0,481	0,434	2,67	0,48	7
20	3,50	3	4	0,512	0,410	1,24	0,410	4
50	1,13	1	2	0,5	0,25	0,4	0,5	1

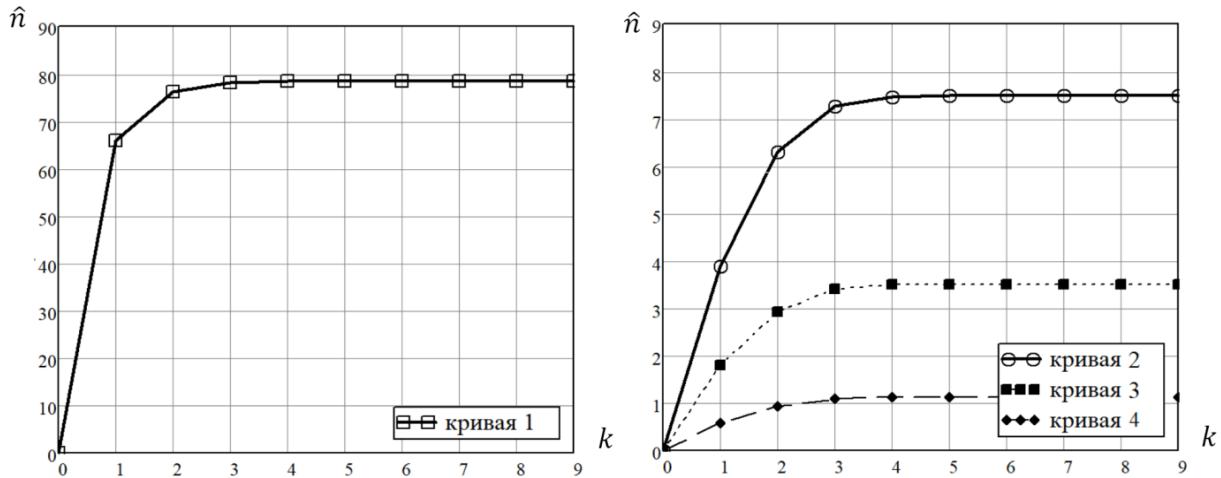


Рис. 2. Зависимость расчётного значения количества продаваемых услуг  $\hat{n}$  от количества итераций  $k$ : 1 –  $r = 1\%$ , 2 –  $r = 10\%$ , 3 –  $r = 20\%$ , 4 –  $r = 50\%$

На рис. 2 видно, что сходимость итерационного процесса при определении оптимального количества  $n_{opt}$  продаваемых услуг достигается за 5 итераций. В табл. 2 представлены данные о максимальной прибыли  $\Pi_{\max}$ , сочетании оптимальной стоимости за единицу услуги  $S_{opt}$  и количества  $n_{opt}$  продаваемых услуг за фиксированный промежуток времени. Результаты исследования показывают, что высокая стоимость за единицу услуги не всегда обеспечивает максимум прибыли, как и большое количество продаваемых услуг.

Зависимость прибыли от количества продаваемых услуг представлена для частного случая (13), (17) на рис. 3. Полученные кривые наглядно демонстрируют наличие максимума функции прибыли и её снижение при большом количестве продаваемых услуг, поскольку стоимость единицы услуги в этом случае снижается.

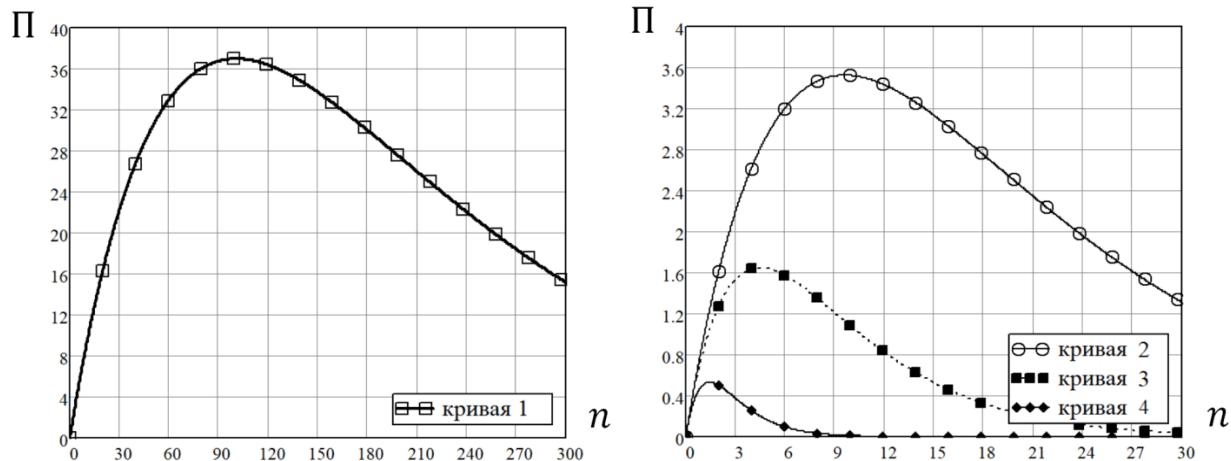


Рис. 3. Зависимость прибыли от количества проданных услуг при  $Z = 0, P = 0$ :  
 1 –  $r = 1\%$ , 2 –  $r = 10\%$ , 3 –  $r = 20\%$ , 4 –  $r = 50\%$

Таким образом, построенная модель условной оптимизации прибыли и предложенная численная методика поиска оптимального решения имеют важную практическую значимость в экономической сфере, поскольку позволяют на практике определить оптимальную стоимость единицы услуги, количество продаваемых услуг, тем самым повысив эффективность продаж и финансовый доход.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Темукуева, Ж. Х. Снижение себестоимости в системе максимальной оптимизации объемов прибыли / Ж. Х. Темукуева // Экономика и социум. – 2016. – № 7 (26). – С. 323-325.
2. Мураховская, И. А. Модели (методы) оптимизации прибыли предприятия / И. А. Мураховская // Студенческий вестник. – 2020. – № 12-3 (110). – С. 59-60.
3. Ермакова, М. С. Учетная политика как инструмент оптимизации налоговых платежей по налогу на прибыль в компаниях / М. С. Ермакова // Экономика и предпринимательство. – 2020. – № 7 (120). – С. 1171-1174.
4. Ланцова, Н. М. Оптимизация распределение прибыли предприятия в сфере энергетики как приоритетный фактор роста и инновационного развития / Н. М. Ланцова, О. В. Зырянова // Вестник образовательного консорциума Среднерусский университет. Серия: Экономика и управление. – 2019. – № 13. – С. 23-26.
5. Бурыкин, А. Д. Оптимизация механизма формирования и распределения прибыли предприятия / А. Д. Бурыкин, В. А. Селезнева // Учёт и контроль. – 2019. – № 3 (41). – С. 50-58.
6. Горбунов, П. М. Оптимизация товарных потоков для увеличения прибыли организации / П. М. Горбунов // Научно-исследовательский центр «Вектор развития». – 2021. – № 3. – С. 265-273.
7. Морева, В. В. К вопросу оптимизации распределения прибыли в современных условиях / В. В. Морева, А. В. Дубинин // Научный вестник Невинномысского государственного гуманитарно-технического института. – 2018. – № 3-4. – С. 172-176.
8. Гончаренко, В. М. Об экономической корректности прикладных математических задач / В. М. Гончаренко, Л. В. Липагина // Современная математика и концепции инновационного математического образования. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 285-293.
9. Старчак, Д. И. Особенности анализа переменных и постоянных затрат / Д. И. Старчак, Р. Р. Козырев, В. В. Кувалакин // Colloquium-Journal. – 2020. – № 2-11 (54). – С. 35-37.
10. Филиппов, Е. С. Анализ доходов и расходов предприятия и пути их оптимизации / Е. С. Филиппов, Э. О. Иремадзе // Colloquium-Journal. – 2018. – № 6-5 (17). – С. 52-54.
11. Мякинькая, В. В. Оптимизация ценообразования на предприятиях с помощью инструментов раздельного управленческого учёта / В. В. Мякинькая // Бухгалтерский учёт и анализ. – 2019. – № 4 (268). – С. 23-28.
12. Кацуpeeев, А. А. Модели и алгоритмы, применяемые для оптимизации маршрутов и ценообразования пассажирских железнодорожных перевозок / А. А. Кацуpeeев, Э. О. Комбарова // Вестник молодёжной науки России. – 2019. – № 5. – С. 2.



13. Алешина, А. В. Максимизация маржинальной прибыли при известных кривых спроса / А. В. Алешина, А. Л. Булгаков // Микроэкономика. – 2021. – № 6. – С. 34-39.
14. Оптимизационно-сетевое обслуживание в лесной промышленности / В. И. Максименко [и др.] // Вестник Института дружбы народов Кавказа (Теория экономики и управления народным хозяйством). Экономические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 7.
15. Полшков, Ю. Н. Прикладные методы анализа, моделирования и прогнозирования в сфере экономики труда: инновации, региональные риски, проблемы управления / Ю. Н. Полшков // Вестник Донецкого национального университета. Серия В. Экономика и право. – 2021. – № 1. – С. 179-187.
16. Борисова, М. В. Компьютерная реализация процедур линейного программирования / М. В. Борисова, К. И. Недопёкина // Академия педагогических идей Новация. Серия: Студенческий научный вестник. – 2019. – № 3. – С. 47-51.
17. Зенков, А. В. Численные методы / А. В. Зенков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 124 с.
18. Kumar, V., Pandey, R., Goyal, S. Cost and Profit Optimization and Mathematical Modeling Solutions to Stochastic Processes in Inventory System // International Journal of Innovations in Engineering and Technology. – 2017. – V. 8. – P. 205-223. DOI: 10.21172/ijiet.81.029.
19. Frick, K. Micro-Costing Quantity Data Collection Methods. Medical care. – 2009. – N 47. – P. 76-81. DOI: 10.1097/MLR.0b013e31819bc064.
20. Zavvar, S., Mirzazadeh, A., Maass, E. Ozturkoglu, Y., Mohammadi, M., Moslemi, S. A mathematical model and optimization of total production cost and quality for a deteriorating production process. Cogent Mathematics. – 2016. – № 3. DOI: 10.1080/23311835.2016.1264175.

**Табаров Б. Д., Одинаев З. И.**

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ДИСКРЕТНОМ ПОВЫШЕНИИ НАГРУЗКИ

**Табаров Б. Д., Одинаев З. И.  
B. D. Tabarov, Z. I. Odinaev**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ДИСКРЕТНОМ ПОВЫШЕНИИ НАГРУЗКИ**

### **RESEARCH OF CONTINUOUS REGULATION OF THE REACTIVE POWER OF A CAPACITOR PLANT WITH A DISCRETE INCREASE IN LOAD**

**Табаров Бехруз Довудходжаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: behruz.tabarov@mail.ru.

**Bekhruz D. Tabarov** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: behruz.tabarov@mail.ru.

**Одинаев Зикирё Исматуллоевич** – студент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: zikiryoodinaev25@gmail.com.

**Zikire I. Odinaev** – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: zikiryoodinaev25@gmail.com.

**Аннотация.** В данной работе рассматриваются проблема низкой точности семиступенчатого регулирования реактивной мощности конденсаторной установки наиболее распространёнными в промышленности способами и её влияние на срок службы электрооборудования и эффективность работы системы электроснабжения всех отраслей промышленного комплекса при дискретном повышении нагрузки. Для устранения данных недостатков предложен новый алгоритм переключения конденсаторных батарей на основе трёх блоков конденсаторов с разными ёмкостями. Приводятся результаты исследования способа непрерывного регулирования реактивной мощности установки при стационарных и динамических процессах, которое было проведено в среде MATLAB.

**Summary.** This paper considers the problem of low accuracy of seven-stage regulation of the reactive power of a capacitor plant most common in industry and its impact on the service life of electrical equipment and the efficiency of power supply systems of all branches of the industrial complex with a discrete increase in load. To eliminate this drawback, a new algorithm for switching capacitor banks with a discrete increase in load is proposed. The results of the study of the method of continuous regulation of the reactive power of the installation for stationary and dynamic processes in the MATLAB environment are presented.

**Ключевые слова:** батареи конденсаторов, способ регулирования, тиристорный ключ, системы управления, сетевой выключатель, активно-индуктивная нагрузка, стационарный и динамический процесс.

**Key words:** capacitor banks, regulation method, thyristor switch, control systems, mains switch, active-inductive load, stationary and dynamic process.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук (номер гранта МК-3799.2022.4).*

УДК 621.314

**Введение.** В настоящее время батареи конденсаторов применяют в электрических сетях напряжением до 1 кВ и выше для улучшения пропускной способности линии электропередачи и комплексного повышения эффективности работы системы электроснабжения всех отраслей



промышленности и агропромышленного комплекса [1–5]. Область применения батареи конденсаторов показывает, что из-за неравномерного графика потребления реактивной мощности на сегодняшний день на промышленных предприятиях для обеспечения нормальной работы и повышения эффективности работы технологических установок достаточно широко применяют батареи конденсаторов, которые обеспечивают широкие пределы регулирования реактивной мощности. Из опыта эксплуатации батареи конденсаторов известно, что при многоступенчатом регулировании реактивной мощности число ступеней регулирования равно количеству батарей конденсаторов с одинаковыми параметрами [6–12]. Существующие конденсаторные установки, обеспечивающие многоступенчатое регулирование реактивной мощности, имеют недостатки, связанные с низкой точностью компенсации реактивной мощности и большим количеством коммутационной аппаратуры.

Для устранения вышеуказанных недостатков предлагается новый принцип построения семиступенчатого регулирования реактивной мощности на основе трёх блоков батареи конденсаторов с разной ёмкостью [13]. Функциональная схема предлагаемого семиступенчатого регулирования реактивной мощности в однолинейном исполнении и операции способа непрерывного регулирования реактивной мощности при плавном изменении нагрузки представлены в работе автора [14].

**Целью работы** являются повышение эффективности работы и качество электроэнергии, а также сохранение срока службы потребителей системы электроснабжения всех отраслей промышленности при плавном и дискретном изменении тока нагрузки за счёт применения предлагаемого многоступенчатого регулирования реактивной мощности и его специализированного способа переключения с одной ступени регулирования реактивной мощности на другую.

В работе для достижения этой цели рассматриваются и решаются нижеперечисленные задачи:

- разработка нового устройства и способа управления многоступенчатым регулированием реактивной мощности на основе трёх блоков батареи конденсаторов;
- исследование стационарных и динамических процессов предлагаемого устройства и способа многоступенчатого регулирования реактивной мощности при плавном и дискретном изменении тока нагрузки.

Применение предлагаемого устройства в реальной установке для обеспечения точности регулирования реактивной мощности позволяет уменьшить количество коммутационных аппаратов существующих батарей конденсаторов в 2 раза [13].

Как отмечалось в работе [13], цель достигается за счёт применения трёх блоков батареи конденсаторов с неравномерной ёмкостью конденсаторов и их специализированного способа управления при дискретном изменении тока нагрузки [14]. Следует отметить, что третья ступень непрерывного регулирования реактивной мощности при резком изменении тока нагрузки достигается при помощи первого и второго блоков батареи конденсаторов. Третий блок батареи конденсаторов на этом интервале времени не подключён к сети. Непрерывное регулирование реактивной мощности при резком изменении тока нагрузки с третьей ступени на пятую достигается при помощи первого и третьего блоков батареи конденсаторов, а второй блок батареи конденсаторов при этом выключен. Седьмая ступень непрерывного регулирования реактивной мощности при дискретном изменении тока нагрузки с пятой ступени на седьмую достигается при помощи всех трёх блоков батареи конденсаторов.

Учитывая нестабильности потребляемой реактивной мощности, рассмотрим принцип действия предлагаемого устройства и способ непрерывного многоступенчатого регулирования реактивной мощности при дискретном повышении промышленных нагрузок на четыре ступени.

**Первая ступень регулирования** достигается при помощи первого блока батареи конденсаторов БК-1 при выключенных втором БК-2 и третьем БК-3 блоках батареи конденсаторов. Как видно из схемы на рис. 1, подключение первого блока батареи конденсаторов БК-1 осуществляется при помощи первого блока тиристорного пускателя ТП-1. Первый блок

тиристорного пускателя ТП-1 специальным способом подключает первый блок батареи конденсаторов БК-1 к сети, сохраняя высокое значение эффективности работы потребителей электрической энергии и коммутационных аппаратов.

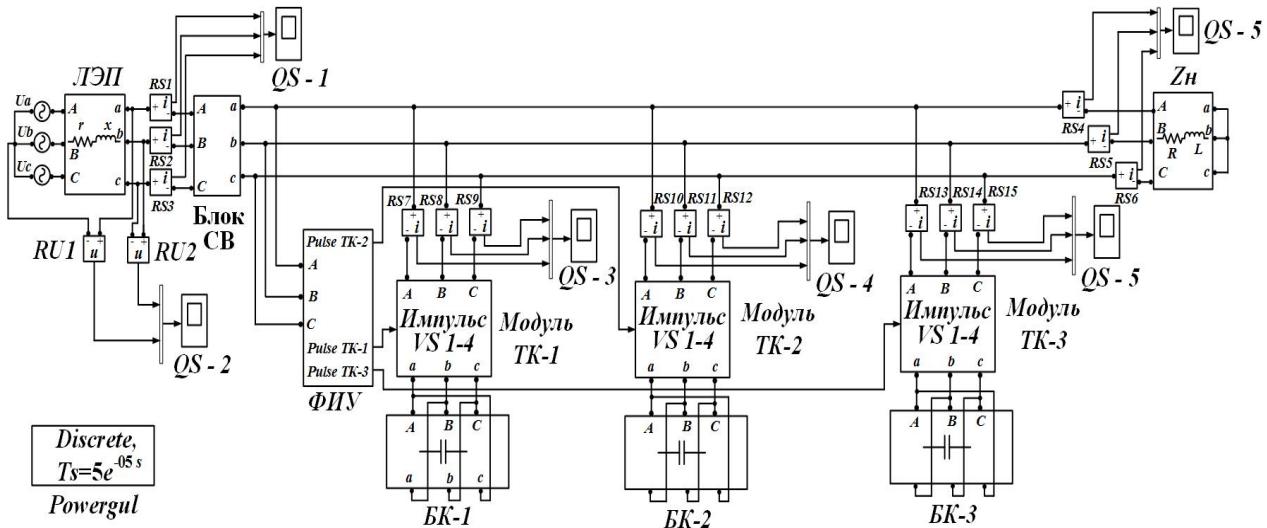


Рис. 1. Имитационная модель предлагаемой трёхкомплектной конденсаторной установки

**Третья ступень регулирования** достигается при помощи первого БК-1 и второго БК-2 блоков батареи конденсаторов и при выключенном третьем блоке конденсаторов БК-3. Подключение этих блоков батареи конденсаторов к сети осуществляется также специальными способами при помощи соответствующих блоков тиристорных пускателей (при помощи блоков ТП-1 и ТП-2).

**Пятая ступень регулирования** достигается при помощи первого БК-1 и третьего БК-3 блоков батареи конденсаторов при выключенном втором блоке батареи конденсаторов БК-2. Подключение этих блоков батареи конденсаторов к сети выполняется при помощи первого ТП-1 и третьего ТП-3 блоков тиристорных пускателей. Тиристорные пускатели ТП-1 и ТП-2 специальным способом подключают соответствующие блоки батареи конденсаторов к сети, сохраняя при этом также высокое значение эффективности работы систем электроснабжения и срок службы их электрооборудования.

**Седьмая ступень регулирования** достигается при включении второго блока батареи конденсаторов БК-2 параллельно к первому БК-1 и третьему БК-3 блокам конденсаторов при внезапном повышении тока нагрузки. Как отмечалось выше, тиристорные пускатели ТП-2 специальным способом вводят в работу второй блок батареи конденсаторов БК-2 без возникновения бросков токов и просадок напряжения.

**Моделирование предлагаемого устройства с многоступенчатым регулированием реактивной мощности.** Цель моделирования данной установки, обеспечивающей многоступенчатое регулирование реактивной мощности при внезапном изменении тока нагрузки, заключается в следующем:

- проверка функционирования предлагаемого устройства и его специализированного способа управления при внезапном повышении тока нагрузки на четыре ступени;

- исследование стационарных и динамических процессов, а также оценка эффективности работы данного предлагаемого устройства при резком изменении тока нагрузки на четыре ступени.

Для достижения поставленной цели была разработана имитационная модель [15] предлагаемого устройства и проведены исследования при плавном и дискретном изменении тока нагрузки. Модель предлагаемой установки представлена на рис. 1 и содержит трёхфазную сеть



( $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ ), линию электропередачи (ЛЭП), блок сетевого выключателя (СВ), первую (БК-1), вторую (БК-2) и третью (БК-3) батареи конденсаторов, модули первого (ТК-1), второго (ТК-2) и третьего (ТК-3) тиристорных ключей с синхронизированным и фазированным с сетью блоком формирования импульсов управления (ФИУ), активно-индуктивную нагрузку ( $Z_h$ ), измерительные датчики тока и напряжения и другие вспомогательные элементы.

Ниже рассмотрим результаты исследования компенсации реактивной мощности с одновременной стабилизацией напряжения у потребителей при неравномерном графике промышленных нагрузок. Следует отметить, что непрерывное регулирование реактивной мощности при изменении тока нагрузки в имитационной модели выполнялось в соответствии с вышеупомянутыми операциями.

Полученные результаты исследования семиступенчатого регулирования реактивной мощности при плавном повышении тока нагрузки на семь ступеней и дискретном повышении на четыре ступени представлены на рис. 2. На осцилограммах приведены фазные токи сети ( $i_{cA}$ ,  $i_{cB}$  и  $i_{cC}$ ) и батареи конденсаторов ( $i_{kA}$ ,  $i_{kB}$  и  $i_{kC}$ ). Здесь Т-1, Т-2 ... Т-7 обозначают интервалы времени, на которых обеспечивается непрерывное и точное регулирование реактивной мощности при плавном и дискретном повышении нагрузки.

Как видно из рис. 2, а, нагрузка плавно возрастает до максимального значения и для плавного повышения эффективности работы сети и потребителей электроэнергии в работе специальными способами вводятся батареи конденсаторов без возникновения бросков тока и просадки напряжения в сети и на нагрузке, а также в самих конденсаторах [14].

На осцилограммах (см. рис. 2, б) на интервалах времени Т-3, Т-5 и Т-7 нагрузка внезапно дискретно повышается относительно минимального значения (интервал времени Т-1) и создаёт необходимость ввода в работу второго и/или третьего блока конденсаторов для уменьшения потери электроэнергии при передаче, распределении и потреблении электроэнергии. Здесь на интервале времени Т-1 первой ступени регулирование реактивной мощности у потребителей достигается благодаря работе первого блока батареи конденсаторов БК-1 при выключенных втором БК-2 и третьем БК-3 блоках батарей конденсаторов. Как показывают осцилограммы на рис. 2, б, на интервале времени Т-3 нагрузка относительно минимального уровня возрастает в 3 раза и в работу вводится второй блок конденсаторов при включённом первом блоке, которые обеспечивают третью ступень компенсации реактивной мощности потребителей электроэнергии. Третий блок конденсаторов при этом находится в отключённом состоянии. Как видно из интервала времени Т-5, нагрузка в конце интервала времени Т-3 внезапно также дискретно повышается и вводится в работу третий блок конденсаторов, а второй блок батареи конденсаторов выключается. На интервале времени Т-5 обеспечение пятой ступени компенсации реактивной мощности потребителей достигается при помощи первого и третьего блоков конденсаторов. Интервал времени Т-7 иллюстрирует седьмую ступень регулирования реактивной мощности потребителей при внезапном повышении тока нагрузки с пятой ступени на седьмую. Здесь, на этом интервале времени, к работе приступает второй блок батареи конденсаторов при нахождении в работе первого и третьего блоков конденсаторов.

Из приведённых результатов исследований семиступенчатого регулирования реактивной мощности видно, что предлагаемое техническое решение обладает способностью обеспечения непрерывного и точного регулирования реактивной мощности потребителей с хорошими энергетическими показателями. Полученные результаты исследований в динамических процессах также подтверждают, что при подключении конденсаторной установки и переключении её с одной ступени на другую регулирование выполняется без возникновения негативного влияния процесса переключения на сеть и нагрузку. Это позволяет обеспечить нормальную работу и сохранение срока службы электрооборудования.

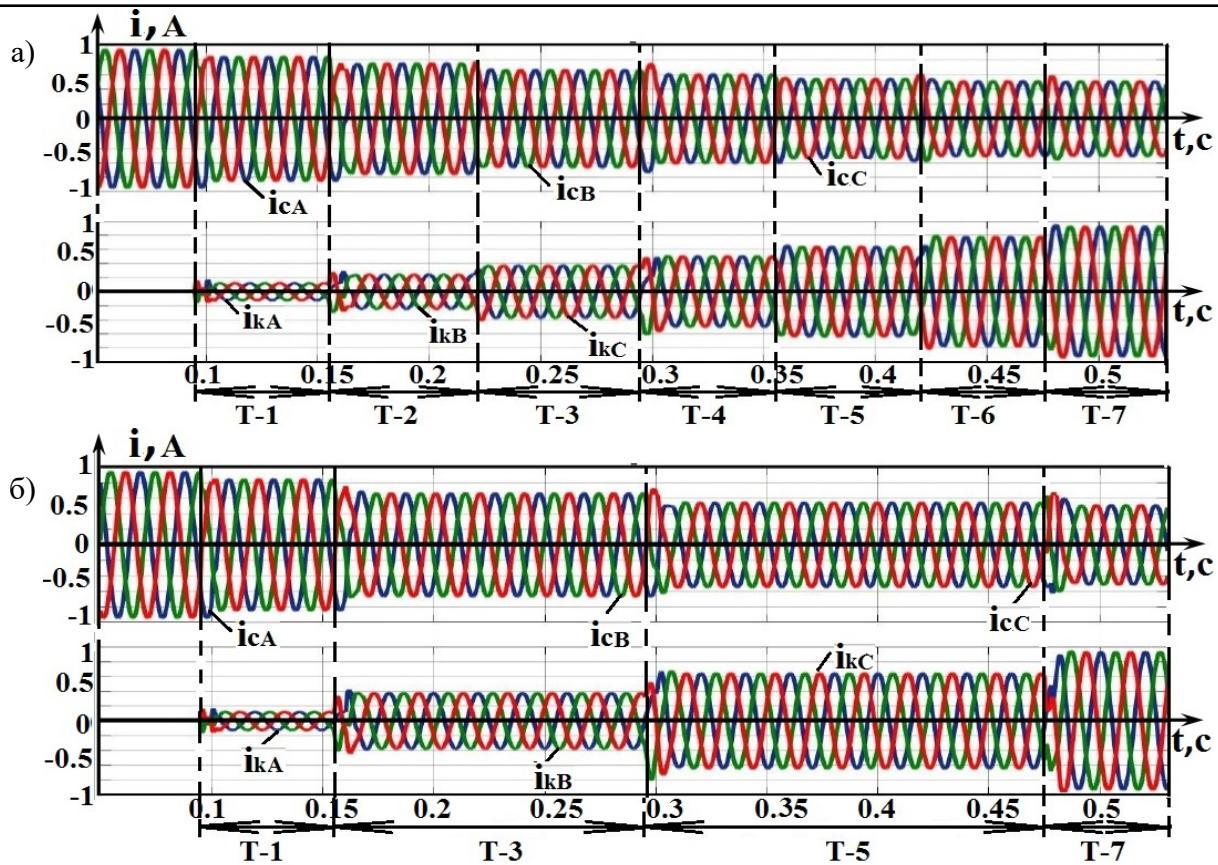


Рис. 2. Осциллографмы токов сети (сверху) и конденсаторов (снизу) при плавном (а) и дискретном (б) повышении нагрузки

**Заключение.** Результаты исследования показали, что реализация предлагаемого технического решения на существующих трансформаторных подстанциях позволяет уменьшить потери электроэнергии в сети, а также на силовых трансформаторах и у потребителей, что приводит к повышению качества напряжения и энергетической эффективности системы электроснабжения всех отраслей промышленности. Кроме этого, сохраняется срок службы электрооборудования благодаря обеспечению непрерывного и точного регулирования реактивной мощности, а также выполнению операции включения, переключения между ступенями и выключения батареи конденсаторов без возникновения электродинамических усилий и коммутационных потерь.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Panfilov, D. I., Elgebaly, A. E. Modified Thyristor Controlled Reactors for Static VAR Compensators // 2016 IEEE 6th International Conference on Power and Energy (PECON 2016), Melaka, Malaysia, 2016.
- Солодуха, Я. Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности (обобщение отечественного и зарубежного опыта). Реактивная мощность в сетях с несинусоидальными токами и статические устройства для её компенсации / Я. Ю. Солодуха. – М.: Информэлектро, 1981. – 67 с.
- Panfilov, D. I., Elgebaly, A. E., Astashev, M. G. Design and Optimization of New Thyristors Controlled Reactors with Zero Harmonic Content // 18th International Conference of Young Specialists on Micro-Nanotechnologies and Electron Devices, 2017.
- Panfilov, D. I., Elgebaly, A. E., Astashev, M. G. Thyristors Controlled Reactors for Reactive Power Control with Zero Harmonics Content // 17th IEEE International Conference on Smart Technologies IEEE EUROCON 2017, Ohrid, Macedonia, 2017.



5. Dionise, T. J., Morello, S. Comprehensive Analysis to Specify a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace Upgrade // IEEE IAS Annual Meeting Conference Record, 2014.
6. Dionise, T. J. Assessing the Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Las Vegas, NV, 2012.
7. Kawamura, A. An Optimal Control Method Applied for the Compensation of the Fundamental VAR Fluctuations in the Arc Furnace // IEEE Transactions of Industry Applications, 1983, vol. 1A-19, iss. 3. p. 414-423. doi: 10.1109/TIA.1983.4504217.
8. Кабышев, А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учеб. пособие / А. В. Кабышев; под ред. Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 234 с.
9. Компенсирующие и регулирующие устройства в электротехнических системах / Г. Е. Поспелов [и др.]. – СПб.: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.
10. Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits // IPEC 83 – Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983, p. 1375-1386.
11. Edson, H. W., Richard, M. S., Mauricio, A. New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Power in Electrical Systems With Generic Loads // IEEE Transactions on Power Delivery, 1993. Vol. 8.
12. Дерюжкова, Н. Е. Нечёткие алгоритмы управления статическим тиристорным компенсатором в системе электроснабжения с переменной нагрузкой / Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова, В. А. Соловьёв // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 51-58.
13. Патент № 2746796 Российской Федерации, МПК H 02 M 3/18 (2006.01). Способ регулирования реактивной мощности конденсаторной установкой: № 2020133987/07: заявлено 15.10.2020; опубликовано 21.04.2021 / Климанш С. В., Константинов А. М., Табаров Б. Д., Климанш В. С.; заявитель ДВГУПС. – 13 с.
14. Климанш, С. В. Повышения точности регулирования реактивной мощности конденсаторной установкой / С. В. Климанш, Б. Д. Табаров, В. С. Климанш // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 40. – Т. 4. – С. 27-43.
15. Блоочно-модульная модель для исследования физических процессов электротермической установки с компенсацией реактивной мощности / В. С. Климанш, Б. Д. Табаров: св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ. – М.: ФИПС, – 2021. – № 2021614296 от 22 марта 2021 г.
16. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.

**Голоколос Д. А., Ким К. К., Иванов С. Н., Бельский К. О.**  
СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКРАНИРОВАННЫМ АСИНХРОННЫМ  
ДВИГАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО ОПИСАНИЯ

**Голоколос Д. А., Ким К. К., Иванов С. Н., Бельский К. О.**  
**D. A. Golokolos, K. K. Kim, S. N. Ivanov, K. O. Belsky**

## **СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКРАНИРОВАННЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО ОПИСАНИЯ**

### **SYNTHESIS OF A SHIELDED ASYNCHRONOUS MOTOR CONTROL SYSTEM BASED ON A VECTOR DESCRIPTION**

**Голоколос Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, инженер-разработчик программного обеспечения (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: em@email.knastu.ru.

**Dmitry A. Golokolos** – PhD in Engineering, Software Engineer (Russia, Sankt-Petersburg). E-mail: em@email.knastu.ru.

**Ким Константин Константинович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Konstantin K. Kim** – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical Engineering and Heat Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, Russia; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Sergey N. Ivanov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Бельский Кирилл Олегович** – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: em@email.knastu.ru.

**Kirill O. Belsky** – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: em@email.knastu.ru.

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы создания системы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором для специальных эксплуатационных условий. Особенностью конструкции двигателя является наличие электропроводящего экрана, отделяющего подвижную и стационарную части двигателя. Приведена структурная схема экранированного двигателя. Определены основные проектные параметры, и обоснована необходимость учёта параметров экрана при составлении схемы управления. Показано, что построение системы управления может быть основано на подходе с представлением напряжений, токов и потокосцеплений в асинхронном преобразователе в виде пространственных векторов.

**Summary.** The issues of creating control system for an asynchronous motor with a short-circuited rotor for special operating conditions are considered. A feature of the engine design is the presence of an electrically conductive screen separating the movable and stationary parts of the engine. The block diagram of the shielded motor is given. The main design parameters are determined and the necessity of taking into account the screen parameters when drawing up the control scheme is justified. It is shown that the construction of a control system can be based on an approach with the representation of voltages, currents and flow couplings in an asynchronous converter in the form of spatial vectors.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, векторное описание, система управления.

**Key words:** asynchronous motor, vector description, control system.

УДК 621.313

**Введение.** Повышение эффективности электромеханических преобразователей, в частности асинхронных электродвигателей с экранированным статором, средствами управления связано с необходимостью учёта большого числа параметров, степень влияния которых на начальном этапе слабо определена. Для синтеза системы управления экранированным асинхронным электродвигателем (ЭД) теоретической основой является знание физических процессов электромагнитного преобразования электрической энергии в механическую и тепловую, что наиболее характерно рассматриваемому объекту. Практическая реализация системы управления двигателем с учётом внешних и/или внутренних возмущений предполагает её оптимизацию по заданным критериям качества регулирования в соответствии с особенностями технологического процесса. Техническая сложность объекта управления, которым является экранированный асинхронный двигатель, определяет структуру всей системы управления, а эффективность поведенческого алгоритма зависит от степени учёта взаимодействующих параметров синтезируемой системы [1].

**Объект управления.** Экранированный асинхронный двигатель эффективен при работе в наиболее тяжёлых эксплуатационных условиях. Это подтверждает изучение опыта мировых компаний нефтегазовой отрасли, в частности фирмы Siemens, специализирующейся на создании принципиально новых агрегатированных устройств, имеющих общий герметичный корпус электропривода. Блок частотного регулирования находится в верхней части агрегата, электропривод и исполнительный механизм с установленным на двух герметичных магнитных опорах монолитным валом – в нижней. Лобовые части статорных обмоток отогнуты под углом  $90^\circ$ , короткозамкнутый ротор имеет специальное защитное покрытие и выполнен с медной обмоткой. В зазоре между статором и ротором установлен специальный неподвижный элемент. Практика эксплуатации экранированных агрегатов Siemens показала, что по сравнению с традиционной конструкцией они позволяют существенно повысить герметичность и стойкость к агрессивным средам.

**Математическое описание объекта управления.** На рис. 1 условно представлены основные структурные элементы ЭД с короткозамкнутым ротором при произвольной величине угла его поворота  $\Theta$ . В обозначениях токов и напряжений значение нижнего индекса идентифицирует принадлежность параметра к переменным статора (1), ротора (2), экрана (x). В случае пространственной симметрии обмоток двигателя допустимо считать:

$$Z_1 = Z_{1A} = Z_{1B} = Z_{1C}; \quad Z_2 = Z_{2a} = Z_{2b} = Z_{2c}; \quad Z_x = Z_{xA} = Z_{xB} = Z_{xC},$$

где  $Z_{1i}$ ,  $Z_{2i}$ ,  $Z_{xi}$  – полные сопротивления фазных обмоток статора, ротора и экрана соответственно.

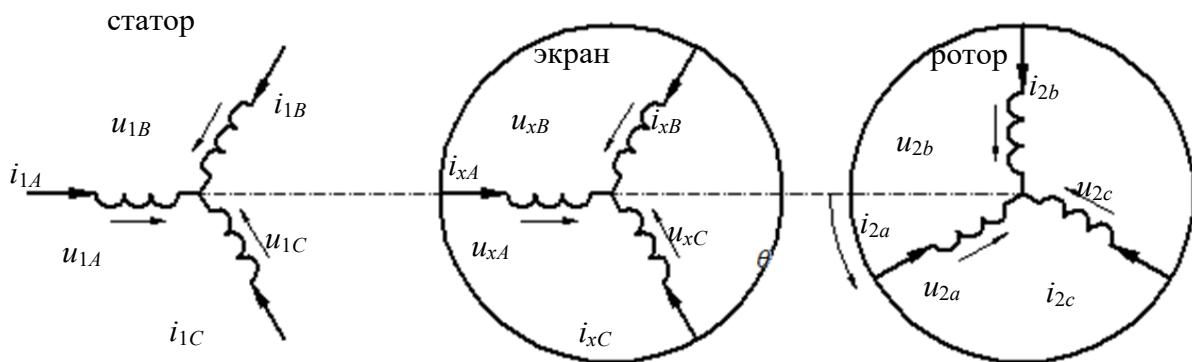


Рис. 1. Обмотки трёхфазного экранированного асинхронного двигателя

При использовании модели обобщённого преобразователя описание электромагнитных процессов производится с учётом замены реального преобразователя эквивалентным. Число витков обмоток с короткозамкнутыми контурами для обеспечения инвариантности магнитного потока

и мощности пересчитывается в соответствии с обмоточными данными первичной. Это обеспечивается неизменностью намагничивающих сил, а также основного потока, связывающего все обмотки ЭАД.

Возможность использования символического метода предполагает учёт только основной гармоники во всех электромагнитных параметрах преобразователя. Соответственно, поток взаимоиндукции создаётся намагничивающим током, магнитодвижущая сила – сумма намагничивающих сил всех обмоток. В приведённом ЭАД число витков обмоток с короткозамкнутыми контурами совпадает с обмоточными данными статорной обмотки. Для предварительных расчётов можно принять, что дополнительные потоки (рассеяния) связаны лишь с одной обмоткой. Приведённые значения токов, напряжений и сопротивлений с учётом обмоточных коэффициентов обмоток и числа фаз получены в работах [2; 3]. В соответствии с электромашиностроительной практикой число короткозамкнутых витков ротора 0,5, при этом каждый стержень обмотки образует одну fazу, т. е. число пазов равно числу фаз [4–6]. Для экрана отсутствует распределение по пазам, поэтому число фаз экрана равно  $m_1$ . Обмоточный коэффициент первой гармоники статора принимается равным 0,93, обмоточный коэффициент короткозамкнутых обмоток равен 1 [4].

Поток взаимоиндукции наводит пропорциональную числу витков каждой обмотки электродвижущую силу (ЭДС). Выше отмечено, что короткозамкнутые обмотки ротора и экрана приведены к обмотке статора, соответственно, уравнения равновесия ЭДС по второму закону Кирхгофа в одной части обращаются в нуль. Если частота напряжения регулируется относительно номинальной (частотное управление), то удобно рассматривать определяемую угловой скоростью относительную частоту.

Анализ переходных процессов в экранированном преобразователе возможен при учёте следующих факторов:

1. Многофазная система симметрична, параметры нулевой последовательности отсутствуют, сумма значений фазных токов в один и тот же момент времени равна нулю.

2. Отсутствует искажение синусоидальности намагничивающих сил по внутренней поверхности статора ЭАД.

3. За пределами активной длины статора источники магнитного поля отсутствуют.

4. Магнитное поле рассматривается только нормальной компонентой, которая равномерно и гармонически изменяется в области расчётной длины и неизменна по толщине экрана.

5. Экран имеет магнитную проницаемость  $\mu_0$ .

Для оценки влияния экрана преобразователь можно рассмотреть с положения обобщённой машины [6]. Экранированный двигатель имеет ряд особенностей, отличающих его от традиционных устройств:

1. Использование экрана приводит к увеличению немагнитного зазора между статором и ротором.

2. Возрастает отношение активной длины магнитопровода к полюсному делению с целью снижения потерь в экране статора.

3. Для достижения требуемой устойчивости вал изготавливается фактически массивным.

4. Для исключения деформации экрана из-за внутреннего давления требуется полузакрытое или закрытое исполнение пазов статора.

#### **Синтез системы управления на основе векторного описания объекта управления.**

Синтез системы управления экранированным электромеханическим преобразователем возможен на основе следующих подходов: обобщённого двухфазного преобразователя, обобщённого пространственного вектора и преобразованием фазовых и координатных переменных состояния.

Векторное описание объекта управления учитывает все три фазы, что соответствует реальному физическому процессу. Фазы  $B$  и  $C$  сдвинуты во временном пространстве относительно обмотки фазы  $A$  соответственно на электрический угол  $2\pi/3$  и  $4\pi/3$ . Полные потокосцепления обмоток фаз создаются током рассматриваемой обмотки и токами в остальных обмотках.

Исходная система уравнений в матричной форме содержит матрицы-столбцы мгновенных значений фазных напряжений, связанных токов и потокосцеплений. Введение функционала в виде



собственной индуктивности обмоток, определяемой главными потокосцеплениями и потокосцеплениями в смежных фазах, наиболее целесообразно при частотном регулировании электропривода [7]. Для симметричного режима работы достаточно учесть одну фазу двигателя, т. к. токи нулевой последовательности отсутствуют.

Токи обмоток в исходных уравнениях посредством взаимной индуктивности, являющейся функцией угла  $\gamma$  (поворота ротора), влияют на потокосцепления каждой обмотки.

Уравнения связи потокосцеплений и токов в матричной форме:

$$\langle \Psi_1 \rangle = |L_1| \langle i_1 \rangle + |L_{12}| \langle i_1 \rangle + |L_{1x}| \langle i_1 \rangle;$$

$$\langle \Psi_2 \rangle = |L_{21}| \langle i_1 \rangle + |L_2| \langle i_1 \rangle + |L_{2x}| \langle i_1 \rangle;$$

$$\langle \Psi_x \rangle = |L_{x1}| \langle i_1 \rangle + |L_{x2}| \langle i_1 \rangle + |L_x| \langle i_1 \rangle,$$

где  $|L_1|, |L_2|, |L_x|$  – матрицы индуктивностей,

$$[L_1] = \begin{bmatrix} L_{m\phi} + L_{1\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{1\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{1\sigma} \end{bmatrix};$$

$$[L_2] = \begin{bmatrix} L_{m\phi} + L_{2\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{2\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{2\sigma} \end{bmatrix};$$

$$[L_x] = \begin{bmatrix} L_{m\phi} + L_{x\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{x\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{x\sigma} \end{bmatrix}.$$

В каждой матрице первая строка представляет коэффициенты для мгновенных значений токов фазы. Остальные строки матрицы  $[L_i]$  учитывают фазовый сдвиг  $B$  и  $C$  относительно фазы  $A$  статора, матрицы  $[L_1]$  – фаз ротора в пространстве.

Матрицы взаимоиндуктивностей, учитывающих влияние токов обмоток:

$$[L_{12}] = [L_{x2}] = L_{m\phi} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos(\gamma - 2\pi/3) \\ \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos\gamma & \cos(\gamma + 2\pi/3) \\ \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos\gamma \end{bmatrix};$$

$$[L_{21}] = [L_{2x}] = L_{m\phi} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma + 2\pi/3) \\ \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos\gamma & \cos(\gamma - 2\pi/3) \\ \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos\gamma \end{bmatrix};$$

$$[L_{1x}] = [L_{x1}] = \begin{bmatrix} L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} \end{bmatrix}.$$

Основное поле статора создаётся суммой пульсирующих полей фазных обмоток, которые, как принято выше, изменяются по гармоническому закону. Ток синусоидален, индукция и намагничивающая сила создают вращающийся вектор, который является векторной суммой намагничивающих сил фаз. Аналогично определение пространственного вектора для других трёхфазных переменных: напряжений, токов, потокосцеплений. Применительно к комплексной плоскости рассматривая в качестве вещественной ось обмотки фазы  $A$ , выражение для пространственного вектора можно записать в виде

$$\vec{F} = \frac{2}{3} \left( F_A + F_B e^{\frac{j2\pi}{3}} + F_C e^{\frac{j4\pi}{3}} \right);$$

где  $F_i$  – мгновенное значение намагничивающей силы в соответствующей фазе.

Модифицированный вектор

$$\vec{F} = \langle a \rangle^T \begin{bmatrix} F_{1A} \\ F_{1B} \\ F_{1C} \end{bmatrix}; \langle a \rangle^T = 2/3[1 \quad a \quad a^2],$$

где  $a = e^{\frac{j2\pi}{3}}$ .

Рассматривая плоскость комплексного переменного в осях  $x - y$ , связанных со статором,  $\vec{F}$  можно разложить на проекции в декартовых координатах:

$$\vec{F} = f_{1x} + jf_{1y}.$$

В неподвижной системе координат переменные с индексами «1» и « $x$ » имеют скорость  $w_0$ , переменные с индексом «2» – скорость  $w_2$ , равную частоте электродвижущей силы ротора с учётом вращения последнего со скоростью, пропорциональной числу пар полюсов. В подвижной системе координат  $d - q$ , связанных с обмоткой «2», переменные ротора вращаются со скоростью  $w_2$  относительно самого ротора.

Для синтеза системы управления экранированным асинхронным двигателем представленные выше уравнения приводятся к вращающейся с синхронной скоростью системе координат  $\alpha - \beta$ .

Векторное описание объекта управления во вращающейся с синхронной скоростью системе координат имеет вид

$$\begin{aligned} 0 &= R_2 \vec{I}_2 + \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} + jw_2 \vec{\Psi}_2; \quad 0 = R_x \vec{I}_x + \frac{d\vec{\Psi}_x}{dt} + jw_0 \vec{\Psi}_x; \quad \vec{\Psi}_1 = L_1 \vec{I}_1 + L_m \vec{I}_2 + L_m \vec{I}_x; \\ \vec{\Psi}_2 &= L_m \vec{I}_1 + L_2 \vec{I}_2 + L_m \vec{I}_x; \quad \vec{\Psi}_x = L_m \vec{I}_1 + L_m \vec{I}_2 + L_x \vec{I}_x; \quad \frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p (\vec{I}_2 \cdot \vec{\Psi}_m) \right). \end{aligned} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) управляющими воздействиями (внешними) являются составляющие пространственного вектора напряжения и частота. Это не позволяет принять последнюю величину за неизвестную переменную, поэтому выбранную систему необходимо преобразовать в связанную с потокосцеплением  $\Psi_2$ . Синхронно вращающееся по отношению к неподвижной системе  $x - y$  потокосцепление  $\Psi_2$  представляет сигнал постоянного тока в системе  $\alpha - \beta$ , сдвинутый относительно оси  $\alpha$  на угол  $\gamma_1$ .

Комплексная форма пространственного вектора при совмещении действительной оси с  $\alpha$ , а мнимой – с  $\beta$  имеет вид



$$\vec{\Psi}_2 = \Psi_{2a} + j\Psi_{2b}.$$

Мгновенное значение угла поворота вращающейся системы координат  $\alpha - \beta$  оставляет систему уравнений без изменений, его влияние заключается в соотношении на оси координат  $\alpha - \beta$  проекций вектора. Для согласования системы координат по  $\vec{\Psi}_2$  необходимо уравнение [8, 9]

$$\Psi_{2b} = 0.$$

Соответственно, уравнение электрического равновесия для ротора

$$0 = R_2 \vec{I}_2 + \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} + jw_2 \vec{\Psi}_2 \quad \rightarrow \quad \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} = -R_2 i_{2a}; \quad w_0 = \frac{R_2 i_{2b}}{\Psi_{2a}} + p_n w.$$

Вектор намагничающего тока:

$$\vec{I}_m = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_x.$$

Система (1) принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{\Psi}_1}{dt} &= \vec{U}_1 - R_1 \vec{I}_1 - jw_0 \vec{\Psi}_1; \quad \frac{d\Psi_{2a}}{dt} = -R_2 i_{2a}; \quad \frac{d\vec{\Psi}_x}{dt} = -R_x \vec{I}_x - jw_0 \vec{\Psi}_x; \\ \vec{I}_1 &= L_{1\sigma}^{-1}(\vec{\Psi}_1 - \vec{\Psi}_m); \quad \vec{I}_2 = L_{2\sigma}^{-1}(\vec{\Psi}_2 - \vec{\Psi}_m); \quad \vec{I}_x = L_{x\sigma}^{-1}(\vec{\Psi}_x - \vec{\Psi}_m); \\ \vec{\Psi}_m &= L_m \vec{I}_1 + L_m \vec{I}_2 + L_m \vec{I}_x; \quad w_0 = \frac{R_2 i_{2b}}{\Psi_{2a}} + p_n w; \quad \frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p_n (\vec{I}_2 \cdot \vec{\Psi}_m) - M_c \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Система уравнений (2) дополнена уравнением движения, обусловленным взаимодействием тока  $\vec{I}_2$  с потокосцеплением  $\vec{\Psi}_m$  с учётом момента инерции  $J$  и момента нагрузки  $M_c$ , включающего механические потери двигателя.

Таким образом, при описании ЭД вращающимися синхронно с системой координат пространственными векторами входные переменные идентифицируются сигналами постоянного тока, изменяющимися только при переходных процессах [9]. Управляющим является пространственный вектор  $\vec{U}_1$ , частота которого  $w_0$  определяется скоростью  $w$  и частотой  $w_2$  и не является управляющим воздействием.

Модель может быть уточнена за счёт учёта изменения степени насыщения магнитной цепи, которое является одной из причин вариативности индуктивных сопротивлений обмоток и коэффициентов в дифференциальных уравнениях. Считая, что насыщение проявляется в изменении коэффициента, связывающего основной магнитный поток и намагничающий ток, при этом между потоками рассеяния и токами связь соответствует ненасыщенной машине с постоянными индуктивностями рассеяния  $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}, L_{x\sigma}$  [9], полные индуктивности можем записать следующим образом:

$$L_1 = L_{1\sigma} + k_\Psi(\Psi_m)L_m; \quad L_2 = L_{2\sigma} + k_\Psi(\Psi_m)L_m; \quad L_x = L_{x\sigma} + k_\Psi(\Psi_m)L_m.$$

Изменение активного и индуктивного сопротивлений учитывается коэффициентами, характеризующими эффект вытеснения.

Индуктивность обмотки ротора

$$L_2 = k_x L_{2n} + k_\Psi L_m,$$

где  $L_{2n}$  – индуктивность обмотки при неподвижном роторе.

Активное сопротивление ротора

$$R_2 = k_x R_{2n},$$

где  $R_{2n}$  – сопротивление обмотки при неподвижном роторе.

**Система управления в MATLAB Simulink.** Имитационная схема динамической модели объекта моделирования в среде моделирования MATLAB Simulink приведена на рис. 2. В ней учтено, что описание динамических процессов использует сигналы в комплексной форме; нелинейности модели на каждом шаге итерации учитываются активными сопротивлениями и индуктивностями всех обмоток, индуктивностью намагничивающего контура.

Питание подаётся от симметричной системы трёхфазного напряжения, генерируемого блоком «Источник напряжения».

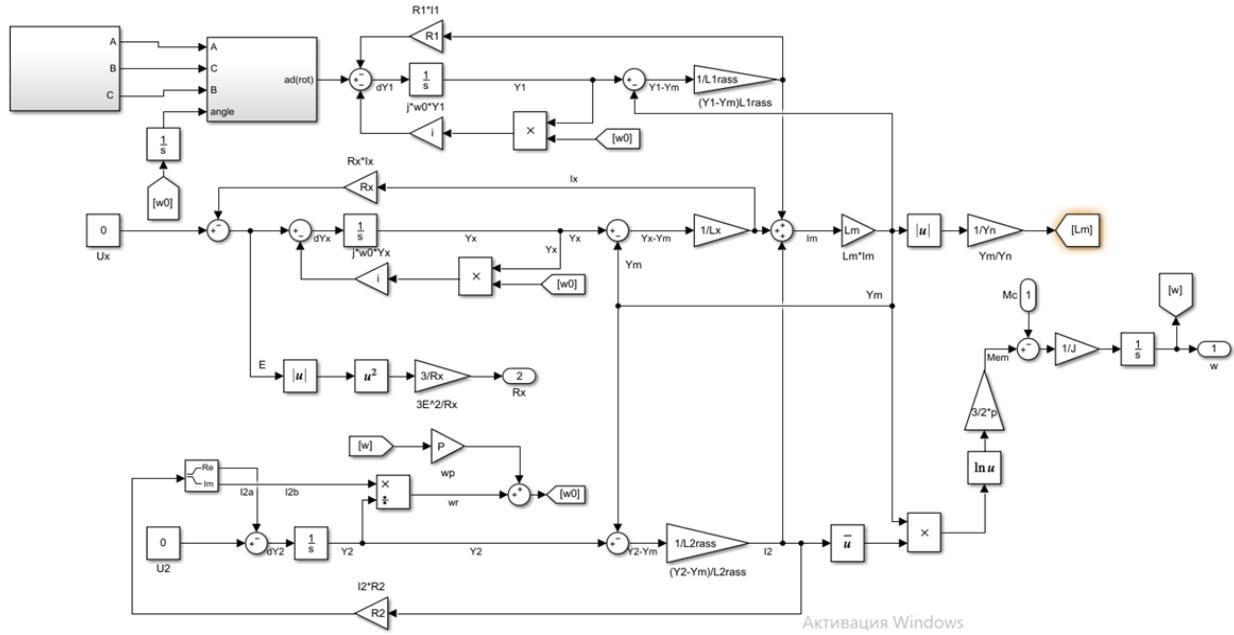


Рис. 2. Модель системы управления экранированного преобразователя

Переход в систему координат  $\alpha - \beta$  обеспечивает «Преобразователь фаз». Трёхфазная система напряжений переводится в двухфазную  $x - y$  прямым преобразованием Кларка:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix},$$

в двухосную врачающуюся – преобразованием Парка:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix}.$$

Комплексный вид питающего напряжения:

$$U_1 = U_\alpha + jU_\beta.$$

Обратное преобразование позволяет перейти к значениям фазных величин:

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} A_A \\ A_B \\ A_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix},$$

где  $A_i$  – амплитуда переменной в соответствующей системе координат.

На рис. 3 приведена визуализация механических характеристик экранированного двигателя, выполненных в двух программных средах. Из рисунка видно, что изменение сопротивления экрана неоднозначно влияет на электромагнитный момент. При достаточно большом активном сопротивлении экрана  $R_x$  характеристики экранированного двигателя практически совпадают с характе-

ристиками обычного преобразователя. Также полученные результаты подтверждают несущественное влияние индуктивности на механические характеристики. Расчёт переходных процессов в пакете MATLAB Simulink показал, что уменьшение активного сопротивления экрана приводит к снижению динамики системы. При использовании материалов экрана с низким электрическим сопротивлением динамические характеристики системы ухудшаются не менее чем на 20 %. Это указывает, что при оптимизации ЭАД средствами управления целесообразно использование подходов на основе нечёткой логики и/или нейронных сетей, поскольку позволит обойти математические неопределённости модели и повысить устойчивость работы [11; 12].

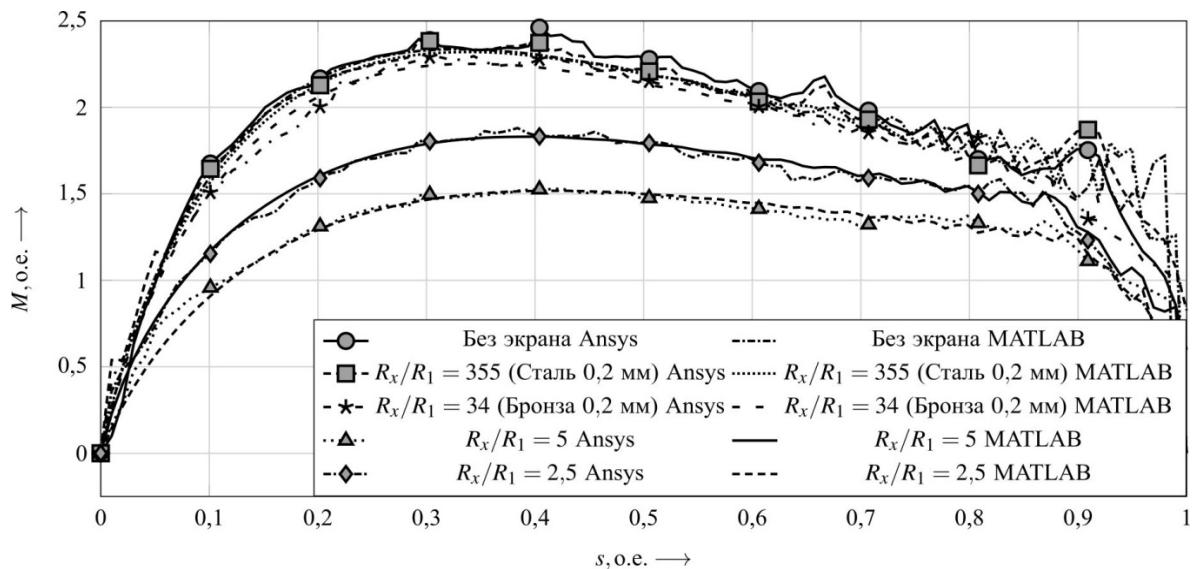


Рис. 3. Влияние параметров экрана на механические характеристики при различных  $R_x$

**Заключение.** Реализация системы управления экранированным электромеханическим преобразователем на основе описания его параметров пространственными векторами зависит от точности нахождения определяющих коэффициентов математической модели. Оценка влияния экрана необходима как для обеспечения устойчивости системы, так и для достижения заданных регулировочных характеристик. Математическая модель, полученная на основе векторного описания объекта управления с учётом принятых допущений, реализована в системе управления экранированным асинхронным двигателем при вариативной параметризации экрана. Основными входными величинами её формирования являются первичные напряжения, размерные соотношения, обмоточные данные. Модель позволяет учесть нелинейность коэффициентов, связанных с определяемыми активными сопротивлениями, индуктивностями, взаимными индуктивностями.

## ЛИТЕРАТУРА

- Голоколос, Д. А. Повышение эффективности совмещённых энергетических комплексов переменного тока средствами управления / Д. А. Голоколос, С. Н. Иванов // Электропривод на транспорте и в промышленности: труды Всероссийской научно-практической конференции (г. Хабаровск, 25-27 сентября 2013 г.). – Хабаровск: ДВГУПС, 2013. – С. 104-110.
- Голоколос, Д. А. Исследование характеристик экранированного асинхронного двигателя / Д. А. Голоколос, Г. М. Гринфельд, К. К. Ким // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 4. – С. 33-36.
- Голоколос, Д. А. Энергетические соотношения в герметичных электротехнических комплексах специального назначения / Д. А. Голоколос, С. Н. Иванов, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № III-1 (19). – С. 4-10.
- Беспалов, А. В. Проектирование асинхронного двигателя общего назначения короткозамкнутым ротором: учеб. пособие / А. В. Беспалов. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гуманит. ун-та, 2012. – 154 с.

**Голоколос Д. А., Ким К. К., Иванов С. Н., Бельский К. О.**

**СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКРАНИРОВАННЫМ АСИНХРОННЫМ  
ДВИГАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО ОПИСАНИЯ**

5. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов [и др.]. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.
6. Уайт, Д. С. Электромеханическое преобразование энергии / Д. С. Уайт, Г. Х. Вудсон; под ред. С. В. Страхова; пер. с англ. Л. А. Ильинского, В. К. Садовского. – Л.: Энергия, 1964. – 528 с.
7. Барыльник, Д. В. Математическое описание и моделирование систем компенсации силы тяжести с асинхронными частотно-регулируемыми электроприводами / Д. В. Барыльник, О. А. Кравченко, Г. Я. Пятибратов. – Новочеркасск: Юж.-Рос. гос. техн. ун-т., 2006. – 150 с.
8. Калачев, Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика) / Ю. Н. Калачев. – СПб.: «ЭФО», 2013. – 63 с.
9. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
10. Каган, А. В. Математическое моделирование в электромеханике. Ч. 2. Письменные лекции / А. В. Каган. – СПб.: Сев.-Зап. гос. заочн. техн. ун-т, 2002. – 73 с.
11. Имитационная модель трёхточечного узла процесса формования листового материала электромеханического типа / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, В. В. Тетерин, Чжо Аунг Хтет // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № II. – С. 86-90.
12. Соловьев, В. А. К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объёмного формирования / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, Чжо Аунг Хтет // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 54-57.



Горьковый М. А., Егорова В. П., Соловьев В. А., Горьковый А. И., Мельниченко М. А.  
M. A. Gorkavii, V. P. Egorova, V. A. Soloviev, A. I. Gorkavii, M. A. Melnichenko

## РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

### DEVELOPMENT OF THE CONTROL SYSTEM ARCHITECTURE FOR A ROBOTIC PRODUCTION PROCESS BASED ON DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

**Горьковый Михаил Александрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Mikhail A. Gorkavii** – PhD in Engineering, Head of Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Егорова Валерия Павловна** – аспирант, старший преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Valeria P. Egorova** – Postgraduate Student, Senior Teacher, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Соловьев Вячеслав Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: erapu@knastu.ru.

**Vyacheslav A. Soloviev** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Electro Drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: erapu@knastu.ru.

**Горьковый Александр Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: gorkavyi\_ai51@mail.ru.

**Aleksandr I. Gorkavii** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electro Drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gorkavyi\_ai51@mail.ru.

**Мельниченко Маркел Андреевич** – аспирант, преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: markel.96dk@mail.com.

**Markel A. Melnichenko** – Postgraduate Student, Teacher, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: markel.96dk@mail.com.

**Аннотация.** На основе типовой структурной схемы автоматизированной системы управления показана необходимость применения интеллектуальных инструментов для повышения качества функционирования производственного процесса. Предложенное решение по модернизации типовой структурной схемы САУ предусматривает использование эталонной модели для достижения требуемых показателей качества, оптимальности и быстродействия реализации решений. В результате проведённых исследований сформирована структурная схема управления производственным процессом на базе цифрового двойника с элементами человекомашинного взаимодействия. Применение разработанного подхода к синтезу систем управления позволит выявить наиболее нагруженные контуры управления, а также снизить влияние человеческого фактора при передаче информации между агентами системы.

**Summary.** On the basis of a typical block diagram of an automated control system, the necessity of using intelligent tools to improve the quality of the production process is shown. The proposed solution for the modernization of a typical structural diagram of the ACS provides for the use of a reference model to achieve the required indicators of quality, optimality and speed of implementation of solutions. As a result of the research, a block diagram of the production process management based on a digital twin with elements of human-machine interaction has been formed. The application of the developed approach to the synthesis of control systems will make it possible to identify the most loaded control loops, as well as reduce the influence of the human factor in the transfer of information between system agents.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, система автоматизированного управления, роботизированный технологический процесс, промышленное производство, система поддержки принятия решений, агентная модель, объектно-ориентированный подход.

**Key words:** digital twin, automated control system, robotic process, industrial production, decision support system, agent model, object-oriented approach.

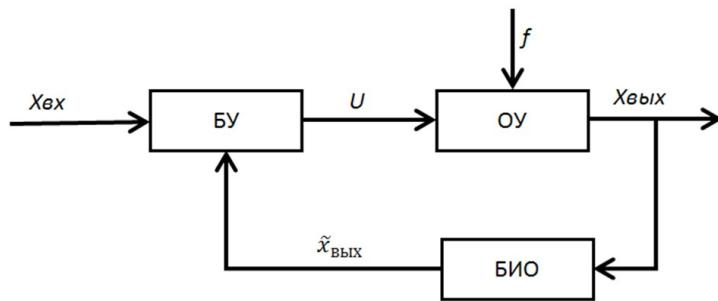
*Данное исследование выполнено в рамках деятельности Консорциума устойчивого развития и технологического лидерства и НИОКР «Разработка методов повышения энергетической эффективности роботизированных технологических процессов», финансируемой за счёт средств ФГБОУ ВО «КнАГУ» № ВН002/2020. Исследование проводилось с использованием оборудования научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и передовые промышленные технологии».*

УДК 004.8

**Введение.** Сложившиеся условия современных реалий и ситуация международной напряжённости формируют новые вызовы перед органами управления ведущих отечественных предприятий. Так, согласно стратегическим приоритетам РФ, высокотехнологичные промышленные предприятия, несмотря на существенные ограничения доступа к импортируемым технологиям, программному обеспечению и оборудованию, должны обеспечить необходимый объём и качество выпускаемой продукции. Помимо технико-технологической составляющей, существенным также является значительное снижение финансовых ресурсов предприятий в связи с беспрецедентным давлением на экономику страны, что в свою очередь автоматически определяет снижение объёма доступных материальных, информационных и временных ресурсов.

Таким образом, промышленные предприятия, выпускающие технологичную продукцию, вынуждены функционировать в условиях жёсткой системы оптимизации, одновременно форсируя процессы выработки инновационных решений и производства продукции необходимого качества с максимальной экономией дефицитных ресурсов, при этом осуществляя импортозамещение целых сегментов производственных технологий и составных частей конечного изделия. Одним из основных инструментов комплексного повышения эффективности производственных процессов, в том числе в условиях существенных возмущающих воздействий, являются программно-аппаратные средства автоматизации (интеллектуальные системы управления, роботизированные комплексы, комплексные технологии цифрового двойника (ЦД) и др. [1–3]), а научные разработки, направленные на поиск путей совершенствования существующих средств автоматизации и разработку новых, будут востребованы.

**Методология.** При разработке систем управления на базе цифровых двойников целесообразно в том числе опираться на кибернетический подход классической теории управления, сопоставляющий объектам реального мира модели в составе блоков, для которых установлены связанные причинно-следственным отношением входные и выходные сигналы [3] (см. рис. 1).



ОУ – объект управления; БУ – блок управления; БИО – блок измерения и оценки

Рис. 1. Типовая структурная схема АСУ с замкнутым контуром управления

Эффективность применения классических методов синтеза систем управления и математических моделей детерминированных технологических процессов на базе промышленных роботов достаточно высока, что подтверждается в большом количестве публикаций, например [4; 14; 15; 18].

Однако в случае стохастических процессов в условиях нестабильности значений достаточно большого числа параметров и, что хуже, в условиях возможных изменений структуры самого объекта управления эффективность классических методов синтеза систем управления (СУ) может значительно снизиться, т. е. не будут достигнуты требуемые показатели качества, оптимальности и быстродействия реализации решений в ЦД. Как правило, нестабильность параметров и структуры объекта и, соответственно, цифрового двойника, который в каждый момент времени должен обладать требуемой степенью адекватности, вызвана большой сложностью объекта управления (например, полная интеграция ЛСУ, АСУТП и АСУПП), а также, что немаловажно, необходимостью включения в имитационные модели цифрового двойника элементов человекомашинного взаимодействия (например, коллaborативные роботизированные процессы). В таком случае целесообразно действовать интеллектуальные алгоритмы вывода [5; 7], в частности, нейронные сети [6], нечёткие системы [6], генетические алгоритмы [8], а также прогрессивные технологии синтеза имитационных моделей, например, мультиагентное моделирование [6]. Представленные инструменты позволяют с достаточной степенью адекватности синтезировать модули цифрового двойника, моделирующие недетерминированные процессы. В то же самое время общая технология проектирования имитационных моделей [5; 7] может быть применена без существенных коррекций и для разработки интеллектуальных модулей в составе автоматизированных систем управления (АСУ) роботизированным процессом на базе ЦД.

**Результаты и обсуждение.** На текущий момент системы управления отечественных предприятий по производству высокотехнологичной продукции в целом работают согласно схеме, приведённой на рис. 1. Абстрактный блок управления при этом сочетает в себе три режима управления (автоматический, автоматизированный и «ручной»), а существенная часть от всего объёма сформированных управлений воздействий приходится на третий режим, обеспечиваемый человеком. Необходимость одновременного функционирования управлений в трёх режимах значительно усложняет процедуры разработки и оптимизации решений как вычислительными системами, так и лицами, принимающими решения. Несогласованность, неоптимальность, субъективизм и невысокая скорость выработки решения человеком также не способствуют повышению показателей эффективности АСУ. Если учесть результаты концептуальной декомпозиции блока управления (БУ) (см. рис. 2), очевидным становится тот факт, что в существующих системах управления, несмотря на частичную автоматизацию, технологический процесс не подкреплён целостной моделью.

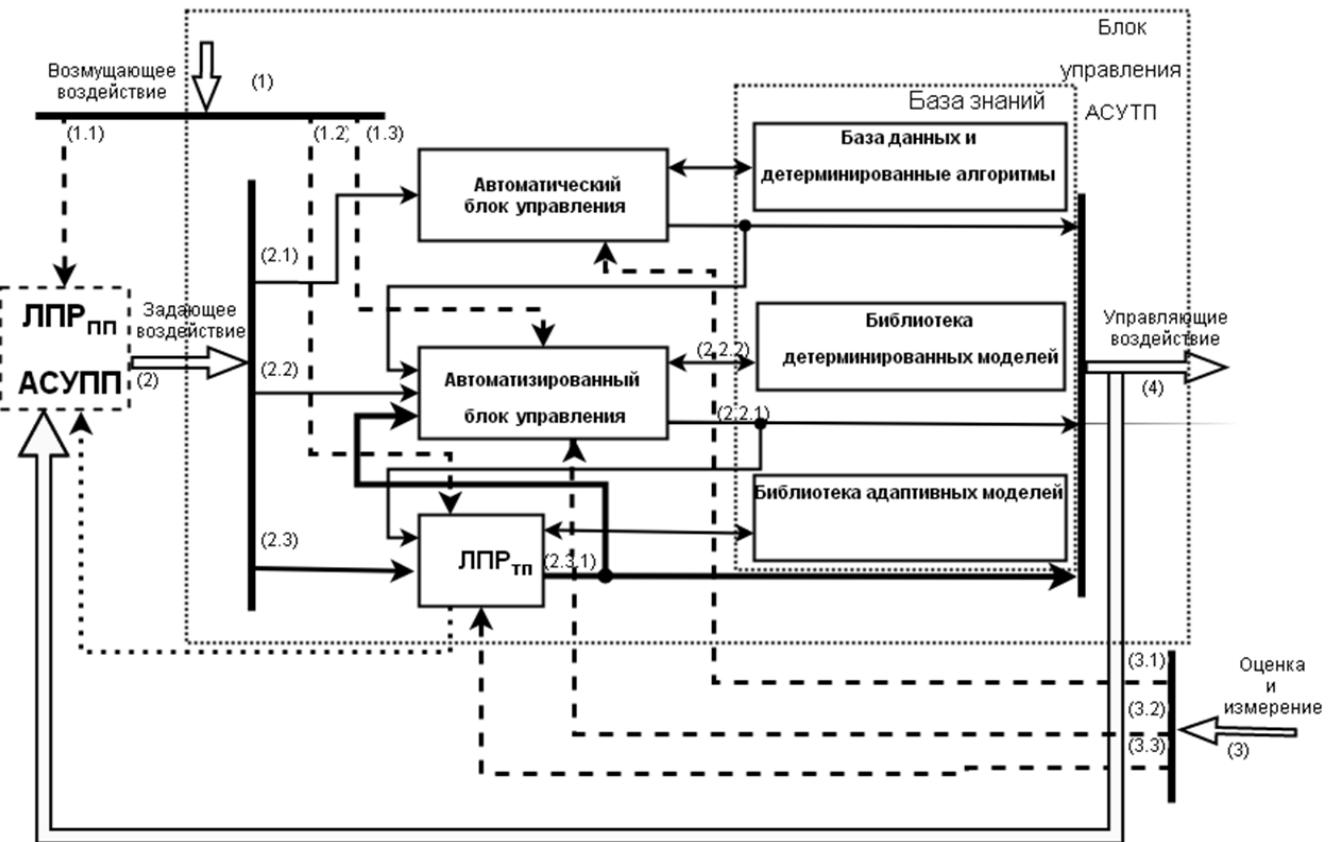


Рис. 2. Структурная декомпозиция блока управления АСУ колаборативным роботизированным процессом

Как правило, модели сложных элементов процесса существуют лишь в абстрактной форме и хранятся в виде эмпирических знаний и опыта лица, принимающего решение (ЛПР), а также разрозненной документации разных форматов. Это обуславливает трудности в формировании управленческих решений по контуру (2)-(2.3)-(2.3.1)-(4) (см. рис. 2), определяет высокую итеративность процесса выработки решений, а также многократную коррекцию задающего воздействия (2). Кроме того, наличие оперативного канала взаимодействия (2.3.1), призванного улучшить качество итогового решения, зачастую создаёт существенную нагрузку на интеллектуальные ресурсы лица, принимающего решение, технологического процесса (ЛПР ТП) и АСУ ТП, позволяя лицу, принимающему решение, производственного процесса (ЛПР ПП) и АСУ ПП изменять задающее воздействие (2), не получив ещё информацию по каналу (4). Нестабильность контура (2)-(2.3)-(2.3.1)-(4) также вносит значительные элементы неопределённости в контур (2)-(2.2)-(2.2.1)-(4), что замедляет автоматизированный процесс принятия решений и повышает затраты ресурсов на его реализацию (вычислительные мощности, временные затраты сотрудников по сопровождению АСУ, операторов и т. п.).

Кроме того, абстрактные модели в части ЛПР представляются в редуцированном формате с оттенками субъективных причинно-следственных связей в связи с ограниченными «вычислительными» возможностями сотрудников, что также негативным образом оказывается на процессе управления. Человек не в состоянии учитывать и обрабатывать многообразие моделей и их режимов в тактическом и тем более оперативном планировании, одновременно согласуя свои решения с ключевыми показателями эффективности (KPI), установленными на уровне управления производственными процессами. Дополнительным фактором снижения качества решения и замедления скорости его выработки является несогласованность видения ситуации ЛПР ТП и ЛПР ПП наряду с существованием фактора неопределённости оценки параметров в каналах (4) и (3.3).

Снижение загрузки контура (2)-(2.3)-(2.3.1)-(4) за счёт повышения степени автоматизации, т. е. расширения функционала контура (2)-(2.2)-(2.2.1)-(4), связано в первую очередь с отсутствием устоявшихся и дающих гарантированный результат методов интеллектуализации сложных коллаборативных процессов [9], а также функционированием АСУ на базе разнородного аппаратно-программного обеспечения разной архитектуры, форматов, производителя и т. д. Интеграционные функции эксплуатируемых аппаратно-программных модулей опять же ложатся на ЛПР со всеми вытекающими последствиями.

Сформулированные проблемы управления могут быть решены за счёт расширения существующих систем автоматизации (описываемых структурной схемой на рис. 1) дополнительными модулями анализа и поддержки принятия решения на базе цифровых двойников по принципу объект – «модель-эталон» [10] (см. рис. 3).

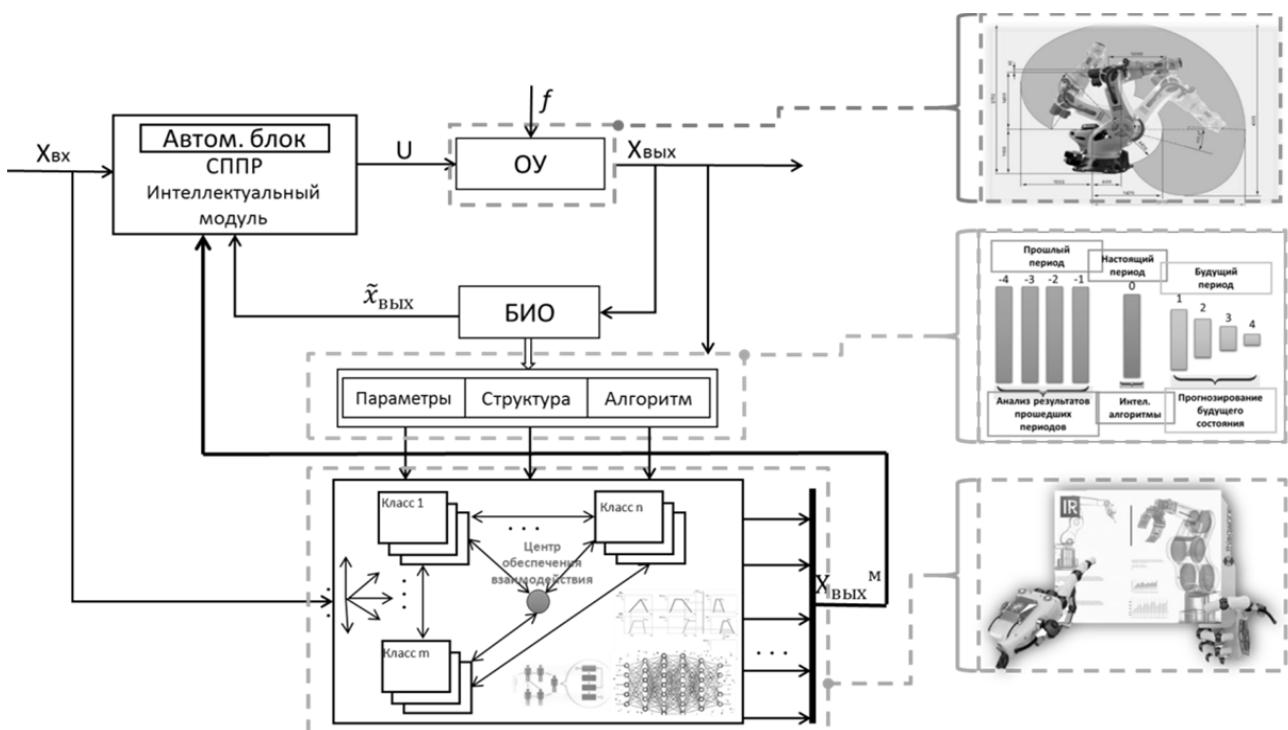


Рис. 3. Структурная схема управления производственным процессом на базе ЦД

Ключевыми изменениями АСУ на рис. 3 являются: включение цифрового двойника, интерфейсов и механизмов его адаптации и расширения блока управления (БУ), интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР), анализирующей результаты моделирования в цифровом двойнике и корректирующей управление  $U$ . Технологии ЦД позволяют обеспечивать работу моделей в трёх реальностях (в настоящем, прошлом и будущем), архивируя и анализируя фактически случившиеся события, анализируя и оперативно корректируя текущие значения параметров, прогнозируя будущие состояния и учитывая их результаты в оперативном и тактическом планировании. Степень зависимости уровня объективности данных от вида моделирования схематично изображена на рис. 3. При этом для реализации прогноза целесообразно использовать интеллектуальные методы [5; 20]. Интерфейсы адаптации (обучения) модели должны предусматривать механизмы, корректирующие не только параметры и структуру модели, но и алгоритмы её функционирования, например алгоритмы функционирования отдельных модулей. Одной из особенностей предлагаемой схемы является включение в ЦД имитационной модели организационной части объекта и блока управления, т. е. HDT [13; 14; 15; 16], обеспечивающих прогнозирование человекомашинной составляющей, например, экспертных

знаний, компетентностных характеристик и психофизических параметров сотрудников, а также учёт их при формировании управлеченческих воздействий на объект управления.

Для идентификации технологического процесса и синтеза цифрового двойника необходима технология, позволяющая в максимально редуцированной имитационной модели отразить максимально возможное количество ключевых структур, зависимостей и причинно-следственных связей. Идентификация процесса должна быть направлена на выявление структурных взаимосвязей, их параметризацию, декомпозицию подпроцессов, временных интервалов жизненного цикла продукции и процесса, а также формирование гибких систем критериев качества.

Перспективным и эффективным инструментом интеграции полученных в ходе идентификации знаний может выступать объектно-ориентированный подход [11; 12]. Наделение интеллектуальных агентов модели свойствами интеллектуальности и обеспечения адекватной «внешней среды» их существования позволяет выявить в ходе имитационного моделирования синергетические взаимосвязи и скрытые закономерности. Для интеллектуального вывода целесообразно использовать нейро-нечёткие гибридные системы [6; 17; 19], позволяющие формировать решения с достаточной степенью достоверности в условиях неопределённости.

**Заключение.** Анализ текущего состояния и будущих перспектив развития промышленных предприятий позволил сформулировать набор ключевых проблем, снижающих эффективность производственных процессов, основными из которых являются несовершенство систем управления, связанное с нерациональным использованием элементов внутренней структуры управляющих блоков, большое количество подпроцессов управления, сконцентрированных у ЛПР, необходимость поддержания в работоспособном состоянии большого числа интеграционных связей. Выполненная декомпозиция блоков управления роботизированными процессами позволила выделить наиболее нагруженные и слабодетерменированные контуры управления. Исследование способов снижения влияния человеческого фактора внутри систем управления человекомашинных систем позволило предложить концептуальную схему системы управления роботизированным процессом на базе цифрового двойника и СППР, являющихся надстройками над существующей АСУ. Продемонстрирована целесообразность включения в имитационные модели ЦД модуля НДТ, позволяющего частично снизить негативное влияние человеческого фактора, возникающего вследствие перегрузки неавтоматизированного контура управления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zakoyan, E. V. Management of production processes in the organization to increase its efficiency / E. V. Zakoyan, N. G. Kondrashova // Journal of Economy and Business. – 2022. – V. 1, № 83. – P. 102-105.
2. Improving the Efficiency of Production Processes of Enterprises of the Aviation Industry / S. Serebryansky, B. Safoklov, I. Pocebnova, V. Lepeshkin // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021». Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – V. 247. – DOI:10.1007/978-3-030-80946-1\_91.
3. Balogun A. A. A., Improving the energy efficiency of production processes at industrial enterprises of the Russian Federation / A. A. A. Balogun, P. Hefei, E.S. Zakharova // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. – 2022.
4. Лясковский, В. Л. Методические и программные средства выбора решений по созданию (развитию) автоматизированных систем управления / В. Л. Лясковский, И. Б. Бреслер, М. А. Алашев // Наукомеханические технологии в космических исследованиях Земли. – 2021. – Т. 13. – № 3. – С. 48-59.
5. Глухих, И. Н. Гибридный CBR-подход в системах мониторинга и поддержки принятия решений на сложных технологических объектах / И. Н. Глухих // The scientific heritage. – 2021. – Т. 1. – № 72. – С. 24-29.
6. Кузин, А. Ю. Мультиагентная система управления распределённой энергосистемой / А. Ю. Кузин, Д. В. Лукичев, Г. Л. Демидова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 5. – С. 945-954.
7. Гришин, Е. С. Программное обеспечение подсистемы контроля качества выпускаемой продукции с использованием интеллектуальных алгоритмов / Е. С. Гришин // Программные продукты и системы. – 2020. – Т. 33. – № 4. – С. 681-688.
8. Гавриленко, Н. Г. Использование генетического алгоритма для решения задач оптимизации управлеченческого воздействия в автотранспортной системе / Н. Г. Гавриленко // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2021. – Т. 2. – № 62. – С. 14-19.



9. Андрианов, А. М. Анализ технологий комплексной цифровизации высокотехнологичного промышленного производства в условиях парадигмы «Индустря 4.0» / А. М. Андрианов // Научные труды вольного экономического общества России. – 2021. – Т. 1. – № 227. – С. 298-317.
10. Хасанов, О. З. Алгоритмы адаптивного управления и идентификации нелинейных динамических объектов роботизированного технологического комплекса с эталонной моделью и сигнальной адаптацией / О. З. Хасанов, З. М. Хасанов // Вестник УГАТУ. – 2021. – Т. 2. – № 92. – С. 102-111.
11. Шальнев, И. О. Объектно-ориентированный подход к описанию взаимодействия группы робототехнических средств на основе распределённой виртуальной машины / И. О. Шальnev // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – Т. 1. – № 218. – С. 125-137.
12. Михелёв, В. В. Нормативная система системно-объектного анализа и моделирования / В. В. Михелёв, С. И. Маторин, А. Г. Жихарев // Экономика. Информатика. – 2020. – Т. 47. – № 3. – С. 623-637.
13. Human Digital Twin in Industry 4.0: Concept and Preliminary Model / Y. Naudet, A. Baudet, M. Risse // Proceedings of the 2nd International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics. – 2021. – Р. 137-144. – DOI:10.5220/0010709000003062.
14. Шанин, Д. О. Разработка структуры роботизированного комплекса, функционирующего в динамически изменяющейся среде / Д. О. Шанин, С. И. Сухоруков // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы международной научно-практической конференции. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 90-94.
15. Концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки / С. И. Сухоруков, С. П. Черный, А. С. Мешков, Д. А. Киба // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 26-33.
16. Разработка интеллектуального модуля прогнозирования образования гололёда на проводах линий электропередач // В. А. Соловьев, С. И. Сухоруков, С. П. Чёрный, К. Е. Костин, Д. О. Савельев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № III-1 (23). – С. 18-25.
17. Максимова, Н. А. Особенности моделирования развитых нечётких систем с алгоритмом вывода Мамдани для управления электроприводами постоянного тока / Н. А. Максимова, С. П. Черный, С. И. Сухоруков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I-1 (49). – С. 37-50.
18. Зайченко, И. В. Математическое моделирование и управление процессом повышения эффективности человекомашинных систем с помощью комплексного критерия оценки эргономичности / И. В. Зайченко, С. А. Гордин, Ю. Г. Егорова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 45-50.
19. Стельмащук, С. В. Оценка точности системы согласованного управления с учётом возмущающего воздействия / С. В. Стельмащук // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 9-17.
20. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович, М. И. Хисматулин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 29-38.

**Жбанов В. А., Абарникова Е. Б.**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СХОДСТВА ДВУХ ОБРАЗЦОВ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ ДАННЫХ

**Жбанов В. А., Абарникова Е. Б.**  
**V. A. Zhbanov, E. B. Abarnikova**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СХОДСТВА ДВУХ ОБРАЗЦОВ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ ДАННЫХ**

### **DESIGN AND DEVELOPMENT OF A NEURAL NETWORK MODEL FOR DETERMINING THE SIMILARITY OF TWO SAMPLES OF NON-STRUCTURED DATA**

**Жбанов Валерий Александрович** – магистр, студент кафедры «Проектирование, управление и разработка информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Valery A. Zhbanov** – Master's Degree Student, Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Абарникова Елена Борисовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование, управление и разработка информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Elena B. Abarnikova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** Данная работа посвящена проектированию и разработке модели нейронной сети для определения сходства двух образцов неструктурированных данных.

**Summary.** This work is devoted to the design and development of a neural network model to determine the similarity of two samples of unstructured data.

**Ключевые слова:** наука о данных, глубокое обучение, нейронные сети.

**Key words:** data science, deep learning, neural networks.

УДК 004.4

На текущий момент существует огромное количество ресурсов, на которых люди пишут свои мысли: комментарии, публикации, статьи и многое другое.

Но в сегменте сетевой литературы существует серьёзная проблема. Если за качеством печатных книг следят редакторы издательств, то за качеством сетевой литературы следить некому – на большинстве литературных ресурсов отсутствуют редакторы и/или модераторы, поскольку владельцам ресурсов невыгодно держать отдельный редакторский штат.

В свою очередь большая часть читающей молодёжи предпочитает печатным книгам электронные ресурсы; низкое качество литературы формирует у них неправильное представление о русской литературной традиции, русском языке в целом и литературной речи в частности.

Возможным решением задачи премодерации текста является создание программного обеспечения «Классификатор текстов», которое предназначено для анализа текстов, проверки соответствия сюжета, оригинальности, обнаружения провокаций, оскорблений, нарушений речевых и стилистических норм.

Структура и функциональные возможности данного программного обеспечения подробно описаны в статье «Разработка библиотеки для обработки неструктурированных текстов» [7].

Задачи программного обеспечения решаются алгоритмами классификации текста. На практике было обнаружено, что стандартный подход к решению задач классификации текстов, описание которого было представлено в статье «Анализ моделей нейронных сетей для классификации неструктурированных текстов» [6], не может использоваться в задачах, где набор классов динами-

чески расширяется, т. к. это приводит к необходимости переобучения модели нейронной сети с учётом новых данных.

Таким образом, необходимо разработать модель, позволяющую определить сходство двух текстов и не требующую знания о конкретных классах образцов. Такая модель может быть использована для определения класса текста, если имеется образец текста, класс которого уже известен.

Для достижения поставленной цели сформулируем основные задачи исследования:

1. спроектировать архитектуру модели нейронной сети;
2. реализовать модель;
3. подготовить набор данных для обучения и тестирования;
4. обучить модель;
5. протестировать модель;
6. проанализировать результаты.

Объектом исследования является обработка неструктурированных данных при помощи технологий искусственного интеллекта.

Предметом исследования является программное обеспечение «Классификатор текстов».

Научная новизна обусловлена следующими параметрами:

1. предложен новый подход к решению задачи классификации;
2. предложена и программно реализована новая архитектура модели.

Практическая значимость определена применением результатов исследования:

1. для модерации сетевых ресурсов;
2. для автоматизации рабочих процессов цензоров или модераторов;
3. при исследованиях в других направлениях искусственного интеллекта.

Теоретической основой исследования послужили работы российских и зарубежных авторов [3; 4; 5].

Модель для решения данной задачи должна принимать на вход два векторизованных текста и возвращать единственное число с плавающей точкой – процентное сходство входных текстов.

На рис. 1 показана схема модели нейронной сети. Данные, полученные моделью, конкatenируются и попадают в слой кодирования, который превращает коды символов в векторы фиксированного размера, после чего полученная матрица попадает в рекуррентный слой, содержащий LSTM-модули, выход которого нормализуется и попадает в выходной слой.

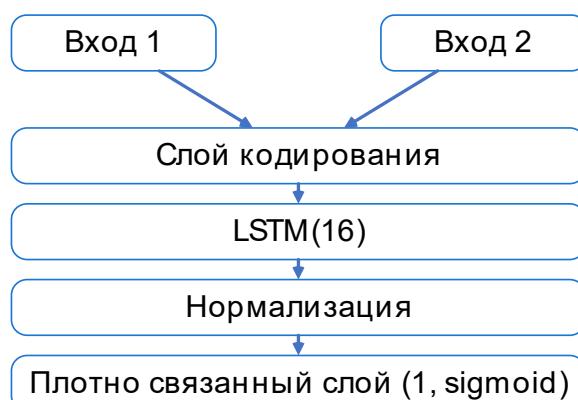


Рис. 1. Архитектура модели

Ниже приведён код на языке Python с применением библиотеки машинного обучения TensorFlow v2.8.0, реализующий описанную архитектуру:

```
# Вход для первого текста
encoder_inputs = keras.Input(shape=(sequence_length,), name="first_input")
```

```
# Вход для второго текста
decoder_inputs = keras.Input(shape=(sequence_length,), name="second_input")

# Объединение данных, полученных со входов модели
x = layers.concatenate([encoder_inputs, decoder_inputs])

# Кодирование данных, преобразование вектора в матрицу
x = layers.Embedding(vocab_size, 100)(x)

# Основной вычислительный слой
x = layers.LSTM(16)(x)

# Нормализация
x = layers.BatchNormalization()(x)

# Выходной слой модели
decoder_outputs = layers.Dense(1, activation="sigmoid")(x)

# Создание модели
model = keras.Model(
    [encoder_inputs, decoder_inputs], # Входы
    decoder_outputs # Выходы
)

# Компиляция модели
model.compile(
    optimizer=optimizers.Adam(), # Алгоритм обучения
    loss="mse", # Функция потерь
    metrics=["accuracy"] # Дополнительные функции
)

# Вывод информации о модели
model.summary()
```

Для обучения модели был сгенерирован набор данных, состоящий из отрывков из трёх книг. В случае если отрывки из одной книги – они считаются схожими. Код для формирования набора данных приведён ниже:

```
# Загружаемые тексты
texts = []

# перебираем входные файлы
for file in files:

    # Открываем текущий файл для чтения
    with open(PATH + "Datasets/Fandoms/" + file, "rb") as file:

        # Получаем текст из файла
        text = file.read(-1).decode("UTF-8")
```



```
print(len(text))

# Сохраняем текст, обрезав его до определённой длины
texts.append(text[:100000])

for text in texts:
    print(text[:100])

# Части набора данных
X1, X2, y = [], [], []

# Получает случайный отрывок текста
# text: входной текст
def get_range(text):

    # Максимально возможная длина диапазона
    max_len = sequence_length

    # Минимальная длина диапазона
    min_len = int(0.5 * max_len)

    # Получаем случайную длину диапазона
    length = random.randint(min_len, max_len)

    # Вычисляем начала диапазона
    pos = random.randint(0, len(text) - length)

    # Возвращает кортеж с началом диапазона и его длиной
    return int(pos), int(length)

# Извлекает два соответствующих отрывка из двух входных текстов
# first: первый текст
# second: второй текст
def generate(first, second):

    # Получаем первый диапазон
    spos, flen = get_range(first)

    # Получаем второй диапазон
    spos, slen = get_range(second)

    # Возвращаем кортеж из двух текстов
    return (first[spos : spos + flen],
            second[spos : spos + selen])

# Комбинации входных текстов
comb = itertools.combinations_with_replacement(range(len(texts)), 2)

# Последовательно перебираем комбинации текстов
for first, second in comb:
```

```

# Если индексы равны, то тексты схожи – метка 1, иначе 0
y_row = int(first == second)

# Требуемое количество образцов
count = 500

# Берём требуемое количество образцов
# из текущей комбинации текстов
for it in range([count, (len(texts) - 1) * count][y_row]):

    # Расчёт новых данных
    x1_row, x2_row = generate(texts[first], texts[second])
    # Векторизация
    x1_row, x2_row = vectorizer(x1_row), vectorizer(x2_row)
    # Добавление новых строк в набор данных
    X1.append(x1_row)
    X2.append(x2_row)
    y.append(y_row)

# Разделение полученного набора данных
X1_train, X1_test, X2_train, X2_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X1, X2, y, test_size=0.33, random_state=42)

# Набор данных для обучения
dataset_train = [{"first_input": np.array(X1_train),
                  "second_input": np.array(X2_train)},
                  np.array(y_train)]]

# Набор данных для тестирования
dataset_test = [{"first_input": np.array(X1_test),
                  "second_input": np.array(X2_test)},
                  np.array(y_test)]]

```

Информация о процессе обучения приведена в табл. 1.

История обучения

Таблица 1

Этап обучения	Обучающая выборка		Тестовая выборка	
	Потери	Точность	Потери	Точность
10	0.2445	0.6133	0.2319	0.6714
20	0.1962	0.6793	0.2154	0.6552
30	0.1902	0.6706	0.2134	0.6718
40	0.1801	0.7061	0.2170	0.6751
50	0.1744	0.7118	0.1958	0.7030
60	0.1620	0.7456	0.1883	0.7145
70	0.1489	0.7695	0.1459	0.7181
80	0.1441	0.7861	0.1491	0.7377
90	0.1434	0.7900	0.1441	0.7467
100	0.1209	0.8292	0.1418	0.7809

На рис. 2 показан график изменений точности на тренировочной выборке. На рис. 3 показан график изменений функции потерь на тренировочной выборке.

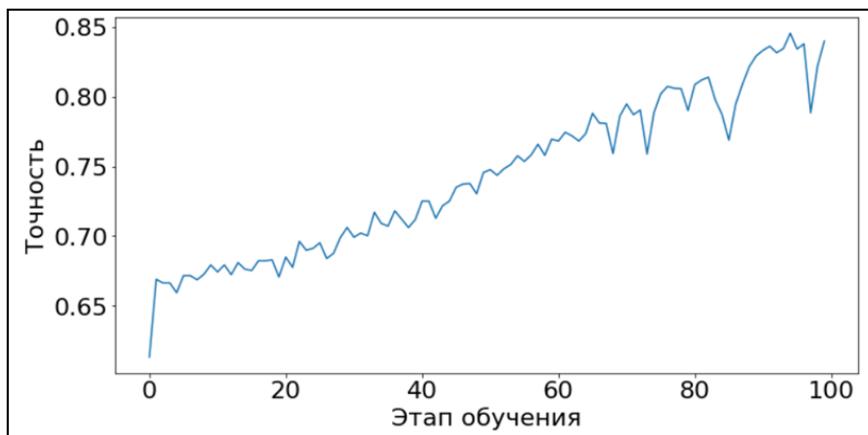


Рис. 2. График точности

Из графиков на рис. 2 и 3 видно, что в процессе обучения значения изменялись неравномерно, из чего можно сделать вывод о наличии в наборе данных выделяющихся из общего числа образцов. Для более корректной работы модели необходимо сформировать и проверить обучающий набор данных.

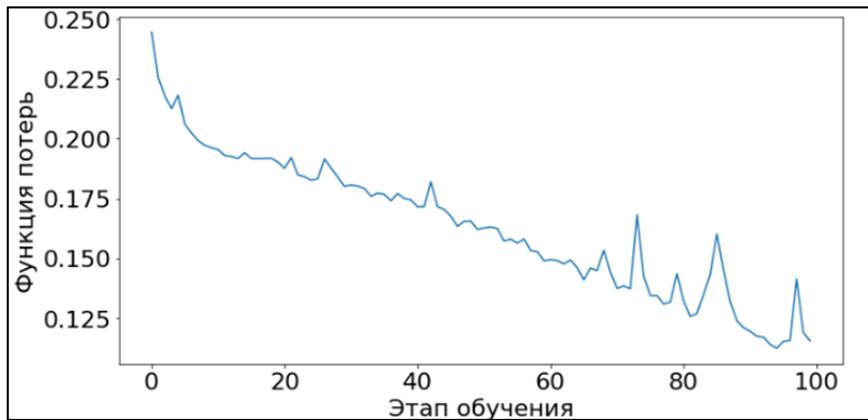


Рис. 3. График функции потерь

В результате работы была спроектирована и разработана модель, которая способна определить сходство двух неструктурированных текстов. Можно добиться большей точности модели, например применив более сложный алгоритм векторизации, такой как «Word2vec». С полным кодом проекта и результатами тестирования можно ознакомиться при помощи интерактивной облачной среды разработки Google Colab [1].

## ЛИТЕРАТУРА

1. colab.research.google.com: Сравнение образцов: сайт. – United States, 2020 – . – URL: [https://colab.research.google.com/drive/1GSdbbY2ODX6U7PYkW0kvA\\_Z5\\_JCK\\_K2b?usp=sharing](https://colab.research.google.com/drive/1GSdbbY2ODX6U7PYkW0kvA_Z5_JCK_K2b?usp=sharing) (дата обращения: 06.10.2022). – Текст: электронный.
2. keras.io: Natural Language Processing: сайт. – United States, 2020 – . – URL: <https://keras.io/examples/nlp/> (дата обращения: 06.10.2022). – Текст: электронный.
3. Komleva, E. V. About Digital Texts Significant In Text Classification / E. V. Komleva // The European Proceedings of Social and Behavioural Sciences, Оренбург, 19–20 сентября 2019 года. Vol. LXXXIII. – Оренбург: European Publisher, 2020. – P. 154-159. – DOI 10.15405/epsbs.2020.04.02.17. – EDN OLTUBF.
4. Potaraev, V. Analysis of relation types in semantic network used for text classification / V. Potaraev // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2020. – № 4. – С. 305-308.

**Жбанов В. А., Абарникова Е. Б.**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СХОДСТВА ДВУХ ОБРАЗЦОВ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ ДАННЫХ

5. Бондаренко, В. И. Классификация научных текстов с помощью методов глубокого машинного обучения / В. И. Бондаренко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 69-77.
6. Жбанов, В. А. Анализ моделей нейронных сетей для классификации неструктурированных текстов / В. А. Жбанов, Е. Б. Абарникова // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы V Всерос. нац. науч. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11-15 апреля 2022 года. В 4 ч. Ч. 1 / Редколлегия: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 374-378.
7. Жбанов, В. А. Разработка библиотеки для обработки неструктурированных текстов / В. А. Жбанов, Е. Б. Абарникова // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07-11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 17-19.
8. Омельяненко, Я. Эволюционные нейросети на языке Python: практическое руководство / Я. Омельяненко; пер. с англ. В. С. Ященко. – Москва: ДМК Пресс, 2020. – 310 с.
9. Плас, Дж. Вандер. Python для сложных задач / Плас Дж. Вандер. – СПб.: Питер, 2018. – 576 с.



**Колесник М. Б.**  
**M. B. Kolesnik**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ГЕРМЕТИЧНОЙ ЗАДВИЖКИ В СРЕДЕ SIMINTECH**

### **SIMULATION OF THE OPERATION OF AN ELECTROMECHANICAL CONTROL SYSTEM FOR A SEALED VALVE DRIVE IN A SIMINTECH ENVIRONMENT**

**Колесник Максим Борисович** – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Maxim B. Kolesnik** – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Аннотация.** В данной статье приведена модель электромеханической системы управления приводом герметичной задвижки, построенная в пакете SimInTech. Описаны её основные элементы и принцип работы. Обосновано и показано задание исходных данных для расчёта. Приведены результаты моделирования в виде кривых, отражающих скорость и перемещение заслонки, а также изменение нагрузки.

**Summary.** This article presents a model of an electromechanical control system for the drive of a sealed valve, built in the SimInTech package. Its main elements and the principle of operation are described. The assignment of the initial data for the calculation is justified and shown. The simulation results are presented in the form of curves reflecting the speed and movement of the flap and the change in load.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, SimInTech, модель, моделирование.

**Key words:** electromechanical system, SimInTech, model, simulation.

УДК 621.31:621.25

**Введение.** Ранее была разработана методика проектирования привода герметичной задвижки и выполнена проектный расчёт. В результате расчёта были получены объёмная модель задвижки, тяговая характеристика, геометрические размеры исполнительного элемента и параметры для выбора приводного двигателя. Следующим этапом была разработана принципиальная электромеханическая система (ЭМС) управления в виде блок-схемы и описаны её основные элементы. ЭМС приведена на рис. 1. В данной статье показаны модель ЭМС, построенная в пакете SimInTech, и результаты моделирования её работы в виде графиков [1–3].

**Разработка модели управления.** В ЭМС, приведённой на рис. 1, питание двигателя и системы управления, контроля и защиты осуществляется от аккумуляторной батареи напряжением 12/24 В, т. е. источник трёхфазного переменного напряжения номиналом 380 В отсутствует. Ниже описано моделирование для случая, когда этот источник присутствует. Разработанная модель управления в пакете SimInTech приведена на рис. 2 и 3. Она состоит из двух отдельных проектов, объединённых в одном пакете и работающих согласованно.

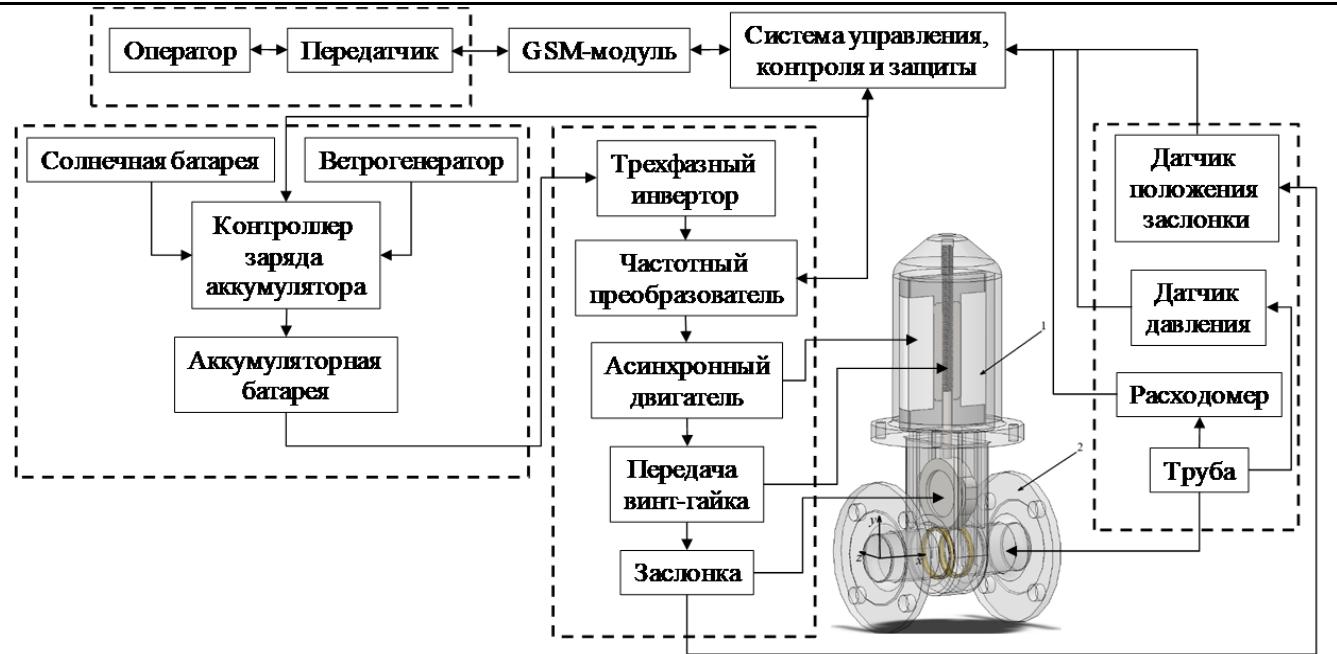


Рис. 1. Электромеханическая система управления приводом герметичной задвижки

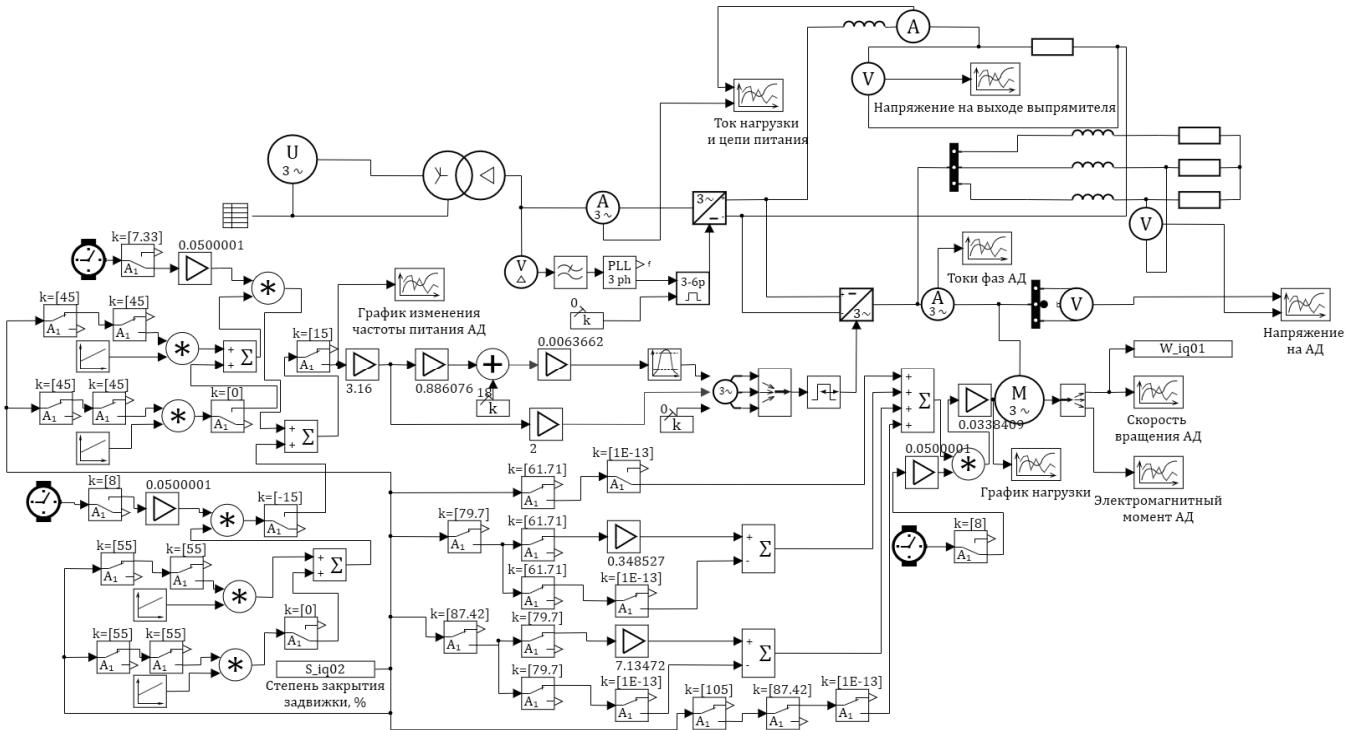


Рис. 2. Модель электромеханической системы управления

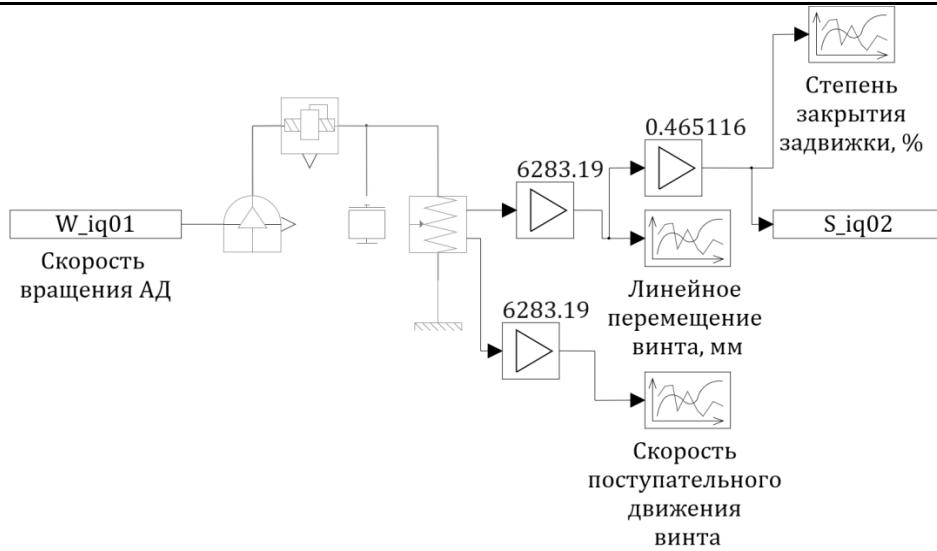


Рис. 3. Модель механизма винт-гайка электромеханической системы

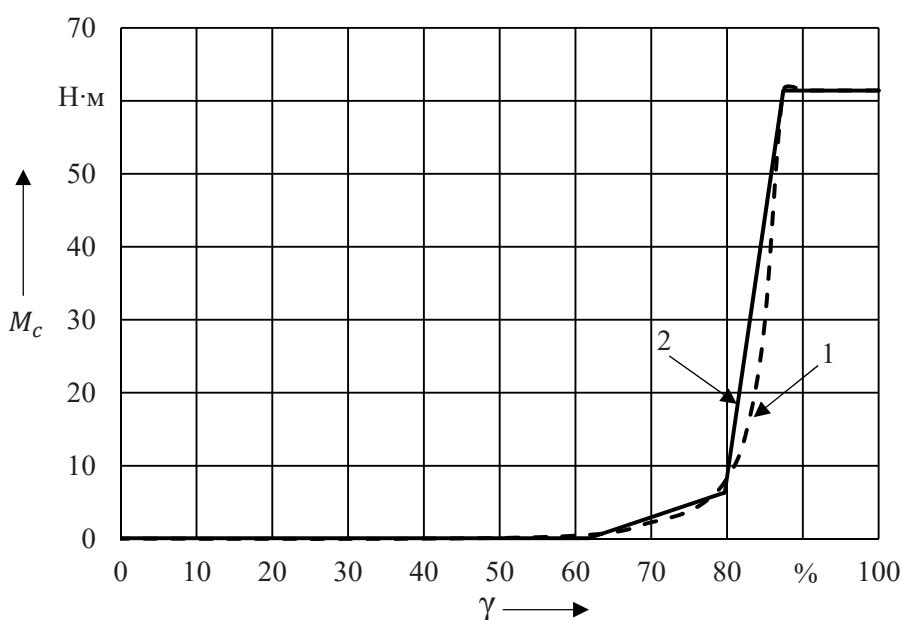
Питание двигателя осуществляется через частотный преобразователь, представленный совокупностью выпрямителя и инвертора. Ток от трёхфазного источника сначала протекает через согласующий трансформатор, затем через блок трёхфазного мостового выпрямителя, представленного биполярными транзисторами с изолированным затвором и диодами. Полученное на выходе выпрямленное пульсирующее напряжение поступает на вход трёхфазного мостового инвертора, также состоящего из IGBT-транзисторов и диодов. В инверторе напряжение обратно преобразуется в переменное, но уже представленное импульсами различной длительности и ширины. Для регулирования напряжения, в том числе по частоте и амплитуде, применяется совокупность блоков: трёхфазный управляемый источник сигнала, мультиплексор и генератор широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Через блок трёхфазного управляемого источника сигнала задаётся желаемая на выходе инвертора амплитуда напряжения и частота. Соответственно, также возможно управление частотой вращения двигателя [4–5].

В реальности система, состоящая из двух моделей и входящая в состав одного пакета, должна работать следующим образом: когда давление в системе снижается ниже допустимого, система защиты фиксирует неисправность и от системы управления поступает управляющее воздействие на замыкание контактов контактора, через которые питается трёхфазная обмотка статора асинхронного двигателя. В результате этого по обмотке начинает протекать переменный ток. Далее в соответствии с заданными условиями пуска двигатель начинает разгоняться, что приводит в движение заслонку задвижки, связанную с двигателем с помощью механизма винт-гайка, приведённого на рис. 3. Задвижка начинает закрываться [6–7].

В пакете SimInTech в процессе моделирования данные о скорости вращения двигателя непрерывно поступают на вход блока «Идеальный источник скорости вращательного движения», который связан с блоком «Ходовой винт». С другой стороны от блока «Ходовой винт» подключён «Идеальный датчик поступательного движения» для отслеживания линейного перемещения винта или в данном случае заслонки запорной арматуры и блок «Инерция поступательного движения». Данные о перемещении, а конкретно данные о степени закрытия задвижки, поступают в окно проекта, представленного на рис. 2. Это необходимо для того, чтобы заданный момент сопротивления двигателя изменялся в зависимости от степени закрытия задвижки, а не от времени моделирования. С уменьшением пропускной способности увеличивается нагрузка на заслонку и, соответственно, на приводной двигатель, достигая максимального значения в закрытом положении задвижки. Также возможно было задать нагрузку непосредственно на винт, которая зависит от степени закрытия задвижки в окне проекта на рис. 3, а затем возникающий момент сопротивления подать на двигатель, но этого пока не было сделано, т. к. ранее в результате проектного расчёта

была получена зависимость механического момента на валу двигателя от степени закрытия задвижки по известной формуле из механики. В свою очередь математика, заложенная в блок «Ходовой винт», неизвестна, но сравнение результатов было бы хорошей проверкой. Также данный способ осложняется правильным заданием параметров этого блока, поэтому пока что он был использован только для отслеживания перемещения винта и его скорости [8].

**Задание исходных данных.** Для упрощения процесса моделирования кривая момента со- противления 1, полученная ранее и приведённая на рис. 4, представлена в виде кусочно-линейной кривой 2 и в таком же виде задана как нагрузка в расчётной модели на рис. 1. В модели она представлена множеством переключателей, усилителей и сумматоров.



1 – реальная нагрузка; 2 – нагрузка, принятая для моделирования

Рис. 4. Нагрузка на валу двигателя

Также в результате предыдущих расчётов были получены требуемые параметры для асинхронного двигателя: номинальная мощность 1,5 кВт, синхронная частота вращения 500 об/мин. Так как в каталоге не было двигателя с заданными параметрами, то был взят аналог с номинальной мощностью 2,2 кВт и синхронной частотой вращения 750 об/мин. На рис. 5 приведено окно с параметрами выбранного двигателя, внесёнными в программу.

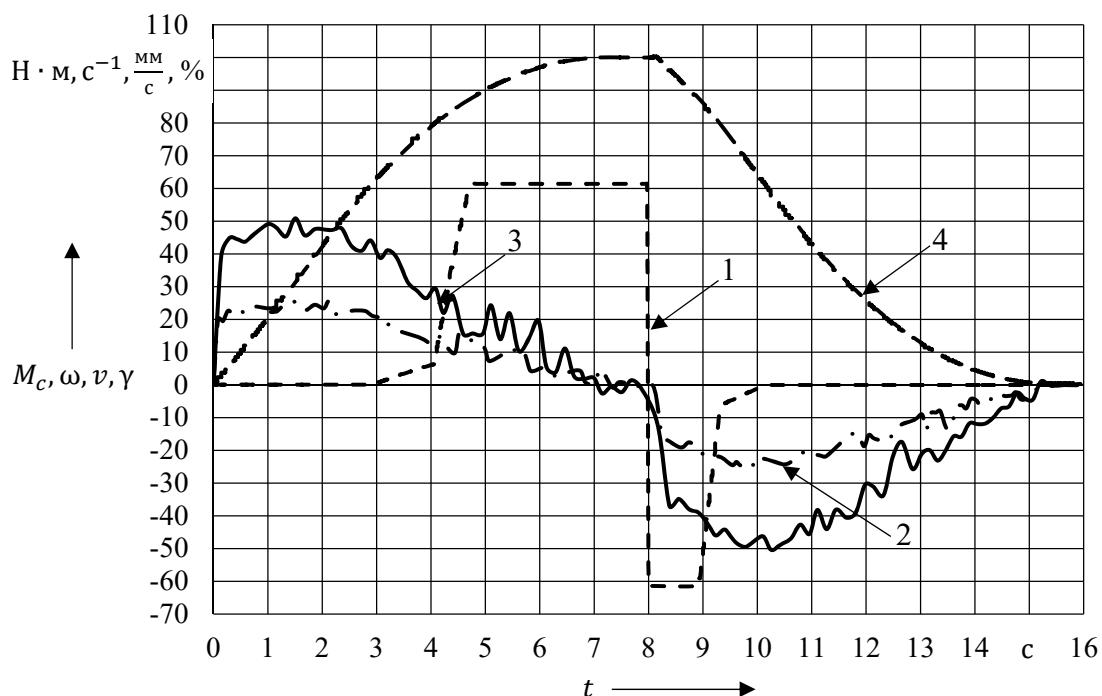
**Моделирование работы системы.** Так как гидравлическая схема не была построена и датчиков давления не было, то плавный пуск, затем работа на закрытие задвижки, плавное торможение, пауза, плавный пуск в обратном направлении, работа на открытие задвижки, плавное торможение и стоп были реализованы за счёт линейных источников, переключателей, часов, перемножителей и сумматоров.

В результате моделирования были получены зависимости частоты вращения, момента со- противления на валу двигателя, скорости поступательного движения заслонки и степень закрытия задвижки от времени, приведённые на рис. 6. Кривые отражают полный рабочий цикл системы. От 0 до 7,3 с задвижка закрывается, и в соответствии с этим изменяются все параметры в системе. От 7,3 до 8 с система остаётся в состоянии покоя. Затем в момент времени 8 с моделируем сигнал от оператора на открытие задвижки, соответственно, направление скорости и нагрузки изменяет свой знак и задвижка переходит из закрытого в открытого состояния [9–11].

Свойства : ac\_IM1

Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
<b>Название</b>				
Номинальные				
Номинальная частота вращения, об/мин	Nnom	711		
Номинальная частота питающей сети, Гц	fnom	50		
Число пар полюсов	p	4		
Номинальное напряжение, В	Unom	380		
Номинальная мощность, кВт	Pnom	2.2		
Момент инерции, кг*м <sup>2</sup>	J	0.013		
Схема замещения				
Сопротивление намагничивания [Xm], Ом	Zm	[25.608]		
Сопротивление ротора [Xlr, Rr], Ом	Zr0	[2.902 , 1.417]		
Сопротивления статора [Xls, Rs], Ом	Zst	[1.878 , 1.588]		
Начальные условия				
Дополнительные				

Рис. 5. Параметры асинхронного двигателя



- 1 – Момент сопротивления на валу двигателя  $M_c = f(t)$ , Н · м;
- 2 – Частота вращения ротора двигателя  $\omega = f(t)$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;
- 3 – Скорость поступательного движения заслонки  $v = f(t)$ , мм/с;
- 4 – Степень закрытия задвижки  $\gamma = f(t)$ , %

Рис. 6. Графики переходных процессов при работе системы

**Заключение.** Таким образом, в результате работы в пакете SimInTech была спроектирована модель, отражающая принцип работы ЭМС управления приводом герметичной задвижки, смоделирована её работа с заданными параметрами и построены графики переходных процессов, отражающие весь рабочий цикл.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
- 2 Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
3. Алямовский, А. А. Инженерные расчёты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
4. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов, Е. А. Шабаев, О. С. Козлов, А. М. Щекатуров. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 424 с.
5. Калачев, Ю. Н. SimInTech: Моделирование в электроприводе / Ю. Н. Калачев. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 106 с.
6. Колесник, М. Б. Повышение эффективности привода герметичной задвижки / М. Б Колесник // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы V Международной научно-практической конференции // Редколлегия: С. И. Сухоруков (отв. ред.), А. С. Гудим, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 144-146.
7. Колесник, М. Б. Получение аппроксимирующих зависимостей для учёта влияния параметров нагрузки на энергетические показатели асинхронного двигателя / М. Б. Колесник // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III-1 (59). – С. 43-47.
8. Колесник, М. Б. Моделирование устойчивости электромеханического преобразователя при осевых нагрузках / М. Б. Колесник, С. Н. Иванов, К. К. Ким // Известия вузов. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 45-50.
9. Ким, К. К. Повышение эффективности электропривода магистральных задвижек / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – № 3. – С. 71-77.
10. Патент № 2736387 Российской Федерации, МПК7 H 05 B 6/10. Электромеханическая система запорной арматуры: № 2020111602: заявлено 19.03.2020; опубликовано 16.11.2020 / Ким К. К., Иванов С. Н., Горбунов А. В.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2 с.
11. Особенности проектирования электромеханических преобразователей для систем комплексной безопасности / О. С. Амосов, Д. А. Голоколос, С. Н. Иванов, Со Хтайк // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 5. – С. 5-11.



Копытов С. М., Босхомджеев С. А.  
S. M. Kopytov, S. A. Boshomdzheev

## ВЫБОР СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ МОЩНОГО СТАБИЛИТРОНА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МОДУЛЯТОРЕ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДИММИРУЕМОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

### CHOICE OF A SUBSTITUTION CIRCUIT OF A HIGH-POWER STABILIZER FOR USE IN A MAINS VOLTAGE MODULATOR OF A DIMMABLE LIGHTING NETWORK

**Копытов Сергей Михайлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: skopytov@mail.ru.

**Sergey M. Kopytov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: skopytov@mail.ru.

**Босхомджеев Сергей Алексеевич** – магистрант кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: imp\_ist@mail.ru.

**Sergey A. Boshomdzheev** – Master's Degree Student, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: imp\_ist@mail.ru.

**Аннотация.** Одним из преимуществ светодиодного освещения является возможность диммирования. Используются различные интерфейсы для управления диммерами, но все они требуют подведения к осветительному прибору отдельной линии управления. Альтернативой проводным линиям управления диммерами является передача команд управления по сети электроснабжения с использованием технологии Power Line Communication. В разновидности этой технологии информация кодируется количеством полуволн сетевого напряжения, находящихся между маркерами. Для формирования маркеров необходимо уменьшать амплитуду отдельных полуволн примерно на 10 %. Проблемой является получение стабильного уровня маркеров независимо от тока в сети электроснабжения. Необходим узел снижения напряжения полуволны, являющийся аналогом мощного стабилитрона. Приведены и экспериментально исследованы схемы замещения мощного стабилитрона: определены параметры элементов, получены вольт-амперные характеристики схем замещения, сняты осциллограммы работы в сети питания при рабочих токах. Сформулированы выводы о преимуществах и недостатках данных схем.

**Summary.** One of the advantages of LED lighting is the ability to dim. Various interfaces are used to control dimmers, but they all require a separate control line to the lighting fixture. An alternative to wired control lines for dimmers is the transfer of control commands through the power supply network using Power Line Communication technology. In a variation of this technology, the information is coded by the number of half-waves of line voltage located between the markers. To form the markers, the amplitude of the individual half-waves must be reduced by about 10 %. The problem is to obtain a stable marker level irrespective of the current in the power supply network. A half-wave voltage reduction node, which is an analogue of a powerful stabilizer, is necessary. Powerful stabilizer substitution diagrams are given and experimentally investigated: parameters of elements are determined, volt-ampere characteristics of substitution diagrams are obtained, oscilloscopes of work in power supply network at working currents are taken. Conclusions about advantages and disadvantages of these schemes are formulated.

**Ключевые слова:** диммируемая система освещения, низкочастотная PLC-технология, маркер, амплитудная модуляция полуволн сетевого напряжения, силовой коммутатор, схема замещения мощного стабилитрона.

**Key words:** dimmable lighting system, low-frequency PLC technology, marker, mains voltage half-wave amplitude modulation, power switch, powerful zener diode equivalent circuit.

**Введение.** Основными источниками внутреннего и наружного освещения в настоящее время являются светодиодные осветительные приборы. Они имеют существенные преимущества перед источниками света других видов (лампами накаливания, галогенными, ртутными и газоразрядными лампами). К таким преимуществам можно отнести экономичность, экологичность, повышенный срок службы, надёжность конструкции, морозоустойчивость и устойчивость к перепадам напряжения. Одним из важных преимуществ светодиодных осветительных приборов является возможность экономии электрической энергии за счёт управления световым потоком, который практически линейно зависит от потребляемого тока.

Светодиоды в осветительных приборах соединяют последовательно, поскольку они имеют низкое падение напряжения. Для питания таких приборов используют источники с выходом по току – светодиодные драйверы. Выпускают драйверы не только с фиксированным выходным током, но и с возможностью регулирования выходного тока – диммируемые светодиодные драйверы [1; 2].

Для управления выходом диммируемого драйвера обычно используют цифровые интерфейсы DALI, DMX512, KNX, а также аналоговое напряжение величиной 0...10 В или ШИМ-сигнал амплитудой 10 В и частотой 0,1...3 кГц. Данные способы управления требуют отдельной сигнальной линии. Кроме того, они имеют ограниченную дальность действия, а также большинство из них создаёт высокочастотные помехи. Поэтому актуальна передача команд управления без использования отдельной проводной линии связи. Такие возможности предоставляет технология Power Line Communication (PLC), позволяющая передавать команды управления по самой линии электроснабжения [3–6].

**Использование модифицированной низкочастотной технологии PLC для управления диммируемой осветительной сетью.** В работах [7–9] предложено использовать модифицированную низкочастотную технологию PLC. В ней информация кодируется количеством полуволн сетевого напряжения, расположенных между маркерами. В качестве маркеров используются полуволны сетевого напряжения, уменьшенные по амплитуде примерно на 10 %, что допускается стандартами на параметры сетевого напряжения. Принцип управления светильниками с помощью низкочастотной технологии PLC демонстрирует функциональная схема диммируемой системы освещения с амплитудной модуляцией полуволн сетевого напряжения, изображённая на рис. 1.

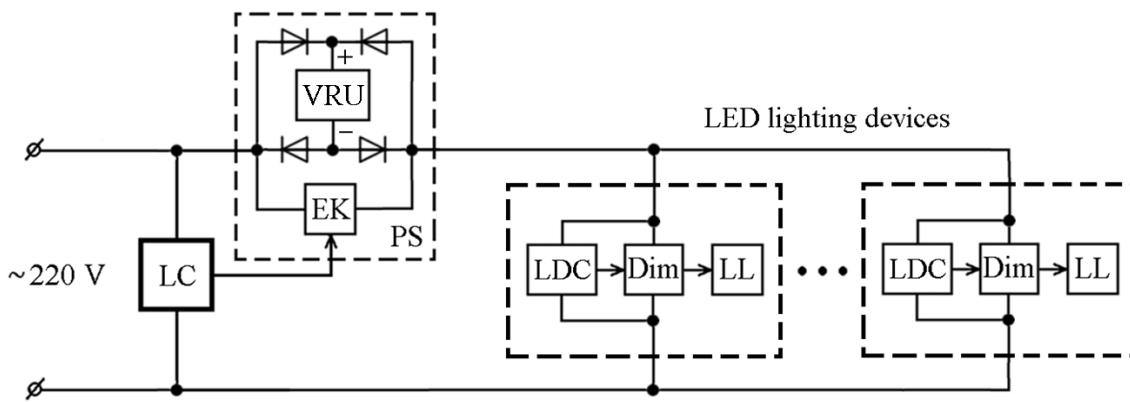


Рис. 1. Функциональная схема диммируемой системы освещения

В разрыв осветительной линии установлен силовой коммутатор (PS), состоящий из электронного ключа (EK) и диодного моста. В диагональ диодного моста установлен узел снижения напряжения (VRU) с односторонней проводимостью тока. В обычном режиме освещения электронный ключ открыт сигналом, приходящим от контроллера освещения (LC). Ключ пропускает нормальное сетевое напряжение в линию освещения. К линии подключены светодиодные освети-

тельные приборы, состоящие из контроллера осветительного прибора (LDC), диммера (Dim) и светодиодной лампы (LL).

Начало и конец передачи данных отмечаются маркерами. Для их формирования контроллер освещения не открывает электронный ключ в нужный полупериод сетевого напряжения. В этом случае ток проходит через соответствующую пару диодов в одном направлении через узел снижения напряжения, на котором часть напряжения падает.

Электронный ключ на приведённой схеме должен обладать двусторонней проводимостью. Например, возможна его реализация на симисторе или твердотельном реле. Также возможно использование электронного ключа с односторонней проводимостью, если установить его в диагональ диодного моста параллельно с узлом снижения напряжения. Однако в этом случае придётся примириться с дополнительным падением напряжения на диодах моста.

Преимуществами данного способа управления диммерами являются отсутствие дополнительной линии управления, передача команд управления на большие расстояния, минимальное влияние на форму сетевого напряжения.

Для устойчивого распознавания маркеров требуется, чтобы величина снижения напряжения не зависела от количества осветительных приборов и их мощности, т. е. от тока в линии. Свойством стабильного падения напряжения при разных токах обладают кремниевые стабилитроны, однако их мощность ограничена сравнительно небольшими токами.

Целью работы является выбор и исследование схем замещения мощного стабилитрона с рабочим напряжением 20...30 В и током до 10 А.

**Сравнение схем замещения мощных стабилитронов.** В работах [10; 11] предложен силовой коммутатор на мощных MOSFET-транзисторах, приведённый на рис. 2, а.

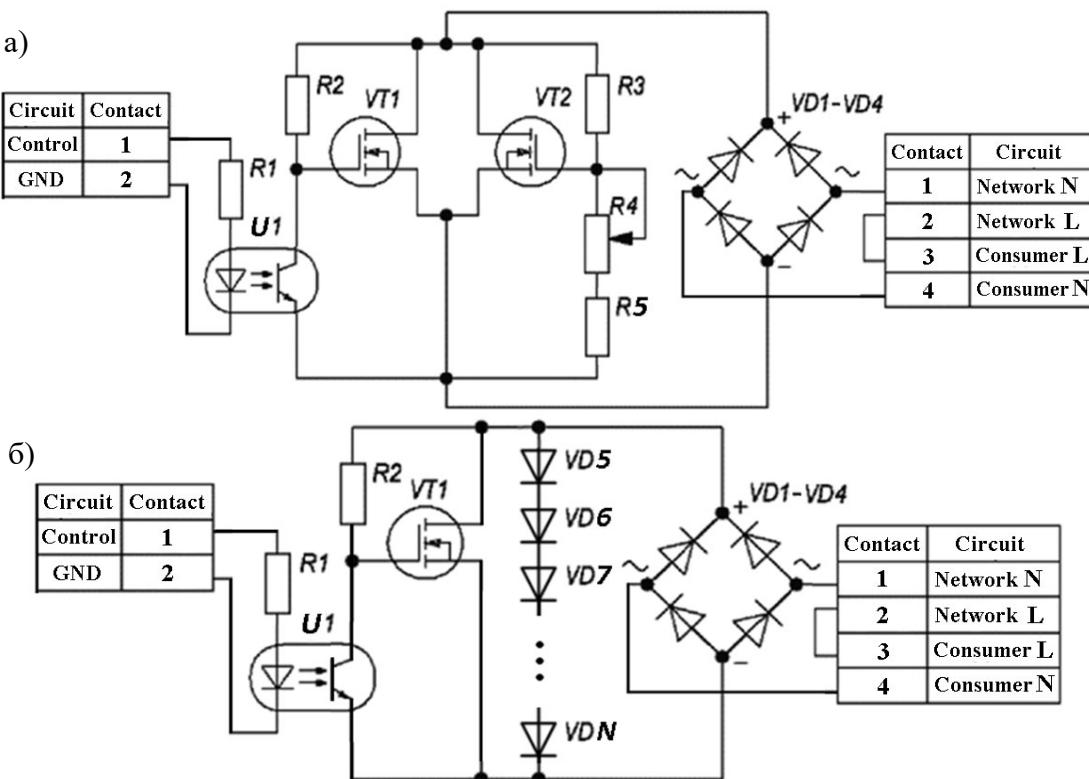


Рис. 2. Принципиальные схемы силовых коммутаторов переменного напряжения:  
 а – силовой коммутатор с гасящим напряжение мощным MOSFET-транзистором;  
 б – силовой коммутатор с гасящей напряжение батареей выпрямительных диодов

Сигналы формирования маркеров поступают через транзисторную оптопару U1 от контроллера освещения. Диодный мост VD1-VD4 предназначен для получения односторонней направленности сетевого тока через MOSFET-транзисторы. Транзистор VT1 работает в режиме ключа, пропуская нормальное сетевое напряжение в линию освещения. В полупериод формирования маркера транзистор VT1 закрыт, а транзистор VT2 пропускает ток и гасит часть сетевого напряжения. Регулировка проводимости канала и падения напряжения на транзисторе VT2 осуществляется резисторами R4 и R5. Однако в зависимости от тока нагрузки это падение будет изменяться, что является существенным недостатком данной схемы.

Для решения этой проблемы в работе [10] предложено использовать последовательное включение мощных выпрямительных диодов в прямом направлении, как показано на рис. 2, б.

Падение напряжения на батарее диодов:

$$U = NU_D,$$

где  $N$  – количество диодов;  $U_D$  – падение напряжения на одном диоде.

Например, в случае использования 24 выпрямительных диодов типа Д245 суммарное падение напряжения составляет порядка 25 В при токе 3 А.

При всей простоте и надёжности такого решения недостатки его также очевидны: большое число дискретных элементов, требующих установку на радиаторы, зависимость падения напряжения от силы протекающего тока и температуры.

В работах [12; 13] авторы рассматривают схему замещения низковольтного стабилитрона с плавной регулировкой напряжения стабилизации и температурной коррекцией его параметров в зависимости от внешних условий. Данная схема приведена на рис. 3, а.

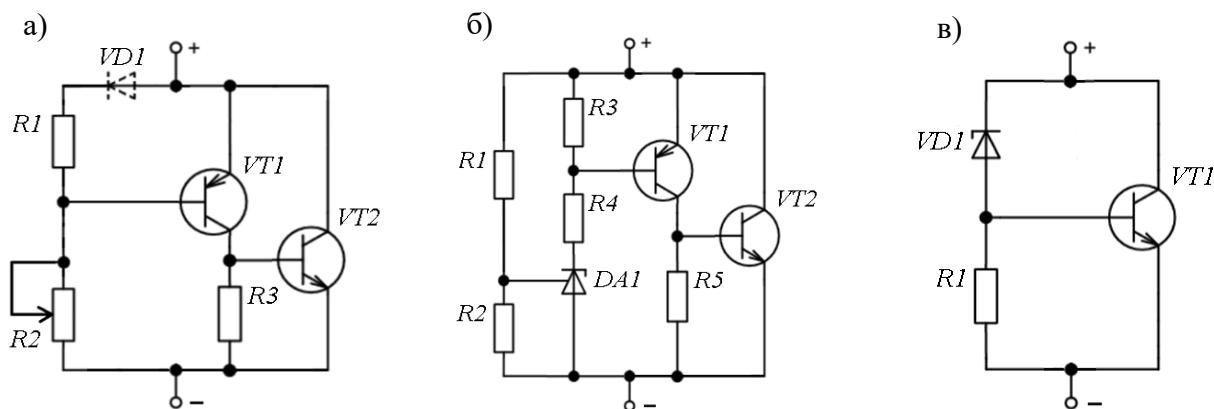


Рис. 3. Принципиальные эквивалентные схемы мощных стабилитронов:

а – схема с плавной регулировкой напряжения стабилизации;

б – схема с использованием микросхемы низковольтного регулируемого стабилитрона TL431;  
в – параллельный стабилизатор напряжения на основе обычного стабилитрона и транзистора

Значение напряжения стабилизации приближённо определяется зависимостью

$$U = 0,6 + \frac{0,35R2}{R1}.$$

Преимуществом схемы является меньшее дифференциальное сопротивление по сравнению с обычными стабилитронами. В результате схема позволяет получить существенно больший коэффициент стабилизации. К недостаткам схемы относят больший, чем у традиционных стабилитронов, температурный коэффициент напряжения стабилизации. Для его уменьшения рекомендуют применить термокомпенсирующий германиевый диод VD1 типа Д18.

Хотя авторы позиционируют рассматриваемую схему замещения как низковольтную для диапазона стабилизации напряжения от 1,2 до 7 В, однако она вполне применима и для диапазона стабилизации в десятки вольт. Использование в качестве транзистора VT2 мощного составного транзистора позволяет получить ток силой в несколько ампер.

В работе [14] представлено два варианта сильноточного (до 8 А) параллельного стабилизатора напряжения. Они построены с использованием микросхемы низковольтного регулируемого стабилитрона TL431. В первом варианте стабилизатора могут быть получены напряжения от 1,24 до 1,75 В, а во втором – от 1,75 до 6 В. Схема второго варианта приведена на рис. 3, б, она имеет высокий коэффициент стабилизации и позволяет легко устанавливать нужное напряжение стабилизации. Коррекция значений используемых резисторов позволила применить данную схему для стабилизации более высоких напряжений.

Недостатком схемы является сравнительно большое количество элементов, вследствие чего уменьшается её надёжность. Альтернативным вариантом является параллельный стабилизатор напряжения на основе обычного стабилитрона и транзистора, схема которого приведена на рис. 3, в.

Значение напряжения стабилизации определяется зависимостью

$$U = U_{ST} + U_{BE},$$

где  $U_{ST}$  – напряжение стабилизации используемого стабилитрона;  $U_{BE}$  – падение напряжения между базой и эмиттером транзистора.

Необходимое напряжение стабилизации можно получить путём последовательного соединения стабилитронов.

**Результаты экспериментальных исследований.** Для оценки пригодности представленных схем замещения к использованию в качестве узла снижения напряжения в программе Multisim выполнено моделирование и определены параметры элементов. Затем на испытательном стенде с источником питания постоянного тока и нагрузкой в виде проволочного реостата опытным путём получены вольт-амперные характеристики (см. рис. 4).

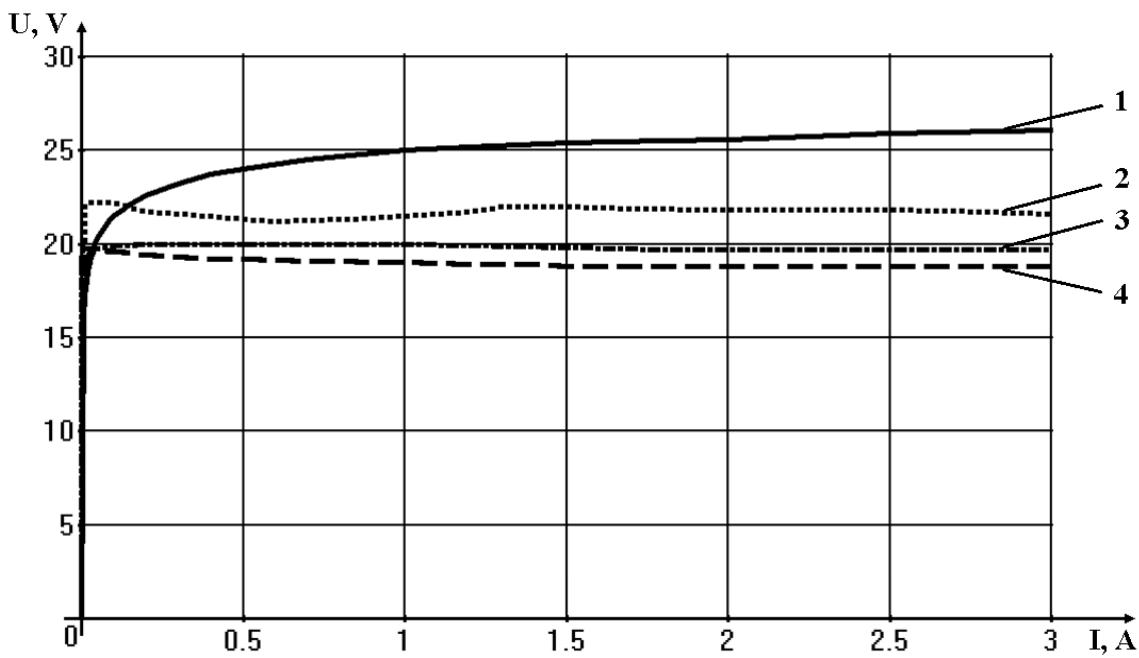


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики эквивалентных схем мощного стабилитрона

На рис. 4 график 1 соответствует характеристике батареи из 24 выпрямительных диодов Д245 с максимальным током 10 А.

В следующих трёх схемах замещения в качестве гасящего напряжение и пропускающего основной ток элементом использован один и тот же мощный составной транзистор типа КТ827А, который имеет максимальный ток коллектора 20 А. В то же время номинальное значение максимального напряжения коллектор-эмиттер данного транзистора может быть меньше амплитудного напряжения сети 311 В, поскольку на нём падает не больше 10 % от этого напряжения. Данный транзистор установлен на массивном радиаторе.

График 2 соответствует схеме замещения на рис. 3, а. При этом использованы следующие элементы:  $R_1 = 200 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 3,6 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 1,1 \text{ кОм}$ ,  $VT_1$  – составной р-п-р транзистор КТ973А. График 3 характеризует схему, представленную на рис. 3, б. В ней использованы резисторы со следующими параметрами:  $R_1 = 36 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 5,1 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_4 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 1,1 \text{ кОм}$ ,  $VT_1$  – составной р-п-р транзистор КТ973А. Последний график 4 соответствует схеме параллельного стабилизатора напряжения с параллельным включением транзистора (см. рис. 3, в). В качестве стабилитрона  $VD_1$  использован мощный стабилитрон Д815А с напряжением стабилизации 20 В. Добавочный резистор  $R_1 = 27 \text{ Ом}$ .

Сравнение вольт-амперных характеристик показывает, что наименьший коэффициент стабилизации имеет схема замещения в виде батареи выпрямительных диодов. Кроме того, от неё же следует ожидать наибольшего температурного коэффициента напряжения стабилизации с отрицательным знаком.

Характеристика для схемы замещения на рис. 3, а более стабильна, однако имеет локальные повышения и понижения напряжения стабилизации при разных токах.

Вольт-амперные характеристики схем замещения на рис. 3, б и на рис. 3, в наиболее близки к идеальным характеристикам. Следует указать, что с ростом тока мощный транзистор нагревался, а температура остальных элементов практически не изменялась.

Окончательное тестирование рассмотренных схем замещения проведено в сети переменного тока с напряжением 220 В. Стенд содержал схему замещения мощного стабилитрона и нагрузку в виде проволочного потенциометра. Для сравнения полуволн напряжения, пришедших на нагрузку после гашения части напряжения и без гашения, параллельно схеме замещения был установлен встречный выпрямительный диод. Таким образом, амплитуда положительных полуволн сетевого напряжения уменьшалась, а отрицательных оставалась прежней. Осциллограммы напряжений на нагрузке, полученные при токе около 6,3 А, приведены на рис. 5.

Осциллограмма на рис. 5, а соответствует графику 1 на рис. 4, осциллограмма на рис. 5, б – графику 2, на рис. 5, в – графику 3 и на рис. 5, г – графику 4. Осциллограммы на первый взгляд практически не отличаются друг от друга, что подтверждает работоспособность всех приведённых схем замещения. Более подробное рассмотрение показывает, что вершины модулированных полуволн для последних двух схем замещения немного расширены по сравнению с первыми двумя схемами.

**Заключение.** Для получения маркера при использовании низкочастотной PLC-технологии необходимо уменьшать амплитуду полуволны сетевого напряжения. Величина этого вычета не должна зависеть от силы тока в цепи питания. Таким образом, узел снижения напряжения должен обладать свойствами мощного стабилитрона. Поскольку мощные дискретные стабилитроны на большие токи отсутствуют, приходится использовать схемы замещения.

Рассмотренные схемы замещения мощных стабилитронов имеют различные коэффициенты стабилизации напряжения, температурные коэффициенты напряжения стабилизации, отличаются количеством использованных элементов, линейностью вольт-амперной характеристики на участке стабилизации и возможностью регулировки напряжения стабилизации. Предпочтение следует отдать схемам замещения на основе параллельного стабилизатора напряжения с параллельным включением мощного выходного транзистора. Использование микроэлектронного стабилизатора напряжения TL431 со схемой обвязки позволяет регулировать напряжение стабилизации схемы замещения.

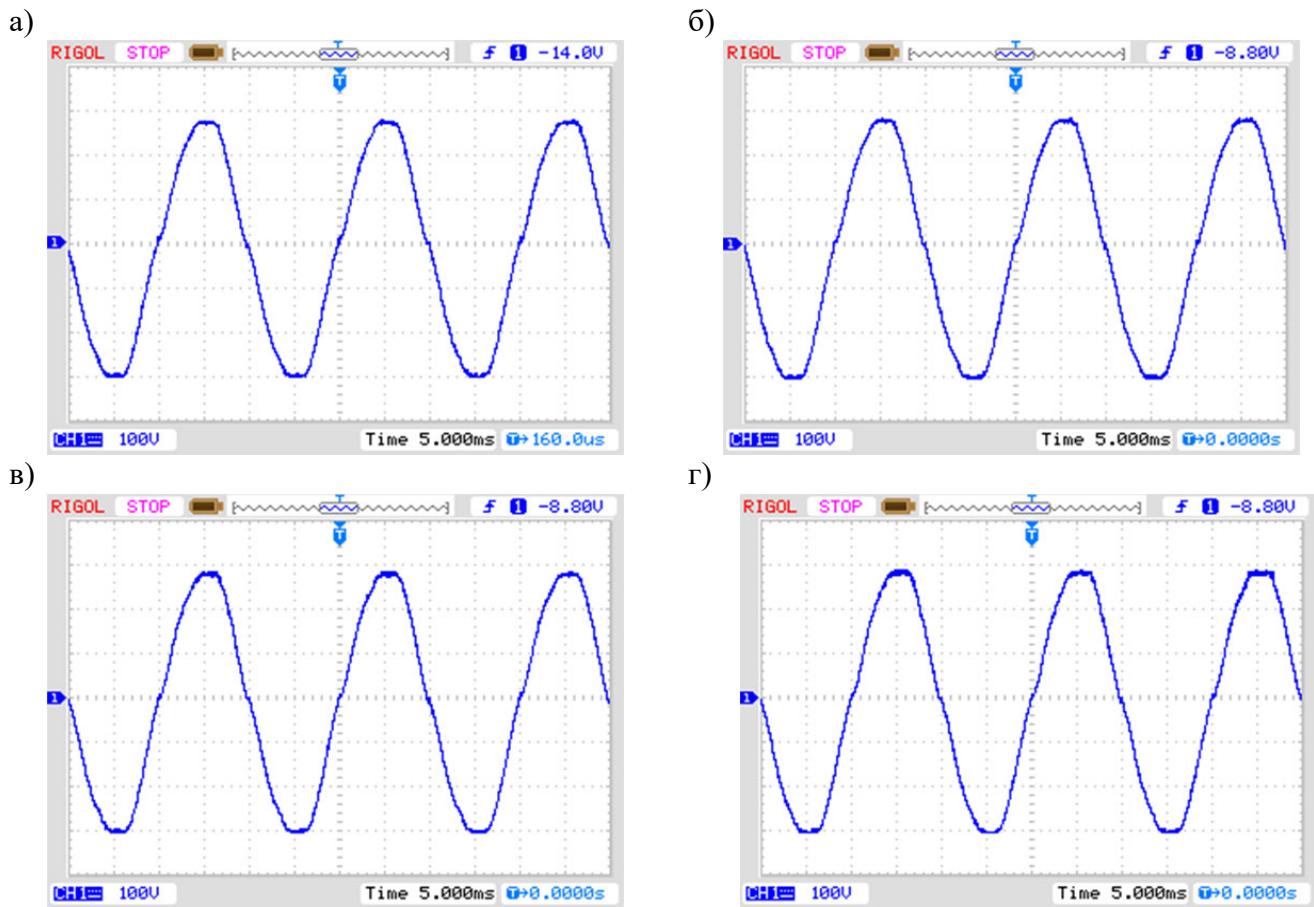


Рис. 5. Осциллограммы напряжений на нагрузке при модуляции положительных полуволн схемного напряжения: а – гашение напряжения батареей выпрямительных диодов; б – гашение напряжения схемой с плавной регулировкой напряжения стабилизации; в – гашение напряжения с использованием микросхемы низковольтного регулируемого стабилитрона TL431; г – гашение напряжения параллельным стабилизатором напряжения на основе обычного стабилитрона и транзистора

Необходимо заметить, что схемы замещения мощного стабилитрона находят применение также во многих других областях силовой электроники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Wang Y., Alonso J. M., Ruan X. A Review of LED Drivers and Related Technologies // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, p. 5754-5765, July 2017. DOI: 10.1109/TIE.2017.2677335. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7869351>.
2. Коротков, С. М. Источники питания для светодиодного освещения / С. М. Коротков, А. В. Лукин // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 46. – С. 45-49.
3. Sittoni A. et al. Street lighting in smart cities: A simulation tool for the design of systems based on narrowband PLC // 2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2), IEEE, 2015, p. 1-6. DOI: 10.1109/ISC2.2015.7366195. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7366195>.
4. Коротченко, Ф. Создание сети передачи данных на основе PLC-технологии / Ф. Коротченко, Н. Наташина // Control Engineering Россия. – 2019. – № 6 (84). – С. 64-68.
5. Никуличев, А. Ю. Система управления уличным освещением с использованием передачи информации по сети электроснабжения / А. Ю. Никуличев, А. А. Сапронов // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. – Спец. выпуск. – С. 137-138.

**Копытов С. М., Босхомджеев С. А.**

ВЫБОР СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ МОЩНОГО СТАБИЛИТРОНА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
В МОДУЛЯТОРЕ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДИММИРУЕМОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

6. Вставская, Е. В. Способ передачи информации по питающей сети и его применение в построении систем автоматизированного управления наружным освещением / Е. В. Вставская, Е. В. Костарев // Вестник ЮУрГУ. – 2011. – № 2. – С. 81-84.
7. Патент № 2525854 Российской Федерации, МПК H 04 B 3/54 (2006.01). Система и способ связи через амплитудную модуляцию линий электропитания: № 2012100298/07; заявлено 14.06.2010; опубликовано 20.08.2014 / Седлак Йозеф; патентообладатель Седлак Йозеф. – 9 с.
8. Kopytov S. M., Ulyanov A. V. Modification of the Dimming Control Method for LED Lighting Using PLC Technology // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2018, p. 1-4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602739. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8602739&isnumber=8602430>.
9. Марущенко, Д. С. Разработка модели управления системой светодиодного освещения посредством PLC-меток с моделированием системы обратной связи / Д. С. Марущенко, А. В. Ульянов // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, 12-16 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 315-317.
10. Копытов, С. М. Коммутатор сетевого напряжения для управления светодиодными осветительными приборами с помощью низкочастотной PLC-технологии / С. М. Копытов, А. В. Ульянов, Р. В. Шибеко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – № 9 (22). – С. 152-161.
11. Копытов, С. М. Контроллер для управления светодиодными осветительными сетями по линии электропитания / С. М. Копытов, А. В. Ульянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – № 1 (15). – С. 52-59.
12. Александров, И. Регулируемый аналог стабилитрона / И. Александров // Радио. – 1993. – № 11. – С. 39.
13. Климкин, К. А. Схема замещения стабилитрона с возможностью плавной регулировки напряжения стабилизации / К. А. Климкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2017. – № 3. – С. 95-99.
14. Robert N. Buono. High-Current, Low-Voltage Shunt Regulator // Electronic Design, February 7, 2000, p. 132-134. URL: <https://www.electronicdesign.com/technologies/analog/article/21756712/highcurrent-lowvoltage-shunt-regulator>.



Лепехина С. Ю., Сухоруков С. И., Давыдов Ю. А.  
S. Yu. Lepikhina, S. I. Sukhorukov, Yu. A. Davyдов

## КОМПЛЕКС АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ТРЁХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

### ALGORITHM SET FOR THE OPERATION OF THE CONTROL SYSTEM OF A ROBOTIC THREE-DIMENSIONAL PRINTING COMPLEX

Лепехина Светлана Юрьевна – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: el.chep@bk.ru.  
Svetlana Yu. Lepikhina – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komso-molsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: el.chep@bk.ru.

Сухоруков Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sukhorukov@knastu.ru.

Sergei I. Sukhorukov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: sukhorukov@knastu.ru.

Давыдов Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспорт железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); Россия, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47; тел. 8(4212)407-076. E-mail: Lab@festu.khv.ru.

Yuri A. Davyдов – Dr. Sc., Professor, Railway Transport Department, Far Eastern State University of Railway Transport (Russia, Khabarovsk); house 47, Seryshev Street, Khabarovsk, 680021, Russia. E-mail: Lab@festu.khv.ru.

**Аннотация.** В данной статье разработан комплекс алгоритмов работы системы управления, применяемой в рамках разрабатываемого роботизированного комплекса трёхмерной печати. Проанализированы варианты возможных структур роботизированного комплекса. Выбрана структура для дальнейшей реализации. Проанализировано функциональное назначение и возможности входящих в комплекс управляющих устройств. Разработана структура алгоритмов управления роботизированного комплекса. Разработаны блок-схемы алгоритмов, реализуемых на отдельных устройствах, входящих в состав роботизированного комплекса.

**Summary.** In this article, a set of algorithms for the operation of the control system used within the framework of the developed robotic complex of three-dimensional printing is developed. Variants of possible structures of the robotic complex are analyzed. A structure has been selected for further implementation. The functional purpose and capabilities of the control devices included in the complex are analyzed. The structure of the control algorithms of the robotic complex has been developed. Block diagrams of algorithms have been developed, implemented on separate devices that are part of the robotic complex.

**Ключевые слова:** роботизированный комплекс, система управления, алгоритм управления, трёхмерная печать.

**Key words:** robotic complex, control system, control algorithm, 3D printing.

*Исследование выполнено в рамках научного проекта, финансируемого за счёт средств КнАГУ № ВН009/2021.*

УДК 681.5

**Введение.** На сегодняшний день в промышленности активно внедряются аддитивные технологии. Это связано с тем, что аддитивные технологии позволяют осуществлять быстрое прототипирование новой продукции, а также изготавливать изделия сложной пространственной конфигурации из различных материалов (преимущественно из различных пластиков и полимеров) [1; 2].

Основными преимуществами трёхмерной печати являются значительная экономия сырья, связанная с использованием только необходимого количества материала, возможность изготовления сложных конструкций, высокая скорость наладки и запуска процесса производства новой продукции и мобильность производства, осуществляемая за счёт возможности в кратчайшие сроки запускать производство новой продукции [3]. Однако, несмотря на все преимущества, присутствует ряд проблем, препятствующих широкому промышленному применению таких технологий. Одной из проблем, мешающих внедрению аддитивных технологий в промышленность, являются малые габариты зоны печати существующих 3D-принтеров [4]. Аддитивные технологии выгодны для мелкосерийного и гибкого производства, однако потребности промышленности в размерах печатаемых изделий зачастую превышают возможности готовых систем трёхмерной печати. Кроме того, применение классической трёхкоординатной механики для перемещения печатающей головы составляет дополнительные сложности при печати [5; 6].

Одним из вариантов решения вышеперечисленных проблем является смена типа механики на более сложные системы, такие как, например, промышленные роботы-манипуляторы. При разработке и внедрении таких систем, в отличие от классических 3D-принтеров, возникает ряд проблем, связанных с обеспечением совместного функционирования разнородного оборудования в составе технологического комплекса. Это обусловлено применением робота-манипулятора в качестве некоторой завершённой самостоятельной единицы с собственной системой управления, которую необходимо интегрировать в общую систему управления комплексом. Кроме того, необходимость обеспечения корректной работы системы с большой рабочей зоной печати приводит к построению отдельных локальных подсистем для управления элементами робототехнического комплекса [7; 8; 9].

В рамках данной статьи разработаны алгоритмы работы системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати пластиковых изделий, учитывающие состав и особенности функционирования элементов системы и реализуемые в рамках отдельных локальных подсистем управления входящего в комплекс оборудования.

**Варианты структур роботизированных комплексов трёхмерной печати.** В ходе ранее проведённых исследований [10; 11] были проанализированы основные технологические требования к процессу печати пластиками и предложены варианты возможных структур роботизированных комплексов трёхмерной печати, отличающиеся различной иерархией оборудования в составе комплекса.

В первом варианте структуры главным устройством является контроллер робота, на который загружается управляющая программа в виде единого файла. Контроллер робота распознаёт команды и заданные параметры печати и передаёт их через интерфейс передачи данных на подчинённые контроллеры локальных подсистем управления элементами комплекса. Далее системы управления, получив команды и параметры, отрабатывают заложенные в них рабочие программы: система нагрева и охлаждения поддерживает температуру на сегментах термостола и экструдера с использованием сигналов от встроенных в них датчиков; система подачи пластика управляет механизмом подачи пластика (обеспечивает необходимую скорость и величину подачи пластика).

В соответствии с описанной структурой был реализован экспериментальный образец роботизированного комплекса и осуществлена серия экспериментальных запусков системы.

Во время пробных запусков этого комплекса были выявлены проблемы, связанные с недостаточным быстродействием системы управления и значительными временными задержками при передаче команд между различными элементами системы, что негативно повлияло на качество напечатанной детали.

Второй вариант структуры (см. рис. 1) предполагает подчинённую роль контроллера робота в системе управления – общее управление роботизированным комплексом при этом осуществляется некоторый центральный компьютер, или ПЛК.

При такой структуре контроллер робота только получает команды от центрального ПЛК и выполняет необходимые перемещения. Центральный ПЛК при этом осуществляет построчное

чтение файла программы, анализ текущей команды, формирование и передачу управляющих команд для локальных подсистем, осуществляющих управление отдельными элементами системы.

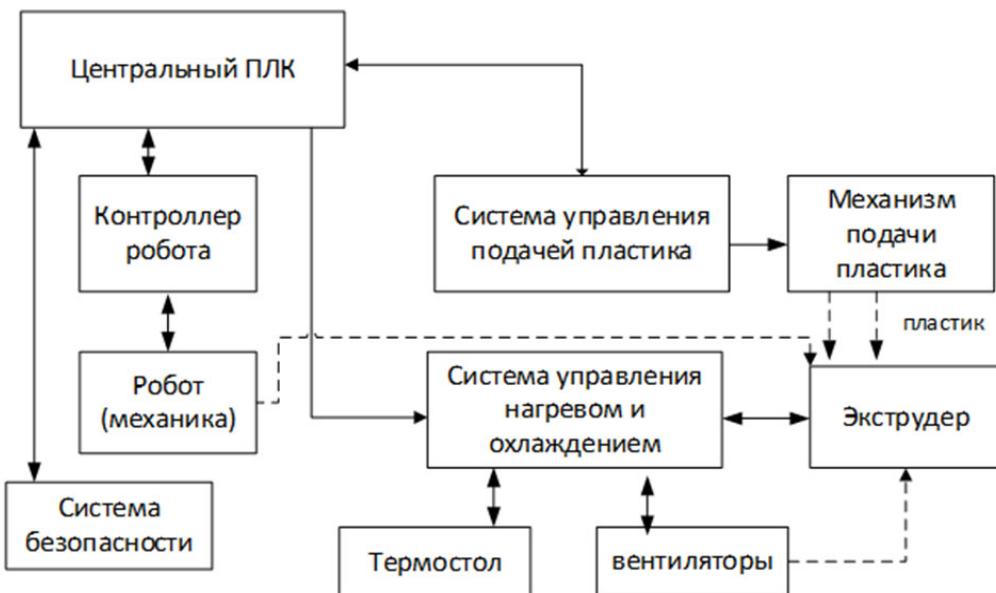


Рис. 1. Функциональная схема автоматизированного комплекса с ведомым контроллером робота

Такой подход позволяет повысить общее быстродействие всей системы за счёт обработки файла с программой на отдельном процессоре, а также за счёт возможности применения более быстродействующих интерфейсов для передачи команд между контроллерами и подсистемами. Кроме того, за счёт применения отдельного ПЛК должно в значительной степени упроститься решение вопросов синхронизации отдельных подсистем комплекса между собой.

В рамках данной статьи будет описан комплекс алгоритмов работы системы управления именно для второго варианта структуры комплекса.

**Анализ структуры комплекса алгоритмов.** В рамках вышеописанной структуры роботизированного комплекса необходима реализация целого ряда взаимосвязанных алгоритмов, используемых на различном оборудовании. Проанализируем отдельные устройства, на которых реализуются алгоритмы, и возможности по их построению.

Структура управляющих устройств приведена на рис. 2.

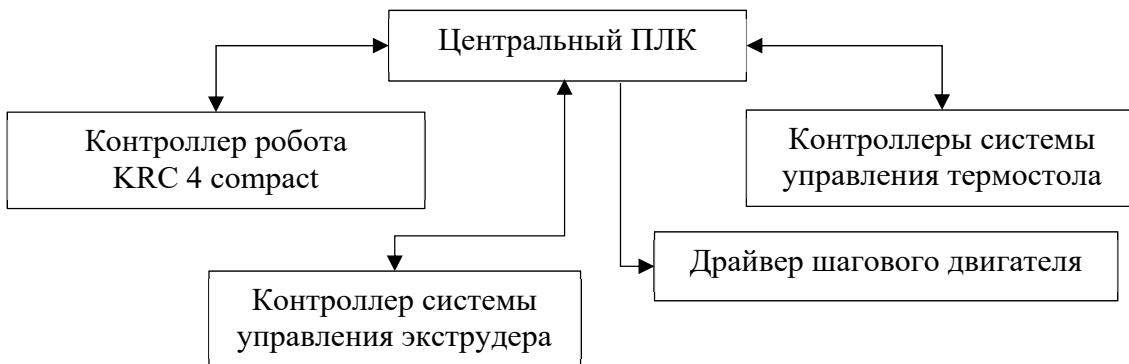


Рис. 2. Схема взаимодействия управляющих устройств системы

Для обработки команд перемещения используется контроллер робота KRC 4 compact, обмен данными с которым осуществляется с помощью программного пакета mxAutomation. Данный

программный пакет способен работать с промышленными ПЛК, такими как Siemens, а также микрокомпьютерами на базе операционной системы Windows. В связи с тем, что библиотека, необходимая для обеспечения обмена информацией между внешним ПЛК и контроллером робота, функционирует только под Windows и не может быть напрямую использована в системах типа Linux, выбор пал на микрокомпьютер, поддерживающий ОС Windows IoT, а именно Raspberry Pi 4. Именно на данном микрокомпьютере будет реализован основной алгоритм управления комплексом.

Кроме промышленного робота, в системе предусмотрены многосегментный нагревательный стол [10], подсистема контроля нагрева экструдера, а также механизм подачи пластика. Термостол и экструдер управляются отдельными микроконтроллерами, для которых необходима разработка алгоритмов. Механизм подачи пластика приводится в действие шаговым двигателем, управляемым через специализированный драйвер. При этом драйвер функционирует по заранее заложенным алгоритмам, реализованным производителем, поэтому разработка алгоритмов работы драйвера не требуется. Разработаем алгоритмы для вышеописанных устройств.

**Алгоритм работы управляющей программы роботизированного комплекса.** Для осуществления печати некоторого изделия необходимо на микрокомпьютере осуществлять построчное чтение и интерпретацию команд из управляющего кода с последующим их исполнением или отправкой на соответствующие исполнительные устройства. На сегодняшний день стандартом формирования управляющего кода для реализации задач печати является G-код, получаемый через специальную программу – слайсер [12; 13].

Для построчного чтения файла с G-кодом необходимы определение типа команды и последующий вызов необходимого метода. В рамках данной работы рассматриваются команды установки температуры экструдера, установки температуры нагревательного стола, задания параметров работы элементов системы.

К основным командам G-кода относятся:

1. M109 Snnn – установить температуру экструдера и ждать.
2. M190 – установить температуру стола и ждать.
3. G28 – перемещение в начало («домой»).
4. G0 (G1) Xnnn Ynnn Znnn Ennn Fnnn – перемещение.

В подпрограмме команды M109 происходит объявление переменной заданной температуры, после чего по протоколу I2C на модуль управления нагревом экструдера передаётся сигнал о начале нагрева и значение переменной заданной температуры. Далее ожидается ответный сигнал о завершении нагрева.

В подпрограмме команды M190 происходит объявление переменной заданной температуры, после чего по протоколу I2C на модули управления нагревом стола передаётся сигнал о начале нагрева и значение переменной заданной температуры. Далее ожидается ответный сигнал о завершении нагрева.

Команда G28 означает перемещение робота в позицию Home, т. е. на позицию: A1 = 0, A2 = -90, A3 = 90, A4 = 0, A5 = 0, A6 = 0. Для реализации данной команды применима функция библиотеки команд \_mxAKrcReadactualaxisposition. Она вычисляет текущее положение оси робота.

Для перемещения в пространстве (G0) необходимы координаты X, Y, Z.

По декартовой системе координат положение X = 0 Y = 0 Z = 0 находится в углу нагревательного стола.

В соответствии с данными командами и их принципом действия был разработан алгоритм программы, исполняющейся на центральном микрокомпьютере и осуществляющей чтение и интерпретацию G-кода. Блок-схема алгоритма программы чтения G-кода изображена на рис. 3.

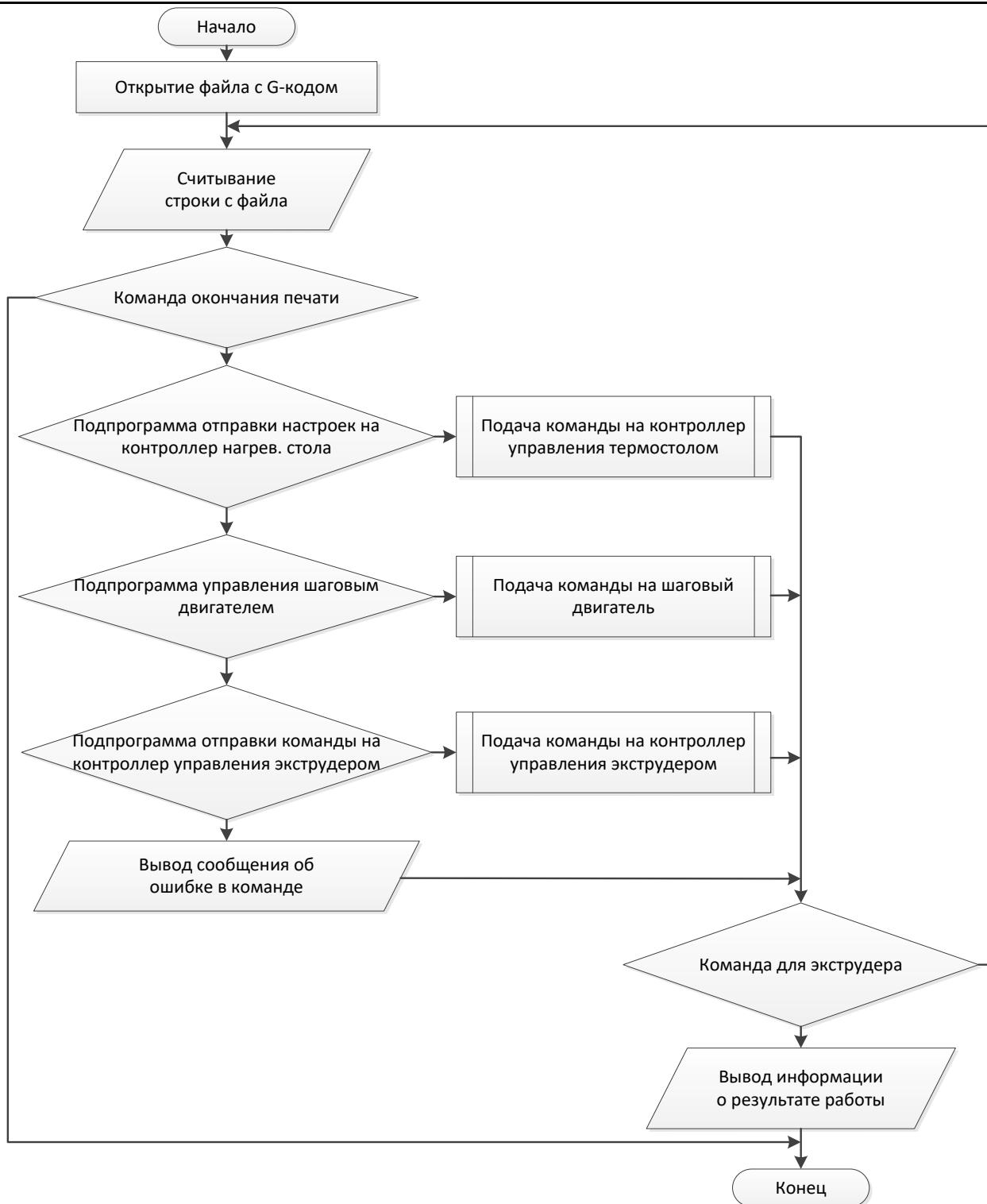


Рис. 3. Блок-схема алгоритма программы чтения G-кода

Кроме команд перемещения и контроля температуры, необходимо осуществлять выдачу пластика, для данной цели решено использовать шаговый двигатель. Блок-схема работы шагового двигателя представлена на рис. 4.

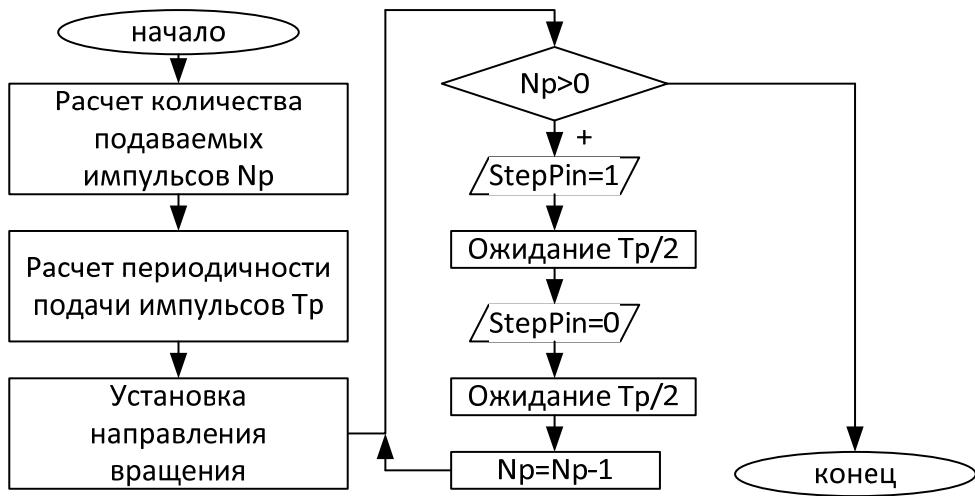


Рис. 4. Блок-схема управления шаговым двигателем

**Алгоритм работы управляющей программы нагревательного стола.** Управление нагревательным столом осуществляется путём передачи данных по протоколу I2C. Команды последовательно передаются по шине от первой до крайней секции, обратно сигналы передаются также последовательно.

В начале программы каждый микроконтроллер (Atmega 328-PU) получает своё значение  $T_3$  (заданная температура нагрева стола) от микрокомпьютера Raspberry через контакты шины ввода-вывода, далее подаёт сигнал логической единицы на транзистор, коммутирующий нагревательный элемент к силовому питанию 12 В для начала нагрева.

Микроконтроллер считывает сигнал с датчика температуры каждые 0.1 с. Далее идёт сравнение температуры  $T_d$ , полученной от датчика, и температуры  $T_3$ , заданной в текущей программе.

Если  $T_d < T_3$ , то выводится значение 0 и нагрев продолжается. Если  $T_d \geq T_3$ , то выводится значение 1 и напряжение перестаёт поступать на mosfet, он закрывается и нагрев прекращается.

При достижении необходимой температуры микроконтроллер считывает сигнал (0 или 1 с предыдущего сегмента) и сравнивает через логическое И со своим значением. Процесс нагрева продолжится до тех пор, пока все модули не дадут единицу на выходе, после чего сигнал о достижении необходимого диапазона температур будет отправлен на внешний контроллер.

В случае если в качестве задания на нагрев была получена нулевая величина, микроконтроллер не осуществляет включение нагрева, вместо этого генерируется сообщение на МК «Нагрев отсутствует» и загорается светодиод. Алгоритм работы программы описан в блок-схеме (см. рис. 5).

**Алгоритм работы управляющей программы экструдера.** Управление экструдером осуществляется аналогично управлению нагревательным столом. Различие заключается в том, что появляется необходимость управлять вентиляторами, охлаждающими радиатор с термобарьером и изготавливаемую деталь.

Для управления вентиляторами применяются mosfet-транзисторы, открывающиеся при заданных условиях. Работа вентилятора охлаждения радиатора зависит от значения датчика нагрева на экструдере, в то время как скорость вращения вентилятора обдува детали управляется посредством ШИМ.

В начале программы микроконтроллер получает своё значение заданной температуры от управляющего компьютера через протокол передачи данных I2C, после чего проводится сравнение температуры, полученной от датчика, и температуры, заданной в текущей программе.

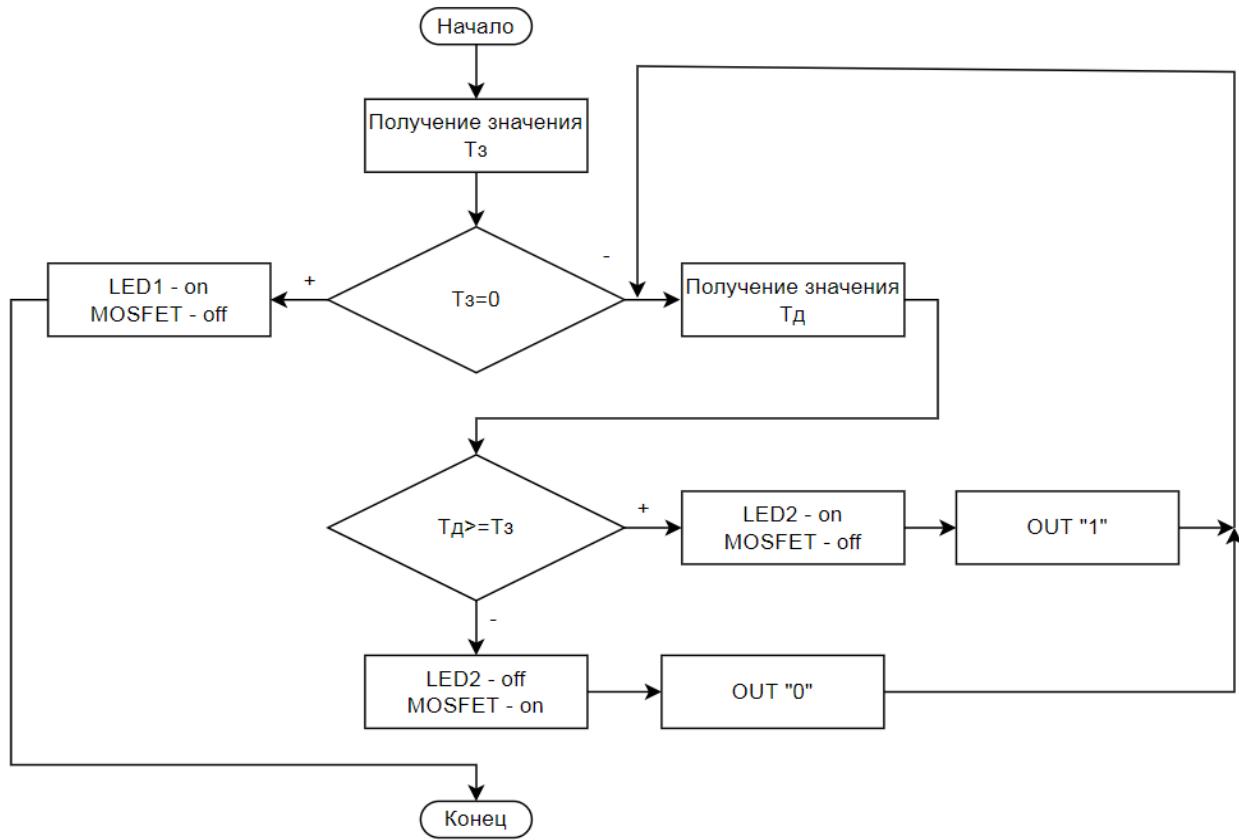


Рис. 5. Алгоритм работы программы нагревательного стола

Практическое применение разработанных алгоритмов системы управления в дальнейшем предполагается в рамках НИОКР по проектированию и отладке роботизированных комплексов трёхмерной печати, а также возможно применение при построении систем крупногабаритной печати на основе классической механики.

В рамках данной научной работы разработан комплекс алгоритмов работы системы управления, применяемой в рамках разрабатываемого роботизированного комплекса трёхмерной печати. Проанализированы варианты возможных структур роботизированного комплекса. Выбрана структура для дальнейшей реализации в рамках научного проекта. Проанализированы функциональное назначение и возможности входящих в комплекс управляющих устройств. Разработана структура алгоритмов управления роботизированного комплекса. Разработаны блок-схемы алгоритмов, реализуемых на отдельных устройствах, входящих в состав роботизированного комплекса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петрова, А. М. Автоматическое управление: учеб. пособие / А. М. Петрова. – Москва: Форум, 2010. – 240 с.
2. Белов, М. П. Технические средства автоматизации и управления / М. П. Белов. – Санкт-Петербург: СЗТУ, 2006. – 184 с.
3. Пронин, А. И. Теория автоматического управления: учеб. пособие / А. И. Пронин, Е. Б. Щелкунов. – 2-е изд., доп. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. – 108 с.
4. Лысыч, М. Н. Области применения технологий 3D-печати / М. Н. Лысыч, М. Л. Шабанов, В. В. Романов // Современные научно-технические технологии. – 2014. – № 12 (Ч. 2). – С. 165-169.
5. Лысыч, М. Н. Обзор современных технологий 3D-печати / М. Н. Лысыч, М. Л. Шабанов, А. А. Качурин // Современные научно-технические технологии. – 2015. – № 6. – С. 26-30.
6. Шкуро, А. Е. Технологии и материалы 3D-печати: учеб. пособие / А. Е. Шкуро, П. С. Кривоногов. – Екатеринбург: ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2017. – 101 с.

**Лепехина С. Ю., Сухоруков С. И., Давыдов Ю. А.**

**КОМПЛЕКС АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ТРЁХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ**

7. Козырев, Ю. Г. Промышленные роботы / Ю. Г. Козырев. – Москва: Машиностроение, 1988. – 392 с.
8. Юрьевич, Е. И. Управление роботами и робототехническими системами / Е. И. Юрьевич. – Санкт-Петербург: Мир, 2000. – 348 с.
9. Безопасность промышленных роботов: документация: разработчик KUKA Roboter GmbH. – Augsburg, 2016. – 39 с.
10. Лепехина, С. Ю. Разработка системы управления унифицированного модуля нагревательного стола для роботизированного комплекса трёхмерной печати / С. Ю. Лепехина, Г. А. Громыко, С. И. Сухоруков // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11-15 апреля 2022 года. В 4 ч. Ч. 1 / Редколлегия: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 35-37.
11. Овсянников, А. Р. Анализ возможностей применения миникомпьютеров для построения систем управления роботизированными комплексами / А. Р. Овсянников, С. Ю. Лепехина, С. И. Сухоруков // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы V Международной научно-практической конференции // Редколлегия: С. И. Сухоруков (отв. ред.), А. С. Гудим, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 63-67.
12. KUKA System Technology: документация / KUKA Roboter GmbH. – Augsburg, 2016. – 107 с.
13. KR C4 compact: инструкция по эксплуатации / KUKA Roboter GmbH. – Augsburg, 2016. – 141 с.



Лисовец А. Е., Григорьев Я. Ю.  
A. E. Lisovets, Ya. Yu. Grigoriev

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

## OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES BASED ON THE IMPLEMENTATION OF SIMULATION MODELS

Лисовец Александр Евгеньевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Alexander E. Lisovets – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Григорьев Ян Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по учебной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Yan Yu. Grigoriev – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Vice Rector for Academic Affairs, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В современном производстве, реализуемом с применением высокотехнологичного оборудования, большую актуальность приобретают задачи мониторинга процессов и повышения их эффективности. Решение таких задач обеспечивается более эффективным использованием ресурсов и своевременной корректировкой параметров технологических процессов. Выявление элементов технологической цепочки, требующих оптимизации, может быть обеспечено созданием имитационной модели, воспроизводящей поведение реального процесса. В работе приводится построение имитационной модели производственного участка, на основе которой формируются правила, обеспечивающие повышение эффективности производства.

**Summary.** In modern production, implemented with the use of high-tech equipment, the tasks of monitoring processes and improving their efficiency are becoming more relevant. The solution of such tasks is provided by more efficient use of resources and timely adjustment of the parameters of technological processes. Identification of the elements of the technological chain that require optimization can be ensured by creating a simulation model that reproduces the behavior of a real process. The paper presents the construction of a simulation model of a production site, on the basis of which rules are formed to ensure an increase in production efficiency.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, оптимизация, эффективность, производство.

**Key words:** simulation modeling, optimization, efficiency, production.

УДК 303.094.7

Имитационное моделирование подразумевает замену реального объекта моделью, описывающей с достаточной точностью реальную систему с протекающими в ней процессами, с целью получения информации об этой системе (см. рис. 1). Целями работы являются исследование возможности оптимизации производственных процессов на основе разработки имитационных моделей и оценка качества полученных результатов.

В качестве объекта исследования рассматривается производство Амурского гидрометаллургического комплекса компании ОАО «Полиметалл». На предприятии производятся первичная обработка, фильтрация и последующая переплавка драгоценных металлов, таких как серебро, золото. Несколько комплексов представляют собой систему определения и поэтапной переработки сырья – конвейерное производство [3] (см. рис. 2).

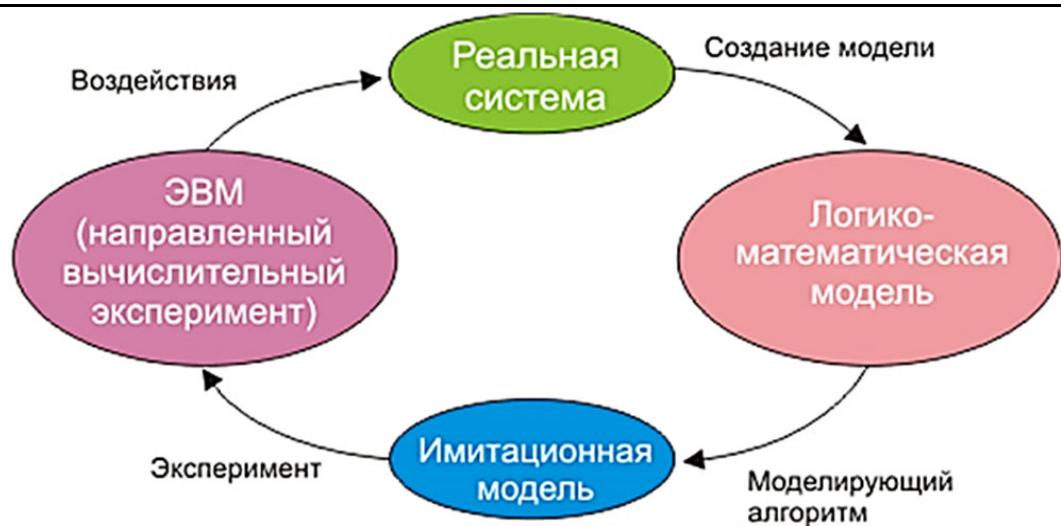


Рис. 1. Схема применения принципа имитационного моделирования

В работе строится модель гидрометаллургического процесса, при котором происходит извлечение металлов из руд, концентратов и отходов различных производств водными растворами химических реагентов с последующим выделением металлов из растворов. На основе данных о реальном производстве создаётся упрощённая блок-схема взаимодействия элементов производства (см. рис. 3). Учитываются физические особенности технологических этапов производства.



Рис. 2. Амурская ГМК в реальной системе



Рис. 3. Схема Амурской ГМК

На примере определённого этапа создаётся логическая модель, полностью соответствующая структуре этапа подготовки концентрата (см. рис. 4).

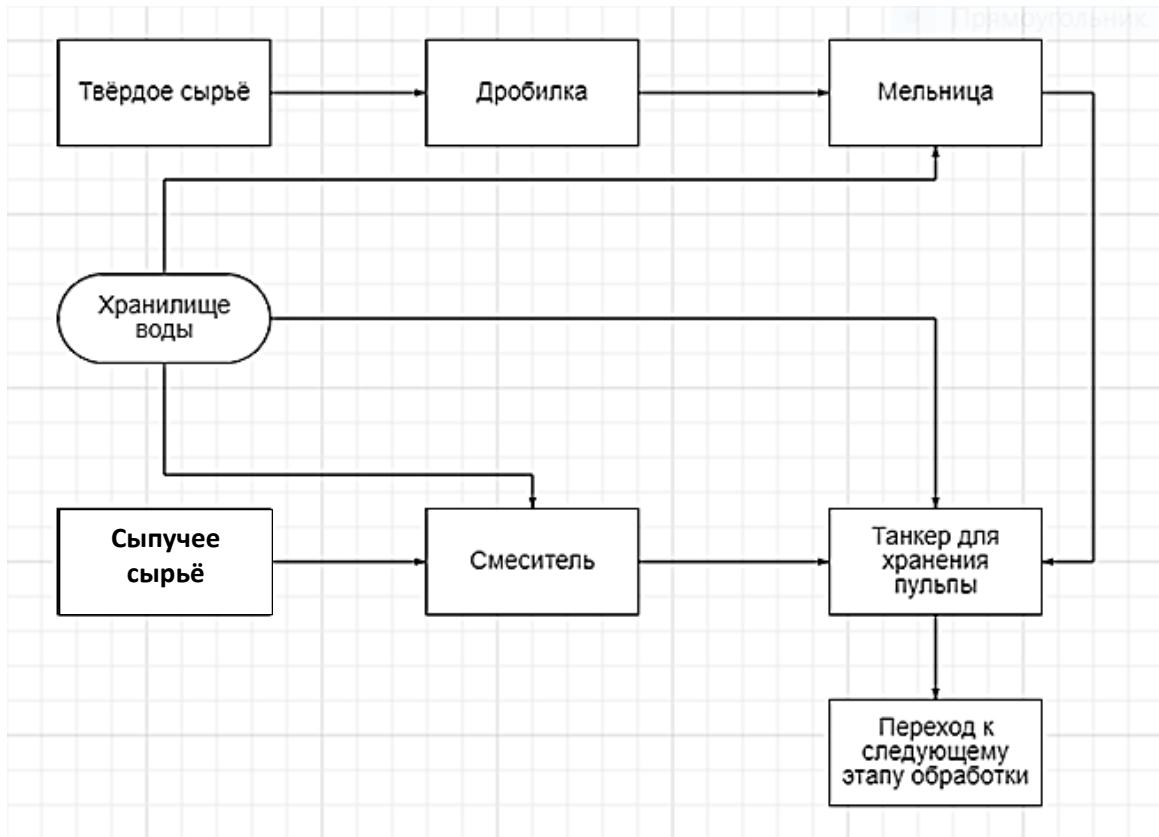


Рис. 4. Схема этапа подготовки концентрата

Имитационная модель позволяет сформировать набор статистических данных на основе моделируемой серии экспериментов и обеспечить реализацию оптимизационных схем. Моделирование осуществляется в среде «AnyLogic Personal Learning Edition» версии 8.6.0, включающей инструментарий для воспроизведения производственных и экономических процессов. Логическая схема рассматриваемого предприятия разрабатывается с применением принципов логического программирования и блок-схем. На основе разработанной логической схемы создаётся имитационная модель с использованием модульного конструктора (см. рис. 5).

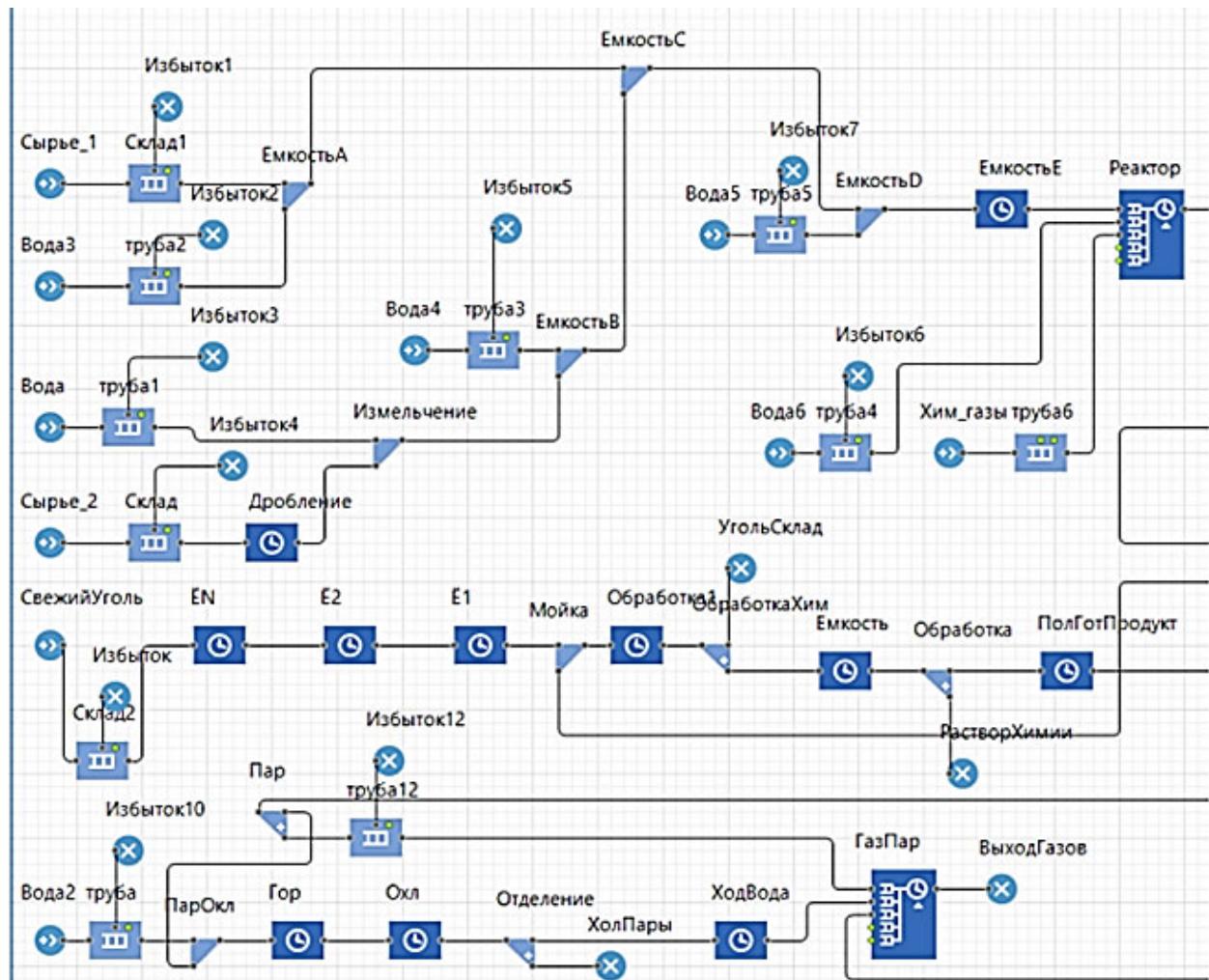


Рис. 5. Логическая интерпретация модели

При разработке используется трёхмерная графическая интерпретация модели, обеспечивающая лучшее представление для операторов модели (см. рис. 6). Оптимизационный процесс обеспечивается непосредственно с применением графического интерфейса, что позволяет обеспечить большую скорость интерпретации изменений модели. Данный подход позволяет исключить необходимость проведения реальных экспериментов на производстве, а при наличии достаточно больших данных, задающих характеристики производственных процессов, находить узкие места, опираясь на технологические параметры [4].

Для разработки модели используются как стандартные объекты разметки пространства, так и новые элементы, такие как дробящий механизм и мельница или центрифуга. Технология сегментированного конвейера упрощается для лучшей производительности и повышения быстродействия модели.

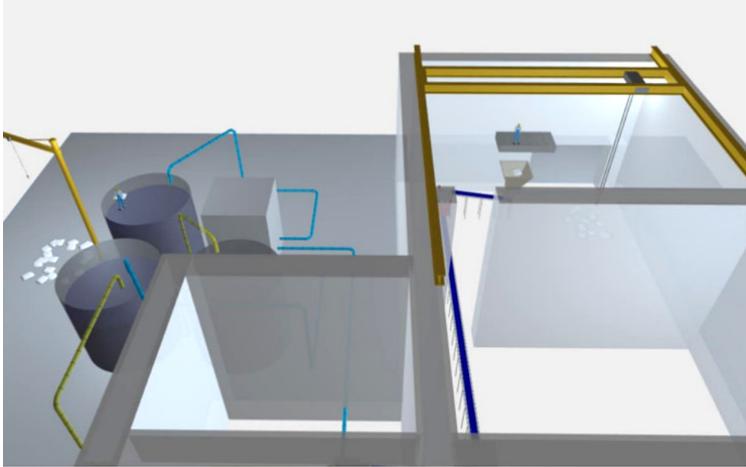


Рис. 6. Трёхмерная анимация модели

На основе разработанной имитационной модели, демонстрирующей работу производства в отрасли металлопереработки, обеспечивается выявление слабых мест в производственном цикле. Реализуется план поэтапной оптимизации технологического процесса [5].

Для выявления закономерностей в работе используется регрессионная модель:

$$y = f(x, b) + \xi, E(\xi),$$

где  $b$  – параметры модели;  $\xi$  – случайная ошибка модели.

Регрессионная функция имеет вид

$$f(x, b) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k,$$

где  $b_j$  – параметры регрессии;  $x_j$  – регрессоры;  $k$  – количество факторов модели.

Многократно произведённый эксперимент определяет набор данных, используемых при построении регрессионной модели [6] (см. рис. 7).

Полученные функциональные связи позволяют прогнозировать развитие исследуемых процессов. Выявляются линейные связи для твёрдого и сыпучего сырья:

- для твёрдого вещества

$$y = 0,7489 \cdot x + 0,0737;$$

- для сыпучего вещества

$$y = 0,2779 \cdot x + 2,8921.$$

Полученные зависимости показывают на простой в связи с нехваткой сыпучего вещества (см. рис. 8).

Количество сыпучего сырья, обрабатываемого в рамках производства модели технологического процесса, на порядок меньше обрабатываемого твёрдого материала. Рассчитываются коэффициенты, определяющие повышение притока сыпучего сырья. Так как скорость его обработки заметно ниже, чем у твёрдого сырья, предполагается увеличение поступаемого сырья для зоны смешения сыпучего материала с водой. Увеличение диапазона времени принятия твёрдого вещества позволяет синхронизировать потоки без потери изначального плана производства. Определяется коэффициент увеличения притока сыпучего сырья, обеспечивающий синхронизацию технологических процессов, в размере 2,79 (см. рис. 9).

Кол-во твёрдого сырья	Время	Кол-во сыпучего сырья	Время
0	3		3
3,4	7	5,1	7
11,1	10	7,1	10
11,7	13	7,4	13
13,4	17	6,9	17
15	20	8,2	20
17,4	23	10	23
18	27	13,1	27
22,6	30	10,5	30
0,5	3	4	3
3,2	7	3,4	7
10,9	10	6,8	10
11	13	7,3	13
14	17	7,2	17
16	20	9,3	20
16,9	23	11,3	23
19,1	27	10,6	27
24	30	12,8	30
1	3	5,2	3
4,1	7	4,8	7
10,6	10	4,6	10
13,2	13	8	13
13,1	17	8,3	17
14,3	20	8,7	20
17,9	23	9,3	23
19,3	27	10,2	27
20,5	30	11,9	30

Рис. 7. Статистика проведения экспериментов

## Динамика обработки сырья

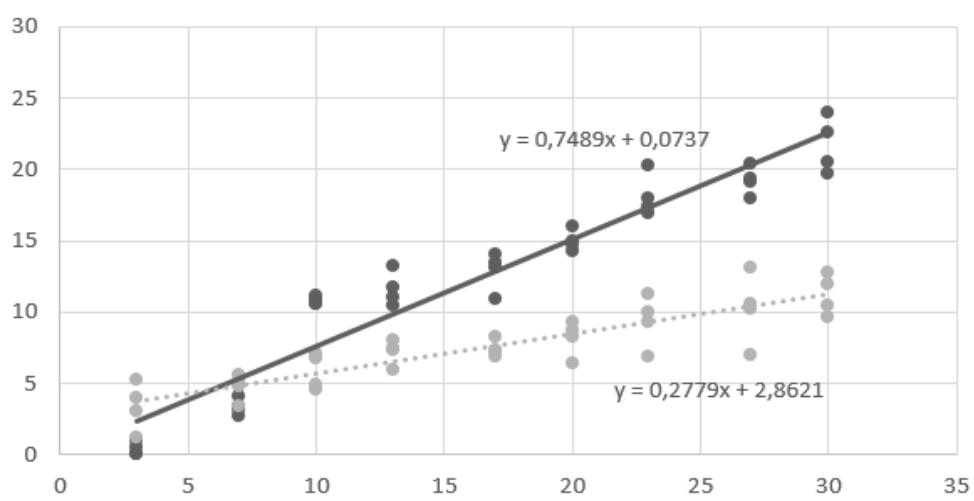


Рис. 8. График линейной регрессии



Рис. 9. Диаграмма используемого материала

Составление зависимости предполагает сбор статистических данных и объединение их в датасет, построение регрессионной модели (см. рис. 10). В результате определяется отношение твёрдого к сыпучему материалу, которое составляет 3 к 4. Время на подготовку для обработки сырья принимает постоянную величину. Возникновение случайных заторов на протяжении нескольких экспериментов является погрешностью построения технологического процесса производства, влекущей за собой неизбежные потери, причиной которых является человеческий фактор.

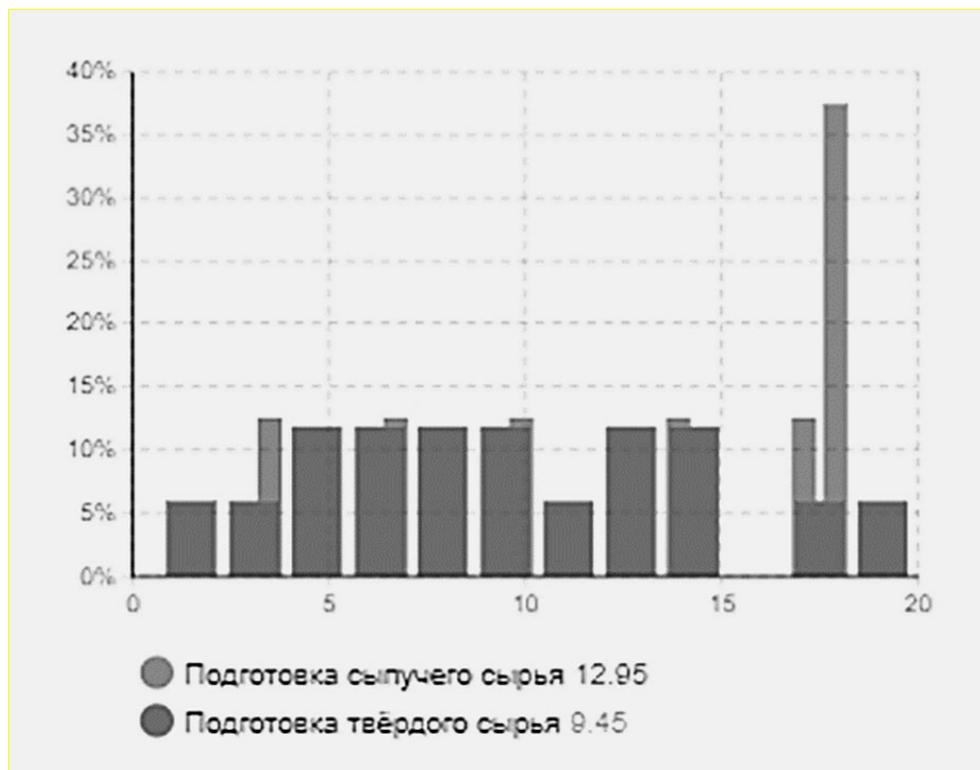


Рис. 10. Гистограмма материала после применения коэффициента линейной регрессии

В качестве альтернативной зависимости для последующей оптимизации рассматриваются другие, нелинейные зависимости, например квадратичная регрессия:

$$y = a * x^2 + b * x + c + e.$$

Для рассматриваемого набора данных функция имеет вид

$$y = 0,017 * x^2 + 1,006 * x + 0,295.$$

Оценка корреляционных показателей указывает на надёжность уравнения и качество получаемых на его основе данных. Достоверность полученных значений наблюдается на уровне 94. Однако сравнение полученных результатов с помощью линейной зависимости, а также различными нелинейными функциями указывает на эффективность применения именно линейной регрессии для оценки исследуемого процесса. Графики регрессионных моделей приведены на рис. 11.

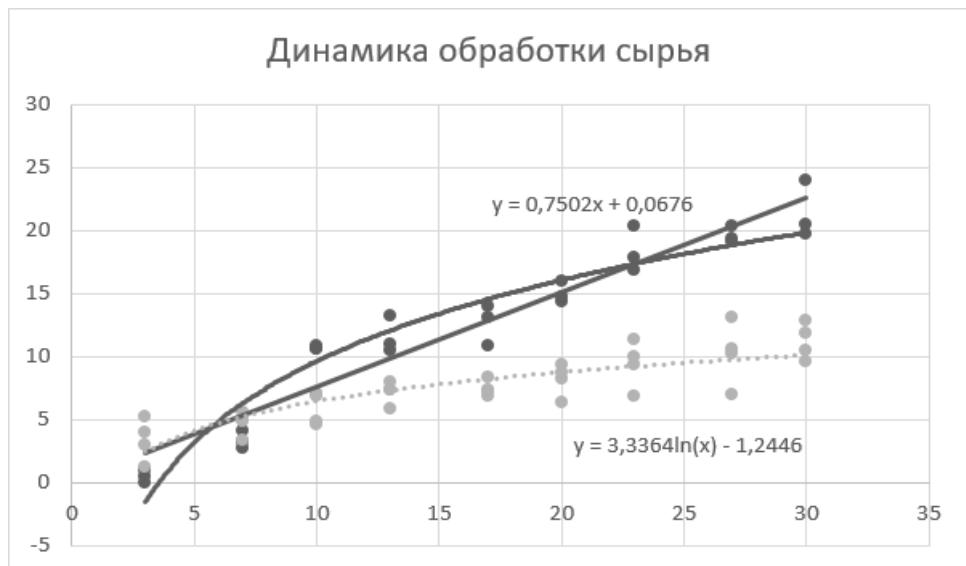


Рис. 11. График парной квадратичной нелинейной регрессии

Определяется относительная ошибка, варьирующаяся в диапазоне 11,25 %. Отклонение является относительно большим, но допустимым для производств, связанным с цветной металлургией. Оптимизация производственной схемы на основе данных моделирования обеспечивает прирост обрабатываемого материала на 11-13 %. Данный подход может применяться на реальном производстве. Дальнейшие исследования в этой области могут рассматривать возможность использования других способов статистического моделирования и интеграцию их в системы имитационного моделирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Организация производства и управление предприятием / О. Г. Туровец, В. Б. Родионов, М. И. Бухалков [и др.]. – М.: ИД «ИНФРА-М», 2007. – 544 с.
2. Павловский, Ю. Н. Имитационное моделирование: учеб. пособие / Ю. Н. Павловский, Н. В. Белотелов, Ю. И. Бродский. – М.: Академия, 2008. – 236 с.
3. Амурский ГМК // Полиметалл, 2023. – URL: <https://www.polymetalinternational.com/ru/assets/where-we-operate/amursk-rox-hub/> (дата обращения: 20.06.2022). – Текст: электронный.
4. Черпаков, М. Формирование модели сопровождения несоответствий на промышленном предприятии / М. Черпаков, В. П. Котляров // Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности: материалы I Международной научно-практической конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 149-154.



5. Поллак, Г. А. Оптимизация процессов в слабоструктурированной системе методом имитационного моделирования / Г. А. Поллак, А. Г. Палей // Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Екатеринбург, 16-18 октября 2019 г. – Екатеринбург: Издательство Уральского государственного педагогического университета, 2019. – С. 486-491.
6. Гончаров, В. А. Методы оптимизации: учеб. пособие / В. А. Гончаров. – Москва: Юрайт, 2020. – 191 с.
7. Технологии имитационного моделирования в задачах оптимизации технологических процессов / А. Е. Лисовец, А. В. Кириллов, О. В. Попова, Я. Ю. Григорьев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 383-385.
8. Применение методов машинного обучения в задачах оценки технологических процессов / О. В. Попова, Я. Ю. Григорьев, Е. П. Жарикова, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 68-72.
9. Черезов, Н. С. Имитационное моделирование производственных процессов / Н. С. Черезов, А. В. Кириллов, Я. Ю. Григорьев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 411-413.

**Ворощенко В. Д., Егорова В. П., Горьковый М. А.**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА НА БАЗЕ АГЕНТНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

**Ворощенко В. Д., Егорова В. П., Горьковый М. А.**

**V. D. Voroschenko, V. P. Egorova, M. A. Gorkavii**

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА НА БАЗЕ АГЕНТНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

### **INTELLIGENT MODULE FOR OPTIMIZATION AND MANAGEMENT OF PRODUCTION PROCESS EFFICIENCY BASED ON AGENT SIMULATION MODEL**

**Ворощенко Василий Даниилович** – студент кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: v.voroshenko@yandex.ru.

**Vasiliy D. Voroschenko** – Student, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: v.voroshenko@yandex.ru.

**Егорова Валерия Павловна** – старший преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Valeria P. Egorova** – Senior Teacher, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Горьковый Михаил Александрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Mikhail A. Gorkavii** – PhD in Engineering, Head of Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Аннотация.** В работе представлен метод оптимизации роботизированного сварочного комплекса путём разработки интеллектуального модуля, пред назначенного для определения координат точки сварки с минимальными суммарными затратами энергопотребления и времени на выполнение технологического процесса, на базе имитационной модели. Продемонстрированы необходимость и специфика применения имитационной модели для визуализации производственного процесса и определения оптимальных параметров его работы. Применение разработанного метода позволит продемонстрировать существенное снижение времени выполнения операций по перемещениям, обеспечивающих сварку роботизированным комплексом.

**Summary.** The paper presents a method for optimizing a robotic welding complex by developing an intelligent module designed to track changes in energy consumption indicators and time spent on the execution of a technological process, based on a simulation model. The necessity and specifics of using neural network models to identify nonlinear dependences of resource consumption by a robot and their joint use to calculate the optimal parameters of the system are demonstrated. The application of the developed approach will make it possible to demonstrate a significant reduction in the time of performing operations on movements that ensure welding by a robotic complex.

**Ключевые слова:** интеллектуальный модуль, имитационная модель, система поддержки принятия решений, электроэнергия, роботизированный технологический процесс, эффективность, сварочный комплекс.

**Key words:** intelligent module, simulation model, decision support system, electric power, robotic process, efficiency, welding complex.

*Данное исследование выполнено в рамках НИОКР «Разработка методов повышения энергетической эффективности роботизированных технологических процессов», финансируемой за счёт средств ФГБОУ ВО «КнАГУ» № ВН002/2020. Исследование проводилось с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и передовые промышленные технологии».*



УДК 004.021

**Введение.** Роботизация производства является одним из современных и востребованных методов повышения эффективности промышленного предприятия [1; 5]. Но проектирование и наладка роботизированного производственного процесса осуществляются на основе эмпирических и не подтверждённых анализом данных конкретного рассматриваемого процесса.

Основной функцией промышленных роботов является перемещение эффектора из одной точки в другую по заданной заранее траектории. Любая траектория может быть охарактеризована расстоянием, которое объект проходит, двигаясь по ней. Отсюда вытекает главная задача при проектировании роботизированного процесса: необходимо найти траекторию с минимальными затратами на перемещения и при этом с минимальным суммарным энергопотреблением [9]. Для комплекса из нескольких роботов с разным функционалом это достаточно сложная задача, чтобы решить её эмпирически. Поэтому предлагается разработать имитационную модель комплекса, с её помощью определить все возможные параметры его работы и найти среди них оптимальные. Исходя из этого была сформулирована цель: разработать систему поддержки принятия решений (СППР) по управлению производственным процессом, которая состоит из интеллектуального модуля на базе агентной имитационной модели.

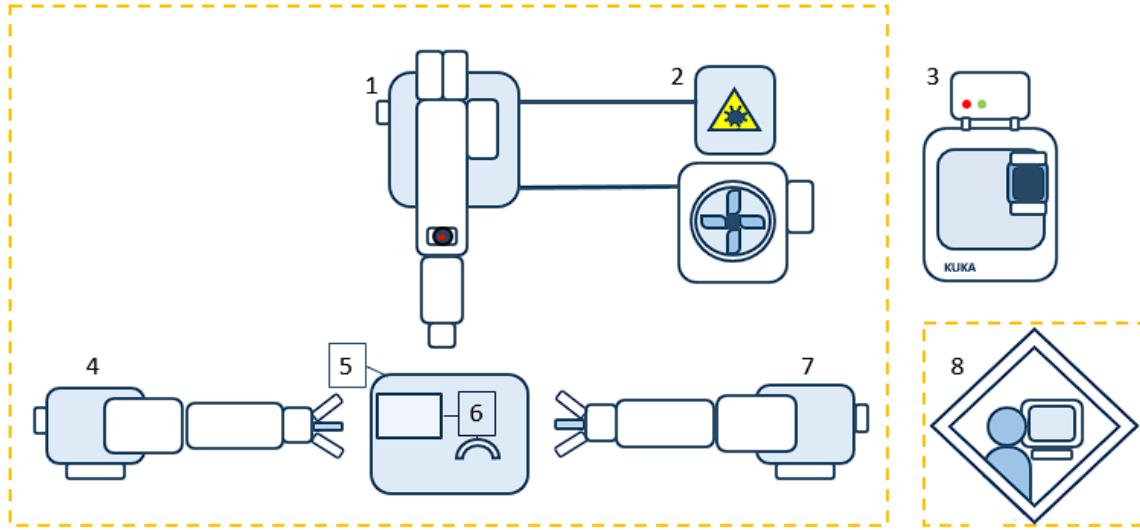
**Методология.** Задачи оптимизации роботизированных систем могут ставиться как локально, применительно к одному роботу, представляющему роботизированную ячейку, так и глобально, применительно ко всей ячейке в целом. Оптимизация подразумевает под собой минимизацию каких-либо параметров системы или их максимизацию, например, затраты ресурсов или точность [2]. Исходя из этого определяется, требуется ли подвергать изменениям технологию производства (техпроцесс сварки или лазерной резки). В представленной работе изменения в роботизированном процессе предусмотрены только для перемещений роботов, обеспечивающих выполнение сварки. Техпроцесс сварки изменениям не подвергается.

Имитационное моделирование предполагает исследование реальной системы с помощью проведения экспериментов над его точной цифровой моделью [4; 11; 12]. Полученные результаты анализируются и используются для формирования корректирующих воздействий на исследуемую систему. Также имитационная модель может выступать в роли «цифрового двойника» объекта управления и предоставлять возможность оперативного отслеживания изменения соответствующих показателей, отображение которых система не предусматривает, или управлять ею посредством управления моделью [1; 5; 10; 14]. Основной задачей модели является имитирование процессов роботизированного комплекса для получения данных об изменении потребления ресурсов роботизированного процесса в зависимости от изменения контрольных точек. В таком случае модель необходима для демонстрации работоспособности предлагаемого интеллектуального модуля, который на основании полученных данных определит контрольную точку с наименьшим потреблением ресурса. Имитация зависимости потребления роботом ресурсов от траектории будет реализована на базе нейросетевой модели. Этот инструмент позволяет идентифицировать зависимость энергопотребления и времени на выполнение траекторного перемещения от точек, между которыми строится траектория. Подобный подход уже был использован для идентификации динамики манипулятора [6; 7].

Проектирование логики интеллектуального модуля и моделируемых процессов описывается с помощью нотации Basic Flowchart. Блок-схема может представлять разноуровневые процессы, также алгоритмы могут выступать концептуальной моделью для разработки программного обеспечения.

**Результаты и обсуждения.** Роботизированный технологический комплекс (РТК) – гибкая производственная система, в которой промышленные роботы реализуют всю технологию производства, за исключением управления и контроля [13]. Состав объектов, участвующих в роботизированном сварочном процессе, показан на рис. 1.

Технологический процесс роботизированной сварки состоит из последовательности действий (см. рис. 2).



1 – робот-сварщик KUKA 5 Arc; 2 – лазер ЛС-2; 3 – контроллер роботов;  
4 – робот-позиционер KUKA KR 10; 5 – сварочный стол; 6 – заготовки;  
7 – робот-позиционер KUKA KR 60; 8 – инженер-технолог

Рис. 1. Схема расположения РТК

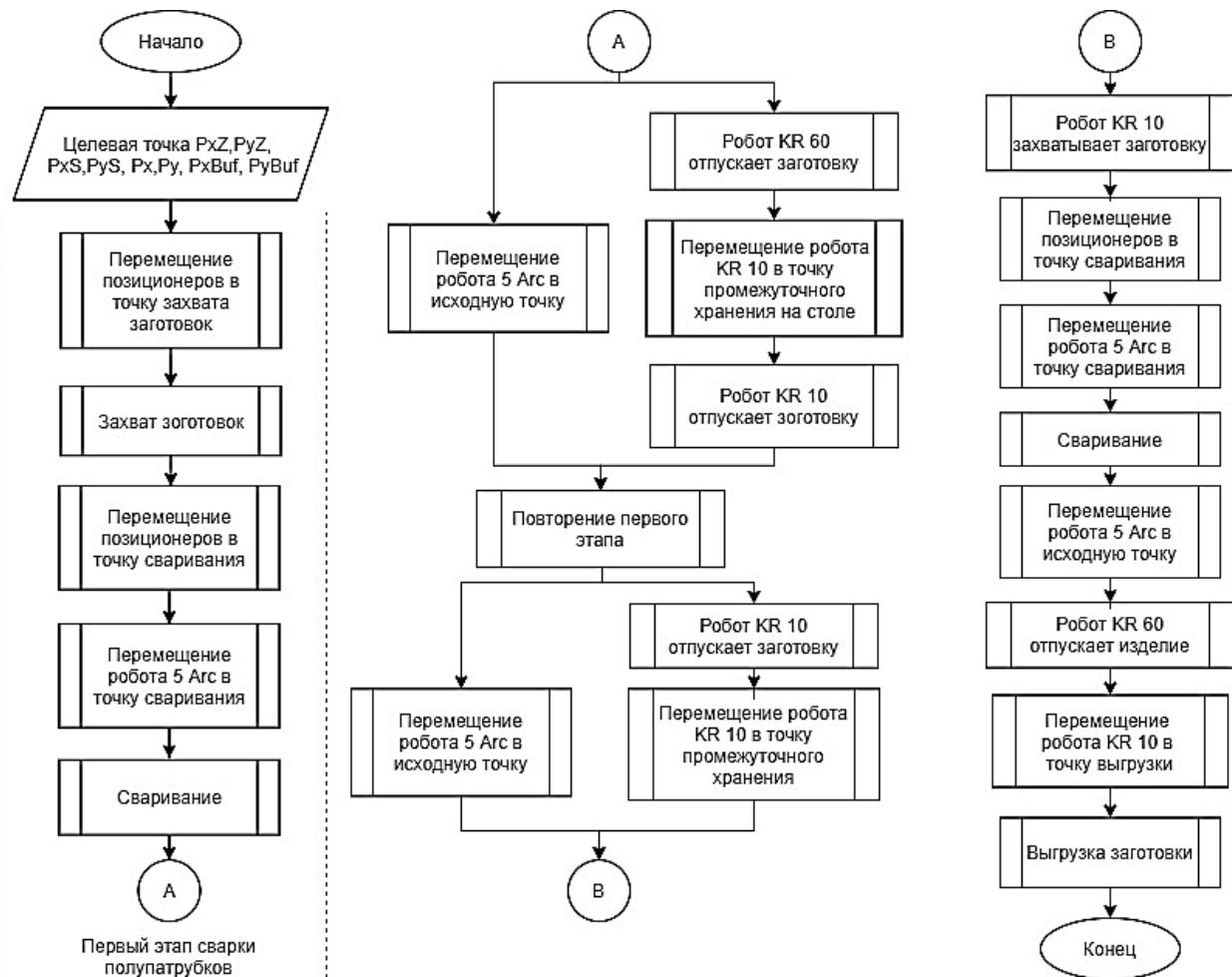


Рис. 2. Алгоритм работы РТК



Как уже было упомянуто, необходимые для формирования управляющих воздействий параметры – электроэнергия и время. В табл. 1 представлено описание этих данных.

Таблица 1  
Данные, отражающие состояние модели

Параметр	Составляющие
Электроэнергия	1. Электроэнергия, которую потребляет роботизированная ячейка на основе манипулятора KUKA KR10, KR60, 5 Arc. 2. Электроэнергия, которую потребляет лазерная установка в течение всего технологического цикла.
Время	1. Время на выполнение операции сварки. 2. Время на выполнение перемещений роботом KR 10. 3. Время на выполнение перемещений роботом KR 60. 4. Время на выполнение перемещений роботом 5 Arc.

Следует отметить, что каждому перемещению роботов соответствует отдельная форма траектории, для которой должно быть рассчитано время выполнения. Каждая составляющая времени состоит из суммы этих значений.

Управление этими параметрами можно осуществить опираясь на следующие свойства:

- величина двух параметров определяется расстоянием между контрольными точками в пространстве (точками захвата, выгрузки и точкой сварки);

- количество энергии, затрачиваемое роботом-сварщиком на выполнение сварки, зависит от расположения свариваемых объектов относительно робота, эта зависимость обусловлена спецификой устройства манипулятора [8].

В результате задача оптимизации роботизированным сварочным комплексом состоит в изменении координат контрольных точек таким образом, чтобы весь комплекс затрачивал минимальное количество либо энергии, либо времени [16; 17].

В рассматриваемой системе моделируемыми объектами (агентами) выступают: роботизированные ячейки, заготовки как объекты, с которыми взаимодействуют роботы, и система управления, выполняющая функции по запуску производственного процесса с заданными параметрами, координации роботов и мониторингу показателей.

Поскольку моделирование выполняется с целью визуализации и расчёта потребления ресурсов роботами в зависимости от положения координат точек, то и состояние модели должно быть отражено визуально и параметрически. Таким образом, поведение каждого агента формирует всё состояние модели [8].

Агенты роботов должны иметь функцию определения потребления ресурсов на осуществляемое перемещение. Так как в реальном объекте затрачивание ресурсов напрямую зависит от перемещений, а определить эту зависимость математически становится сложным, то для этого будут использованы нейросетевые модели потребления, созданные на основе собранных реальных данных о затратах энергии и времени. Цель этого агента состоит в выполнении задаваемых траекторий оптимальным для себя образом и перемещении объектов (заготовок).

Для создания нейронной сети были проведены измерения затрат времени и энергии на выделенные траекторные формы входящих в алгоритм работы РТК. Траекторная форма состоит из множества изначальных и целевых точек. Из полученных измерений была составлена и использована обучающая выборка. Обученные на их основе нейросети используются в работе. Такая модель выявляет реальные, но скрытые и нелинейные зависимости [9].

Таким образом, СППР позволяет определить параметры работы комплекса, при которых онратит минимальное количество времени либо электроэнергии, на основании данных, соответствующих действительности, определяющей суммарное время выполнения последовательности

при всех возможных координатах точки сварки и алгоритма поиску точки сварки с минимальным временем выполнения промежуточных действий (см. рис. 3) [15; 18].

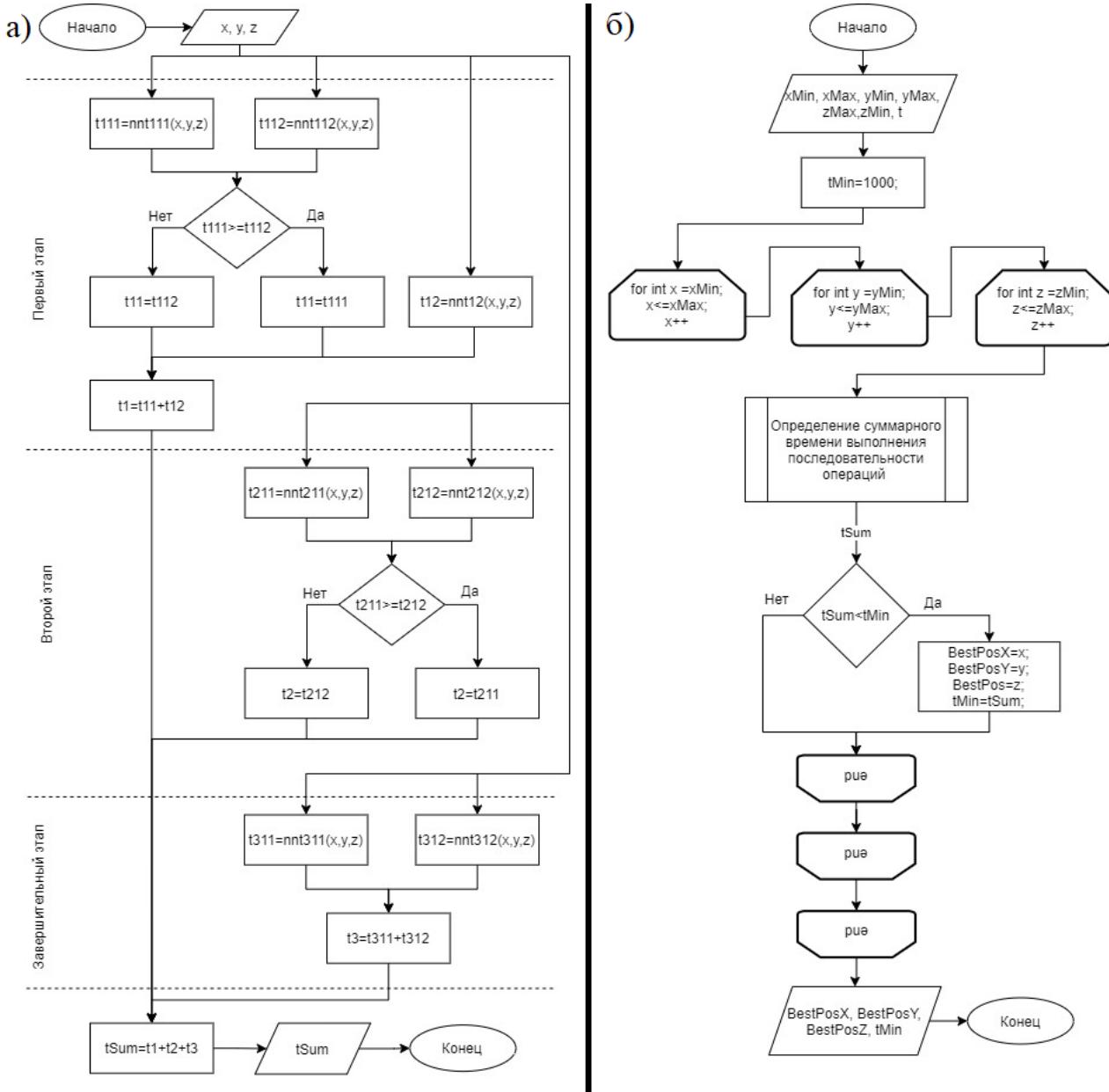


Рис. 3. Алгоритмы интеллектуального модуля по минимизации затрат времени:  
а – алгоритм определения суммарного времени выполнения технологического цикла;  
б – алгоритм поиска точки с минимальным суммарным временем

Первый алгоритм на первом этапе ограничивается моментами захвата заготовок и выгрузки первого патрубка в точку промежуточного хранения. Для начала определяется время перемещения  $t_{11}$  заготовок в точку сварки; поскольку операция осуществляется одновременно, но двумя позиционерами, то выбирается большее время перемещения. Затем определяется время на перемещение первого патрубка  $t_{12}$  в точку промежуточного хранения, и полученные значения суммируются в переменную  $t_1$  (время выполнения первого этапа).

Для второго этапа определяется только время перемещения от точки захвата к точке сварки. Для третьего – сумма времени на перемещение к точке промежуточного хранения и обратно и времени на перемещение к точке выгрузки.

Время рассчитывается с помощью нейросетевой модели для каждого перемещения.

После полученные три значения суммируются и выводятся как результат алгоритма.

Второй алгоритм на вход принимает координаты области, в которой может выполняться сварка. Задаётся значение переменной  $tMin$ , и запускается цикл по перебору всех точек в заданной области. Каждую точку цикл подаёт на вход алгоритму определения суммарного времени выполнения последовательности промежуточных операций. Полученное от него значение сравнивается с  $tMin$ , и, если  $tSum$  меньше, то  $tMin$  приравнивается к  $tSum$  и поданные на вход координаты записываются. После выполнения цикла записанные координаты подаются на выход. Таким образом и осуществляется поиск координат точки сварки с минимальным суммарным временем выполнения промежуточных действий.

По такому же принципу устроены алгоритмы, связанные с энергопотреблением (см. рис. 4) [19; 20].

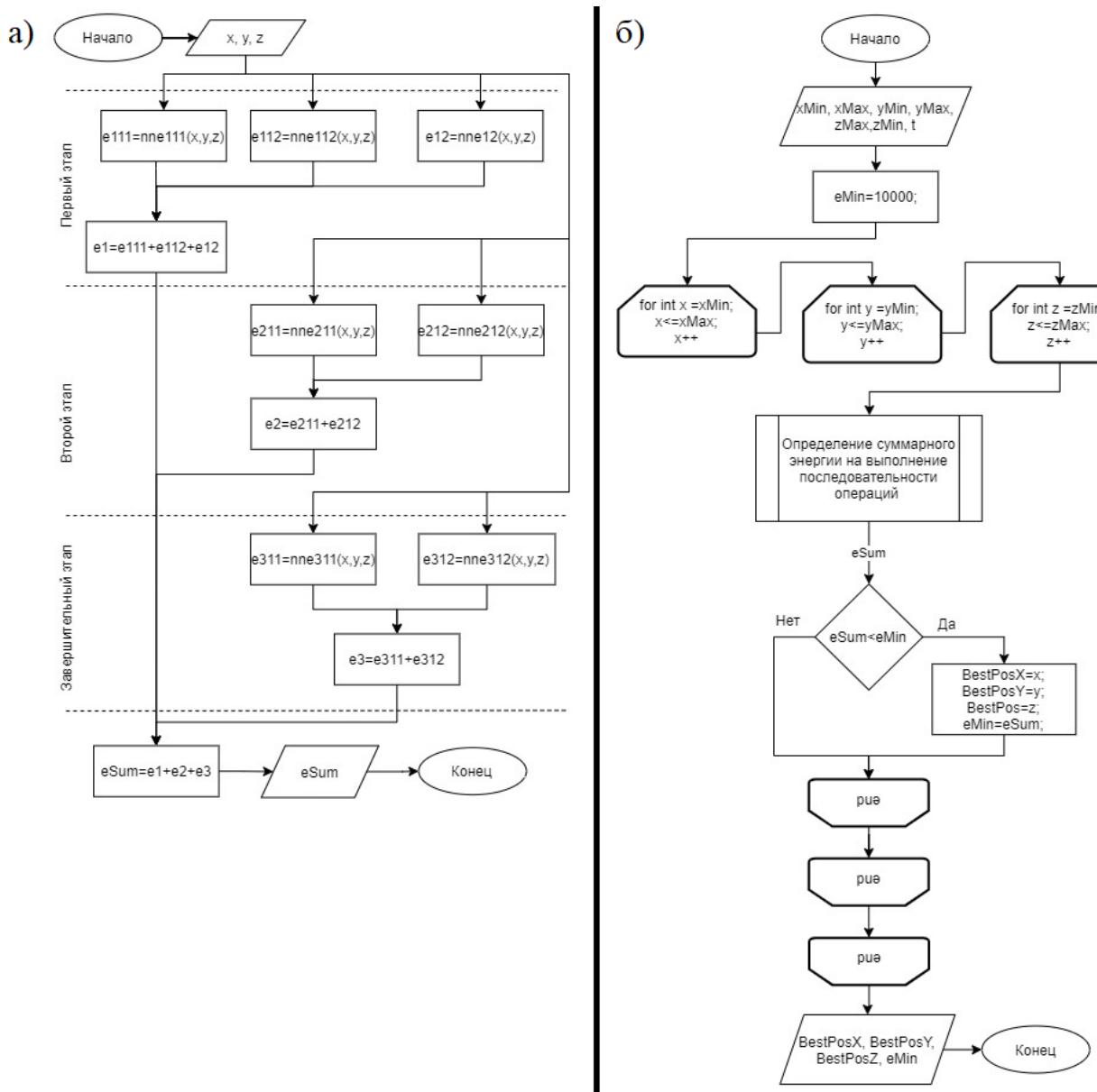


Рис. 4. Алгоритмы интеллектуального модуля по минимизации энергопотребления:

а – алгоритм определения суммарного энергопотребления;

б – алгоритм поиска точки с минимальным суммарным энергопотреблением

На рис. 5 представлен кадр симуляции модели процесса сварки. Следует отметить, что была реализована часть интеллектуального модуля, отвечающего за минимизацию временных затрат, для демонстрации работоспособности метода. На рис. 5 представлены только кадры выполнения сварки, поскольку результаты интеллектуального модуля проявляются именно на этом этапе. Выделенная зона прямоугольной формы на столе – это исследуемая область допустимых точек сварки. Движения и возможность выполнить сварку в другой области она не ограничивает, но нейросетевые модели затрат времени на выполнение обеспечивающих сварку траекторий способны сформировать результат только для этой зоны выполнения сварки. Точка на стыке двух заготовок – это точка сварки. В первом случае она задана заранее перед запуском модели, во втором рассчитана с помощью интеллектуального модуля. Для всех роботов точка сварки интерпретируется по-разному: для 5 Arc это точка центра дуги, по которой он выполняет шов, для позиционеров – центр сечения патрубка с противоположной стороны от места его захвата (для KR 60 эта точка расположена слева от места захвата). В управляющих программах роботов точка, в которой выполняется сварка, имеет разные для каждого координаты. В модели эти точки обобщены в одну для упрощения работы алгоритма и интерпретации его работы. Чтобы воспользоваться рассчитанной интеллектуальным модулем точкой необходимо её перевести в корректное для робота значение.

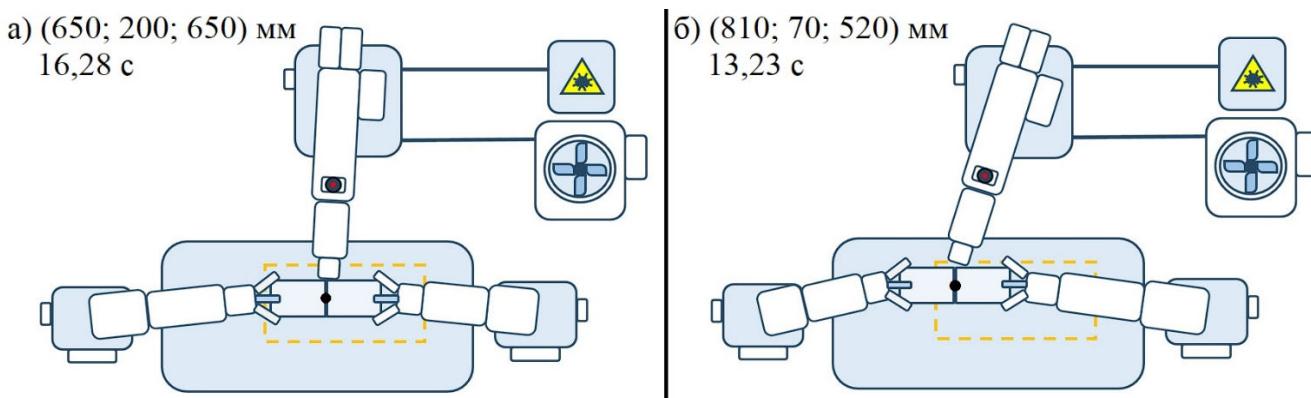


Рис. 5. Кадры симуляции модели:

а – положение роботов при выполнении сварки до использования интеллектуального модуля;  
б – положение роботов при выполнении сварки после использования интеллектуального модуля

В имитационной модели реализованы функции управления моделируемым временем, параметры состояния объектов изменяются с течением времени при наступлении каких-то событий, вызванных работой алгоритма. Принятые размеры в уменьшенном масштабе соответствуют реальным, что говорит об адекватности визуализации.

Следует отметить, что определение эффективности предложенных решений на базе имитационной модели широко применяется в задачах оптимизации роботизированных систем, в частности, основывается на математическом моделировании [2; 3].

Определение суммарного времени выполнения промежуточных действий осуществляется по алгоритму, описанному выше. Для первого случая используется точка, установленная при проектировании роботизированного процесса, для второго – точка, рассчитанная интеллектуальным модулем. Это изменение можно отследить в левых верхних углах кадров симуляции. Также интерфейс выводит значение времени на выполнение моделируемой последовательности операций. Как можно заметить, произошло снижение на 18 %.

Таким образом, получилось найти точку сварки, которая обеспечивает минимальное выполнение исследуемых промежуточных действий среди всех возможных случаев.

**Заключение.** В результате работы было сформировано представление о целесообразности применения имитационного агентного моделирования при формировании управленических реше-

ний над производственным процессом и использования интеллектуального модуля как системы формирования рекомендаций по управлению процессом.

Также были представлены описание рассматриваемого технологического процесса, концептуальное описание имитационной модели, разработанной на его основе, демонстрационного варианта реализованной в программе модели, визуально и параметрически отображающей выполнение части моделируемого производственного процесса.

Были представлены возможности для повышения эффективности роботизированного сварочного процесса комплекса, определены параметры, на основе которых необходимо принять дополнительные управляющие воздействия, что в дальнейшем было отражено в формировании логики работы интеллектуального модуля. На основании этого была проведена частичная реализация модуля для отображения его работоспособности и зависимостей, на базе которых он формирует решение. В результате его работы получилось снизить время на выполнение обеспечивающих сварку перемещений на 18,5 %.

Представленный метод позволяет в краткие сроки провести оптимизацию отдельно взятого роботизированного процесса. Его использование нецелесообразно для постоянно меняющихся технологических процессов на базе одного и того же комплекса, но может послужить основой для этого.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Malik, A. A. Framework to implement collaborative robots in manual assembly: a lean automation approach / A. A. Malik, A. Bilberg // Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, Vienna, Austria. – 2017. – P. 1151-1160. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.160/.
2. Лахменев, А. С. Оптимизация электромеханических систем по критериям точности позиционирования и энергетическим затратам / А. С. Лахменев, А. В. Саушев // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». – 2020. – № 1. – С. 269-271.
3. Оптимизация траекторий промышленных роботов-манипуляторов для лазерной резки / М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, В. М. Шеменков, И. Э. Илюшин, А. А. Юркина // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2020. – № 2 (67). – С. 21-30.
4. Sun, X. A digital twin-driven human-robot collaborative assembly-commissioning method for complex products / X. Sun, R. Zhang, S. Liu // Int J Adv Manuf Technol 118. – 2020. – P. 3389-3402. DOI: 10.1007/s00170-021-08211-y.
5. Balogun A. A. A., Improving the energy efficiency of production processes at industrial enterprises of the Russian Federation / A. A. A. Balogun, P. Hefei, E. S. Zakharova // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. – 2022.
6. Маршаков, Д. В. Нейросетевая идентификация динамики манипулятора / Д. В. Маршаков, О. Л. Цветкова, А. Р. Айдинян // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neurosetevaya-identifikatsiya-dinamiki-manipulyatora> (дата обращения: 26.06.2022). – Текст: электронный.
7. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений / Г. Буч, Р. Максимчук, М. Энгл, Б. Янг, Д. Коналлен, К. Хьюстон. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2008. – 720 с.
8. Кузин, А. Ю. Мультиагентная система управления распределённой энергосистемой / А. Ю. Кузин, Д. В. Лукичев, Г. Л. Демидова // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 5. – С. 945-954.
9. Хасанов, О. З. Алгоритмы адаптивного управления и идентификации нелинейных динамических объектов роботизированного технологического комплекса с эталонной моделью и сигнальной адаптацией / О. З. Хасанов, З. М. Хасанов // Вестник УГАТУ. – 2021. – Т. 2. – № 92. – С. 102-111.
10. Sun, X., Zhang, R., Liu, S. et al. A digital twin-driven human-robot collaborative assembly-commissioning method for complex products. Int J Adv Manuf Technol 118, 3389-3402 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08211-y>.
11. Исследование особенностей применения метода функциональной декомпозиции при разработке имитационных моделей цифрового двойника роботизированного процесса / М. А. Горьковый, В. П. Егорова, А. И. Горьковый, М. А. Мельниченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III-1 (59). – С. 27-34.

12. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович, М. И. Хисматулин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 29-38.
13. Концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки / С. И. Сухоруков, С. П. Черный, А. С. Мешков, Д. А. Киба // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 26-33.
14. Maruyama, T. Digital Twin-Driven Human Robot Collaboration Using a Digital Human / T. Ueshiba, M. Tada, H. Toda, Y. Endo, Y. Domae, Y. Nakabo, T. Mori, K. Suita // Sensors. – 2021. – 21. – 8266. – DOI: 10.3390/s21248266.
15. Atef A. Ata Energy Consumption-Based Trajectory Planning for Manipulators / Atef A. Ata // Advances in Transdisciplinary Engineering. – 2022. – V. 25. – P. 119-124. DOI:10.3233/ATDE220577.
16. Hansen, C.; Oltjen, J.; Meike, D.; Ortmaier, T. Enhanced approach for energy-efficient trajectory generation of industrial robots. In Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Seoul, Korea, 20-24 August 2012; p. 1-7.
17. Field, G.; Stepanenko, Y. Iterative dynamic programming: An approach to minimum energy trajectory planning for robotic manipulators. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, MN, USA, 22-28 April 1996; Vol. 3, p. 2755-2760.
18. Vysocký A. et al. Reduction in robotic arm energy consumption by particle swarm optimization // Applied Sciences. – 2020. – T. 10. – № 22. – C. 8241.
19. Paryanto P., Brossog M., Kohl J., Merhof J., Spreng S., Franke J. (2015) Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems. Int J Adv Manuf Technol 78:1315-1328.
20. Garcia, R. R., Bittencourt, A. C. & Villani, E. Relevant factors for the energy consumption of industrial robots. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 40, 464 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1376-1>.



Саяпина П. О., Ефремов М. А., Крупский Р. Ф., Азимов Х. Х.  
P. O. Sayapina, M. A. Efremov, R. F. Krupsky, Kh. Kh. Azimov

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

### ELECTROMECHANICAL INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM

**Саяпина Полина Олеговна** – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: em@knastu.ru.

**Polina O. Sayapina** – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-na-Amur). E-mail: em@knastu.ru.

**Ефремов Михаил Андреевич** – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: em@knastu.ru.

**Mikhail A. Efremov** – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: em@knastu.ru.

**Крупский Роман Фаддеевич** – кандидат технических наук, главный научный сотрудник – руководитель научно-производственного инжинирингового центра Филиала ПАО «ОАК» – «КнААЗ имени Ю. А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская 1. E-mail: roman\_krupskiy@rambler.ru.

**Roman F. Krupsky** – PhD in Engineering, Chief Researcher – Head of the Scientific and Production Engineering Center of the Branch of PJSC «UAC» – «KnAAZ named after Yu. A. Gagarin» (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681018, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, st. Sovetskaya 1. E-mail: roman\_krupskiy@rambler.ru.

**Азимов Хурсандмурад Хакимович** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

**Khursandmurod Kh. Azimov** – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

**Аннотация.** Показана актуальность разработки и внедрения измерительной электромеханической системы. Приведена методика функционального применения электромеханической системы посредством асинхронного двигателя. Описан порядок выбора выходных параметров асинхронного двигателя, и показаны этапы научно-исследовательской работы. Приводятся описание структурной схемы и назначение основных блоков и модулей.

**Summary.** The relevance of the development and implementation of a measuring electromechanical system is shown. The method of functional application of an electromechanical system by means of an asynchronous motor is given. The procedure for selecting the output parameters of an asynchronous motor is described and the stages of research work are shown. A description of the block diagram and the purpose of the main blocks and modules is given.

**Ключевые слова:** проектирование, электромеханическая система, система взвешивания.

**Key words:** design, electromechanical system, weighing system.

УДК 621.313:621.317.39

**Введение.** Создание информационно-измерительных систем (ИИС) неразрывно связано с их автоматизацией. Это не только снижает трудоёмкость испытаний, но и обеспечивает встраивание измерительных модулей в производственный процесс для непрерывного мониторинга технологических параметров и удалённой корректировки программы измерений [1–3].

Основным классификационным критерием ИИС является принцип организации алгоритма её функционирования. Для исследования технических объектов, эксплуатируемых в статических режимах, применяются ИИС с детерминированными алгоритмами, реализующими стандартные метрологические подходы. Объектам с динамическими режимами работы в большей степени соответствуют программируемые ИИС, учитывающие параметры состояния контролируемого устройства или процесса. Наиболее сложными и универсальными являются адаптивные ИИС, структура и алгоритм работы которых автоматически изменяются в соответствии с измеряемыми величинами.

Независимо от классификации ИИС при их синтезе возникает необходимость решения задачи комплексной совместимости. Она включает информационную, конструкционную, энергетическую, метрологическую и эксплуатационную согласованность характеристик всех структурных блоков и характеристик, учитывающих влияние внешних факторов. Если ИИС выполнена в виде информационно-измерительного комплекса (ИИК), вопросы совместимости функционально объединённой совокупности компьютеров и средств измерений, предназначенных для измерительной задачи, решаются в процессе проектирования. Характерным признаком комплекса является наличие логических программируемых блоков (ПЛИС) и программного управления измерениями, реализованного, как правило, на аппаратном уровне. Например, для блочно-модульной структуры, состоящей из технической (аппаратной) ПЛИС Алтера MAX7000+plus, необходимо программное (алгоритмическое) обеспечение Алтера HDL.

Техническая подсистема включает систему измерений, вычислительные компоненты, таймеры, средства ввода/вывода цифровых и аналоговых сигналов.

Программная подсистема содержит системное и прикладное обеспечение, определяющее вычислительные характеристики комплекса. В частности, оно реализует поведенческие алгоритмы представления и обработки потоковых данных, планирования эксперимента, архивирования и метрологического сопровождения.

Измерительно-вычислительный комплекс обеспечивает управляемые прямые и/или косвенные измерения, преобразование электрических сигналов от измерительных приборов, генерацию нормированных сигналов, представление результатов измерений.

Структура ИИК хотя и зависит от типа решаемой задачи, но однозначно включает компьютер (терминал, программируемый контроллер) с соответствующими периферийными устройствами, использующий алгоритмически разноуровневые взаимосвязанные программы. Обработка и передача измерительной информации реализуются с помощью внешних или интегрированных модулей сопряжения бинарных сигналов (цифро-анalogовый, аналого-цифровой преобразователи, мультиплексоры, шифраторы и т. п.).

Автоматизация ИИК технически сводится к выбору режима объекта измерений (установка, подключение, перемещение, отключение), режима процесса измерений, сбора, передачи, обработки, хранения данных, созданию экспертной базы данных. ИИК представляет класс измерительных средств высокой сложности, поскольку включает цифровые и аналоговые компоненты с согласованными в соответствии с требованиями их совместного использования в многоблочных информационно-измерительных системах техническими и эксплуатационными характеристиками.

Для решения унитарных задач автоматизации измерений предназначены типовые комплексы. Проблемно ориентированные ИИК обеспечивают решение специфичных для прикладной области задач. На решение уникальных и мультифизических задач автоматизации измерений направлены специализированные ИИК.

**Предмет исследования.** Предметом исследования, обеспечивающим решение метрологической задачи определения весовых и/или триботехнических характеристик, является электромеханическая система на базе автоматически тарируемого асинхронного электродвигателя двойного движения. Целесообразность такого технического решения подтверждается исследованиями, выполненными как в нашей стране, так и за рубежом [4–21]. Одна из первых реализаций, обеспечивающих двойное движение исполнительного механизма, это двигатель-электромолоток А. И. Москвитина [22].



В рассматриваемой системе определяющими являются силы, действующие на перемещаемый объект. Из основных положений электромеханики следует, что силы, возникающие вследствие взаимодействия переменного магнитного поля статора с током вторичной короткозамкнутой обмотки, при детерминированных размерных соотношениях электромеханического преобразователя определяются его электромагнитными параметрами [23–25].

Задачами информационно-измерительной электромеханической системы являются определение массы исследуемого объекта и защита от возможной перегрузки.

Технический результат, достигаемый в процессе решения поставленной задачи, заключается в повышении функциональности и надёжности измерительной системы.

Величина силы, действующей на перемещаемый объект, в общем случае может быть найдена на основании уравнения Лагранжа первого рода:

$$m_v \cdot w_v = F_v \sum_{\alpha=1}^r \lambda_\alpha \frac{\partial f_\alpha}{\partial r_v} + \sum_{\beta=1}^r R_v, \quad (1)$$

где  $m_v$  – масса объекта;  $w_v$  – ускорение объекта;  $F_v$  – равнодействующая сила;  $R_v$  – реакция силы.

Выражение врачающего момента, действующего в измерительной системе, может быть получено на основе общих уравнений динамической системы (Лагранжа II рода):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_\sigma} - \frac{\partial T}{\partial q_\sigma} = Q_\sigma, \quad (2)$$

где  $q_\sigma$  – обобщённые координаты;  $\dot{q}_\sigma$  – обобщённые скорости;  $T$  – кинетическая энергия системы;  $Q_\sigma$  – обобщённые силы.

Уравнения Лагранжа (1), (2) позволяют обобщить связь объекта измерения и приложенные к нему силы. Поскольку механическое усилие создаётся электромагнитным моментом  $M_{\text{эм}}$ , развивающим электромеханическим преобразователем, в данном случае асинхронным двигателем, величина момента будет определяться электрическими параметрами подвешенной к нему электрической мощности:

$$M_{\text{эм}} = \frac{pm_1 \Delta U_1^2 r_2'}{\omega_1 \left( (r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x_{\sigma 2}')^2 \right)},$$

где  $p$  – число пар полюсов;  $m_1$  – число фаз;  $\Delta U_1$  – изменение напряжения вследствие перемещения объекта измерения;  $c_1$  – численный коэффициент приведения схемы замещения;  $r_1, r_2'$  – активные сопротивления;  $x_{\sigma 1}, x_{\sigma 2}'$  – индуктивные сопротивления статора и ротора двигателя.

Принцип работы измерительной системы поясняет рис. 1, на котором приведены следующие обозначения: БУ – блок управления, ЧП – частотный преобразователь, Д – асинхронный двигатель с линейным перемещением исполнительного элемента, ДД – датчик движения, ДТ – датчик тока, ВЧ – программируемое логическое устройство («вычислитель»), БВИ – блок вывода информации величин « $t$ » или коэффициента трения « $\mu$ » объекта измерений, ИВП – измерительная весовая платформа (передвижная платформа).

Электродвигатель с линейным перемещением исполнительного элемента состоит из магнитопровода с сетевой обмоткой, подключаемой к сети через частотный преобразователь ЧП и блок управления БУ, вращающейся короткозамкнутой вторичной обмотки, на внутренней поверхности которой нанесена резьба, на наружной поверхности также нанесена резьба с образованием между вращающейся вторичной обмоткой и тягой резьбового соединения, обеспечивающего при вращении вторичной обмотки перемещение тяги в осевом направлении, при этом один из концов тяги механически присоединён к измерительной весовой платформе.

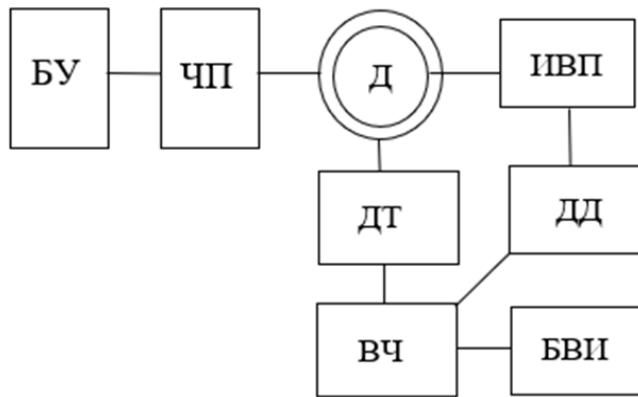


Рис. 1. Структурная схема информационно-измерительной электромеханической системы

Информационно-измерительная электромеханическая система использует датчики наблюдаемых электрических параметров, включаемые в количество фаз трёхфазной сети, определяемое используемой схемой измерения электрических величин (одно-, двух- или трёхфазное подключение). Датчики информационно связаны с программируемым вычислительным устройством, в которое внесена начальная информация о параметрах электродвигателя с линейным перемещением исполнительного элемента (без механического соединения с объектом измерений), жёстко закреплённого на опорной поверхности.

Вычислительное устройство также содержит информацию о допустимых значениях параметров электродвигателя. Для вывода результатов измерений используется блок вывода информации.

Практическая реализация рассматриваемого подхода условно показана на примере схемы определения веса грузового автомобиля (см. рис. 2).

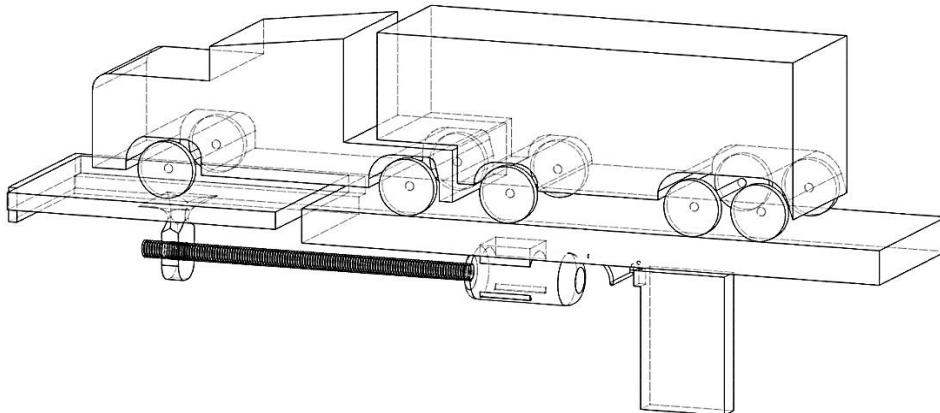


Рис. 2. Функциональная модель измерительной системы

В процессе измерений при получении информации от измерительных датчиков для определения массы вычислительное устройство использует выражение

$$m = \frac{r m_1 \Delta U_1^2 r'_2}{g \mu \pi f_1 d_p \Delta s \left( (r_1 + r'_2)^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2 \right) \left( \frac{D_{cp}}{d} f + \operatorname{tg}(\theta + \varphi) \right)}; \quad (3)$$

для вычисления коэффициента трения

$$\mu = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{g m \pi f_1 d_p s \left( (r_1 + r_2')^2 + (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}')^2 \right) \left( \frac{D_{cp}}{d_p} f + \operatorname{tg}(\theta + \varphi) \right)}, \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести;  $D_{cp}$  – приведённый диаметр сил трения в резьбовой части;  $f$  – коэффициент трения в резьбовой части;  $\theta$  – угол подъёма резьбы;  $\varphi$  – угол трения в резьбе.

В выражениях (3), (4) технические характеристики двигателя без механического соединения тяги с измерительной платформой определяются из справочных данных или находятся по стандартной методике.

Технические характеристики двигателя, измеренные датчиком при перемещении объекта измерений и входящие в приведённые выше формулы, поступают из блока датчиков.

Рассчитанные на основе сравнения предварительно внесённой информации и текущего значения параметров состояния электродвигателя в «вычислителе» значения массы и/или коэффициента трения передаются на блок вывода информации. Реализация блока «вычислитель» средствами пакета LabVIEW показана на рис. 3.

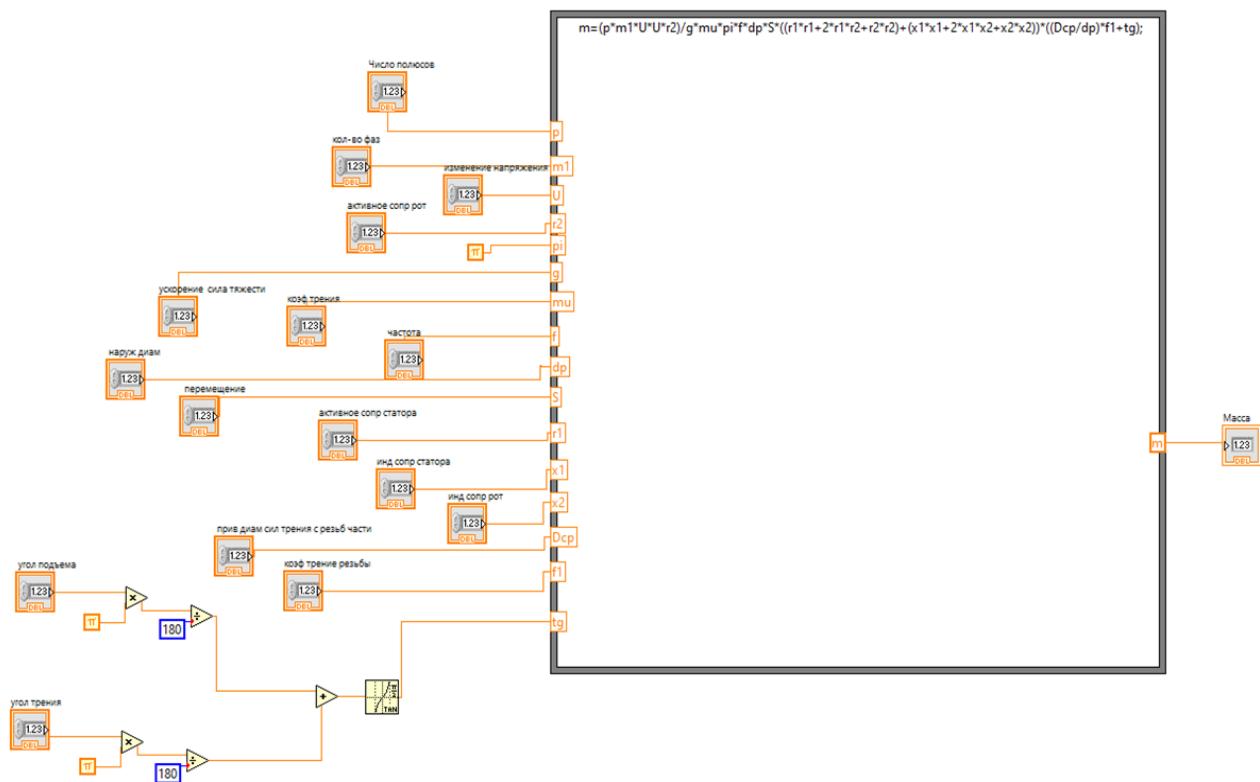


Рис. 3. Мнемоническая схема «вычислитель»

Математическая модель «Вычислитель», реализованная в пакете MATLAB, приведена на рис. 4-5.

Если в процессе перемещения двигателем измерительной весовой платформы измеренные блоком датчиков тока параметры электродвигателя превысили предельно допустимые значения, программируемый частотный преобразователь автоматически формирует сигнал блоку управления, который отключает электродвигатель от сети.

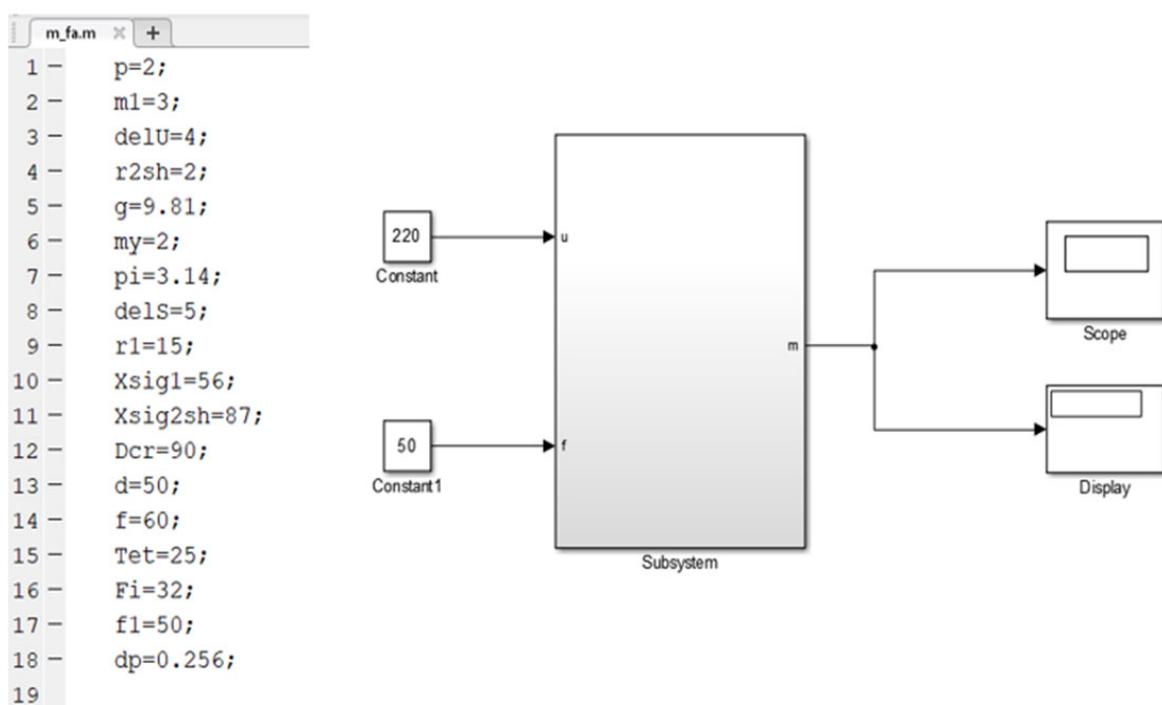


Рис. 4. Математическая модель в пакете MATLAB

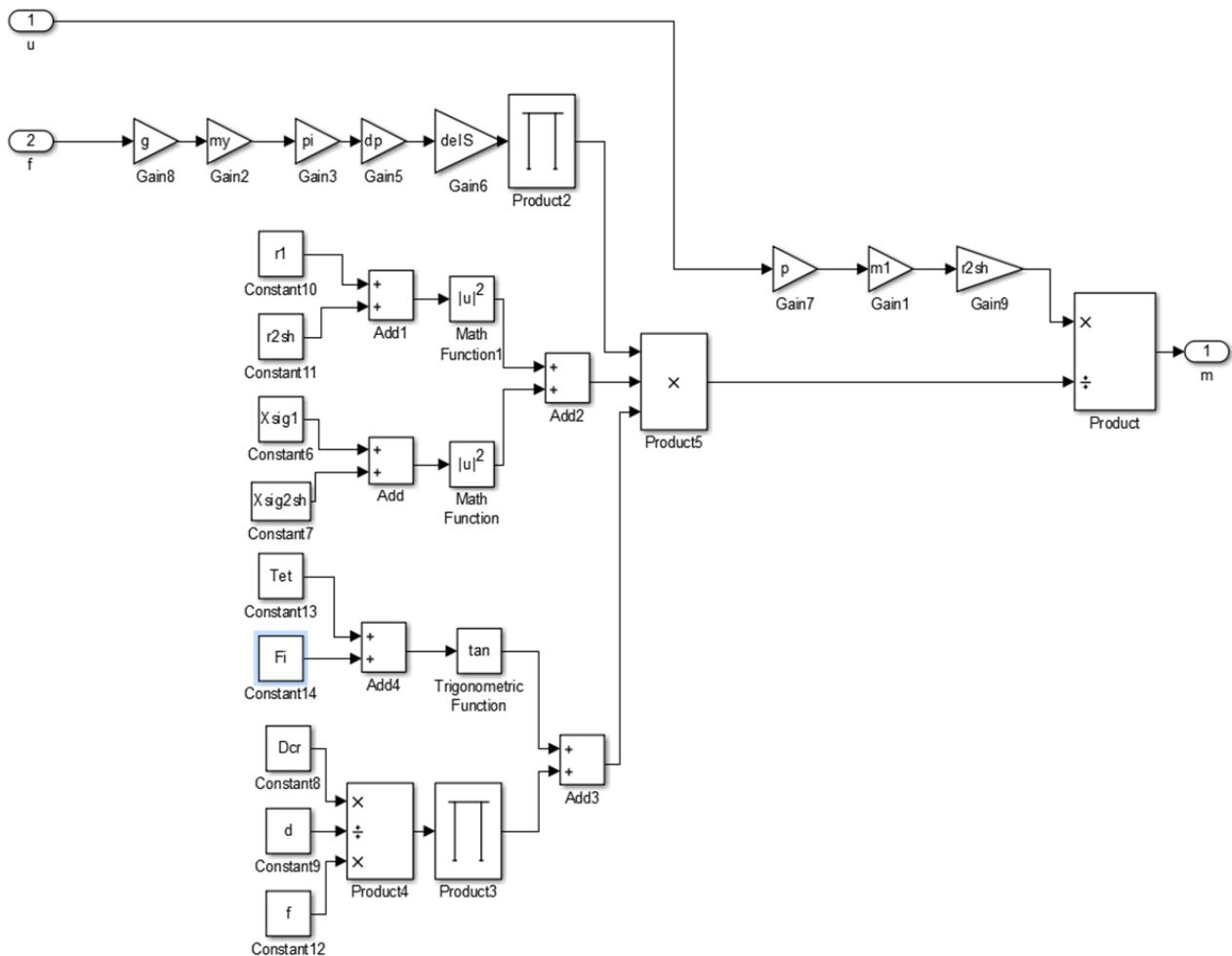


Рис. 5. Математическая модель в пакете MATLAB

**Заключение.** ИИС на базе асинхронного электродвигателя с линейным перемещением исполнительного элемента для определения весовых и/или триботехнических характеристик транспортных объектов позволяет вычислить массу и/или коэффициент трения объекта измерения относительно опорной поверхности. Предложенный подход повышает метрологические характеристики измерительной системы, расширяет функциональные характеристики электромеханических преобразователей и повышает надёжность. Использование программируемого вычислительного устройства, сравнивающего измеряемые значения электрических параметров электродвигателя при перемещении объекта измерения с предварительно внесёнными значениями тех же параметров электродвигателя без перемещения объекта измерения и их предельно допустимые значения, обеспечивает точность измерительной информации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Средства электрических измерений и их поверка / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. И. Чураков. – СПб.: Изд-во «Лань», 2021. – 316 с.
2. Ким, К. К. Электрические измерения неэлектрических величин / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 134 с.
3. Ким, К. К. Электрические измерения неэлектрических величин / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. А. Ткачук. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 137 с.
4. Особенности проектирования электромеханических преобразователей для систем комплексной безопасности / О. С. Амосов [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 5. – С. 5-11.
5. Имитационная модель трёхточечного узла процесса формования листового материала электромеханического типа / В. А. Соловьев [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № II. – С. 86-90.
6. Соловьев, В. А. К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объёмного формирования / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, Чжо Аунг Хтет // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 54-57.
7. Гринченков, В. П. Электромагнитные приводы с возвратно-поступательным и возвратно-вращательным принципом действия для клапанов / В. П. Гринченков, И. А. Павленко // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – Т. 4. – № 2. – С. 51-57.
8. Совмещённые электрические машины для автоматики / Ю. М. Келим [и др.]: под общ. ред. Д. В. Свечарника. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.
9. Kulinchenko, G. V. Research of dynamic parameters of the electric drive on the basis of rolling rotor motor / G. V. Kulinchenko, A. M. Maslennikov, V. A. Baguta // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2016. – № 6. – Р. 9-14. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2016.6.02>.
10. Kulinchenko, G. V. Assessment of efficiency of electric drive of stop valves / G. V. Kulinchenko [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – P. 36-44. doi: 10.15587/1729-4061.2019.174203.
11. Garganeev, A. G. Design Principles of Pipeline Valve Mechatronic Systems / A. G. Garganeev, V. V. Mashinsky // XIII International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – 2012. – Р. 330-332.
12. Udovichenko, A. V. Electric motors for variable-speed drive of lock valves / A. V. Udovichenko [et al.] // Electronics. – 2021. – Vol. 10, iss. 21, URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/21/2727> (access date: 30.11.2022).
13. Laitwaite, E. R. Linear motors with transverse flux / E. R. Laitwaite // Proc. IEEE. Vol. 118. № 12. – 1971. – Р. 1761-1767.
14. Bahke, E. Transport system Heute und Morgen Mainz / E. Bahke // Krausskopf Verlag. – 1973. – 215 p.
15. Rummich, E. Synchrone Linear maschinen / E. Rummich // Bull. SEV. – № 23. – 1972. – Р. 1338-1344.
16. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.
17. Колесник, М. Б. Получение аппроксимирующих зависимостей для учёта влияния параметров нагрузки на энергетические показатели асинхронного двигателя / М. Б. Колесник // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III-1 (59). – С. 43-47.
18. Ким, К. К. Моделирование устойчивости электромеханического преобразователя при осевых нагрузках / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. Б. Колесник // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 45-50.

19. Ким, К. К. Повышение эффективности электропривода магистральных задвижек / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – № 3. – С. 71-77.
20. Ким, К. К. Моделирование комбинированного электропривода / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 3 (197). – С. 44-51.
21. Патент № 2736387 Российской Федерации, МПК F16K 31/04 (2006.01), F16K 37/00 (2006.01). Электромеханическая система запорной арматуры: № 2020111602: заявлено 19.03.2020: опубликовано 16.11.2020 // Ким К. К., Иванов С. Н., Горбунов А. В. – 9 с.
22. Москвитин, А. И. Электрические машины возвратно-поступательного движения. Электрические молотки, вибраторы, быстроходный электромагнитный привод / А. И. Москвитин. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1950. – 144 с.
23. Брук, И. С. Теория асинхронного двигателя с массивным ротором / И. С. Брук // Вестник экспериментальной и теоретической электротехники. – 1929. – № 5. – С. 175-193.
24. Вевюрко, И. А. О расчёте асинхронной машины с полым ротором методом симметричных составляющих / И. А. Вевюрко // Вестник электропромышленности. – 1958. – № 5. – С. 28-32.
25. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 528 с.



Черный С. П., Охотников А. В.  
S. P. Chernii, A. V. Okhotnikov

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТОЙ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ИНТЕГРАЦИЕЙ ВНУТРЕННИХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТОРА УМНОЖЕНИЯ

### MODELING OF A DEVELOPED FUZZY CONTROL SYSTEM WITH INTEGRATION OF INTERNAL MODULES BASED ON THE MULTIPLICATION OPERATOR

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kerapu@knastu.ru.

**Sergei P. Chernii** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kerapu@knastu.ru.

**Охотников Александр Владимирович** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: erapu@knastu.ru.

**Alexander V. Okhotnikov** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: erapu@knastu.ru.

**Аннотация.** В представленной работе рассматривается один из возможных подходов к моделированию развитой нечёткой системы управления с интеграцией внутренних модулей, организующих вложенный каскад, на основе оператора умножения. Выделены особенности функционирования технологического процесса, и с учётом этого проведено моделирование процедур интеллектуального управления, реализованных на основе нечёткого многокаскадного подхода, в условиях воздействия существенного количества возмущающих воздействий, как недетерминированных, так и вполне определённых, и показано наличие взаимного влияния элементов системы регулирования. Проведён анализ динамических характеристик переходных процессов в интеллектуальной системе управления сложным технологическим объектом.

**Summary.** In the present paper, one of the possible approaches to modeling a developed fuzzy control system with the integration of internal modules organizing a nested cascade based on the multiplication operator is considered. The features of the functioning of the technological process are highlighted, and with this in mind, the simulation of intelligent control procedures implemented on the basis of a fuzzy multi-stage approach is carried out under the influence of a significant number of disturbing influences, both non-deterministic and well-defined, and the presence of mutual influence of the elements of the control system is shown. The analysis of dynamic characteristics of transients in an intelligent control system of a complex technological object is carried out.

**Ключевые слова:** нечёткий логический регулятор, терм-множество, нечёткое множество, лингвистическая переменная, интеллектуальная система управления.

**Key words:** fuzzy logic controller, term, fuzzy set, linguistic variable, intelligent control system.

*Исследования проводятся в рамках гранта № ВН010/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критериев энергоэффективности».*

УДК 681.5.01:658.5

**Введение.** Применение интеллектуальных подходов к реализации систем управления технологическими процессами на текущий момент связано с такими объектами регулирования, для которых характерно наличие целого ряда формальных признаков. Среди таких признаков можно выделить наличие информации об объекте регулирования в количественном и качественном виде, существенное количество различных возмущающих факторов, а также большое число координат

системы, зависящих друг от друга как напрямую, так и косвенно. Подвесные системы транспортных модулей конструктивно состоят из большого числа регулируемых гидравлических или пневматических элементов, регулирование которых зачастую производится на основе знаний оператора в ручном режиме. В случае соединения нескольких траловых платформ в единую систему с целью повышения грузоподъёмности возникает дополнительная задача стабилизации такой системы в горизонтальном положении. Для решения совокупности указанных задач предлагается использовать развитую нечёткую систему управления, позволяющую не только контролировать положение гидроцилиндров локального уровня регулирования, но и выполнять выравнивание платформы в горизонтальном положении [1; 2].

**Особенности функционирования объекта управления.** Для формализации математической модели развитой нечёткой системы управления с реализацией внутренних модулей на основе оператора умножения рассмотрим упрощённую функциональную схему гидравлической системы полуплатформы, представленную на рис. 1. Для приведённой ниже функциональной схемы приняты следующие допущения: количество активных элементов подвесной системы сокращено до четырёх, поверхность платформы представляет собой абсолютно жёсткую пластину [5]. В процессе функционирования представленного технологического объекта возникает целый ряд ограничивающих факторов, которые не только определяются его конструктивными особенностями, но и диктуются условиями внешней среды.

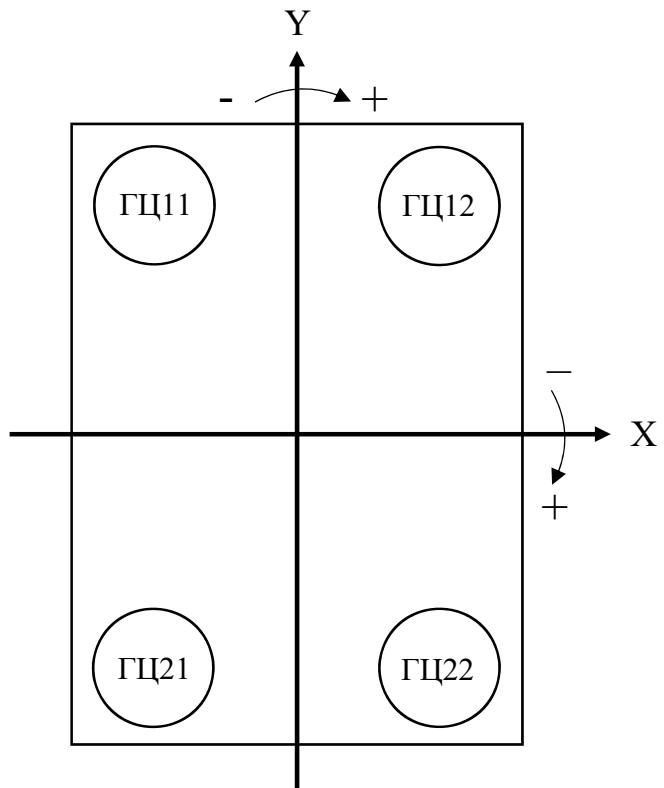


Рис. 1. Упрощённая функциональная схема гидравлической системы полуплатформы

С учётом того, что грузы, транспортируемые на подобного рода траловых системах, представляют собой объекты с существенными массогабаритными характеристиками и в дополнение к этому крепление таких объектов не представляется возможным, одним из важнейших критериев при реализации процедур управления является стабилизация кренов всей системы, возникающих вследствие кривизны дорожного покрытия.

**Моделирование многокаскадного нечёткого регулятора.** Интеллектуальная система управления, реализующая стабилизацию высокотоннажной траловой системы, структурно может

быть реализована с использованием подхода, основанного на применении развитых нечётких регуляторов. Внутренний вложенный каскад такого регулятора представляет собой набор простейших нечётких модулей с единственным информационным входом и выходом, реализующим закон управления отдельным гидроцилиндром подвесной системы. Внешний каскад нечёткой системы управления реализует функцию стабилизации платформы относительно горизонтального положения за счёт изменения уставок внутренних нечётких модулей.

Входные лингвистические переменные « $X$ » и « $Y$ », соответствующие отклонению системы от горизонтального положения, формализуются пятью элементами в базовом терм-множестве и имеют аппроксимированные функции принадлежности треугольного вида [3; 4]. Выходные переменные реализуют набор констант, который задаёт соответствующее положение каждому модулю подвесной системы вложенного каскада объекта регулирования. Регулирование гидроцилиндрами во внутреннем каскаде выполнено с использованием элементарных нечётких логических регуляторов Сугено с единственными лингвистическими переменными на входе и выходе. На рис. 2-4 представлена настройка нечёткого логического регулятора с алгоритмом вывода Такаги-Сугено.

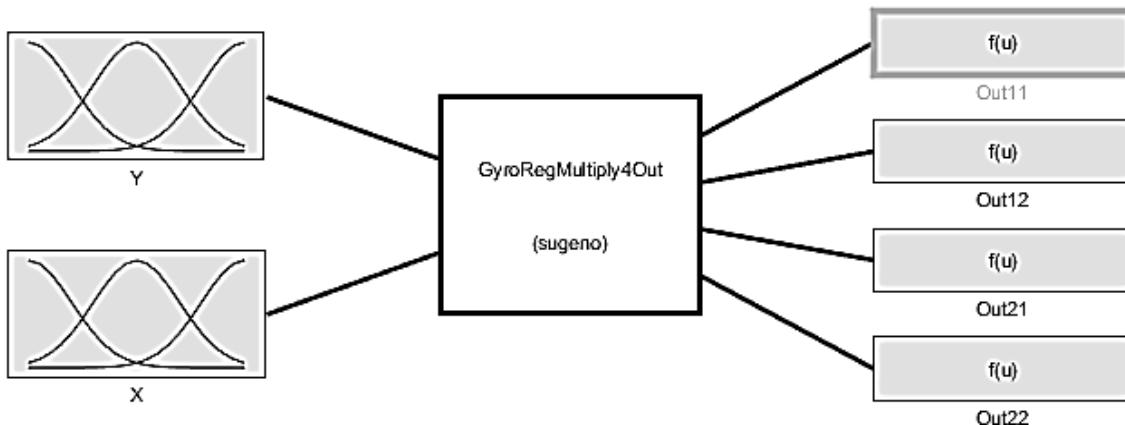


Рис. 2. Нечёткий логический регулятор, реализующий классификацию внутренних модулей по пропорциональному принципу с применением оператора умножения

Нечёткая продукционная база знаний регулятора представляет собой перечень из 25 правил, и её фрагмент имеет следующий вид:

1. Если ( $Y$  есть null) и ( $X$  есть null) тогда ( $Out11 = 1$ ) ( $Out12 = 1$ ) ( $Out21 = 1$ ) ( $Out22 = 1$ );
2. Если ( $Y = lowIncline$ ) и ( $X$  есть null) тогда ( $Out11 = 0,5$ ) ( $Out12 = 1$ ) ( $Out21 = 0,5$ ) ( $Out22 = 1$ );  
...
24. Если ( $Y$  есть  $lowMidIncline$ ) и ( $X$  есть  $highIncline$ ) тогда ( $Out11 = 1$ ) ( $Out12 = 50$ ) ( $Out21 = 1$ ) ( $Out22 = 0,5$ );
25. Если ( $Y$  есть  $lowMidIncline$ ) и ( $X$  есть  $highMidIncline$ ) тогда ( $Out11 = 1$ ) ( $Out12 = 25$ ) ( $Out21 = 1$ ) ( $Out22 = 0,75$ ).

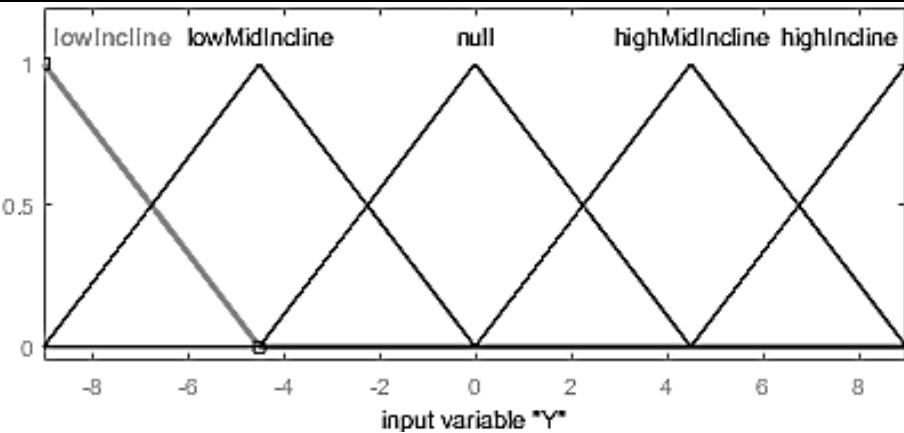


Рис. 3. Входная лингвистическая переменная «Y»

**Результаты моделирования.** На рис. 5 представлен график переходного процесса в гидроприводах с использованием нечёткого логического регулятора, реализующего классификацию внутренних модулей по пропорциональному принципу с их интеграцией в общую многокаскадную структуру на основе оператора умножения. Сверху вниз показаны переходные характеристики в гидроцилиндрах ГЦ11, ГЦ 12, ГЦ21, ГЦ22.

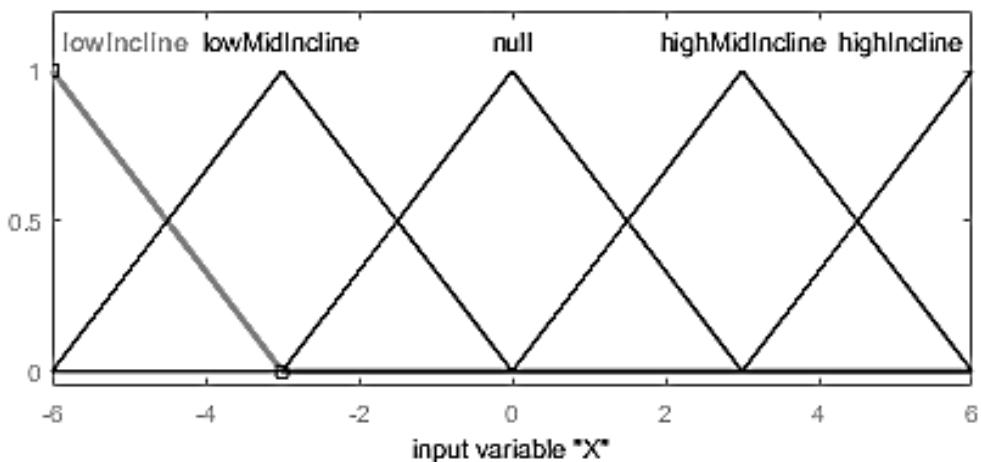


Рис. 4. Входная лингвистическая переменная «X»

На рис. 5 выделен ряд наиболее характерных зон, в которых представлено изменение установок гидроцилиндров в случаях изменения кривизны дорожного покрытия, обусловленного ландшафтом местности.

В момент времени с 0,5 до 1 с (зона I) на вход к нечёткому логическому регулятору (НЛР) поступают сигналы  $X = +0^\circ$ ,  $Y = +9^\circ$ , соответствующие отклонению платформы от горизонтального положения на определённый угол. Данные значения интерпретируются интеллектуальной системой как «произошёл наклон транспортной платформы относительно оси Y». Реагируя на входные значения, НЛР формирует управляющий выходной сигнал – выдвинуть гидроцилиндры 12 и 22 (см. рис. 1), позволяющие скорректировать отклонение платформы.

В момент времени с 1,5 до 2 с (зона II) на вход к НЛР поступают сигналы:  $X = -6^\circ$ ,  $Y = 0^\circ$ , соответствующие отклонению платформы от горизонтального положения на определённый угол. Данные значения интерпретируются интеллектуальной системой как «произошёл наклон транспортной платформы относительно оси X». Реагируя на входные значения, НЛР формирует управ-

ляющий выходной сигнал – выдвинуть гидроцилиндры 11 и 12 (см. рис. 1), позволяющие скорректировать отклонение платформы.

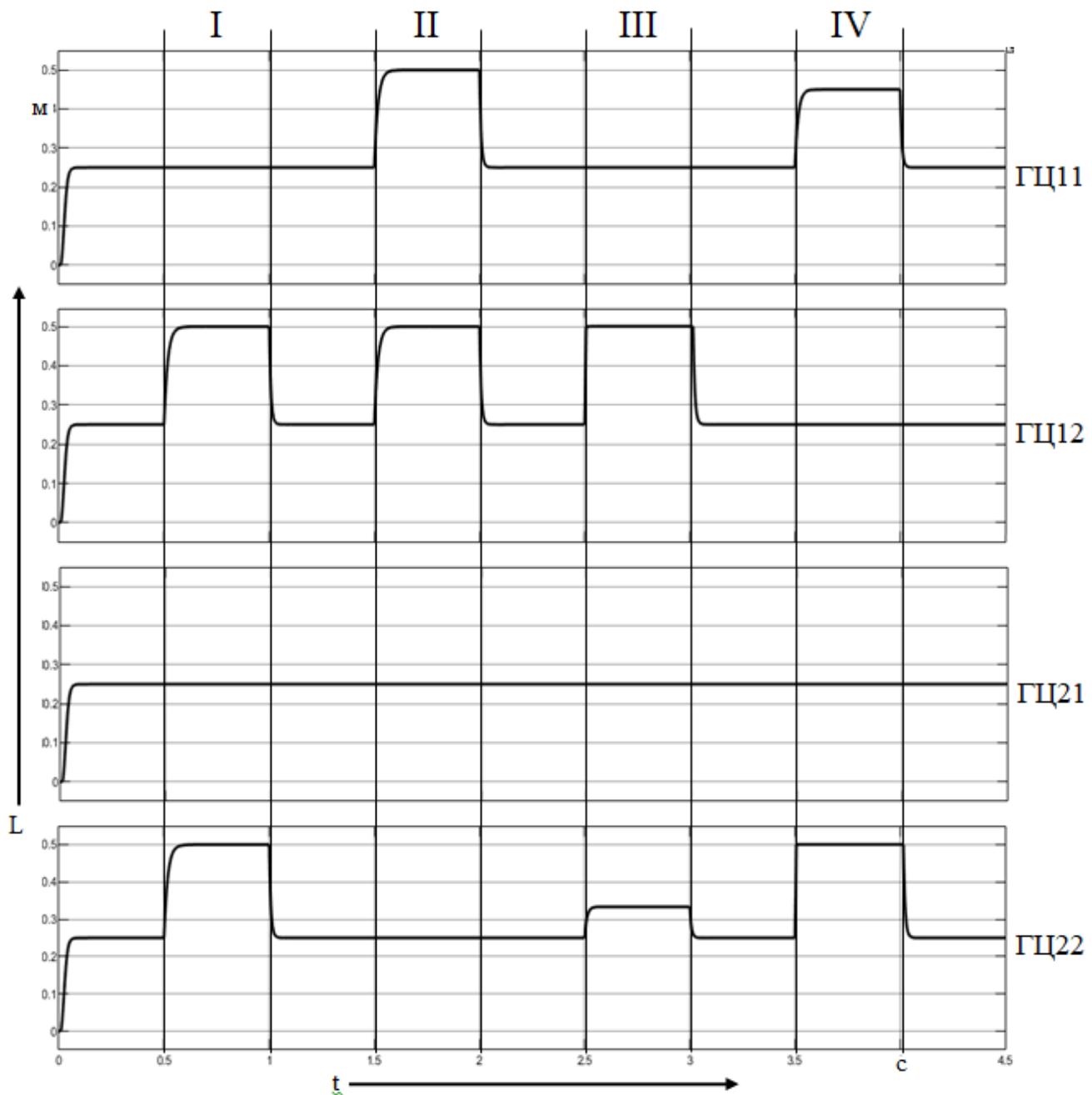


Рис. 5. Графики переходных процессов в гидроприводах при подаче на систему управляющего воздействия без учёта возмущения

На рис. 6 изображён график переходного процесса при подаче на систему возмущающих воздействий в виде синусоидального сигнала с белым шумом, что позволяет провести моделирование поведения системы с учётом неровностей, обусловленных непосредственно дорожным покрытием.

Анализ рис. 5 и 6 в моменты времени от 2,5 до 3 с и от 3,5 до 4 с (зоны III и IV) показал, что система управления работает некорректно. Такая реакция связана с тем, что классификация внутренних модулей производится по пропорциональному принципу с применением оператора умно-

жения и, как следствие, происходит накопление ошибки интегрирования. Во время скачкообразного изменения входного сигнала НЛР внешнего каскада генерирует управляющий сигнал, который резко увеличивает входной сигнал модуля внутреннего каскада, что приводит к некорректному изменению уставок гидроцилиндров подвесной системы объекта регулирования.

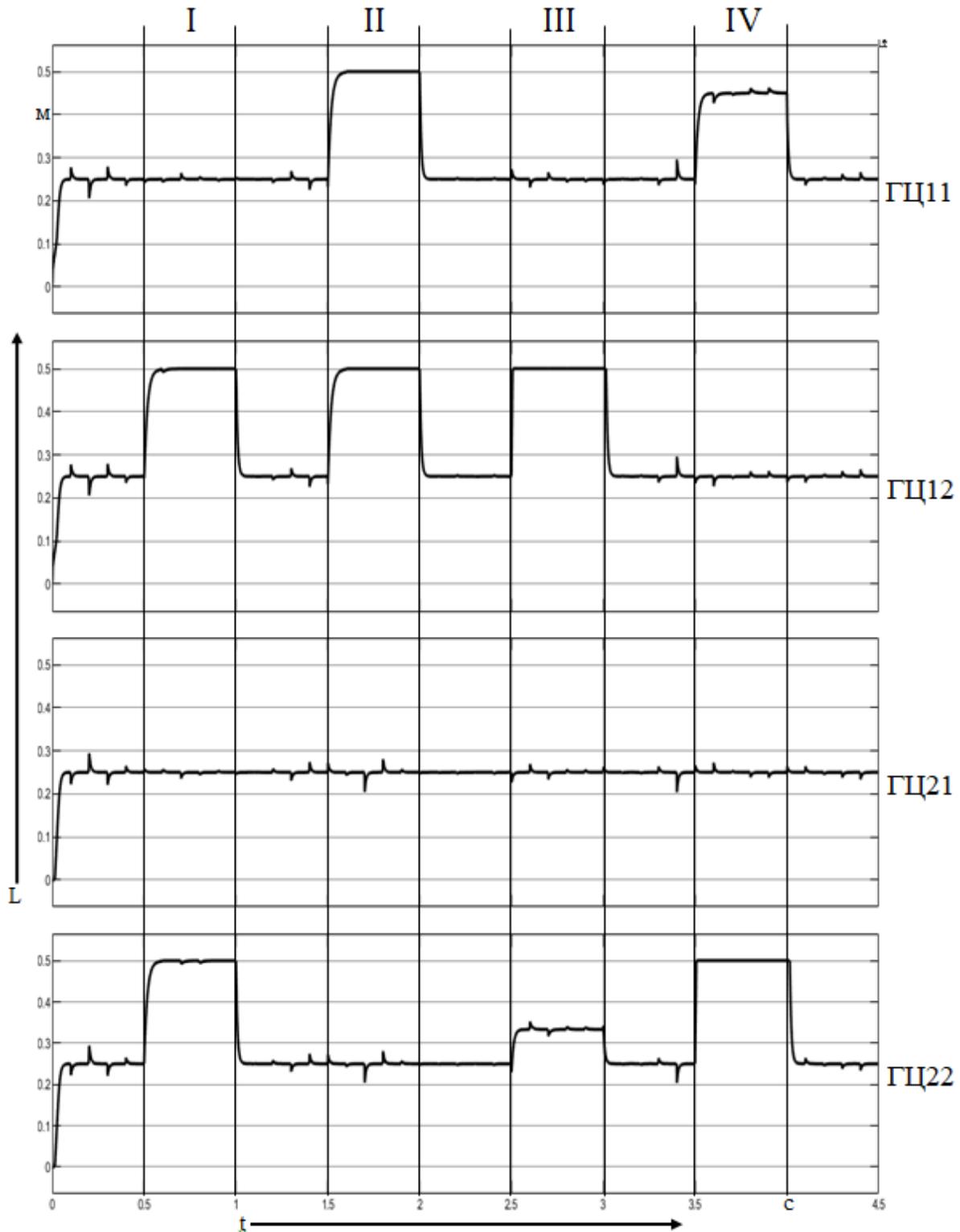


Рис. 6. Графики переходных процессов в гидроприводах при подаче на систему возмущающего воздействия в виде белого шума



**Заключение.** Исходя из анализа результатов моделирования, можно сделать вывод, что предложенная реализация нечёткого логического регулятора внешнего каскада, реализующего классификацию внутренних модулей (нечётких логических регуляторов внутреннего каскада) с их интеграцией по пропорциональному принципу с применением оператора умножения, позволяет реализовать процедуры интеллектуального управления сложным технологическим процессом. Однако такой подход не лишён некоторых недостатков, связанных с накоплением ошибки регулирования вследствие внедрения в систему звена, реализующего функцию произведения управляющих координат между каскадами. Выходом из подобной ситуации может стать замена оператора умножения при интеграции вложенных каскадов на оператор суммирования.

Применение интеллектуальных систем управления технологическими процессами на основе многокаскадного нечёткого управления позволяет проводить гибкую настройку системы на целый ряд возмущающих факторов, как внешних, так и внутренних, ряд из которых имеет недетерминированный характер. Для транспортных систем применение такого подхода позволит не только повысить скорость перемещения высокотоннажных объектов, но и использовать дороги общего пользования с учётом возможных неровностей, обусловленных наличием подъёмов, кривизной траектории и качеством покрытия, и, как следствие, избавит от необходимости строительства специализированных дорог.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cherniy S. P., Susdorf V. I., Buzikaeva A. V., Khrulkov V. N. Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities // EAI Endorsed Transactions on Energy Web (2021), 31, Р. e4. DOI: 10.4108/eai.13-7-2018.165496.
2. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С. П. Черный, В. А. Соловьев, А. В. Бузикаева, С. И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2 (55). – С. 32-39.
3. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. А. Г. Подвесовский, Ю. В. Тюменцев; под ред. Ю. В. Тюменцева. – М.: Лаборатория знаний, 2020. – 801 с.
4. Соловьев, В. А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами: учеб. пособие / В. А. Соловьев, С. П. Черный. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2006. – 74 с.
5. Хрульков, В. Н. Один из подходов к моделированию процесса стабилизации высокотоннажной платформы / В. Н. Хрульков, С. П. Черный, А. В. Охотников // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., г. Комсомольск-на-Амуре, 6-11 декабря 2021 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 100-103.

**Иванов Ю. С., Горьковый М. А., Грабарь Д. М.**

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДИКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ К СОСТЯЗАТЕЛЬНЫМ  
АТАКАМ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

**Иванов Ю. С., Горьковый М. А., Грабарь Д. М.**

**Yu. S. Ivanov, M. A. Gorkavyy, D. M. Grabar**

## **АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДИКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ К СОСТЯЗАТЕЛЬНЫМ АТАКАМ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ**

### **ANALYSIS OF PREDICTIVE MODELS STABILITY TO ADVERSARIAL ATTACKS IN ROBOTICS COMPLEXES**

**Иванов Юрий Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27. E-mail: ivanov\_ys@icloud.com.

**Yuriii S. Ivanov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov\_ys@icloud.com.

**Горьковый Михаил Александрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Mikhail A. Gorkavyy** – PhD in Engineering, Head of Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Грабарь Даниил Михайлович** – магистр кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: grabardm@ml-dev.ru.

**Daniil M. Grabar** – Master's Degree Student, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: grabardm@ml-dev.ru.

**Аннотация.** В статье проведён анализ эффективности современных моделей для распознавания объектов в системах технического зрения роботизированных комплексов. Приведён обзор технологий состязательных атак на предиктивные модели. Проведены эксперименты по реализации существующих атак на различные модели. Подготовлен сравнительный анализ киберустойчивости различных наиболее часто используемых моделей в действующих системах к деструктивным информационным воздействиям.

**Summary.** The paper analyzes the effectiveness of modern models for object recognition in vision systems of robotic complexes. A review of technologies of adversarial attacks on predictive models is given. Experiments on the implementation of existing attacks on different models have been conducted. A comparative analysis of the cyber resistance of various most commonly used models in existing systems to destructive information influences has been prepared.

**Ключевые слова:** распознавание объектов, глубокие нейронные сети, компьютерное зрение, FGSM, безопасность, состязательные примеры.

**Key words:** object recognition, deep neural network, computer vision, FGSM, security, adversarial examples.

УДК 004.8

**Введение.** Компьютерное зрение используется во многих приложениях робототехники для обнаружения людей, нештатных ситуаций, навигации и ориентирования в пространстве [1; 2].

Распознавание объектов для коллaborативной робототехники также является важной задачей, решаемой специалистами по машинному обучению.

Важно учитывать, что коботы предназначены для совместной работы с людьми, а значит у них нет «права на ошибку». Любая ошибка системы искусственного интеллекта (ИИ), может привести к травме человека-оператора, работающего в одном рабочем пространстве с коботом.



Одной из актуальных задач коллаборативной робототехники является задача обнаружения и распознавания инструментов и изделий. Коботу необходимо учитывать изменчивость освещения, неопределенность расположения и многообразие подвидов инструментов. Как правило, с данной задачей успешно справляются алгоритмы, основанные на применении глубокого обучения.

В лаборатории [3] исследователи изучали механику работы кобота с различными типами инструментов.

В работе [4] авторы разработали алгоритм распознавания движений человека и определения используемого инструмента в руке человека. Стоит отметить, что алгоритм показал высокую точность при тестировании в реальной производственной задаче.

Исследователи [5] предложили новый набор объектов для распознавания роботом, а также метод адаптации алгоритмов под условия съемки.

Ранее авторами [6] предлагался подход к коррекции изображений с целью повышения точности распознавания целевых инструментов.

В работе [7] предлагается перспективный метод автоматического распознавания инструментов и их использование без предварительного обучения, тем самым реализуя one-shot или few-shot обучение.

Таким образом, методы глубокого обучения позволили достичь значительных успехов при построении коллаборативных робототехнических комплексов. Однако, как показывают многочисленные исследования, системы предиктивной аналитики всё чаще подвергаются атакам [8]. Незначительные и незаметные изменения входных изображений достаточны для того, чтобы обмануть большинство нейросетевых подходов.

В работе [9] проводится всесторонний обзор состязательных атак и защиты в области компьютерного зрения.

Применительно к задачам робототехники состязательные атаки рассматриваются в работе [10]. Авторами демонстрируются примеры атак на системы оценки позы.

Для обнаружения состязательных атак применяются различные методы обнаружения аномалий, в том числе показавшие свою эффективность в других областях информационной безопасности [11].

В данной работе решается задача распознавания инструментов в рабочей зоне кобота с использованием предобученных наиболее часто используемых глубоких моделей. Проведено исследование киберустойчивости моделей компьютерного зрения к наиболее популярным видам состязательных атак. Предложены методы повышения надёжности моделей.

**Постановка задачи.** Необходимо обучить наиболее современные модели для визуальной классификации изображений и протестировать их по метрикам точности, скорости и размеру модели. Математическая постановка задачи распознавания объектов в кадрах видеопотока приведена в работах [1; 12; 13].

Пусть имеются: множество образов  $\omega \in \Omega$ , заданных признаками  $x_i, i = \overline{1, n}$ , совокупность которых для образа  $\omega$  представлена векторными описаниями  $\Phi(\omega) = (x_1(\omega), x_2(\omega), \dots, x_n(\omega)) = \mathbf{x}$ ; множество классов  $\mathbb{B} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_c\}$ , где  $c$  – количество классов. Априорная информация представлена обучающим множеством (датасетом)  $\mathbb{D} = \{(\mathbf{x}^j, \beta^j)\}, j = \overline{1, L}$ , заданным таблицей, каждая строка  $j$  которой содержит векторное описание образа  $\Phi(\omega)$  и метку класса  $\beta_k, k = \overline{1, c}$ . Заметим, что обучающее множество характеризует неизвестное отображение  ${}^*F: \Omega \rightarrow \mathbb{B}$ .

Требуется по имеющимся кадрам  $I_t$  непрерывного видеопотока  $V = (I_1, \dots, I_t, \dots, I_T)$  решить задачу распознавания образов: обнаружить образы  $\omega$  в виде оценки признаков  $\tilde{\mathbf{x}}$  с помощью отображения  $F_1: I_t \rightarrow \tilde{\mathbf{x}}$  и классифицировать их с использованием отображения  $F_2: \tilde{\mathbf{x}} \rightarrow \beta_k, k = \overline{1, c}$  в соответствии с заданным критерием  $P(\tilde{\mathbf{x}})$ , минимизирующим вероятность ошибки.

Таким образом, необходимо найти отображение  $F_1: I_t \rightarrow \beta_k$ , при котором  $F$  является набором функций и алгоритмов  $f_i, i = \overline{1, N_f}$ .

В качестве критерия эффективности будут использоваться общепринятые метрики для оценки качества классификатора: Accuracy, Precision, Recall,  $F$ -мера.

Целью состязательных атак на изображения является генерация нового изображения путём небольшого изменения исходного. Изменение происходит таким образом, чтобы максимизировать функционал ошибки модели машинного обучения.

Задача атаки с использованием состязательных примеров может быть сформулирована следующим образом. Для каждого  $I_t$ , принадлежащего некоторому классу  $\beta_k$ , необходимо определить такую функцию  $G$ , аддитивно изменяющую оригинальное изображение с заданным коэффициентом  $\epsilon$ , таким образом реализуя отображение  $G: I_t \rightarrow {}^G I_t$ , где  ${}^G I_t$  – сгенерированное изображение  ${}^G I_t = I_t + \epsilon$ .

Атака будет успешной при выполнении следующего условия: выполняется ошибочная классификация при  $F(I_t) \neq F({}^G I_t)$  минимальной  $\epsilon$ , гарантирующей визуальную неотличимость изображения  $I_t$  от  ${}^G I_t$ .

**Обучение классификаторов для распознавания.** Для обучения и тестирования классификаторов использовался датасет KTH handtool (см. рис. 1), содержащий 5559 изображений 3 классов инструментов: молоток, плоскогубцы и отвёртка – в разном освещении и в разных местах. Каждый из классов разбивается на подклассы.

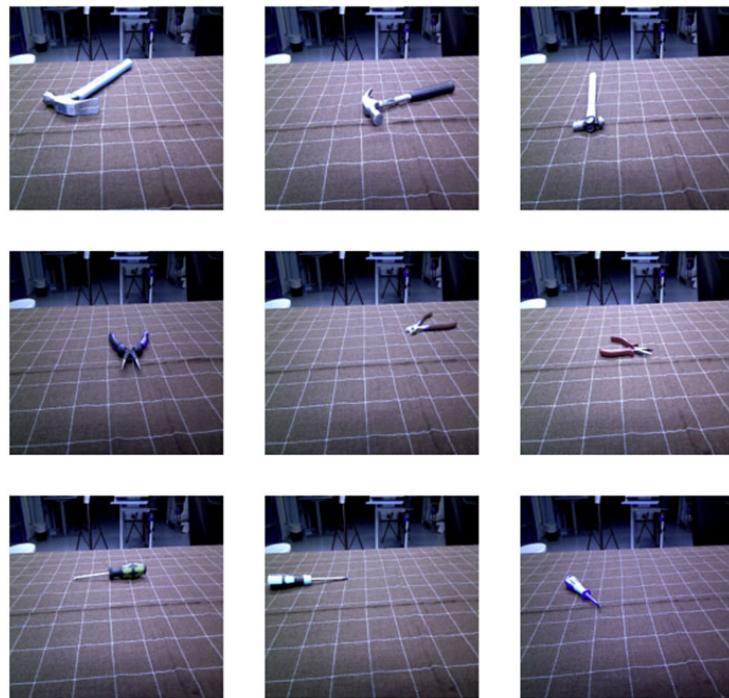


Рис. 1. Примеры изображений из датасета KTH handtool

В качестве базовых моделей используются следующие: MobileNetV3, EfficientNetB0, EfficientNetB3, EfficientNetV2. Архитектуры MobileNet и GhostNet подробно описаны в работах [12; 14].

Дальнейшее развитие ИИ послужило к разработке метода Neural architecture search (NAS). NAS использовался для проектирования сетей, которые соответствуют или превосходят по производительности созданные вручную архитектуры.

EfficientNet – класс новых моделей, который получился при изучении масштабирования (скейлинг, scaling) моделей и балансирования между собой глубины и ширины (количества каналов) сети, а также разрешения изображений в сети. Авторы статьи [15] предлагают новый метод составного масштабирования (compound scaling method), который равномерно масштабирует глубину/ширину/разрешение с фиксированными пропорциями между ними (см. рис. 2).

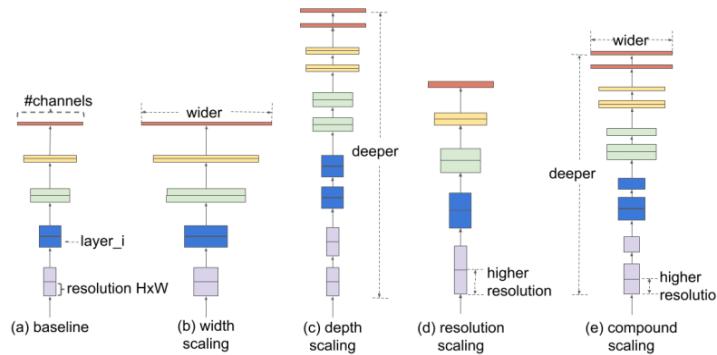


Рис. 2. Масштабирование EfficientNet

Чтобы улучшить работу нейросети, исследователи [16] выбирали начальную архитектуру (см. рис. 3) автоматически с помощью методов AutoML. Так были построены EfficientNet-B1 – EfficientNet-B7 с целым числом в конце имени, указывающим значение составного коэффициента.

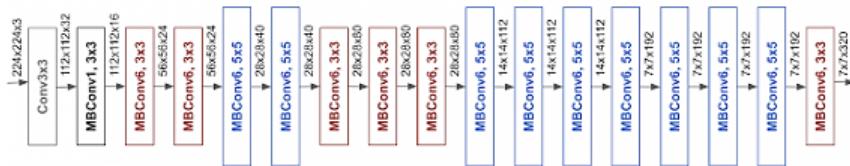


Рис. 3. Архитектура EfficientNet

EfficientNetV2 [17] (см. рис. 4) имеет более высокую скорость обучения и лучшую эффективность параметров, чем предыдущие модели данного класса EfficientNet. Данная архитектура имеет ряд важных отличий по сравнению с предыдущим поколением:

- используется как MBConv слой, так и недавно добавленный слой fused-MBConv на ранних уровнях;
- используется меньший коэффициент расширения для MBConv, что позволяет снизить накладные расходы на доступ к памяти.

С использованием тестирующей выборки, полученной из датасета, был проведён эксперимент на оборудовании со следующими параметрами: ЦПУ Intel Core i7-5820K, ГПУ 1080 Ti. Проведено сравнение эффективности описанных нейронных сетей с точки зрения стандартных метрик качества классификации.

Stage	Operator	Stride	#Channels	#Layers
0	Conv3x3	2	24	1
1	Fused-MBConv1, k3x3	1	24	2
2	Fused-MBConv4, k3x3	2	48	4
3	Fused-MBConv4, k3x3	2	64	4
4	MBConv4, k3x3, SE0.25	2	128	6
5	MBConv6, k3x3, SE0.25	1	160	9
6	MBConv6, k3x3, SE0.25	2	256	15
7	Conv1x1 & Pooling & FC	-	1280	1

Рис. 4. Архитектура EfficientNetV2-S

**Атаки на обученные модели.** Как правило, выделяют следующие виды состязательных атак [18]: FGSM, BIM, DeepFool, JSMA, CW, PGD. При этом FGSM (fast gradient sign method) является простым методом, который делает один шаг в направлении градиента:

$$\mathbf{I}_t = \mathbf{I}_t + \varepsilon * \text{sign}(\nabla_k J(\mathbf{I}_t, \beta_k)),$$

где  $J$  – функция потерь;  $\epsilon$  – множитель для обеспечения малых возмущений.

Таблица 1

## Сравнительный анализ работы алгоритмов

Модель	Метрики			
	Prec.	Recall	f1-score	Acc.
MobileNetV3	0.974	0.972	0.973	0.973
EfficientNetB0	0.9973	0.997	0.997	0.997
EfficientNetB3	0.960	0.956	0.957	0.958
EfficientNetV2	0.996	0.996	0.996	0.996

Фактически для генерации состязательного примера мы прибавляем шумовую карту к исходному изображению с некоторым  $\epsilon$  (см. рис. 5).

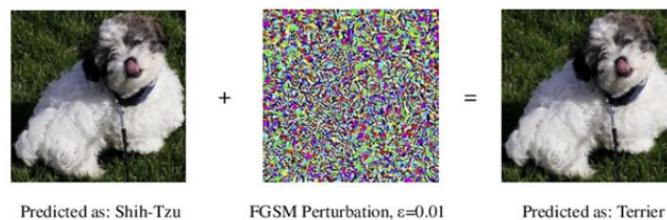


Рис. 5. Генерация изображения с использованием карты шумов

Для эксперимента были получены состязательные изображения из KTH handtool путём добавления шумов с порогами [0, .05, .1, .15, .2, .25]. На рис. 6 приведены примеры сгенерированных изображений.

Каждая из обученных моделей была подвергнута FGSM-атаке. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

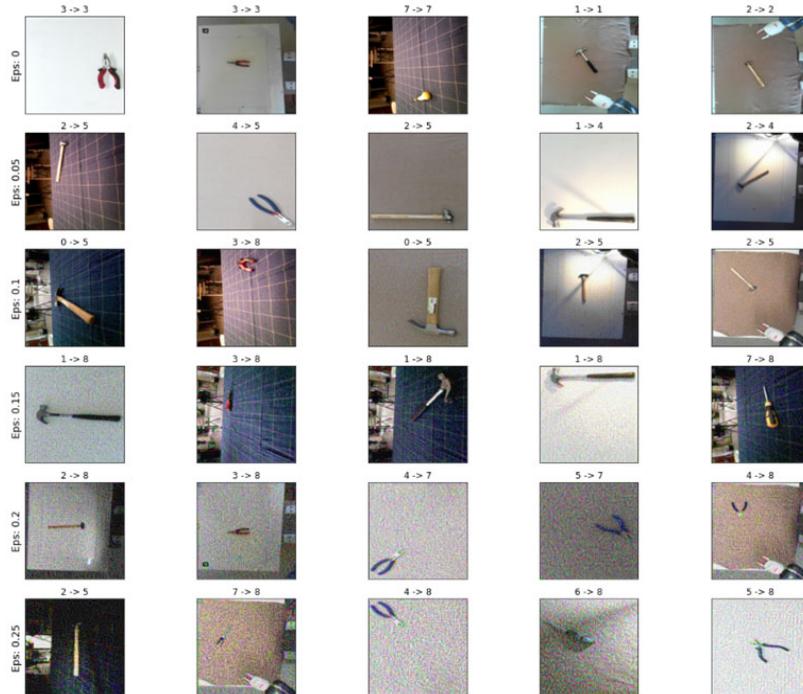


Рис. 6. Сгенерированные изображения KRH handtool путём добавления шумов



Результаты эксперимента FGSM-атаки

Порог	Метрики	Модели			
		MobileNetV3	EfficientNetB0	EfficientNetB3	EfficientNetV2
0	Acc.	0.973	0.997	0.958	0.996
	f1	0.973	0.997	0.957	0.996
0.01	Acc.	0.272	0.532	0.423	0.343
	f1	0.265	0.543	0.417	0.354
0.05	Acc.	0.186	0.228	0.183	0.193
	f1	0.124	0.193	0.137	0.197
0.1	Acc.	0.127	0.192	0.151	0.163
	f1	0.041	0.136	0.089	0.174
0.15	Acc.	0.125	0.175	0.131	0.167
	f1	0.042	0.111	0.091	0.169
0.2	Acc.	0.128	0.157	0.102	0.149
	f1	0.042	0.091	0.054	0.129

**Вывод по результатам моделирования.** Как мы видим, даже небольшие целенаправленные шумы способны сделать SOTA-модель бесполезной. Стоит учитывать, что FGSM-атака требует наличия доступа к самой модели, однако существуют методы, способные генерировать состязательные примеры более эффективно. Большинство из используемых моделей для задач распознавания образов основано на сверточных операциях. Однако в статье [19] представлено использование трансформеров для классификации изображений. Одним из перспективных направлений дальнейшей работы является исследование устойчивости трансформеров к различным видам состязательных атак.

**Заключение.** Приведён сравнительный анализ эффективности популярных нейросетевых архитектур распознавания изображений для задачи классификации инструмента. Представлены и проанализированы результаты исследований устойчивости разноплановых моделей к состязательным атакам. Полученные в ходе данного исследования результаты и выводы позволяют уточнить разделы информационной безопасности, связанные с использованием моделей для задач промышленной робототехники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов, О. С. Вычислительный метод распознавания ситуаций и объектов в кадрах непрерывного видеопотока с использованием глубоких нейронных сетей для систем контроля и управления доступом / О. С. Амосов, С. Г. Амосов, С. В. Жиганов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2020. – № 5. – С. 73-88.
2. Амосов, О. С. Локализация человека в кадре видеопотока с использованием алгоритма на основе распространенного нейронного газа и нечеткого вывода / О. С. Амосов, Ю. С. Иванов, С. В. Жиганов // Компьютерная оптика. – 2017. – № 1. – С. 46-58.
3. MCube Lab Manipulation and Mechanisms Laboratory at MIT // The MCube Lab – Tool Use Dataset: [сайт]. – URL: <https://mcube.mit.edu/tool-use/> (дата обращения: 25.12.2022). – Текст: электронный.
4. Штехин, С. Е. Разработка алгоритма распознавания движений человека методами компьютерного зрения в задаче нормирования рабочего времени / С. Е. Штехин, Ю. К. Иванова // Труды ИСП РАН. – 2020. – № 32. – С. 121-136.
5. Mancini M. et al. Kitting in the wild through online domain adaptation // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2018. – P. 1103-1109.
6. Cheng, L., Target-tools recognition method based on an image feature library for space station cabin service robots / L. Cheng, Z. Jiang, H. Li, B. Wei, Q. Huang // Robotica. – 2016. – № 34. – P. 925-941.
7. Tee K. P. Towards Emergence of Tool Use in Robots: Automatic Tool Recognition and Use Without Prior Tool Learning / K. P. Tee, J. Li, L. T. Pang Chen, K. W. Wan and G. Ganesh // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2018. – № 1. – P. 6439-6446.

8. Chukhnov A. P. Algorithms for Detecting and Preventing Attacks on Machine Learning Models in Cyber-Security Problems / A. P. Chukhnov, Y. S Ivanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 1. – P. 2096.
9. Akhtar N. et al. Advances in adversarial attacks and defenses in computer vision: A survey // IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – P. 155161-155196.
10. Chawla H. et al. Adversarial attacks on monocular pose estimation // 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2022. – Р. 12500-12505.
11. Амосов, О. С. Сетевая классификация атак в задачах информационной безопасности на основе интеллектуальных технологий, фрактального и вейвлет-анализа / О. С. Амосов, Д. С. Магола, С. Г. Баена // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № IV-1 (32). – С. 19-29.
12. Ivanov Y. S. Intelligent Deep Neuro-Fuzzy System of Abnormal Situation Recognition for Transport Systems / Y. S. Ivanov, S. V. Zhiganov, T. I. Ivanova // Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. – 2021. – № 1. – P. 224-233.
13. Amosov O. S. Recognition of Abnormal Traffic Using Deep Neural Networks and Fuzzy Logic / O. S. Amosov, Y. S. Ivanov and S. G. Amosova // Vladivostok: 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019. – P. 1-5.
14. Ivanov Y. S. Comparative Analysis of Deep Neural Networks Architectures for Visual Recognition in the Autonomous Transport Systems / Y. S. Ivanov, S. V. Zhiganov, N. N. Liubushkina // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 1. – P. 2096.
15. Tan M., Le Q. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks // International conference on machine learning. – PMLR, 2019. – P. 6105-6114.
16. Tan M., Le Q. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks // International conference on machine learning. – PMLR, 2019. – P. 6105-6114.
17. Tan M., Le Q. Efficientnetv2: Smaller models and faster training // International conference on machine learning. – PMLR, 2021. – P. 10096-10106.
18. Behnia F. et al. Code-bridged classifier (cbc): A low or negative overhead defense for making a cnn classifier robust against adversarial attacks // 2020 21st International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED). – IEEE, 2020. – P. 27-32.
19. Dosovitskiy A. et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale // arXiv preprint arXiv: 2010. 11929. – 2020.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**  
**MECHANICAL ENGINEERING**

**Сапожник К. Р., Божоев И. Ч., Башков О. В.**  
**K. R. Sapozhnik, I. Ch. Bozhoev, O. V. Bashkov**

**ВЛИЯНИЕ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА СТРУКТУРУ  
И МИКРОТВЁРДОСТЬ СТАЛИ 45**

**INFLUENCE OF SUPERMULTI-CYCLE LOADING ON STRUCTURE  
AND MICROHARDNESS OF STEEL 45**

**Сапожник Ксения Романовна** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sapozhnik\_k@list.ru.

**Ksenia R. Sapozhnik** – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-na-Amure, 27, Lenin Ave. E-mail: sapozhnik\_k@list.ru.

**Божоев Илгиз Чыныбаевич** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ilgiz.bojoev@gmail.com.

**Ilgiz Ch. Bozhoev** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: ilgiz.bojoev@gmail.com.

**Башков Олег Викторович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: bashkov\_ov@mail.ru.

**Oleg V. Bashkov** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Materials Science and Technology of New Materials Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Komsomolsk-on-Amur, Russia); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: bashkov\_ov@mail.ru.

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию структурных изменений и механических свойств стали 45 в условиях объёмной ультразвуковой обработки в режиме сверхмногоциклической усталости. Образцы из стали 45 подвергались циклическим испытаниям ультразвуковой установкой, созданной в лаборатории на базе ультразвукового генератора номинальной мощностью 1 кВт. В образцах, изготовленных по расчётной модели, возбуждались стоячие волны ультразвуковой частотой 20 кГц и осуществлялось растяжение-сжатие с максимальной амплитудой 203 МПа. Увеличение количества циклов ультразвукового воздействия приводит к увеличению микротвёрдости и структурным изменениям в зоне максимальных напряжений материала.

**Summary.** The paper is dedicated to the study of structural changes and mechanical properties of steel 45 in conditions of volume ultrasonic processing in the mode of very high cycle fatigue. Specimens of steel 45 were subjected to cyclic tests by an ultrasonic unit created in the laboratory on the basis of an ultrasonic generator with nominal output 1 kW. In the specimens made according to the calculation model stationary waves were excited at an ultrasonic frequency of 20 kHz and tension-compression were carried out with a maximum amplitude of 203 MPa. An increase in the number of cycles of ultrasonic exposure leads to an increase in microhardness and structural changes in the zone of maximum stresses material.

**Ключевые слова:** ультразвуковые колебания, сверхмногоцикловая усталость, упрочнение, плотность границ зёрен, микротвёрдость.

**Key words:** ultrasonic vibrations, very high cycle fatigue, hardening, grain boundary density, microhardness.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-452.2022.4).*

УДК 620.179.16

**Введение.** Воздействие ультразвука позволило интенсифицировать более тридцати технологических процессов, что стало возможным благодаря особенностям ультразвуковых колебаний. Его универсальность в применении к различным материалам, обусловленная способностью ультразвука проникать в любую упругую среду, способствовала появлению эффективных методов обработки материалов [1; 2]. На сегодняшний день наиболее перспективными направлениями исследований и применения технологии ультразвуковой обработки, сопровождающейся воздействием на структуру материалов, являются:

1. снятие остаточных напряжений ультразвуковой ударной обработкой сварного шва [3; 4];
2. повышение уравновешенности структуры в деформируемых материалах, а также в объёмных наноструктурированных материалах, полученных методами интенсивной пластической деформации [5; 6];
3. ультразвуковое ударное упрочнение, реализуемое по схеме поверхностного пластического деформирования [7; 8];
4. процесс сверхмногоцикловых испытаний материалов на усталость [9–11].

Большинство перечисленных методов обработки направлено на изменение поверхностных и приповерхностных слоёв. Несмотря на то что особенности воздействия на материал при создании в нём мощных ультразвуковых полей достаточно хорошо изучены, природа структурных изменений, происходящих при объёмном ультразвуковом воздействии при малых амплитудах колебаний, в настоящее время недостаточно раскрыта. Представление о совокупности процессов и механизмах их протекания в структуре материала с момента начала ультразвукового воздействия до разрушения материала можно получить, изучая поведение материалов в условиях сверхвысоких циклических испытаний на усталость, основанных на объёмном ультразвуковом воздействии.

В области мало- и многоцикловой усталости уже существуют определённые закономерности, выведенные из механических констант, благодаря которым можно предположить поведение материала. При циклическом нагружении в материале могут происходить процессы как упрочнения, так и разупрочнения. Характер процесса зависит от исходной структуры материала, величины амплитуды максимальных напряжений и продолжительности нагружения [12]. Тем не менее область изучения сверхвысокоциклического воздействия ультразвука и испытаний на сверхмногоцикловую усталость по-прежнему содержит много вопросов, касающихся кинетики структурных изменений и свойств материалов.

Следовательно, установление эффекта сверхвысокоциклического ультразвукового воздействия на структуру и свойства материалов при нагрузках, соответствующих напряжениям ниже предела выносливости, позволит выявить определённые закономерности изменения структуры, определить подходы к выбору параметров нагружения, при контроле которых можно добиться улучшения показателей необходимых свойств: упрочнения материала или снятия в нём напряжений. Полученные результаты могут быть полезны при разработке новых методов структурной модификации материалов, обработка которых затруднена традиционными механическими или термическими методами. Целью данной работы является изучение эффекта объёмного ультразвукового воздействия на структуру и механические свойства стали 45 в условиях сверхмногоциклического нагружения.

**Материалы и методы.** Исследуемым материалом является нормализованная сталь 45 в состоянии поставки. Все образцы изготовлены из одной партии стального проката. Химический состав и физические свойства материала приведены в табл. 1. Сталь 45 является широко используемым конструкционным материалом благодаря своим эксплуатационным свойствам при низкой стоимости. Высокая обрабатываемость позволяет легко варировать размеры изготавливаемых образцов.

Для обработки была спроектирована и изготовлена ультразвуковая установка. Основу установки составляют генератор типа ИЛ-10, магнитострикционный преобразователь и колебательная система, состоящая из ступенчатого рупора с прикреплённым к нему с помощью резьбового соединения образцом. Колебательная система спроектирована таким образом, чтобы обеспечить ре-

резонансное состояние элементов конструкции при рабочей частоте установки 20 400 Гц. Определение начальных геометрических размеров колебательной системы и характеристик напряжённого состояния ультразвукового концентратора и образца проводили в программном пакете Abaqus методом конечных элементов [13]. Собственные частоты, формы колебаний, распределение напряжений и амплитуды перемещений элементов ультразвуковой колебательной системы определялись моделированием.

Таблица 1

Свойства стали 45

Физические свойства			Химический состав, %					
Модуль Юнга $E$ , ГПа	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
207,3	7364	0,31	0,42...0,50	0,17...0,37	0,5...0,8	0,25	0,3	0,3

Геометрические размеры концентратора и образца, обеспечивающие ультразвуковые колебания системы в условиях резонанса, показаны на рис. 1. Размеры  $a$ ,  $b$ ,  $c$  выбраны исходя из резонансных свойств концентратора.

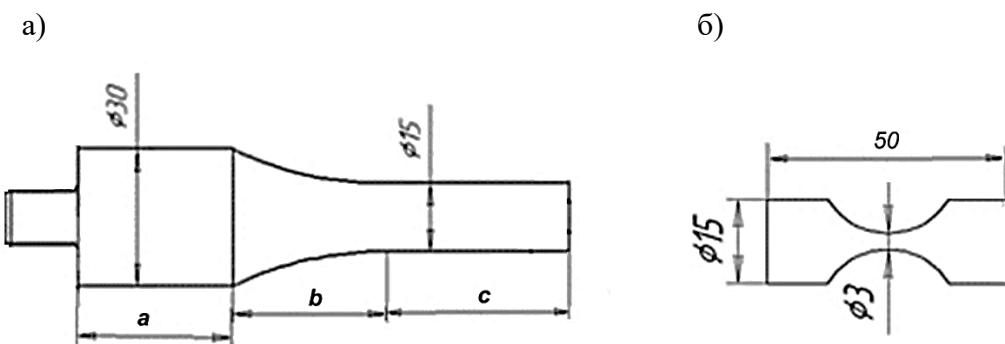


Рис. 1. Конфигурация элементов колебательной системы: а – концентратор; б – образец

Результат моделирования напряжённого состояния материала в элементах колебательной системы представлен на рис. 2.

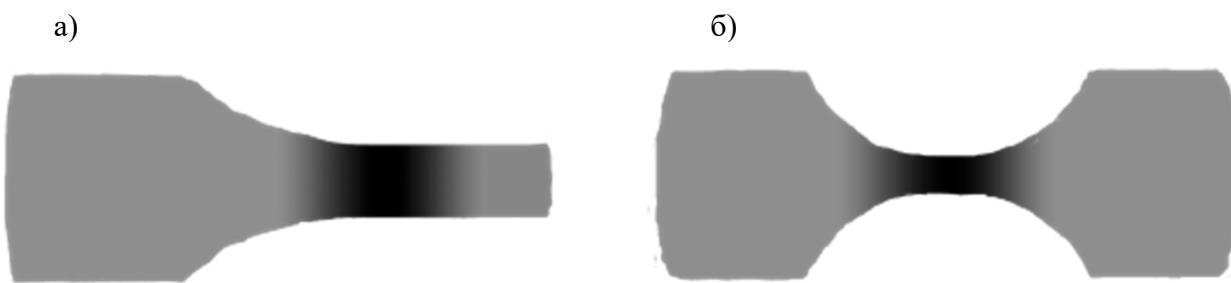


Рис. 2. Характеристики напряжённого состояния: а – концентратор; б – образец

Особенностями разработанной колебательной системы являются модернизированные конфигурации её элементов. Таким образом, имитированный ультразвуковой концентратор с катеноидальным переходом обеспечивал увеличение амплитуд сообщаемых образцу колебаний в 11,2 раза, чего нельзя было достичь за счёт использования традиционных форм (конической, экспоненциальной и т. п.). Конфигурация образца, также выполненного с катеноидальной формой рабочей части, обеспечивала наибольшее значение амплитуды напряжения в середине образца с

плавным снижением к краям образца, что позволяет сравнивать влияние сразу нескольких уровней напряжений на структуру материала [15].

После экспериментального определения уровня оптимального значения напряжения, при котором материал может выдержать без разрушения значительное число циклов, соответствующее значениям сверхмногоциклического нагружения, образцы были испытаны в следующем условии: максимальное напряжение в центре образца было выбрано 203 МПа. Получение экспериментальных значений частоты резонансной системы и значимых выходных параметров ультразвуковых колебаний осуществлялось с помощью высокоскоростного лазерного виброметра Polytec HCV-2000. На протяжении всего испытания контролировали температуру образца, чтобы не допустить её значительного превышения, которое могло бы повлиять на структурные изменения материала образца.

После ультразвуковой обработки образцы подвергались разрезке по центральной оси на две половины, шлифовке, полировке центральной части одной из половин в месте среза для последующего микроскопического анализа. Анализ микроструктуры проводили на микроскопе Nikon Eclipse MA200 при увеличении  $\times 400$ . Цифровые изображения микроструктур обрабатывали с помощью пакета программ Image-Pro.Plus-5.1.

Критерием количественной оценки при анализе микроструктуры материала служила плотность границ структурных элементов  $q_i$  [16], ранее широко применявшаяся при количественном анализе структурных изменений металлических материалов:

$$q_i = \frac{P_i}{F_i},$$

где  $P_i$  – периметр структурного элемента;  $F_i$  – площадь структурного элемента.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 3 показано распределение плотности границ зёрен в области минимальных напряжений, т. е. в области, удалённой от зоны максимальных напряжений в образце, и в зоне максимальных напряжений. Приведено распределение плотности границ зёрен  $q_i$  для образцов, подвергнутых испытаниям с разным числом циклов: исходное состояние без ультразвуковой обработки, испытания с числом циклов  $N = 2,4 \cdot 10^7$  и  $N = 3,94 \cdot 10^8$ .

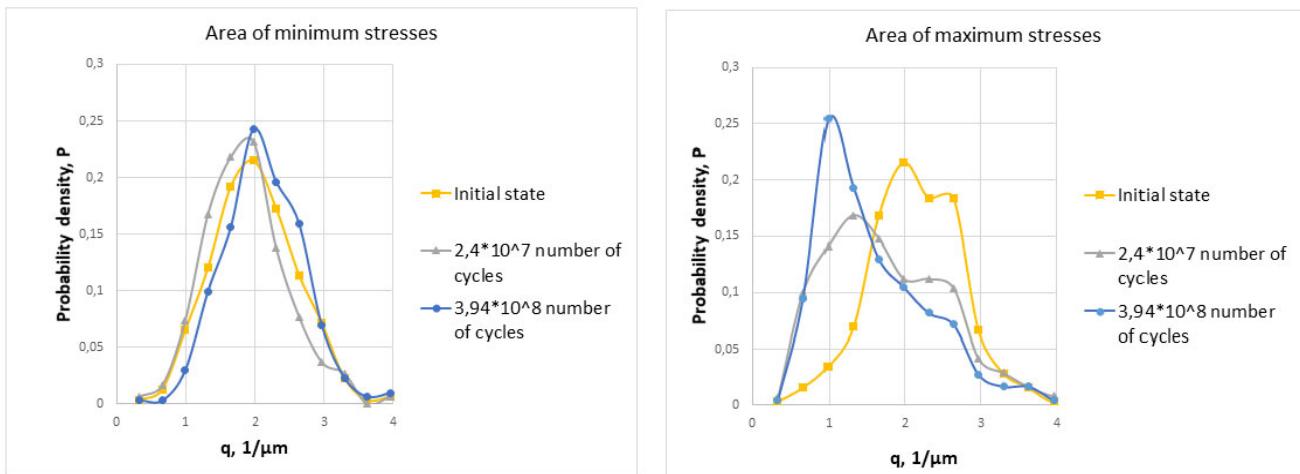


Рис. 3. Изменение плотности границ зёрен в областях максимальных и минимальных напряжений

По результатам количественной оценки распределения плотности границ зёрен  $q$  было установлено, что в зоне влияния минимальных напряжений ультразвукового воздействия (краевые части образцов) существенных структурных изменений не происходит даже при максимальном количестве циклов нагружения. Однако область максимальных напряжений (центр образца) характеризуется смещением пика распределения плотности границ зёрен из области  $q_i = 2,0 \dots 2,5 \text{ мкм}^{-1}$  в область

$q_i = 1,3 \dots 1,5 \text{ мкм}^{-1}$  для образца с числом циклов  $N = 2,4 \cdot 10^7$  и в область  $q_i = 0,9 \dots 1,1 \text{ мкм}^{-1}$  для образца с числом циклов  $N = 3,94 \cdot 10^8$ . Смещение пика распределения плотности границ зёрен в область меньших значений свидетельствует о том, что при ультразвуковом воздействии с заданным уровнем напряжения 203 МПа криволинейность границ зёрен снижается, в результате чего происходит снижение плотности границ зёрен. С увеличением числа циклов нагружения наблюдаемые структурные изменения становятся более выраженным – увеличивается значение пика распределения плотности границ зёрен.

Такие изменения в структуре приводили и к изменению механических свойств материала. Это было выявлено по результатам измерения микротвёрдости образцов вдоль продольной оси из области максимальных напряжений с шагом 1 мм (см. рис. 4). Повышение микротвёрдости наблюдалось в диапазоне до 3 мм от области влияния максимальных напряжений, что соответствовало уровню механических напряжений 157...203 МПа.

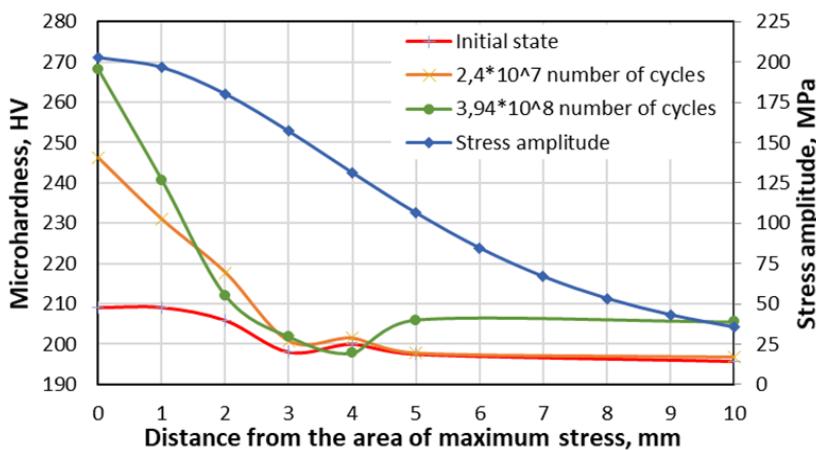


Рис. 4. Распределение напряжений и значений микротвёрдости, измеренных вдоль продольной оси образцов, начиная с области максимальных напряжений

При амплитудах напряжений менее 157 МПа (диапазон более 3 мм от центра образца) значения микротвёрдости соответствуют значениям микротвёрдости материала в исходном состоянии.

Таким образом, можно предположить, что воздействие ультразвукового циклического нагружения при напряжениях ниже 157 МПа приводит к незначительным структурным изменениям при сохранении значений показателей механических свойств. На рис. 5 видно, что структурные изменения, выявляемые параметром плотности границ зёрен, наблюдаются при напряжениях 106 МПа и выше. При более низких напряжениях плотность границ зёрен увеличивается, постепенно приближаясь к плотности границ зёрен в исходном состоянии стали.

По мере удаления от области максимальных напряжений медианное значение плотности границ зёрен увеличивается, и на расстоянии 10 мм приближается к значению, соответствующему исходному состоянию материала. Это подтверждает максимальную эффективность ультразвукового воздействия на структуру нормализованной стали 45 в состоянии поставки в диапазоне 157...203 МПа.

Микротвёрдость в области максимальных напряжений после обработки в течение  $N = 2,4 \cdot 10^7$  циклов увеличилась на 13 %, а после  $N = 3,9 \cdot 10^8$  циклов – на 31 % в сравнении со значениями микротвёрдости исходного состояния образца (см. рис. 4). Это свидетельствует о влиянии продолжительности низкоамплитудной ультразвуковой обработки на механические свойства средненеуглеродистой стали.

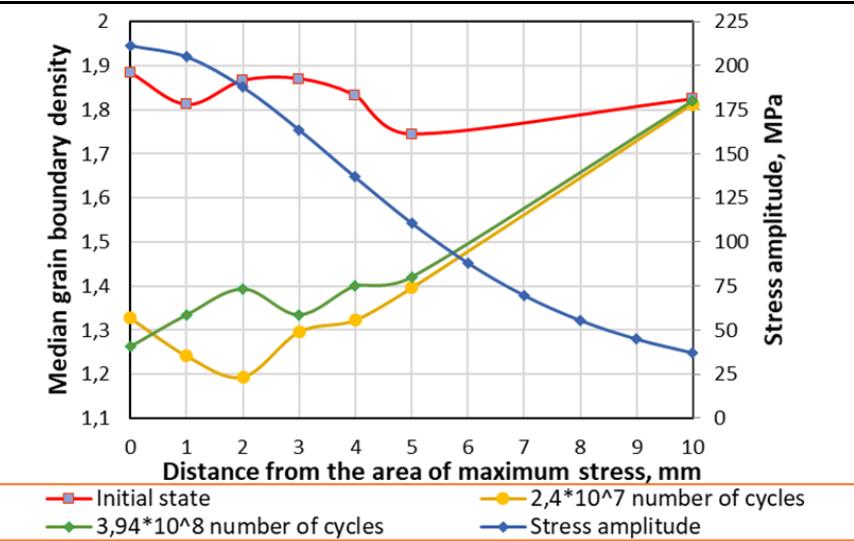


Рис. 5. Изменение средней плотности границ зёрен вдоль продольной оси образцов

**Вывод.** Сверхмногоцикловое нагружение рассматривалось как возможность изучения поведения материала в условиях ультразвукового объёмного воздействия при различном числе циклов и низких уровнях напряжений – от 203 МПа и ниже.

На основе количественного анализа микроструктур с использованием критерия плотности границ зёрен установлено, что границы зёрен при обработке материалов ультразвуковым воздействием сглаживаются и их плотность уменьшается. Изменения структурного состояния стали 45 под действием длительных малоамплитудных нагрузок привели к локальному повышению микротвёрдости стали 45 до 13 % при числе циклов  $N = 2,4 \cdot 10^7$  и до 31 % при количестве циклов  $N = 3,94 \cdot 10^8$ .

Установлено, что минимальный порог эффективных напряжений, способных вызвать существенные изменения в структуре стали 45, приводящие к повышению значений микротвёрдости, составляет не менее 157 МПа. Структурные изменения, приводящие к уменьшению плотности границ зёрен без изменения микротвёрдости, происходят в диапазоне 106...157 МПа.

На основании результатов данного исследования можно предположить, что такой подход к обработке материалов открывает большие перспективы для тех материалов, которые не поддаются обработке традиционными методами из-за их хрупкости, термоустойчивости (например, объёмные наноструктурные материалы, полученные методами жёсткой пластической деформации).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев [и др.]. – Бийск: Изд-во АГТУ, 2010. – 178 с.
2. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман; пер. с нем. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1957. – 728 с.
3. Зарезин, В. Е. Методика повышения качества сварных швов ультразвуковой ударной обработкой с обоснованием оптимальных параметров упрочнения поверхностного слоя / В. Е. Зарезин // Технико-технологические проблемы службы. – 2016. – № 4 (38). – С. 16-22.
4. Сидоров, М. М. Повышение прочности сварных соединений из низколегированных сталей ультразвуковой ударной обработкой / М. М. Сидоров, Н. И. Голиков // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2016. – № 1 (81). – С. 67-72.
5. Назаров, А. А. Обзор: неравновесные границы зёрен в объёмных наноструктурированных металлах и их восстановление под влиянием нагрева и циклической деформации / А. А. Назаров // Письма о материалах. – 2018. – Т. 8. – № 3. – С. 372-381.
6. Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов: учеб. пособие / О. Л. Гасанов, Е. С. Двилис, В. В. Полисадова, А. П. Зыкова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 148 с.



7. Чейлях, А. П. Перспективные технологии упрочнения при обработке материалов / А. П. Чейлях, Я. А. Чейлях, Ю. С. Самотутина. – Мариуполь: ООО «ППНС», 2016. – 378 с.
8. Артемьев, В. А. Упрочнение деталей ультразвуковой поверхностной пластической деформацией / В. А. Артемьев, Н. А. Крылова, В. Г. Шуваев // Материалы Международного симпозиума «Надёжность и качество». Т. 2. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2017. – С. 262.
9. Аномалии упругих свойств металлов при гигацикловом нагружении металлов и кинетика развития повреждений / М. В. Банников, И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Меркурий ПФРК. – 2017. – № 4. – С. 63-70.
10. S. Chengqi, S. Qingyuan, H. Yuanpei, W. Yujie, Effects of intermittent loading on fatigue life of a high strength steel in very highcycle fatigue regime, International Journal of Fatigue. 117 (2018) 9-12.
11. A. Tridello, D. Paolino, M. Rossetto, Ultrasonic VHCF Tests on Very Large Specimens with Risk-Volume Up to 5000 mm, Applied Sciences. 10 (2020).
12. Терентьев, В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов / В. Ф. Терентьев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 287 с.
13. Золочевский, А. А. Введение в Abaqus: метод. пособие / А. А. Золочевский, А. А. Беккер. – Харьков: Группа Бизнес Инвестор, 2011. – 47 с.
14. Лавриненков, А. Д. Расчёт амплитудно-частотных характеристик ультразвуковых преобразователей продольных и продольно-крутильных колебаний с использованием пакета Abaqus / А. Д. Лавриненков // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – № 6. – С. 957-968.
15. Сапожник, К. Р. Моделирование ультразвуковых концентраторов для обработки объёмных наноструктурных материалов / К. Р. Сапожник, О. В. Башков, М. Д. Борисенко // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 14 июня 2019 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 259-264.
16. Ким, В. А. Количественная оценка карбидной неоднородности быстрорежущих сталей с помощью компьютерной металлографии / В. А. Ким, О. В. Башков, А. А. Попкова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 105-111.

**Лепехина С. Ю.**  
**S. Yu. Lepikhina**

**РАЗВИТИЕ СТУДЕНЧЕСКОЙ НАУЧНОЙ И ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КНАГУ  
В 2022 ГОДУ**

**DEVELOPMENT OF STUDENT SCIENTIFIC AND PROJECT ACTIVITIES OF KNASU  
IN 2022**

**Лепехина Светлана Юрьевна** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: svetlanalepekhina.knastu@yandex.ru.

**Svetlana Yu. Lepikhina** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: svetlanalepekhina.knastu@yandex.ru.

**Аннотация.** В данной статье представлен обзор результатов реализации гранта от Минобрнауки России, представляющего собой комплекс студенческих мероприятий, направленных на популяризацию научной деятельности, а также на повышение научно-исследовательской активности студентов и абитуриентов. Описаны проведённые в рамках гранта мероприятия, а также деятельность активных студентов вне университета.

**Summary.** This article provides an overview of the results of the implementation of a grant from the Ministry of Education and Science of Russia, which is a set of student activities aimed at popularizing scientific activity, as well as at increasing the research activity of students and applicants. The activities carried out within the framework of the grant, as well as the activities of active students outside the university, are described.

**Ключевые слова:** грант, студенческое движение, студенческое научное общество, наука, Geek.Knastu.

**Key words:** grant, student movement, student scientific society, science, Geek.Knastu.

*Исследование проведено в рамках гранта в форме субсидий из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ.*

УДК 001

Государственная поддержка играет важную роль в развитии российской науки и высшего образования. Благодаря различным фондам и грантам от государства у научных организаций появляется возможность реализовать свои идеи и проекты мероприятий в жизнь, тем самым поддерживается научная и образовательная деятельность в стране. Регистрация на один из таких грантов стартовала 25 января 2022 года. В течение месяца все вузы страны, в которых действует студенческое научное движение, получили возможность подать заявку на участие в конкурсе СНО, в рамках которого Минобрнауки России распределило 100 млн рублей в виде грантов на поддержку студенческих сообществ для привлечения молодёжи в науку. Всего данный грант получили 40 студенческих сообществ, в том числе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Проект от университета под названием «Организация и проведение мероприятий, направленных на развитие научно-исследовательской деятельности обучающихся, в рамках Сети студенческих конструкторских бюро Geek.Knastu» подразумевал под собой комплекс студенческих мероприятий международного, всероссийского и регионального уровней, направленных на популяризацию научной деятельности, а также на повышение научно-исследовательской активности студентов и абитуриентов.



Сразу после объявления СНО Geek.Knastu Комсомольского-на-Амуре государственного университета победителем конкурса участники научного движения начали активную работу в рамках гранта. В первую очередь молодые учёные КнАГУ приняли участие в работе юбилейного X Всероссийского съезда советов молодых учёных. Научное сообщество вуза представляли председатель СНО Сеть студенческих конструкторских бюро Geek.Knastu, студент факультета энергетики и управления Даниил Грабарь и председатель Совета молодых учёных КнАГУ, доцент кафедры ЭПАПУ Сергей Сухоруков. На данном мероприятии поднимались такие темы для обсуждения, как популяризация науки и научных сообществ, принятие мер для вовлечения молодёжи в науку, существующая на данный момент система грантовой поддержки активных студентов и молодых учёных. По итогам съезда был проведён семинар-совещание руководителей студенческих научных обществ вузов региональных научно-образовательных консорциумов «Вернадский». В рамках семинара-совещания были подведены итоги конкурса Минобрнауки России на предоставление грантов в форме субсидий из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных обществ.

В начале семестра состоялось первое из серии запланированных мероприятий в рамках гранта – выставка пленэрных работ членов студенческого сообщества в области дизайна архитектурной среды. Организацией мероприятия занимались члены СПБ «Проектирование архитектурной среды» – студенты группы 0ДСб-1 (СНО Geek.Knastu), а руководителем пленэрных работ стала Член Союза художников России доцент кафедры «Дизайн архитектурной среды» Ольга Петровна Бескровная. На выставке были представлены пленэрные работы, посвящённые истории архитектуры города Комсомольска-на-Амуре. В ходе проведения выставки были выбраны лучшие работы, а их авторы были вознаграждены руководством факультета кадастра и строительства.

Следующим мероприятием в рамках гранта стало общественное онлайн-обсуждение с всероссийским участием «Threats to international peace and security caused by terrorist acts». Участие в мероприятии приняли студенты Комсомольского-на-Амуре государственного университета, Благовещенского государственного педагогического университета, Дальневосточного государственного университета путей сообщения, Государственного университета управления, Сибирского государственного университета путей сообщения. Во время обсуждения были подняты такие важные в нынешнее время темы, как проблема международного терроризма, политический экстремизм, эффективность международных организаций по борьбе с терроризмом и многие другие.

С 16 сентября по 14 октября 2022 г. в Комсомольском-на-Амуре государственном университете впервые состоялся конкурс научно-исследовательских публикаций среди студентов магистратуры и старших курсов специалитета. Целью конкурса была объявлена поддержка реализации плана Десятилетия науки и технологий. Представленные доклады были посвящены различным темам: технологии и оборудованию механической и физико-технической обработки, автоматизации и управлению технологическими процессами и производствами, математическому моделированию, численным методам и комплексам программ, теории и истории культуры. По итогам конкурса 13 работ из 38 были представлены к награждению.

Активная деятельность продолжилась на очном этапе II Международной научно-практической конференции молодых учёных «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению». Организаторами мероприятия была поставлена цель – дать возможность молодым учёным рассказать своё видение решения актуальных проблем современности в следующих областях:

- Фундаментальные и прикладные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий.
- Современные проблемы управления, обработки, хранения, передачи данных и защиты информации.
- Актуальные задачи математического моделирования и интеллектуального анализа данных.
- Современные проблемы материаловедения и химических технологий.
- Прогрессивные технологии и процессы в машиностроении.

- Актуальные проблемы транспортно-энергетического комплекса.
- Проблемы и перспективы развития авиационной и морской техники.

Участие в конференции приняли молодые учёные из различных регионов России (Пермского, Хабаровского и Приморского краёв, Москвы, Санкт-Петербурга, Саратовской, Тамбовской, Липецкой, Ивановской, Тюменской, Тверской, Новосибирской, Самарской областей, Республики Татарстан), а также иностранные молодые учёные из Белоруссии, Израиля, Сирийской Арабской Республики, Киргизии, Республики Союз Мьянма, Китайской Народной Республики. По итогам данной конференции КнАГУ опубликовал сборник научных трудов, принятых к публикации.

Сразу после завершения II Международной научно-практической конференции молодых учёных «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению» в стенах Комсомольского-на-Амуре государственного университета было объявлено начало II Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных с международным участием «Социальные и гуманистические науки в условиях вызовов современности». Организаторами конференции выступили Комсомольский-на-Амуре государственный университет и Министерство образования и науки Хабаровского края. В первый день проведения мероприятия состоялось пленарное заседание, в котором приняли участие представители научного сообщества вузов ДВФО. В ходе конференции были представлены доклады по шести темам:

- Культурно-историческое наследие народов России.
- Обеспечение национальной безопасности и правовое регулирование социальных процессов в условиях цифровизации общества.
- Лингвистика и межкультурные коммуникации.
- Образование и новые социальные вызовы в XXI веке: смыслы, трансформации и тенденции развития.
- Социально-экономические и политические процессы в современном обществе.
- Современные культурные процессы и практики.

В материалах работ были представлены результаты исследований молодых учёных университета, студентов и аспирантов, коллег из образовательных и научных учреждений, молодых сотрудников научно-исследовательских центров из 35 регионов РФ. Международное участие представлено участниками из Белоруссии, Азербайджана, Таджикистана. В конференции приняли участие учёные из новых субъектов РФ – Донецкого и Мелитопольского университетов.

С 10 по 12 ноября 2022 г. активными участниками студенческого научного сообщества КнАГУ «Сеть студенческих конструкторских бюро Geek.Knastu» был организован межрегиональный конкурс робототехнических проектов Arduinator-2022 и турнир-хакатон «Битва роботов». В рамках данного мероприятия школьники и абитуриенты представили свои проекты, а также приняли участие в турнире, где показали своё умение творчески и нестандартно решать технические задачи. Данное мероприятие предназначалось для завлечения школьников и абитуриентов в научную среду и активной агитации на участие в дальнейших научных и технических мероприятиях.

Не только организация международных и всероссийских научно-практических конференций и проведение научно-технических мероприятий являются задачами, поставленными перед Geek.Knastu. Важной частью реализации гранта стала организация участия студентов во внешних научных мероприятиях: научных и научно-практических конференциях, круглых столах, творческих конкурсах научно-технических разработок, выставках, в том числе международных, симпозиумах, научных семинарах, коллоквиумах.

Первой в активной деятельности вне университета приняла участие студентка 1-го курса магистратуры Светлана Лепехина, председатель СКБ «Промышленная робототехника». Получив приглашение на летнюю школу студенческих научных обществ (СНО), она с 29 по 31 августа 2022 г. представляла своё научное движение в Московском государственном университете. В рамках мероприятия были проведены лекции, семинары, тренинги и дискуссионные площадки для представителей студенческих научных обществ вузов России и зарубежных стран в преддверии нового учебного года.



С 5 по 8 сентября 2022 г. в г. Владивостоке состоялся VII Восточный экономический форум, призванный содействовать ускоренному развитию экономики Дальнего Востока и расширению международного сотрудничества в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Участие в данном мероприятии приняли студенты третьего курса факультета энергетики и управления Елизавета Ильченко и Ярослав Иванюта, активные участники студенческого научного сообщества КнАГУ «Сеть студенческих конструкторских бюро Geek.Knastu». В рамках данного мероприятия приглашённые студенты и молодые учёные смогли обсудить ключевые вопросы развития Дальнего Востока с крупнейшими международными экспертами.

Продолжением активного участия студентов в научных мероприятиях стал XXXI Международный смотр-конкурс лучших выпускных квалификационных работ по архитектуре, дизайну и искусству. От Комсомольского-на-Амуре государственного университета в данном мероприятии приняли участие члены СПБ «Проектирование архитектурной среды»: преподаватели факультета кадастра и строительства Н. В. Гринкруг, Д. Г. Сохацкая, Е. М. Димитриади и студентка Е. А. Чусова, активная участница студенческого научного сообщества КнАГУ «Сеть студенческих конструкторских бюро Geek.Knastu». В программу, помимо основного конкурса, вошли такие мероприятия, как IX Международная научно-практическая конференция «Пространственное развитие России: территория, город, здание» и Международный конкурс научной и учебно-методической литературы по архитектуре, дизайну и искусству. Студенты КнАГУ продемонстрировали высокий уровень подготовки специалистов, завоевав четыре диплома 1-й степени. В свою очередь, студентка Надежда Литвинова за работу «Дизайн-проект модульной системы нестандартных объектов в структуре общественных городских пространств» получила дополнительные награды – Диплом МАРХИ и Диплом высшей степени.

После завершения предыдущего мероприятия студентка факультета энергетики и управления КнАГУ и председатель СПБ «Бизнес и предпринимательство» Елена Бабинова приняла участие в международной выставке франшиз BUYBRAND EXPO 2022. Данное мероприятие проходило 27-29 сентября на площадке Центрального выставочного комплекса «Экспоцентр» в г. Москве. На выставке были рассмотрены вопросы создания франшизы и представлены принципы франчайзинга, а также организованы выступления востребованных специалистов.

Другой член СПБ «Бизнес и предпринимательство» студентка факультета энергетики и управления, магистрантка 1-го курса Дарья Андреевна Порохова приняла участие в работе Всероссийской научно-практической конференции «Дальний Восток России: новые возможности в меняющемся мире». В рамках данного мероприятия учащаяся выступила с докладом на тему «Формирование методики оценки уровня социально-экономического состояния и финансовой устойчивости муниципального образования» и приняла участие в дискуссионных площадках, посвящённых развитию экономики Дальнего Востока.

Участники СКБ «Беспилотные летательные аппараты» также проявили интерес к реализации гранта. Студенты приняли участие в 15-й Всероссийской студенческой научной школе «Аэрокосмическая декада», которая прошла на базе МАИ с 3 по 8 октября 2022 г. В рамках научной школы студенты КнАГУ Семён Боровской, Данил Пидорич, Алексей Загородний и Юрий Щербина выступали с докладами по тематике научной школы, участвовали в бизнес-играх и тренингах, прослушали выступления представителей промышленности.

Следующим в планах реализации гранта Министерства науки и высшего образования РФ стало участие студентки факультета кадастра и строительства, председателя СКБ «Риск-ориентированные методы решения задач техносферной безопасности» Анастасии Курьес в Международном экологическом фестивале «ЭКОфест», направленном на повышение экологической культуры граждан и развитие экологических инициатив студенческих объединений. На «ЭКОфесте» были организованы обсуждение практик со студенческими экологическими клубами, дискуссии с экспертами, «Зелёный» лекторий.

Подведя итоги в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ, сеть СКБ Geek.Knastu представила результаты своей деятельности на Всероссийском конкурсе «Лучшая практика студенческого самоуправления в образовательных организациях высшего образования»

в номинации «Лучшая практика в сфере развития научно-исследовательских инициатив студенчества», презентовав деятельность сети студенческих конструкторских бюро Geek.Knastu. По итогам успешного прохождения всех этапов конкурса и онлайн-защиты сеть СКБ Geek.Knastu стала победителем в своей номинации. Доклад о студенческом научном сообществе КнАГУ был представлен начальником отдела организации научных и проектно-конструкторских работ студентов Вячеславом Вадимовичем Солецким и председателем сети СКБ Geek.Knastu, магистрантом ФЭУ Даниилом Михайловичем Грабарем. На данный момент сеть Geek.Knastu насчитывает 16 студенческих конструкторских, научных и проектных бюро внутри вуза по различным направлениям, начиная с промышленной робототехники и заканчивая бизнесом и предпринимательством.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сеть студенческих конструкторских бюро Geek.Knastu // КнАГУ, 2019-2023. – URL: <https://geek.knastu.ru/> (дата обращения: 12.10.2022). – Текст: электронный.
2. Грант по поддержке студенческих научных сообществ // ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2014-2023. – URL: <https://knastu.ru/page/3705> (дата обращения: 12.10.2022). – Текст: электронный.

30 января 2023 года ушёл из жизни Почётный гражданин Комсомольска-на-Амуре, бывший директор Комсомольского-на-Амуре авиационного завода Виктор Иванович Меркулов.

Виктор Иванович родился в Комсомольске-на-Амуре 28 сентября 1945 года. В 19 лет он пришёл трудиться на Комсомольский авиационный завод слесарем цеха 90. После службы в армии в 1967 году он вернулся на авиационный завод и без отрыва от производства продолжил своё образование. В 1973 году Виктор Иванович окончил самолётостроительный факультет Комсомольского-на-Амуре политехнического института по специальности «Самолётостроение».

Всю свою жизнь Виктор Иванович посвятил авиастроению. На родном заводе он прошёл путь от слесаря до генерального директора.

На пост генерального директора он был назначен в трудное для страны и авиационной отрасли время, в 1994 году. Во многом благодаря Виктору Ивановичу завод выстоял, не растерял свой потенциал, создал базу для дальнейшего развития, сохранил рабочие места.

Виктор Иванович всегда уделял большое значение подготовке инженерных кадров для авиационного завода. Ещё будучи главным инженером завода, он возглавил государственную экзаменационную комиссию (ГЭК) самолётостроительного факультета и долгие годы лично участвовал в аттестации инженерных кадров. После назначения его генеральным директором он выступил с инициативой создать Попечительский совет университета, в который входили бы представители крупнейших предприятий города. Попечительский совет был создан в 1995 году, и до 2006 года Меркулов Виктор Иванович был бессменным председателем этого совета. Деятельность совета позволила в тяжёлые 90-е годы активизировать и координировать материально-техническую помощь университету, которую оказывали предприятия города.

Виктор Иванович был не только талантливым руководителем, профессиональным производственником, но и занимался научной работой. В 2000 году ему была присуждена учёная степень кандидата технических наук, затем доктора технических наук. Он являлся членом-корреспондентом Российской инженерной академии. Он вошёл в науку созданием самых совершенных боевых самолётов современности, организовал на предприятии систему научного обеспечения сложнейшего производства, сформировав инженерный центр и научно-производственный отдел. Занимался подготовкой кадров высшей квалификации – был членом диссертационного совета по специальности «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов».

Сотрудники университета ценили и уважали Виктора Ивановича. Он был награждён почётным знаком № 1 «За большие заслуги перед коллективом технического университета».

Труд Виктора Ивановича Меркулова на посту генерального директора был отмечен многими государственными наградами. Он является лауреатом Государственной премии в области науки и техники, лауреатом Национальной премии имени Петра Великого в номинации «Лучший руководитель государственного предприятия», награждён нагрудным знаком «Почётный авиастроитель». За значительный вклад в социально-экономическое развитие города в 2002 году ему было присвоено звание «Почётный гражданин города Комсомольска-на-Амуре».

Ректорат Комсомольского-на-Амуре государственного университета и все сотрудники университета выражают искренние соболезнования родным и близким Виктора Ивановича Меркулова. Память об этом замечательном гражданине Комсомольска-на-Амуре, России навсегда останется в наших сердцах.



# Содержание

## УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Андрianов И. К., Палков К. А., Чепурнова Е. К.

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ,  
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛОВ ЛОПАТОК ТУРБИН,  
НА ПРОЦЕСС РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН ОТРЫВА ..... 4

Андрianов И. К., Палков К. А., Чепурнова Е. К.

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ПРИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ  
МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАДАЧИ О ТРЕЩИНЕ ..... 9

Чепурнова Е. К., Андрianов И. К.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИБЫЛИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ  
НА СТОИМОСТЬ И КОЛИЧЕСТВО ПРОДАВАЕМЫХ УСЛУГ ..... 16

Табаров Б. Д., Одинаев З. И.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ДИСКРЕТНОМ ПОВЫШЕНИИ НАГРУЗКИ ..... 25

Голоколос Д. А., Ким К. К., Иванов С. Н., Бельский К. О.

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКРАНИРОВАННЫМ АСИНХРОННЫМ  
ДВИГАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО ОПИСАНИЯ ..... 31

Горьковый М. А., Егорова В. П., Соловьев В. А., Горьковый А. И., Мельниченко М. А.

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
РОБОТИЗИРОВАННЫМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ  
НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ..... 40

Жбанов В. А., Абарникова Е. Б.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СХОДСТВА ДВУХ ОБРАЗЦОВ  
НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ ДАННЫХ ..... 47

Колесник М. Б.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ГЕРМЕТИЧНОЙ ЗАДВИЖКИ  
В СРЕДЕ SIMINTECH ..... 54

Копытов С. М., Босхомджеев С. А.

ВЫБОР СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ МОЩНОГО СТАБИЛИТРОНА  
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МОДУЛЯТОРЕ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ  
ДИММИРУЕМОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ..... 60

Лепехина С. Ю., Сухоруков С. И., Давыдов Ю. А.

КОМПЛЕКС АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ТРЁХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ..... 68

Лисовец А. Е., Григорьев Я. Ю.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ..... 76

Ворощенко В. Д., Егорова В. П., Горьковый М. А.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА  
НА БАЗЕ АГЕНТНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ..... 85

Саяпина П. О., Ефремов М. А., Крупский Р. Ф., Азимов Х. Х.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ..... 94

Черный С. П., Охотников А. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТОЙ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
С ИНТЕГРАЦИЕЙ ВНУТРЕННИХ МОДУЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ ОПЕРАТОРА УМНОЖЕНИЯ ..... 101

Иванов Ю. С., Горьковый М. А., Грабарь Д. М.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДИКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ К СОСТАВАТЕЛЬНЫМ  
АТАКАМ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ..... 109

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Сапожник К. Р., Божоев И. Ч., Башков О. В.

ВЛИЯНИЕ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ НАГРУЗКИ  
НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЁРДОСТЬ СТАЛИ 45 ..... 116

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

Лепехина С. Ю.

РАЗВИТИЕ СТУДЕНЧЕСКОЙ НАУЧНОЙ  
И ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КНАГУ В 2022 ГОДУ ..... 123

ПАМЯТИ ВИКТОРА ИВАНОВИЧА МЕРКУЛОВА ..... 127

Научное издание

Учёные записки КнАГТУ

2023 № I (65)

Науки о природе и технике

Выпускающий редактор

С. Н. Иванов

Подписано в печать 24.03.2023

Дата выхода в свет 28.03.2023

Формат А4.

Бумага офисная 80 г/м<sup>2</sup>.

Усл. печ. л. 13,63.

Уч.-изд. л. 17,18.

Тираж 200. Заказ 30814

Отпечатано в типографии

КнАГУ

681013,

г. Комсомольск-на-Амуре,

пр. Ленина, д. 27.

