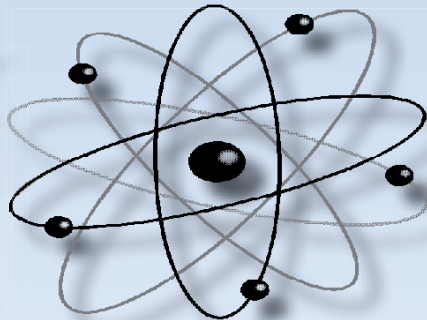


ISSN 2076-4359

# Учёные записки № VII-1 (47) 2020

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 = Učēnye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте 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:	<b>Алексей Иванович Евстигнеев</b> , д-р техн. наук, проф.
Заместитель главного редактора, ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»:	<b>Сергей Николаевич Иванов</b> , д-р техн. наук, доц.
Заместитель главного редактора, ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	<b>Галина Алексеевна Шушарина</b> , канд. филол. наук, доц.
Технический редактор:	<b>Татьяна Николаевна Карпова</b>
Дизайн и верстка:	<b>Приходченко Оксана Вадимовна</b> , канд. техн. наук
Менеджер информационных ресурсов:	<b>Андрианов Иван Константинович</b> , 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 (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф.);
3. Управление, вычислительная техника и информатика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Николаевич Иванов**, д-р техн. наук, доц., **Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
4. Математика и механика (**Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
5. Машиностроение (**Михаил Юрьевич Сариллов**, д-р техн. наук, доц., **Борис Николаевич Марьин**, д-р техн. наук, проф., **Борис Яковлевич Мокрицкий**, д-р техн. наук, доц., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
6. Металлургия и металловедение (**Владимир Алексеевич Ким**, д-р техн. наук, проф., **Олег Викторович Башков**, д-р техн. наук, доц.);
7. Флот и кораблестроение (**Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Виктор Михалович Козин**, д-р техн. наук, проф.);
8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (**Ирина Павловна Степанова**, д-р техн. наук, проф.);
9. Строительство и архитектура (**Николай Петрович Крадин**, д-р архитектуры, проф., член-корреспондент РААСН, **Олег Евгеньевич Сысоев**, д-р техн. наук, доц.).

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

Отделы:

1. Философия, социология и культурология (**Татьяна Алексеевна Чабанюк**, д-р культурологии, проф., **Виктория Юрьевна Прокофьева**, д-р филол. наук, проф., **Вера Ивановна Юдина**, д-р культурологии, доц., **Надежда Юрьевна Костюрина**, д-р культурологии, доц., **Илья Игоревич Докучаев**, д-р филос. наук, проф., **Александр Георгиевич Никитин**, д-р филос. наук, проф.);
2. Филология и искусствознание (**Олег Александрович Бузуев**, д-р филос. наук, проф.);
3. Психология и педагогика (**Татьяна Евгеньевна Наливайко**, д-р пед. наук, проф.);
4. Политология и право (**Владимир Александрович Смоляков**, д-р полит. наук);
5. История (**Жанна Валерьяновна Петрунина**, д-р ист. наук, проф.);
6. Экономика (**Геннадий Иванович Усанов**, д-р экон. наук, проф., **Елена Витальевна Кизиль**, д-р экон. наук, доц.).

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

ЦУЙ СЮЙ, профессор Шеньянского аэрокосмического университета (КНР)

##### **ЭНЕРГЕТИКА**

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

ИШТВАН ВАЙДА, доктор технических наук, профессор, директор Института автоматизации 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 КУЛЬНИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Мияки (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 автоматизации 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 металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

##### **ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

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

##### **НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

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 Шеньянского 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

КИРИЛЛ ЭМИЛЬЕВИЧ РАЗЛОГОВ, доктор искусствоведения, профессор, президент АНО «Новый институт культурологии»

##### **ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОВЕДЕНИЕ**

СВЕТЛАНА 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

**Соловьев В. А., Урасов Д. В.**  
**V. A. Solovyev, D. V. Urasov**

**АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЗАДАЮЩЕГО СИГНАЛА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
РАСХОДОМ ВОДЫ ЗОНЫ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО  
ЛИТЬЯ**

**ADAPTIVE FILTERING OF THE REFERENCE SIGNAL OF THE WATER FLOW CONTROL  
WITH THE HELP OF SYSTEM SECONDARY COOLING ZONE OF THE CONTINUOUS  
CASTING MACHINE**

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

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

**Урасов Дмитрий Владимирович** – начальник отдела АСУТП ООО «Амурсталь», доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: urasovdv@amurstal.com.

**Dmitry V. Urasov** – Head of the Automated Process Control System Department, Amurstal LLC, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: urasovdv@amurstal.com.

**Аннотация.** В статье рассматривается задача построения адаптивного фильтра задающего сигнала системы управления расходом воды зоны вторичного охлаждения заготовки машины непрерывного литья радиального типа, эксплуатируемой в ЭСПЦ металлургического предприятия «Амурсталь». Показано, что реализация такого фильтра возможна на основе модернизированного принципа фильтра скользящего среднего. Приведены результаты работы системы управления расходом воды при наличии предложенного адаптивного фильтра.

**Summary.** The article deals with the problem of constructing an adaptive filter for the reference signal of the water flow control system in the secondary cooling zone of the billet of a continuous casting machine of the radial type, operated in the ESPC of the Amurstal metallurgical enterprise. It is shown that the implementation of such a filter is possible on the basis of the modernized moving average filter principle. The results of the operation of the water flow control system in the presence of the proposed adaptive filter are presented.

**Ключевые слова:** заданная скорость разливки, текущая скорость разливки, кристаллизация металла, адаптивный фильтр, фазовая задержка сигнала, окно наблюдения, оценка поведения сигнала, отклонение сигнала, реализация программного блока.

**Key words:** specified casting speed, current casting speed, metal crystallization, adaptive filter, signal phase delay, observation window, signal behavior evaluation, signal deviation, implementation of a program block.

УДК 658.512:669.1

**Введение**

Традиционная технология непрерывного литья на сегодняшний день обеспечивает примерно 95 % разливаемой стали. Большие объёмы производства с использованием традиционной технологии предполагают уделение большего внимания совершенствованию и оптимизации используемых технологических процессов, поскольку внедрение новых технологических процессов требует значительно больших вложений [1; 2].



Для производства непрерывнолитой заготовки расплавленный металл подаётся в кристаллизатор. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) разливки регулирует скорость движения заготовки, изменяя скорость вращения роликов тянуще-правильного механизма (ТПМ), поддерживает необходимый уровень металла в кристаллизаторе. Этим обеспечивается заданная скорость разливки. Для охлаждения металла на каждом из шести ручьёв используются четыре зоны вторичного охлаждения (ЗВО), каждая из которых представляет комплекс водяных форсунок, пропорциональных клапанов и приборов измерения расхода воды [3–5].

В процессе разливки металла подача воды должна быть непрерывной, а производительность форсунок должна обеспечивать кристаллизацию металла.

Контроль и управление подачей воды в каждую зону осуществляется с помощью цифровой системы автоматического управления (САУ), реализующей ПИД-закон регулирования. В качестве источника задающего значения расхода воды выступает текущая скорость разливки, получаемая от системы управления ТПМ.

### Описание проблемы

Типичный график задающего значения расхода воды при старте ручья показан на рис. 1.

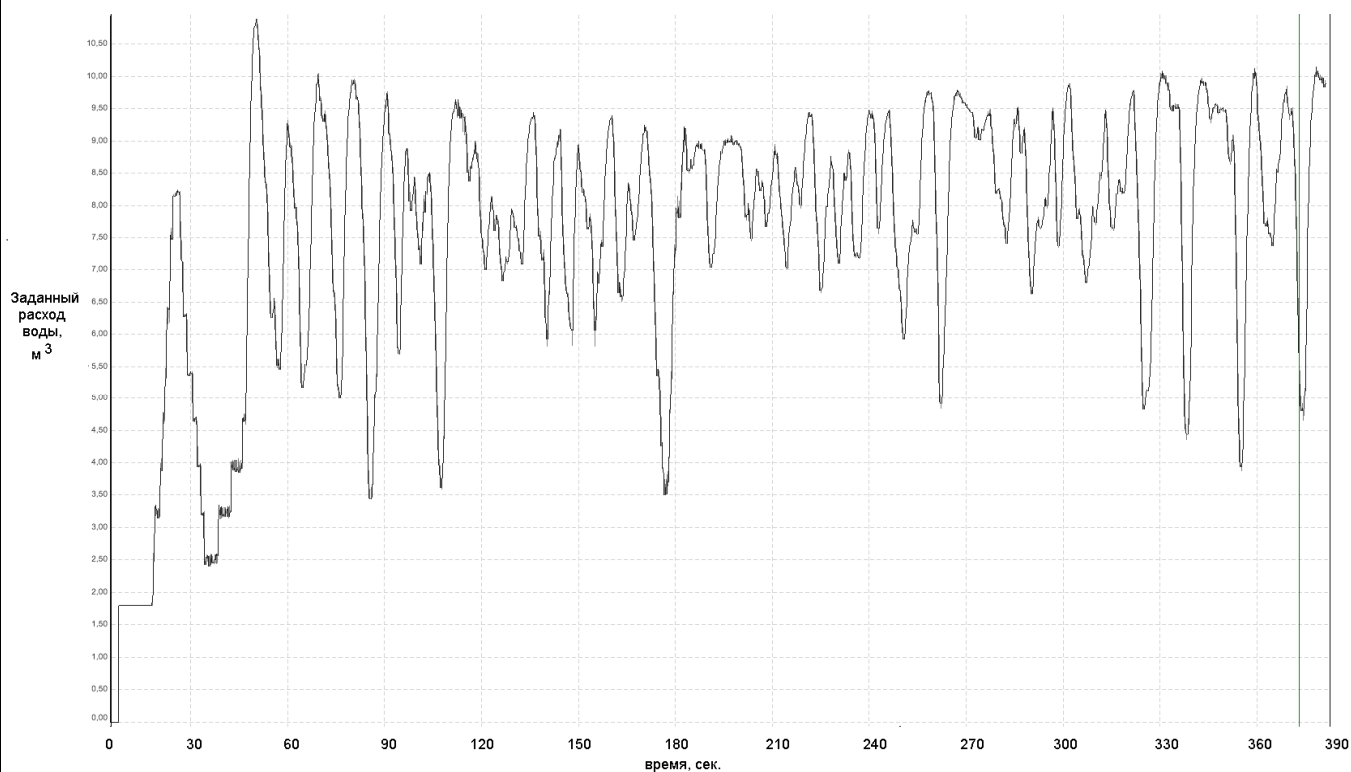


Рис. 1. Кривая задающего значения расхода воды

Приведённая на рис. 1 кривая свидетельствует о том, что на начальном этапе разливки скорость ручья достаточно быстро возрастает, а затем по мере разгона ручья скорость не стабилизируется, а совершает произвольные колебания, причём выделение некоего конкретного установившегося значения не просматривается. Такой характер изменения скорости разливки обеспечивает и соответствующий вид сигнала управления пропорциональными клапанами водяных форсунок. На рис. 2 приведена реальная кривая сигнала управления пропорциональным клапаном расхода воды одной из зон. САУ расходом воды зон вторичного охлаждения постоянно работает в квазиустановившемся режиме, заставляя пропорциональные клапана многократно переключаться, что приводит к увеличению их износа.

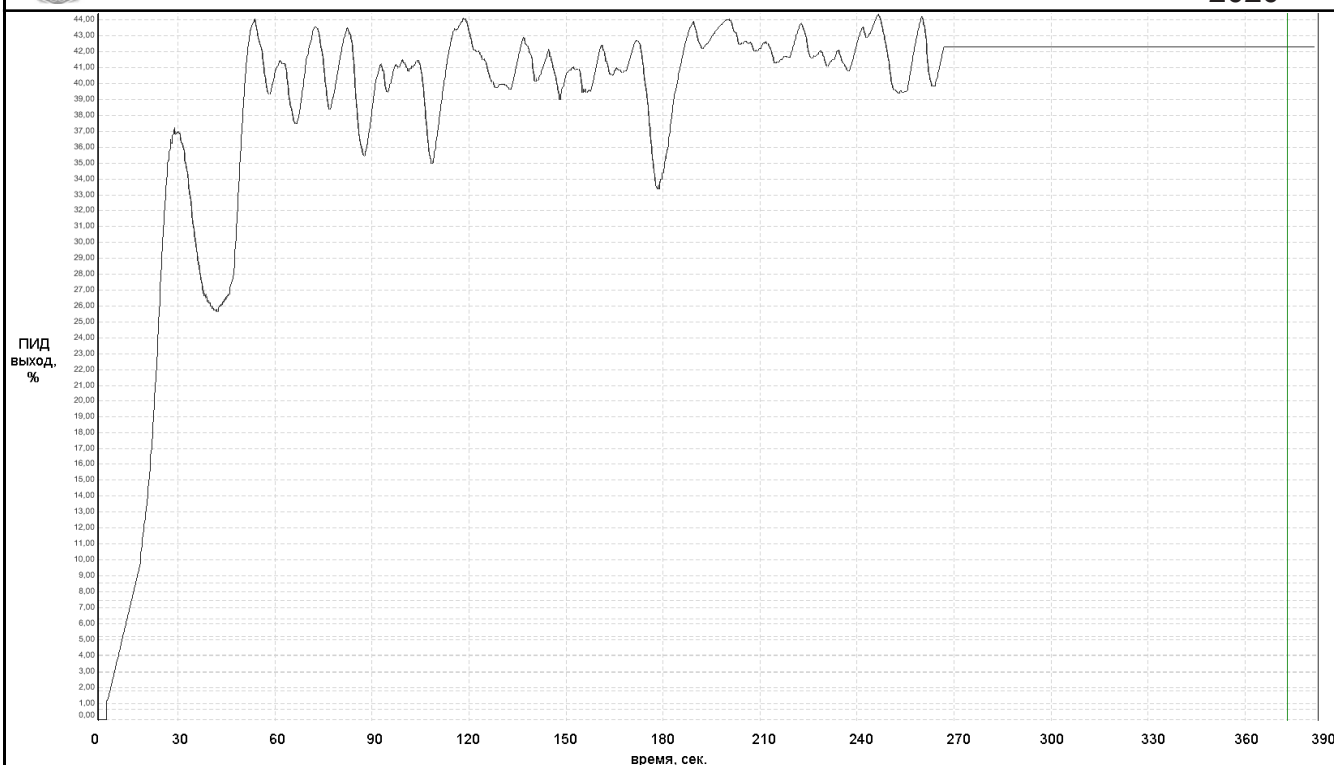


Рис. 2. Сигнал управления пропорциональным клапаном расхода воды

Фактически в установившемся режиме разливки достаточно поддерживать расход воды на определённом уровне. Лишь на начальном этапе разливки быстродействие и точность поддержания расхода воды имеют принципиальное значение. Поэтому на практике для снижения износа пропорциональных клапанов управления расходом воды технологический персонал по прошествии некоторого времени с момента начала разливки вынужден переходить на ручной режим управления пропорциональными клапанами ЗВО. На рис. 2 переключение на ручной режим произошло на 260-й секунде работы, при этом выходное значение сигнала ПИД-регулятора зафиксировано на уровне 42.1 %. Для демонстрации вышесказанного на рис. 3 приведён график расхода воды первой зоны вторичного охлаждения, соответствующий кривой изменения скорости разливки, изображённой на рис. 1.

Реализовать рациональный режим работы запорно-регулирующей аппаратуры в автоматическом режиме, увеличив тем самым её ресурс, можно было бы с использованием адаптивного ПИД-закона в контуре управления расходом, т.е. с применением ПИД-регулятора с изменяемыми коэффициентами: на начальном этапе разливки коэффициенты обеспечивали бы необходимые быстродействие и точность, а в установившемся режиме скорость реакции системы можно было бы замедлить.

Рассматриваемая АСУ ТП машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) построена на базе технических и программных средств фирмы SIEMENS. ПИД-регуляторы выполнены в виде закрытых программных блоков, изменить код которых не представляется возможным.

Другим вариантом решения проблемы может являться применение адаптивного фильтра между блоком формирования текущей скорости разливки и входами регуляторов САУ зон вторичного охлаждения. При этом данный фильтр должен исключить фазовую задержку сигнала на начальном этапе разливки и достаточно эффективно сгладить сигнал текущей скорости разливки в её установившемся режиме. Одним из требований к фильтру должна быть простота его реализации, обусловленная ограниченным быстродействием системы программного управления [6–9].



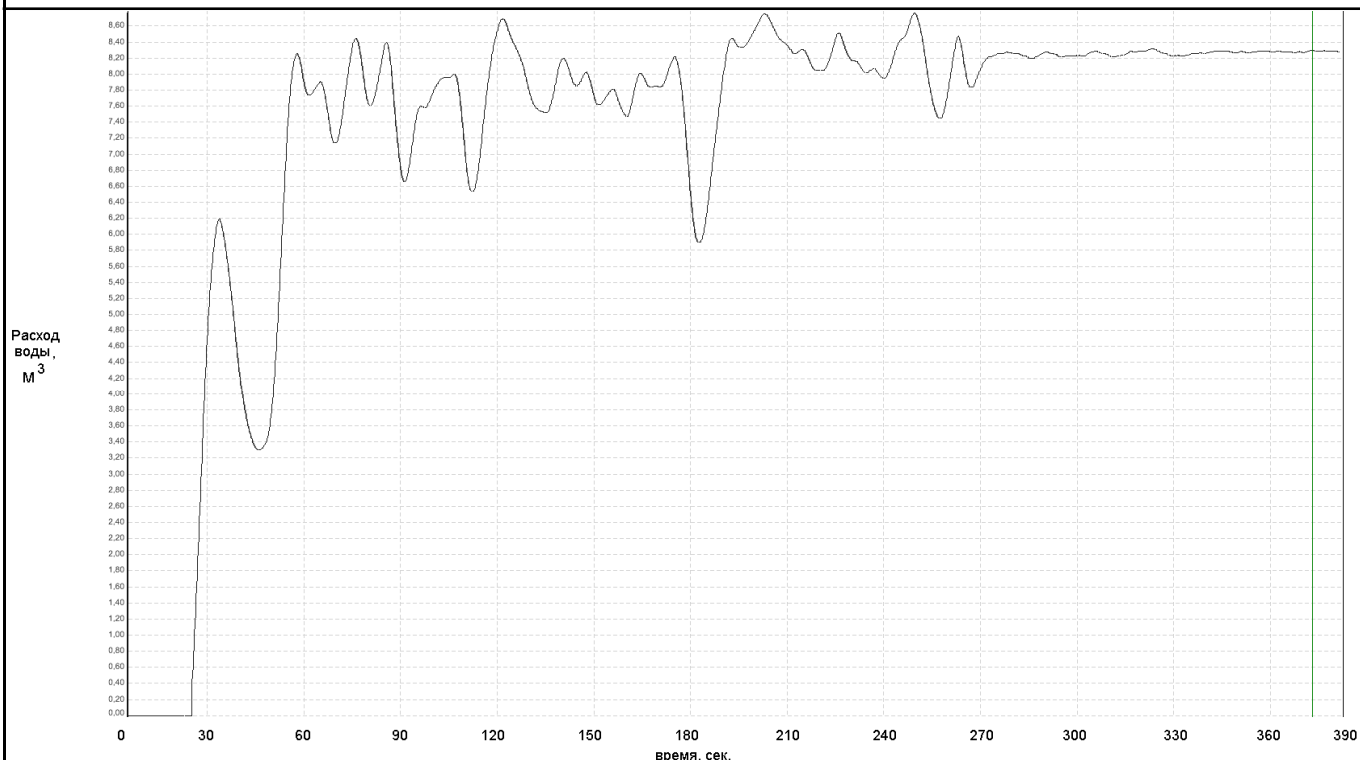


Рис. 3. График расхода воды зоны вторичного охлаждения

### Анализ графиков скорости разливки

Основной проблемой при реализации адаптивного фильтра является поиск критерия, по которому будут изменяться его коэффициенты.

Одним из первых рассмотренных вариантов в ходе решения задачи разработки фильтров стал фильтр скользящего среднего (см. рис. 4) [6]. Он прост в реализации, однако при небольшой ширине окна наблюдения качество фильтрации скорости разливки невысокое, а при расширении окна увеличивается запаздывание. Кроме того, расширение окна наблюдения требует дополнительного увеличения памяти для хранения промежуточных значений сигнала.

Однако, несмотря на выявленную невысокую эффективность, принцип фильтра скользящего среднего позволил сформировать модернизированный критерий, который показал свою эффективность при построении адаптивного фильтра.

Суть модернизации состояла в следующем. Во-первых, было принято решение использовать окно наблюдения для оценки поведения сигнала. При этом ширина окна наблюдения определялась экспериментально и была выбрана равной 131 точке, что соответствует продолжительности сигнала 13.1 с (шаг квантования используемой цифровой САУ равен 0.1 с). В окне наблюдения были рассчитаны:

- дисперсия и среднееквадратичное отклонение сигнала (см. рис. 5);
- интеграл сигнала полный и смещённый;
- энергия сигнала полная (см. рис. 6) и смещённая;
- мощность сигнала;
- локальные максимумы и минимумы (см. рис. 7).

Во-вторых, на основе анализа результатов моделирования были выделены два основных критерия, позволяющие дать оценку поведения сигнала на основании его предыдущих значений в окне наблюдения: полная энергия сигнала и значения локальных максимумов и минимумов сигнала в окне наблюдения.

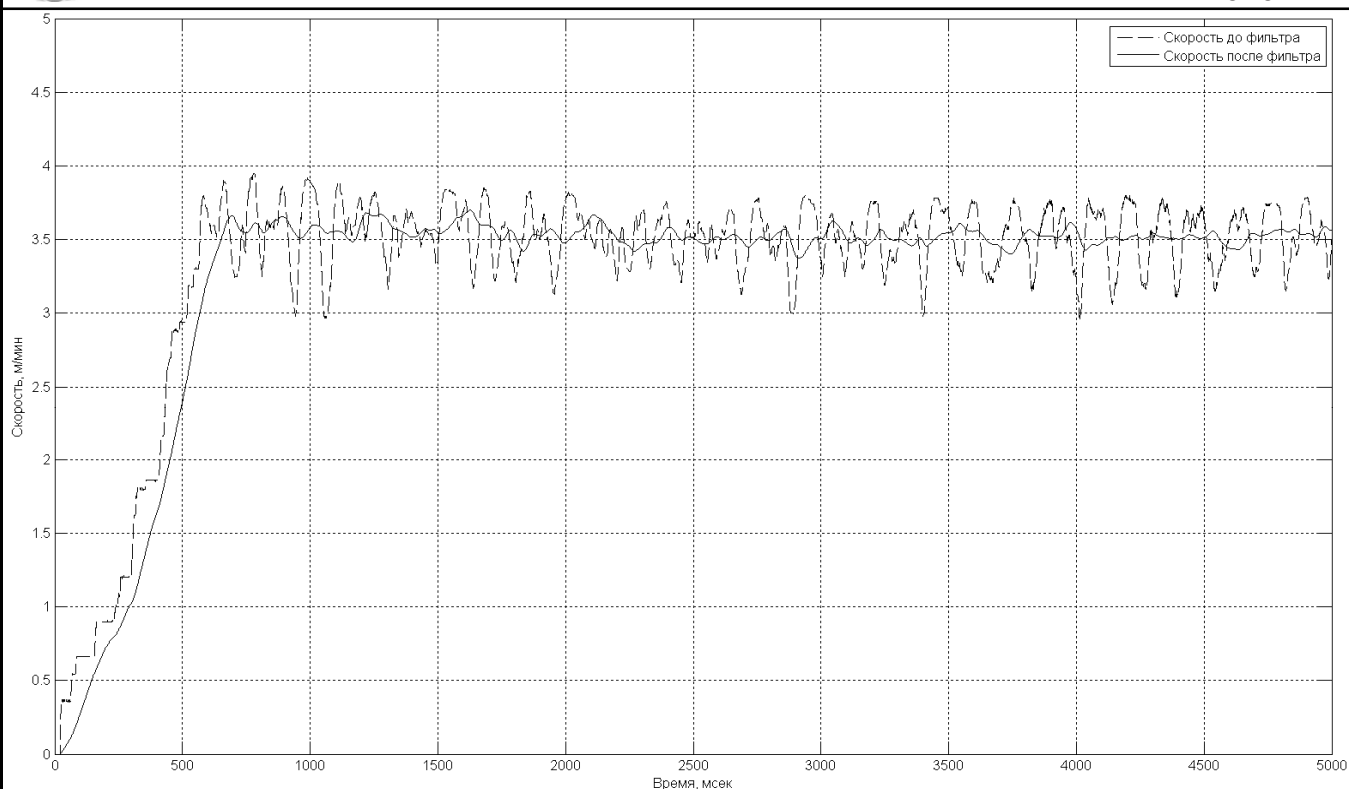


Рис. 4. Иллюстрация работы фильтра скользящего среднего

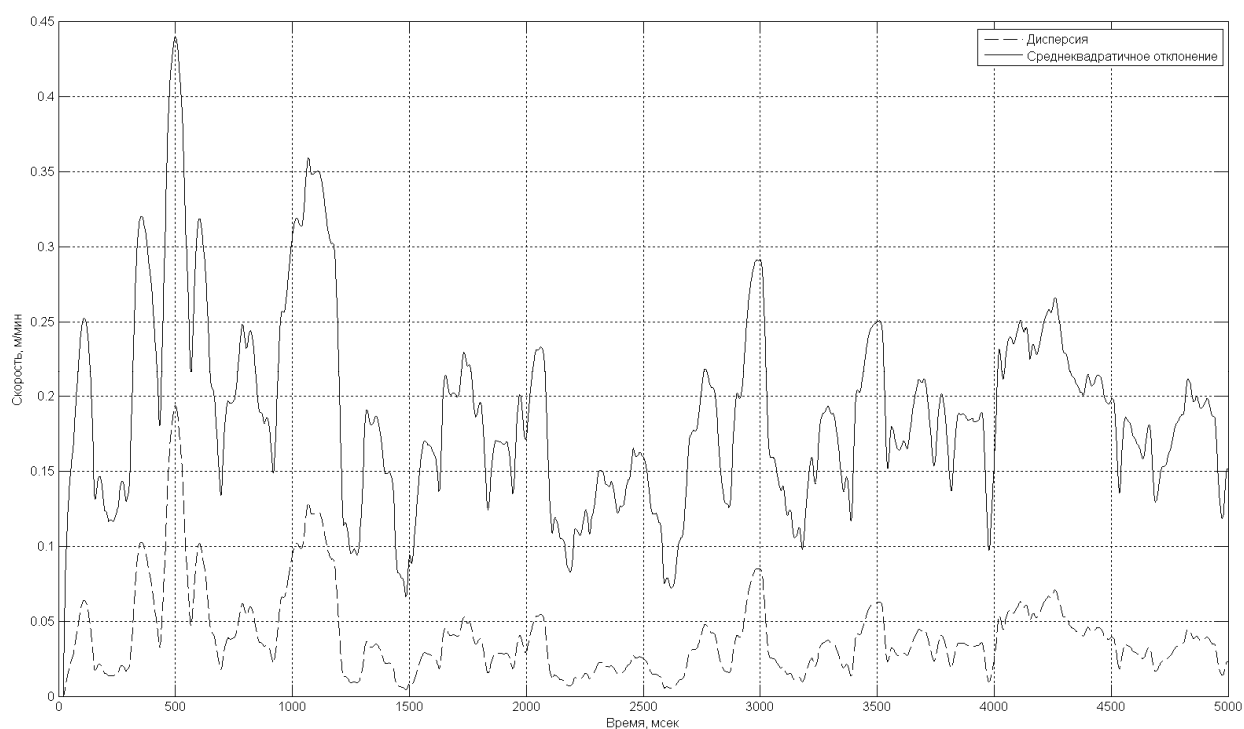


Рис. 5. Дисперсия и среднеквадратичное отклонение сигнала



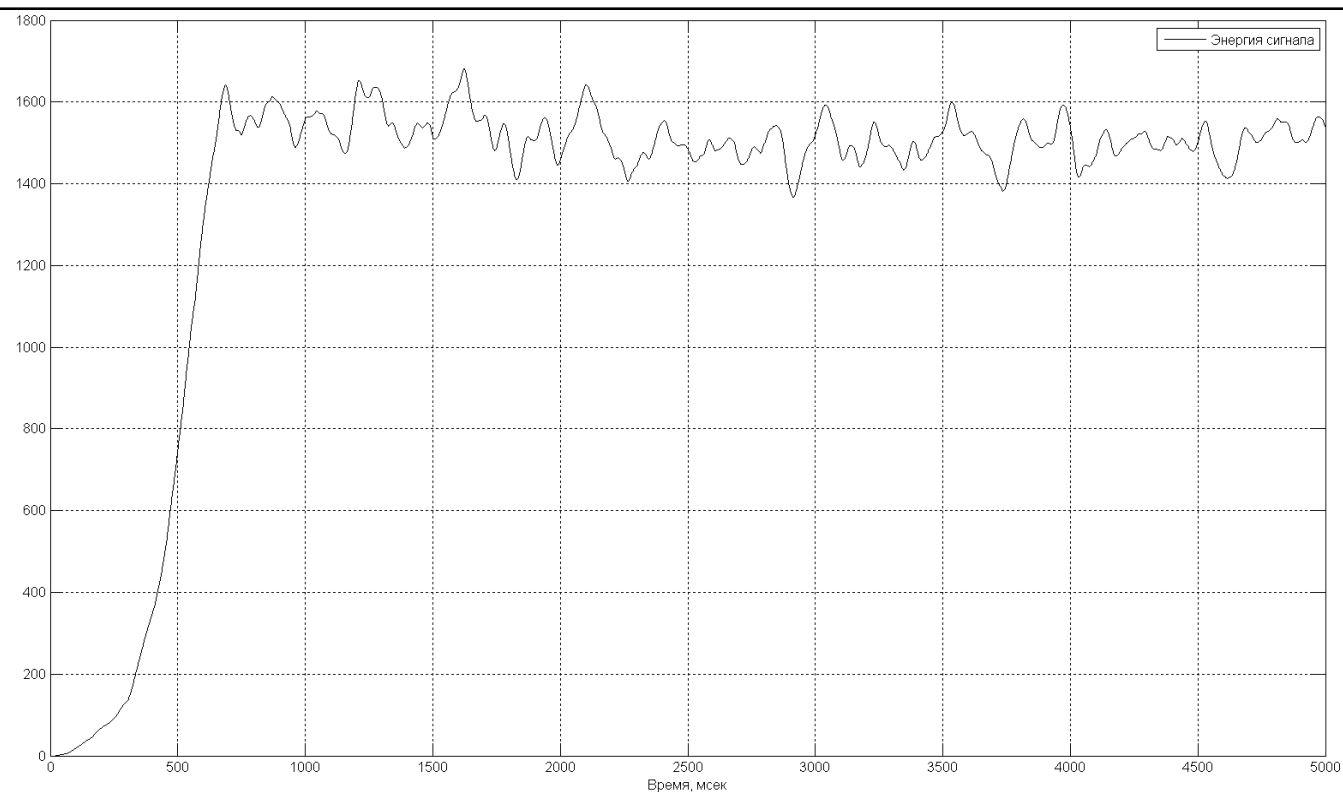


Рис. 6. Энергия сигнала

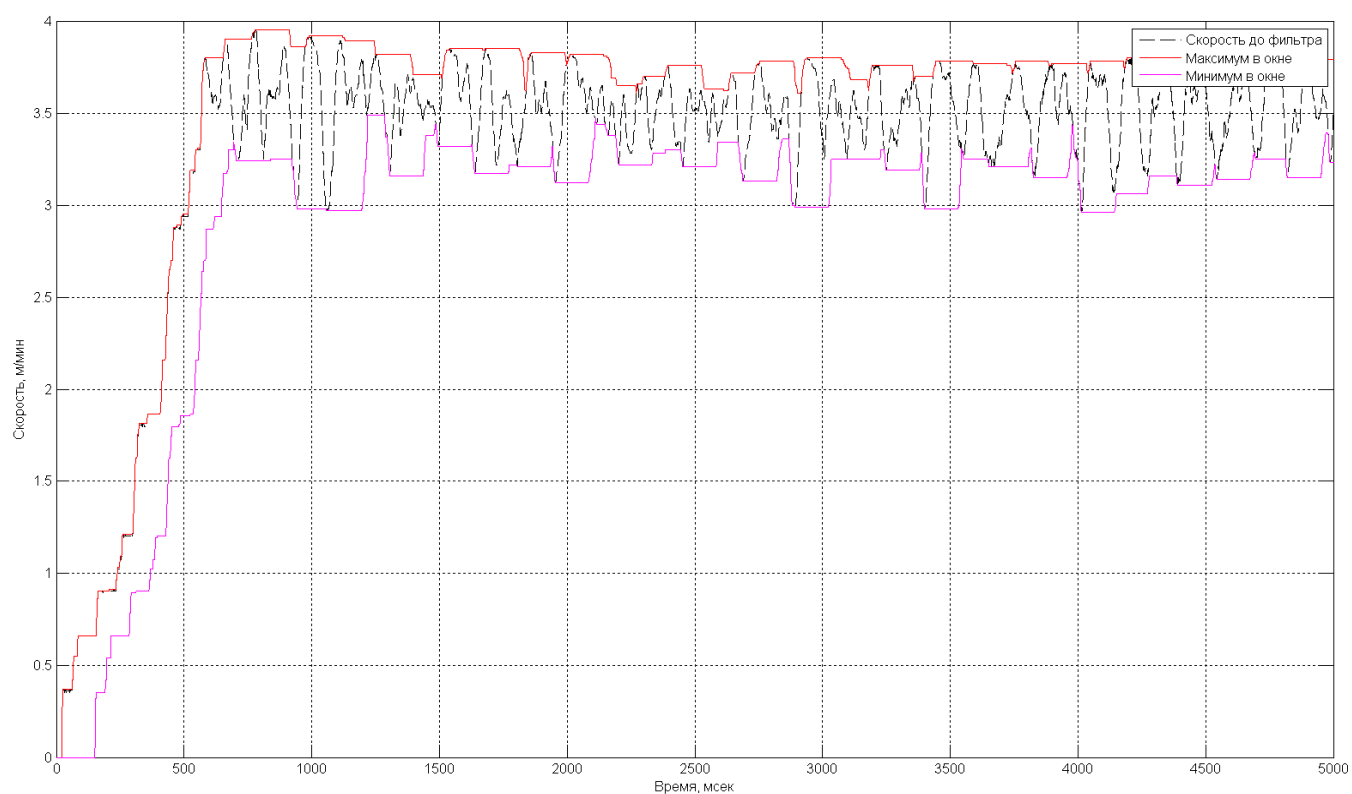


Рис. 7. Локальные максимумы и минимумы сигнала

### Реализация модели адаптивного фильтра в среде MATLAB

Далее рассматривается использование критерия, связанного с оценкой отклонения сигнала от локальных максимумов и минимумов в скользящем окне наблюдения. За основу при реализации адаптивного фильтра предложено использование фильтра низких частот (ФНЧ) первого порядка [6], постоянная времени которого изменяется в зависимости от оценки поведения сигнала.

Функциональная схема адаптивного фильтра, реализованного на этапе отладки алгоритма в среде MATLAB, показана на рис. 8.

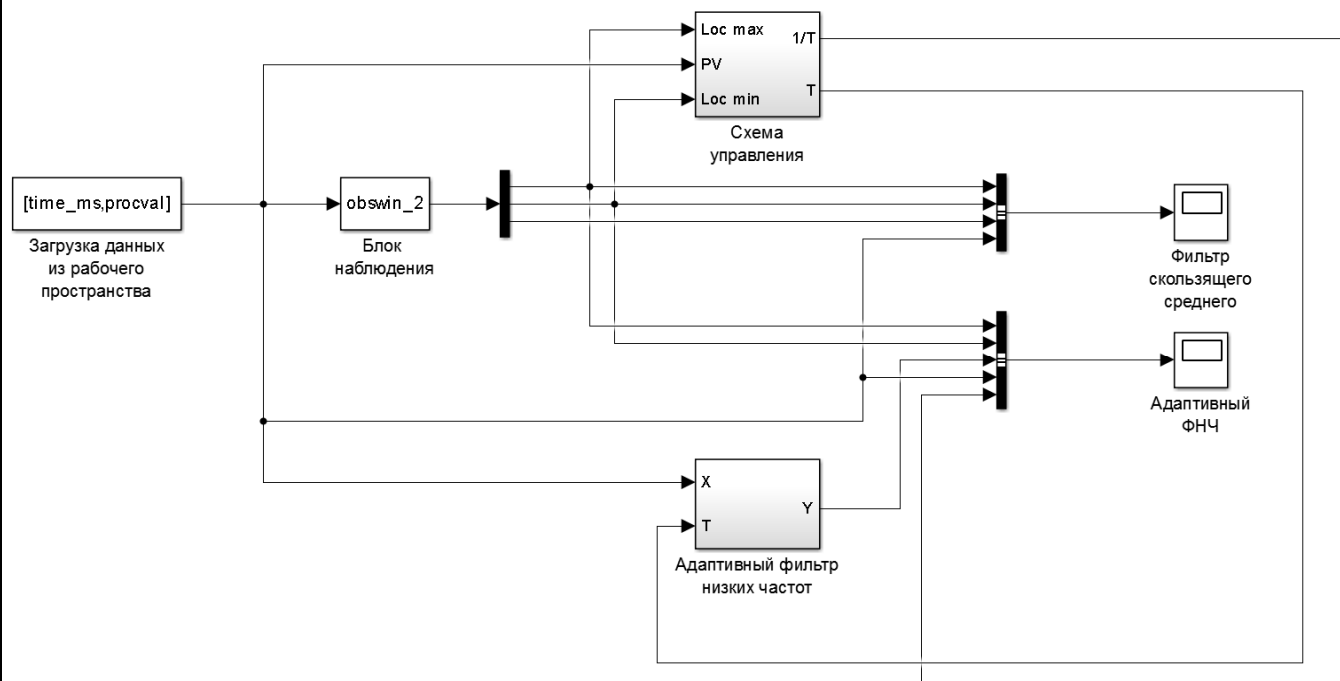


Рис. 8. Функциональная схема адаптивного фильтра

Данные для отладки, полученные в процессе работы МНЛЗ, загружаются из рабочего пространства MATLAB. Блок наблюдения формирует локальные максимумы или минимумы в скользящем окне наблюдения, попутно высчитывая среднее значение сигнала. Схема управления анализирует отклонение текущего значения сигнала и изменяет постоянную времени адаптивного ФНЧ.

На рис. 9 показана работа фильтра на наборе экспериментальных данных.

### Реализация программного блока адаптивного фильтра для ПЛК SIEMENS

Как уже отмечалось выше, АСУ ТП МНЛЗ построена на базе технических и программных средств фирмы SIEMENS и реализована в концепции распределённой системы управления (SIEMENS PCS7). Основным вычислительным устройством системы является ПЛК SIMATIC S7-414-2DP, программный код написан на языках высокого уровня – CFC и SCL [10, 11].

Фрагмент программы управления зонами вторичного охлаждения на языке CFC приведён на рис. 10. Здесь показан блок Calc\_Flow\_1 – вычисления расходов воды по значению текущей скорости разлива SPEED, на выходах которого формируются задающие значения для регуляторов зон вторичного охлаждения: переменные FLOW\_1 ... FLOW\_4.

Вход SPEED блока Calc\_Flow\_1 связан с выходом блока Adapt\_LPF (адаптивный ФНЧ), который фильтрует реальную скорость разлива, получаемую из блока расчёта скорости – Analog\_Input[Speed\_1(A,1)]Speed X Actual value.

Параметры ФНЧ, применённого в проекте, выбраны следующими:

$K=1$  – коэффициент усиления фильтра;

$T=0...60$  с – постоянная времени фильтра;

$N=131$  – ширина окна наблюдения, точек измерения;

$T_s=0.1$  с – шаг квантования (период дискретизации).



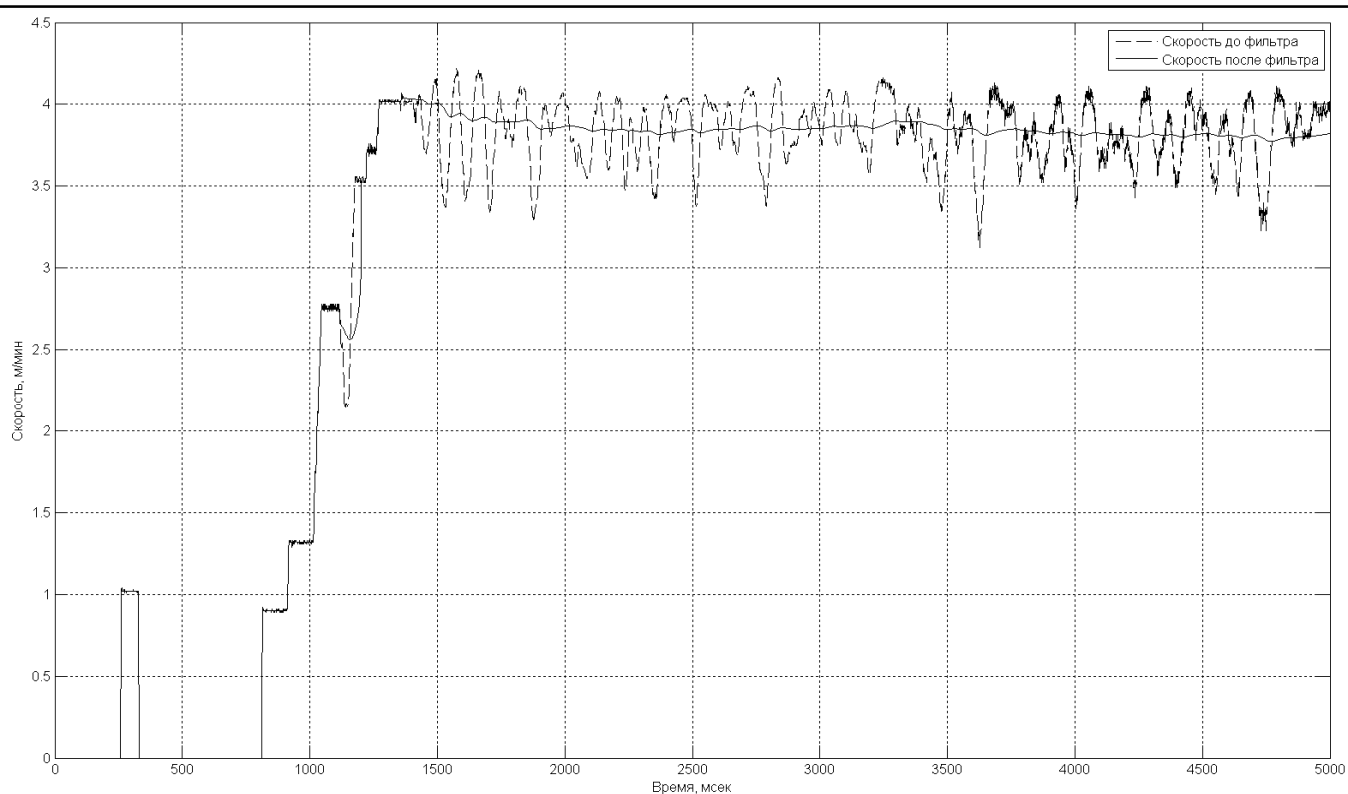


Рис. 9. Работа фильтра на наборе экспериментальных данных

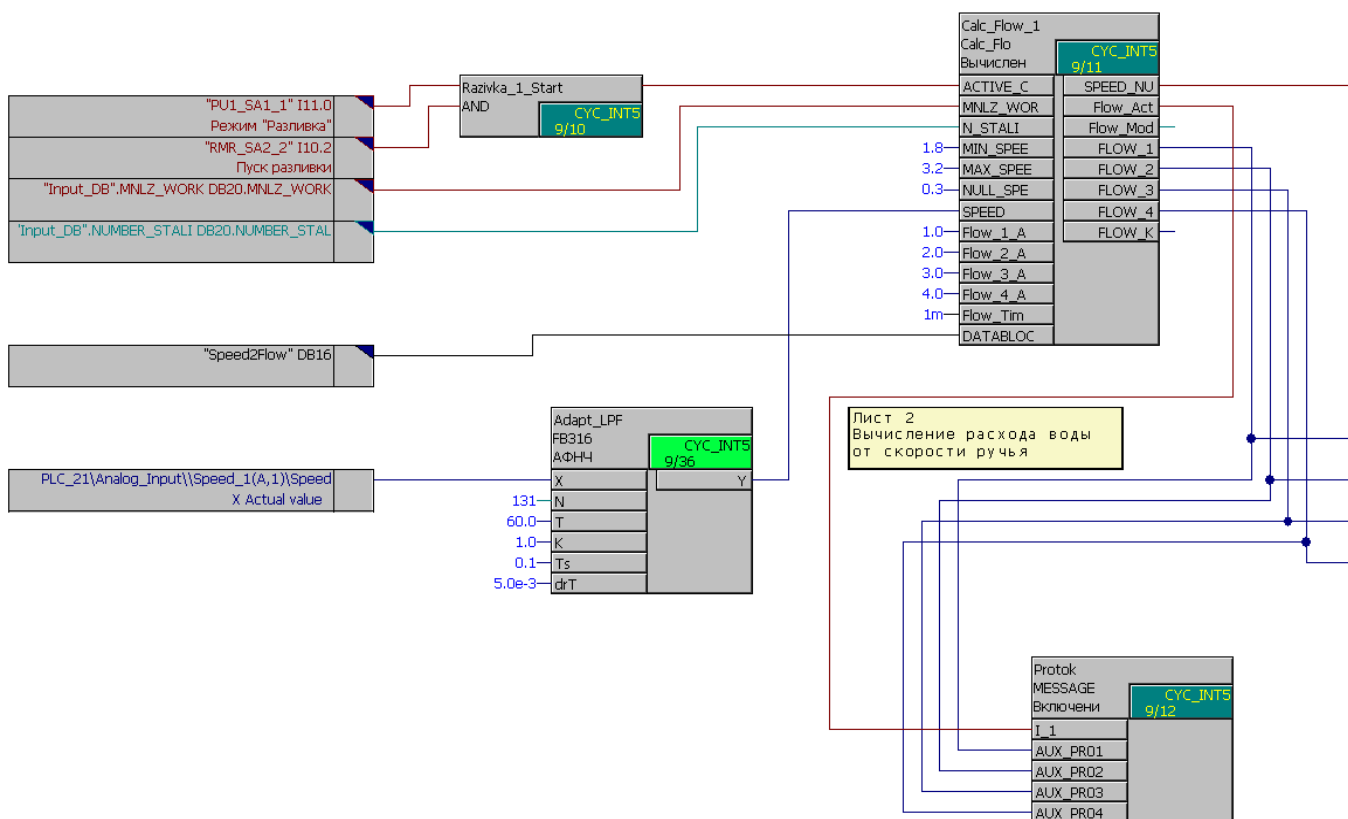


Рис. 10. Фрагмент программы управления ЗВО

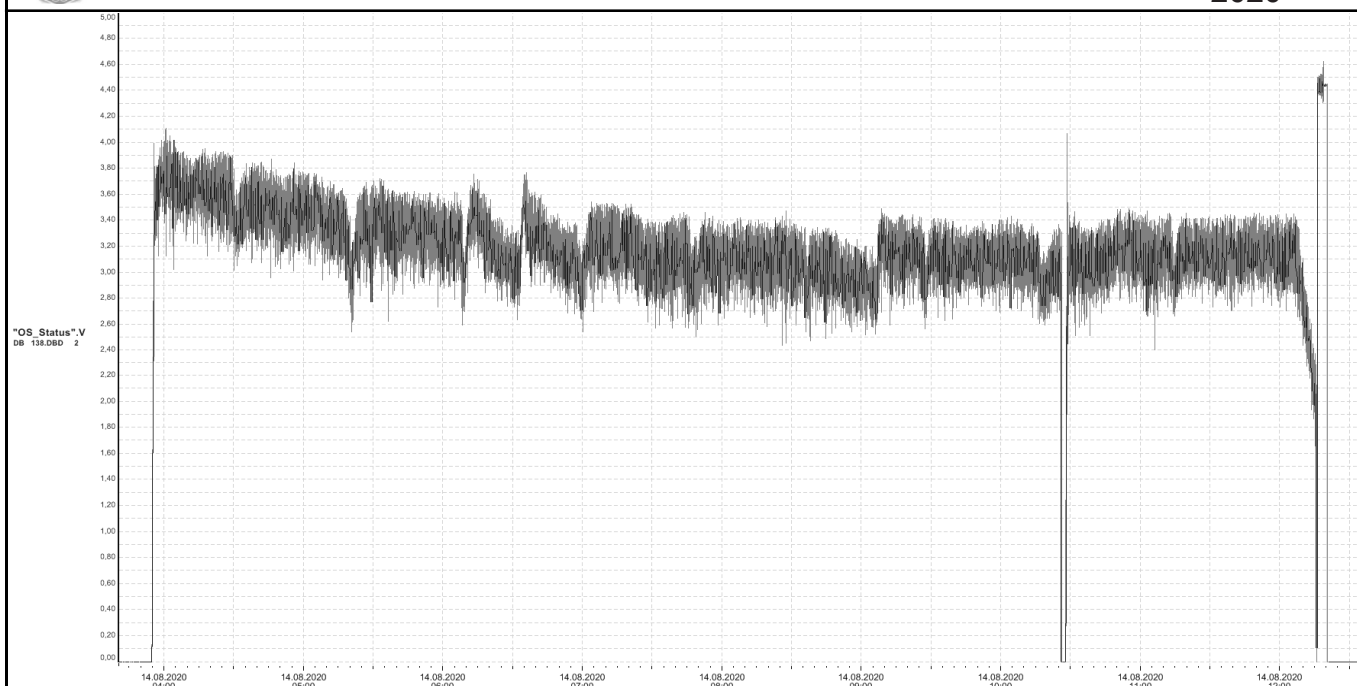


Рис. 11. Скорость в процессе разливки серии плавок

Тестирование разработанного фильтра показало его высокую эффективность в процессе управления расходом воды зон вторичного охлаждения. На рис. 11 показан график скорости движения заготовки в процессе разливки серии из нескольких плавок. Фильтрованный сигнал скорости, выступающий в качестве задающего на систему управления ЗВО, показан на рис. 12.

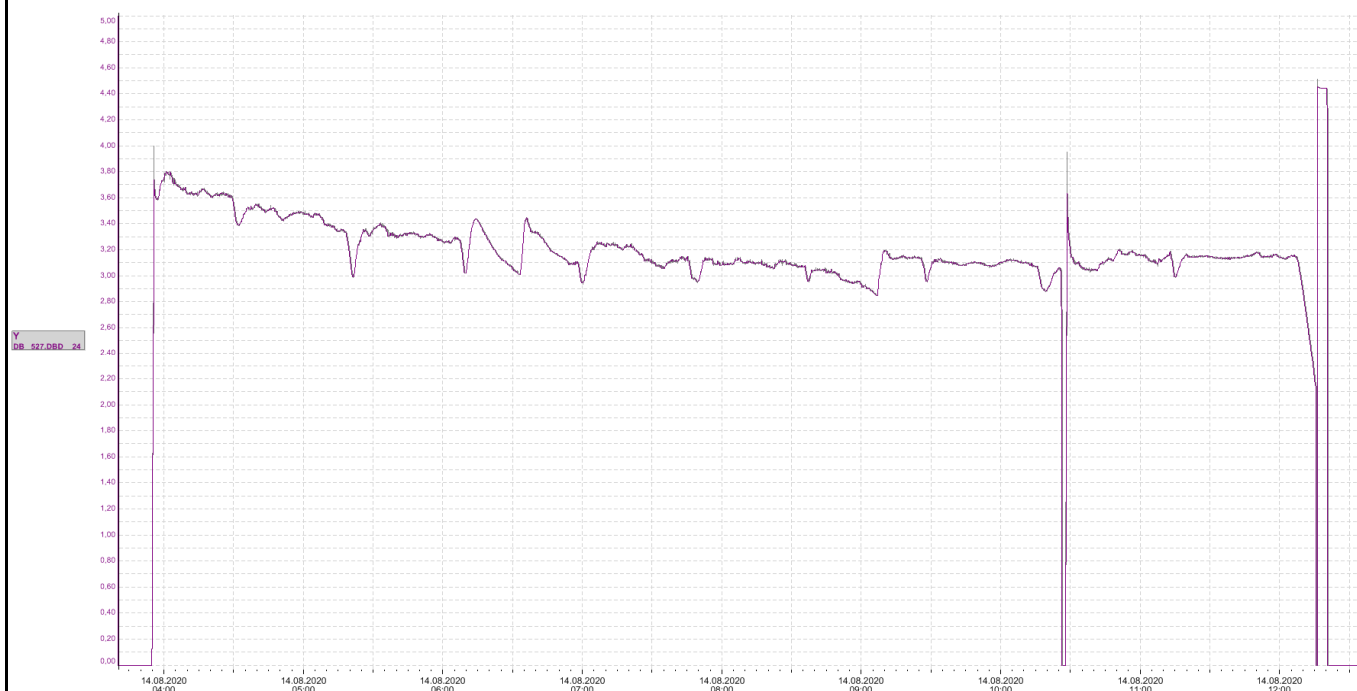


Рис. 12. Работа адаптивного фильтра

### Выводы

Уменьшение количества переключений пропорциональных клапанов существенно снижает нагрузку на запорно-регулирующую аппаратуру, что позволяет увеличить межремонтный интер-



вал обслуживания пропорциональных клапанов. За счёт оптимизации расчёта требуемого количества воды и отказа от перехода в ручной режим управления регуляторами ЗВО общий объём потребляемой МНЛЗ воды уменьшился, что привело к снижению нагрузки на цех водоподготовки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Datenbank «Plantfacts» des Stahlinstituts VDEh, Düsseldorf; Stand: 30. Juni 2008.
2. Schwinn, V.; Schütz, W.; Flüss, P.; Bauer, J.: Prospects and state of the art of TMCP: steel plates for structural and linepipe applications, Thermec' 2006, 4.–8. Juli 2006, Vancouver, Kanada.
3. Кудрин, В. А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов / В. А. Кудрин. – М.: Мир, 2003. – 528 с.
4. Дюдкин, Д. А. Современная технология производства стали / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко. – М.: Теплотехник, 2007. – 528 с.
5. Машины и агрегаты металлургических заводов: учебник для вузов. В 3 т. Т. 2. Машины и агрегаты сталеплавильных цехов / А. И. Целиков, А. И. Полухин, В. М. Гребеник [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 432 с.
6. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов / А. Б. Сергиенко. – 2-е изд. – СПб.: Издательский Дом «ПИТЕР», 2007. – 751 с.
7. Адаптивные фильтры / под ред. К. Ф. Н. Коуэна и П. М. Гранта; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 392 с.
8. Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
9. Манохин, А. Е. О некоторых приложениях моделирования сигналов с использованием адаптивных фильтров / А. Е. Манохин, Ю. А. Нифонтов // Радиолокация. Навигация. Связь. Труды десятой международной научно-технической конференции. – Воронеж: изд-во НПФ ООО «Саквое», 2004. – С. 54.
10. Berger H. Automating with STEP 7 in STL and SCL / H. Berger. – Publicis, 3 edition (May 6, 2005).
11. Structured Control Language (SCL V4, V5.0) for S7-300/S7-400 Programming. Programming Manual. Article number of the documentation: 6ES7811-1CA02-8BA0.  
<https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/1137188>.
12. Ким, К. К. Переходные процессы в асинхронной машине малоинерционного электропривода / К. К. Ким, А. Ю. Панычев, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 94-106.



**Колесник М. Б., Колошенко Ю. Б., Просолович А. А.**  
**M. B. Kolesnik, Yu. B. Koloshenko, A. A. Prosolovich**

**АНАЛИЗ СОВМЕСТИМОСТИ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗРЕДУКТОРНЫМ  
ПРИВОДОМ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА**

**COMPATIBILITY ANALYSIS IN GEARLESS DRIVE RAILROAD SWITCH MANAGEMENT**

**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; тел. 8(4217)241-175. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Maxim B. Kolesnik** – Student of Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel. 8(4217)241-175. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Колошенко Юлия Борисовна** – старший преподаватель кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(4217)241-118. E-mail: koloschenko2011@yandex.ru.

**Yulya B. Koloshenko** – Associate Professor, Aircraft Construction Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel. 8(4217)241-118. E-mail: koloschenko2011@yandex.ru.

**Просолович Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(914)185-93-59. E-mail: office@knastu.ru.

**Alexey A. Prosolovich** – PhD, Associate Professor, Computer-Aided Design System Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel. 8(914)185-93-59. E-mail: office@knastu.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрены существующие схемы управления электроприводами стрелочных переводов, широко применяемые на железной дороге. Приведено принципиальное устройство пятипроводной схемы управления и описан её принцип действия. Дано обоснованное сравнение схем управления, в котором были отражены преимущества и недостатки наиболее распространённых из них. Обоснован выбор конкретной схемы управления с целью её дальнейшего использования и преобразования при проектировании высокоэффективного электропривода стрелочного перевода с линейным перемещением исполнительного элемента.

**Summary.** The article discusses existing control schemes for electric switches that are widely used on the railway. The basic structure of a five-wire control circuit is given and its operating principle is described. A reasonable comparison of control schemes is provided, which reflects the advantages and disadvantages of the most widespread ones. The choice of a specific control scheme is justified for its further use and transformation in the design of a highly efficient electric drive of a wire transfer with linear movement of the executive element.

**Ключевые слова:** стрелочный перевод, электропривод, схема управления.

**Key words:** railroad switch, electric drive, control circuit.

УДК 621.31: 621.25

**Введение.** На долю железных дорог в Российской Федерации приходится более 40 % пассажирооборота и 80 % всего грузооборота государства. По данным ОАО «РЖД» на 2019 г., эксплуатационная общая длина железных дорог, используемых в стране, составляет порядка 85,6 тыс. км и по разработанной стратегии развития ЖД транспорта до 2030 г. должно быть введено более 20 тыс. км новых железнодорожных линий [1; 2].

Обязательной частью верхнего строения пути (ВСП) являются стрелочные переводы, предназначенные для перевода рельсового транспорта с одной железнодорожной ветки на другую [2]. Они обеспечивают приём, отправку, следование промышленного и пассажирского транспорта через станции, обгонные пункты, разъезды.

По состоянию на 2011 г. в России количество стрелочных переводов магистральных дорог, находящихся в эксплуатации, составляло порядка 100 тысяч, кроме этого ещё столько же находится в эксплуатации на различных предприятиях. Таким образом, количество эксплуатируемых переводов даже без учёта вновь вводимых превышает 200 тысяч [3].

Для электрифицированных сетей основным элементом стрелочного перевода является электропривод (ЭСП), позволяющий автоматизировать технологический процесс работы перевода. В настоящее время в качестве основных применяются двухпроводная, четырёхпроводная, пятипроводная, семипроводная и девятипроводная схемы управления.

Четырёхпроводную схему управления используют на станциях с малой маневровой работой. Семипроводная схема применяется в электрических депо метрополитенов. Девятипроводная схема применяется в метрополитенах на электроприводах типа СП-6БМ.

В данной статье рассматривается возможность применения существующих схем управления безредукторным приводом на основе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором [4-7]. Применение электромеханического привода с линейным перемещением исполнительного элемента вместо существующих двигателей традиционного исполнения обеспечивает упрощение конструкции без ухудшения технических характеристик, ведёт к повышению надёжности и снижению стоимости.

**Устройство стрелочного перевода.** Стрелочный перевод состоит из следующих элементов: стрелка, соединительные пути и комплект крестовинной части. Устройство стрелочного перевода показано на рис. 1.

Стрелка состоит из рамных рельсов 1, двух остяков 2 и переводного механизма 3. Остяки и переводной механизм соединены между собой металлической тягой. Также стрелочный перевод включает переводные брусья 4. Комплект крестовинной части состоит из контррельсов 5, усовиков 6 и сердечника 7 [8].

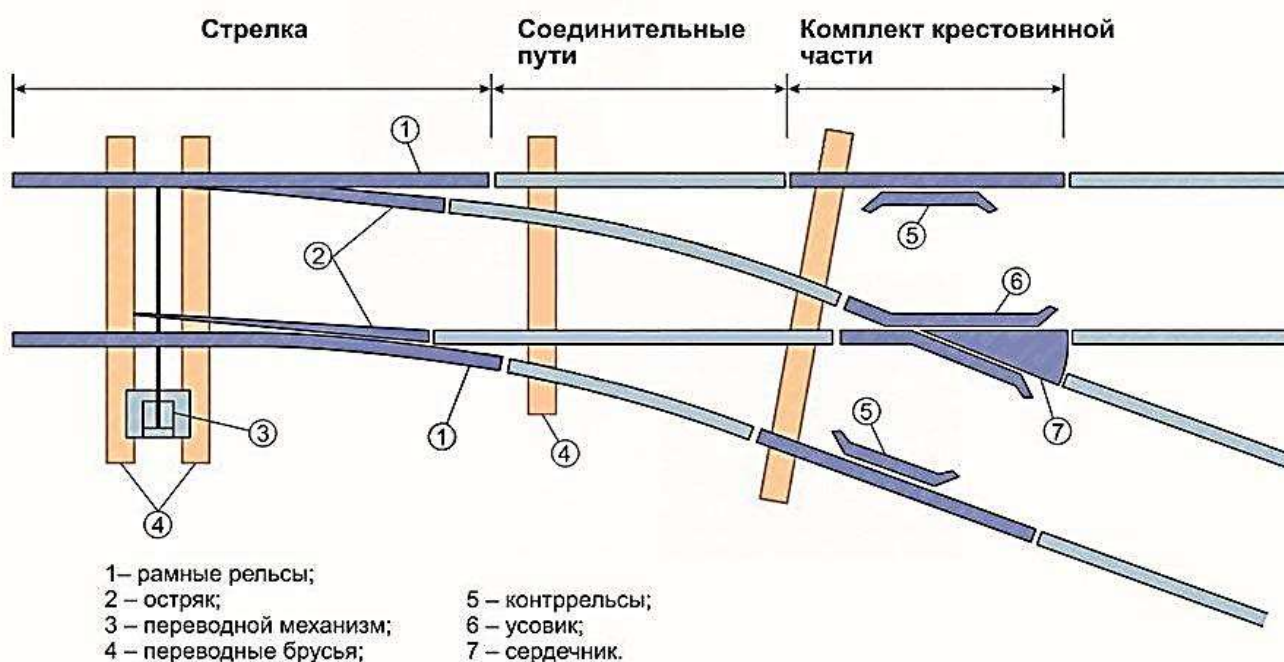


Рис. 1. Устройство стрелочного перевода



Предметом анализа является схема управления стрелочным переводом 3, которая включает три электрических цепи: пусковую (управляющую), рабочую и контрольную.

Назначением пусковой (управляющей) цепи является включение рабочей. Пусковая цепь работает короткий промежуток времени до момента включения рабочей цепи.

Пусковая цепь схемы управления электроприводом стрелочного перевода исполняет следующие функции:

- переключение коммутаторов или активация управляющих реле, запуск приборов;
- исключение возможности перевода при занятой, а также замкнутой в маршруте стрелочной секции;
- фиксация завершения перевода стрелки.

Рабочая цепь необходима для пуска приводного двигателя, его выключения по окончании перевода и обеспечения реверсирования. Задачей рабочей цепи является довод острия до конечного положения даже при прохождении подвижного состава по стрелочному переводу.

Рабочая цепь осуществляет следующие операции:

- подключение электродвигателя к источнику напряжения;
- обеспечение возможности смены хода (реверса) электродвигателя при крайних и промежуточных положениях стрелочного перевода;
- контроль завершения процесса перевода.

Контрольная цепь предназначена для постоянного контроля рабочих положений стрелочной секции. Включение контроля происходит, если сработал электропривод стрелочного перевода либо произошло перемещение острия [9].

**Анализ совместимости схем управления стрелочными переводами.** Двухпроводная схема управления предназначена для управления электроприводом с двигателем постоянного тока, поэтому применительно к электрифицированным сетям переменного тока её использование ведёт к существенному аппаратному усложнению системы управления [10]. Также данная схема имеет ряд недостатков и характерных неисправностей:

- если стрелка остановится не дойдя до соседнего острия, то нейтральное реле окажется без тока и переменное напряжение будет приложено не к контрольной, а к рабочей цепи;
- при ненадёжном контакте в рабочей цепи возможно срабатывание контрольного реле в двух случаях: при механических возмущениях от движущихся по соседним путям поездов изменяется зазор, а значит, и переходное сопротивление неплотного контакта. В результате в контуре, образованном конденсатором  $C$ , обмоткой реле ОК, трансформатором СКТ и резистором  $R_3$  [10], возникает переходный ток частотой до 10 Гц. Периоды этого тока соизмеримы со временем срабатывания контрольного реле, что может стать причиной его выключения;
- при достаточно малом зазоре и наличии в нём паров углерода или коллекторной пыли имеет место искровой пробой. Искровой пробой может способствовать развитию дуги;
- при переключении стрелочной рукоятки острия не переводятся или переводятся, но отсутствует контроль, или не переводятся, а амперметр показывает повышенный ток;
- близкая установка к электроприводу стрелочного перевода реверсирующего реле, которое в свою очередь при неблагоприятных погодных условиях может часто отказывать;
- стрелка теряет контроль во время прохождения по стрелочному переводу подвижного состава;
- повышенное потребление тока электродвигателем.

Пятипроводная схема управления ЭСП используется для управления электроприводом с трёхфазным асинхронным двигателем переменного тока (электропривод типа СП-6БМ). По сравнению с двухпроводной пятипроводная схема имеет ряд преимуществ [11]. Главным из них является использование асинхронного электродвигателя переменного тока с короткозамкнутым ротором, который не имеет щеточно-коллекторного узла, соответственно, износ и подгорание этих элементов ему не свойственны. Поэтому пятипроводная схема с асинхронным двигателем и отсутствующим дополнительным реле более надёжна и получила большее распространение.



Пятипроводная схема даёт возможность реализовывать последовательный и параллельный перевод спаренных электроприводов. Для неё не характерны по сравнению с двухпроводной схемой непереключение поляризованного контакта контрольного реле, ложный контроль положения стрелки при неправильном подключении контрольного диода или линейных проводов [11].

Принципиальная схема пятипроводной схемы управления приведена на рис. 2.

Пусковая цепь включает стрелочный коммутатор, который даёт возможность перевода остряков по команде оператора диспетчерской службы. Стрелочный коммутатор включает три позиции: перевод в плюсовое и минусовое (крайние), а также среднее положение для маршрутного управления. В этой позиции в блоке управления одиночными стрелками (НСО) сигнал проходит через контакты минусового (МУ) или плюсового управляющего (ПУ) реле.

Поляризованное пусковое (ППС) и нейтральное (НПС) стрелочные реле являются основными компонентами пусковой цепи. Реле НПС при срабатывании осуществляет проверку безопасности и даёт разрешение на перевод стрелки, затем активирует реле ППС и соединяет контактами рабочую и контрольную цепи. Реле ППС определяет, куда должен быть осуществлён перевод, и готовит цепь для обратного перевода путём смены полярности в рабочей цепи и отключения от сети реле НПС. Однако благодаря параллельно включённому реле НПС конденсатору  $C_1$  реле НПС по-прежнему продолжает работать до момента включения электродвигателя. Диод  $VD$  не допускает разрядку конденсатора  $C_1$  через реле ППС. Контакты стрелочного путевого реле (СП) проверяют свободу стрелочного перевода, а замыкающего реле (З) – незамкнутое положение стрелочного перевода. Для перевода стрелки в минусовое положение переключают стрелочный коммутатор. Для осуществления короткой продолжительности работы реле НПС выполняется следующая цепочка операций: от плюса (П) через коммутированные контакты 21-22 стрелочным коммутатором питание приходит на контакты реле ППС, далее через диод  $VD$ , обмотку реле НПС и контакты реле З и СП питание выходит на минус (М). После активации реле НПС и замыкания его контактов, активируется реле ППС в следующем порядке: от плюса (П) через коммутированные контакты 21-22 стрелочным коммутатором и замкнутые контакты реле НПС питание приходит на обмотку реле ППС и через контакты реле З и СП выходит на минус (М).

После включения реле ППС реле НПС поддерживается во включённом состоянии благодаря фазоконтрольному устройству, которое состоит из включённых согласованно трёх вторичных обмоток трансформаторов ( $TV1-TV3$ ) через выпрямительный мост. Они рассчитаны таким образом, что при токах 0,8 А и более магнитопроводы насыщаются. Блок фазового контроля также предназначен для снятия блокировки реле НПС при обрыве любой из фаз.

Ротор электродвигателя начинает вращаться, в этот же момент времени размыкаются контрольные контакты автопереключателя и замыкаются рабочие (41-42, 43-44, 45-46), тем самым обеспечивая перевод стрелки в обратное положение.

Как только заканчивается перевод стрелки, цепь электродвигателя разрывается из-за размыкания контактов автопереключателя (11-12, 13-14). Следующим шагом реле НПС отключает контакты, и к линейным проводам подключается реле ОК. Для постоянного питания контрольной цепи от полюсов ПХКС, ОХКС подаётся переменное напряжение через изолированный трансформатор СКТ. Выпрямление тока для питания реле ОК осуществляется диодом  $VD$  из блока БВС. Таким образом, для реле ОК диод  $VD$  выполняет функцию источника постоянного тока. Конденсатор  $C$  препятствует протеканию постоянной составляющей через низкоомную обмотку трансформатора СКТ. Реле МК притягивает якорь, и, так как рукоятка коммутатора повернута в минусовое положение, над коммутатором зажигается жёлтая ячейка [9].



**Заключение.** В результате проведённого исследования выявлено, что пятипроводная схема управления ЭСП является наиболее эффективной и может быть использована для управления безредукторным асинхронным приводом стрелочного перевода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Значение железнодорожного транспорта. Основные показатели работы железных дорог [Электронный ресурс] / Железнодорожный моделизм. – Режим доступа: <http://www.modelzd.ru/ustroystvo-zhd/znachenie-zhd-transporta.html> (дата обращения: 21.09.2020).
2. Из чего состоит стрелочный перевод: устройство и конструкция элементов, описание, неисправности [Электронный ресурс] / ПромПутьСнабжение, 2015-2020. – Режим доступа: <https://promputs nab.ru/poleznoe/254-iz-chego-sostoit-strelochnyy-perevod-ustroystvo-i-konstrukciya-elementov-osobennosti-stroeniya-usovika.html> (дата обращения: 21.09.2020).
3. Рынок стрелочных переводов. Маркетинговое исследование [Электронный ресурс] / IndexBox Russia, 2008-2017. – Режим доступа: <https://www.indexbox.ru/reports/marketingovoe-issledovanie-rynok-strelochnykh-perevodov.html> (дата обращения: 21.09.2020).
4. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.
5. Повышение эффективности приводного механизма стрелочного перевода / С. Н. Иванов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № IV-1 (40). – С. 46-51.
6. Ким, К. К. Повышение эффективности электропривода магистральных задвижек / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – № 3. – С. 71-77.
7. Ivanov, S. Synthesis Of The Control Device Of The Electromechanical Drive Of The Main Valve / S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020.
8. Устройство и схема стрелочных переводов [Электронный ресурс] / Rails torg. – Режим доступа: <https://railstorg.ru/ustrojstvo-i-shema-strelochnogo-perevoda-vidy-neispravnostej/> (дата обращения: 21.09.2020).
9. Стационарные системы автоматики и телемеханики: методические указания по выполнению лабораторных работ специальности «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» / сост. К. В. Менакер. – Чита: «ИрГУПС», 2019. – 41 с.
10. Валиев, Р. Ш. Двухпроводная схема управления стрелкой с пусковым блоком ПС с центральным питанием / Р. Ш. Валиев, Ш. К. Валиев. – Екатеринбург: ООО «Вебстер», 2011. – 43 с.
11. Валиев, Р. Ш. Пятипроводная схема управления стрелкой с пусковым блоком ПСТ с центральным питанием / Р. Ш. Валиев, Ш. К. Валиев. – Екатеринбург: ООО «Вебстер», 2013. – 52 с.
12. Особенности проектирования электромеханических преобразователей для систем комплексной безопасности / О. С. Амосов, Д. А. Голоколос, С. Н. Иванов, Со Хтайк // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 5 (197). – С. 5-11.



Муллер Н. В., Младова Т. А.  
N. V. Muller, T. A. Mladova

## КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ПОМОЩЬЮ ФРАКТАЛЬНОГО И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

### THE COMPLEX ANALYSIS OF TIME SERIES USING FRACTAL AND WAVELET ANALYSIS

**Муллер Нина Васильевна** – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: only\_nina@mail.ru.

**Nina V. Muller** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Cadastre and Technosphere Security, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: only\_nina@mail.ru.

**Младова Татьяна Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

**Tatyana A. Mladova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Cadastre and Technosphere Security Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

**Аннотация.** Статья посвящена применяемому комплексному подходу, основанному на анализе сигналов системы (временных рядов) с помощью фрактального и вейвлет-анализа. В статье отражены преимущества используемого подхода и особенности построения предлагаемой модели.

**Summary.** The article is devoted to the applied complex approach based on analysis of system signals (time series) using fractal and wavelet analysis. The article reflects the advantages of the approach used and the features of the construction of the proposed model.

**Ключевые слова:** фрактальный и вейвлет-анализ, модель, временной ряд (ВР), комплексный подход.

**Key words:** fractal and wavelet analysis, model, time series, complex approach.

УДК 004.942

Наряду с традиционными методами в последнее время получили распространение способы обработки сигналов, в основе которых лежит фрактальный и вейвлет-преобразования.

Для стационарных сигналов применяют классический метод спектрального анализа. Фурье-преобразование вполне простое для расчётов и понятно для интерпретации результатов, но у него есть определённые недостатки.

Преобразование Фурье не в состоянии отличить стационарный сигнал от нестационарного из-за спектральных коэффициентов, которые вычисляются интегрированием по всему интервалу задания сигнала.

В отличие от Фурье-преобразования, вейвлет-анализ позволяет раскрыть особенности локальной структуры сложных сигналов и выявлять различные его свойства, которые невидимы в режиме реального времени.

С помощью вейвлет-преобразования можно выделить дополнительную информацию, недоступную в исходном виде.

Свойство фрактального анализа заключается в учёте поведения системы не только в настоящий период измерений, но и его предыстории.



Существует понятие критического значения фрактальной размерности временной кривой. Чем ближе к критическому значению, тем менее устойчивой становится система с переходом в нестабильное состояние.

Методы, основанные на фрактальных представлениях и вейвлет-преобразованиях, являются универсальными.

На практике мы обычно сталкиваемся с нестационарными явлениями с неопределённым исходом. Для решения этих задач необходим точный прогноз, основанный на методах анализа данных, с выявлением закономерностей в совокупности случайных событий.

Таким образом, в качестве таких методов анализа данных рассмотрим фрактальный и вейвлет-анализ.

### Фрактальный метод

Метод получения фрактальных множеств представлен на рис. 1.

Вычисление новых координат $x', y'$ при аффинных преобразованиях: $x' = a * x - y * b + e,$ $y' = x * c + y * d + f,$	Классы простых геометрических преобразований, задающиеся малым числом параметров $x' = (a_1 * x + b_1 * y + c_1) / (d_1 * x + e_1 * y + f_1),$ $y' = (a_2 * x + b_2 * y + c_2) / (d_2 * x + e_2 * y + f_2),$
$a = \cos(\alpha) * \text{scale } x,$	Квадратичные преобразования на плоскости $x' = a_1 * x * x + b_1 * x * y + c_1 * y * y + d_1 * x + e_1 * y + f_1,$ $y' = a_2 * x * x + b_2 * x * y + c_2 * y * y + d_2 * x + e_2 * y + f_2$
$b = \sin(\alpha) * \text{scale } x,$	
$c = \sin(\alpha) * \text{scale } y,$	
$d = \cos(\alpha) * \text{scale } y,$	
$e = \text{move } x,$	
$f = \text{move } y,$	
$\text{scale } x, y$ - масштабирование по осн X,Y	
$\text{move } x, y$ - параллельный перенос по осн X,Y	
$\alpha$ - угол поворота	

Рис. 1. Метод получения фрактальных множеств

Полученные коэффициенты  $a, b, c, d, e, f$  (см. рис. 1) для каждого звена и составят требуемую систему итерирующих функций.

Многие опытные данные отражают фрактальную структуру, поэтому фрактальный анализ весьма удобен при обработке данных [2; 3]. Для этой цели используют фрактальную размерность  $D_i$  временного ряда, которая отражает масштабную инвариантность рассматриваемого множества.

Для фрактальных объектов  $D_i$  должна быть больше топологической:

$$D_i \geq d_i.$$

Величина фрактальной размерности также является показателем, который определяет количество факторов, влияющих на систему. Когда на систему оказывает воздействие одна или небольшое количество сил в одном направлении, то значение  $D_i$  будет менее 1,4 (см. рис. 2).

Когда  $D_i$  больше 1,6, система становится неустойчивой, нестабильной. То есть  $D_i$  является показателем сложности кривой. Пользуясь этим показателем, можно прогнозировать стабильность поведения системы.

В данном исследовании применили расчёт фрактальной размерности (поточечный метод). Алгоритм расчёта общеизвестный и классический и представлен на рис. 3.

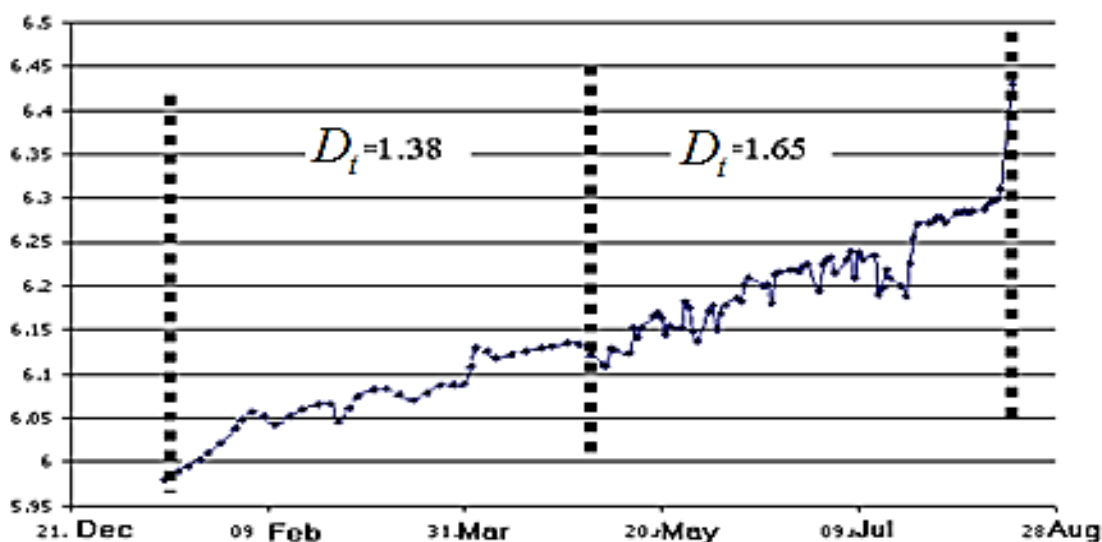


Рис. 2. Пример фрактальной размерности процессов

Суть фрактального анализа заключается в определении степени хаотичности ВР: показателя Херста  $H_f$  и фрактальной размерности  $D_f$ , отражающих природу анализируемого процесса.

Показатель  $H_f$  взаимосвязан с фрактальной размерностью следующим выражением и соотношением (см. рис. 4.):

$$D_f = 2 - H_f.$$

На рис. 5 смоделированы различные временные ряды с использованием программы MATLAB.

#### **Вейвлет-анализ**

Вейвлет-анализ позволяет выявлять те или иные гармоники в разные моменты времени на различных частотах на основе частотного спектра сигнала; он весьма универсален и применим в медицинских, технических, экономических науках и для анализа социальных процессов. Вейвлет-анализ раскладывает частотный спектр по времени для определения моментов возникновения и исчезновения нестационарностей в динамике, выявляет низкочастотные и высокочастотные характеристики сигнала на различных временных масштабах.

В практической жизни обычно встречаются сигналы, которые заданы дискретным набором данных, ограниченных конечным временным интервалом.

Сигнал определяется двумя осями на графике: осью времени и осью амплитуд (масштаба), результат представлен амплитудно-временным отображением сигнала, который позволяет определять особенности сигнала, которые не очевидны при обычном представлении в исходном виде.

Непрерывное вейвлет-преобразование будет иметь вид [5]

$$W(a,b) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \left( \frac{t-a}{b} \right) f(t) dt,$$

где  $\psi(t)$  – вейвлет-преобразование;  $a$  – масштабный коэффициент;  $b$  – параметра сдвига;  $(*)$  – операция комплексного сопряжения.

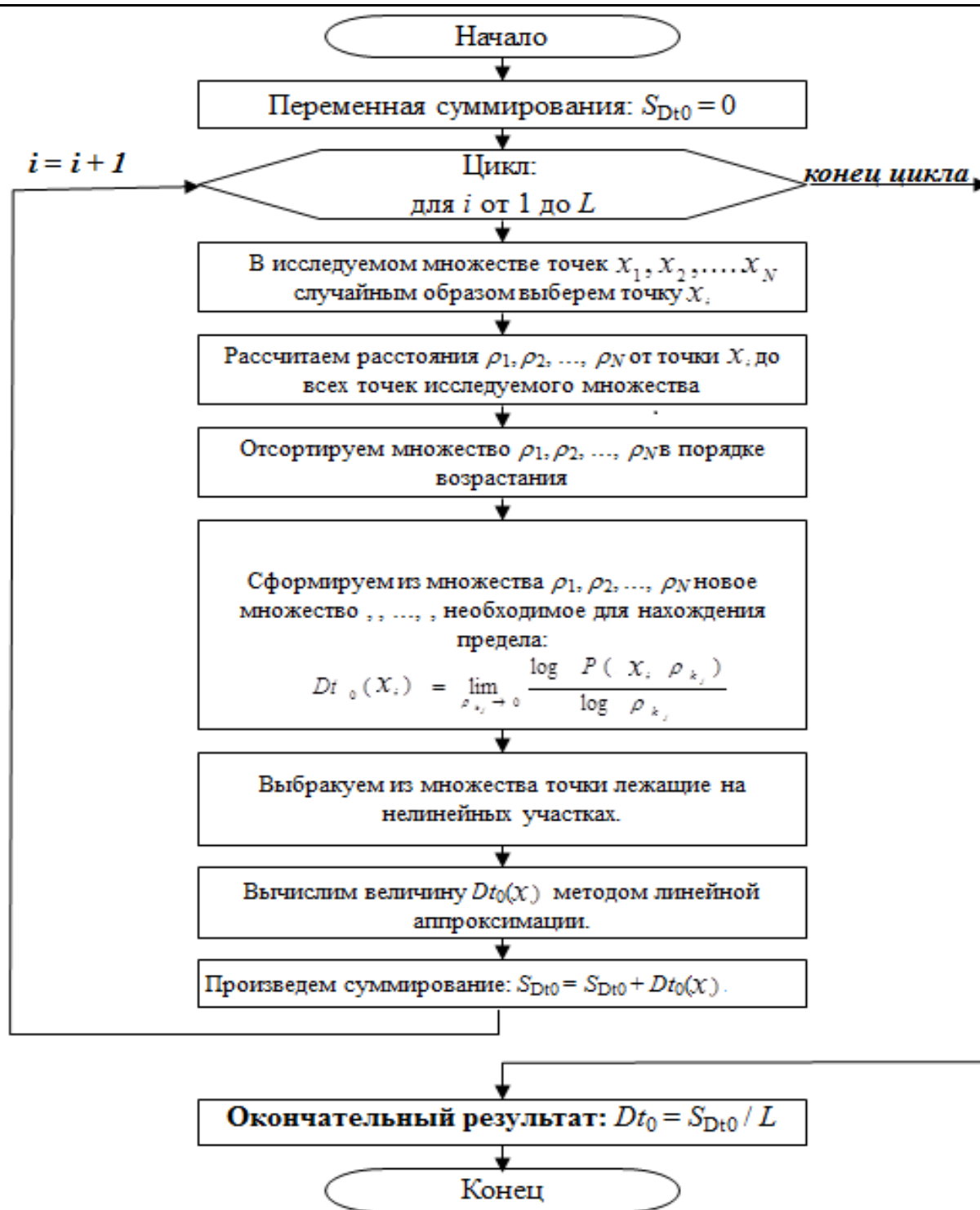


Рис. 3. Алгоритма расчёта  $D_t$  в виде блок-схемы

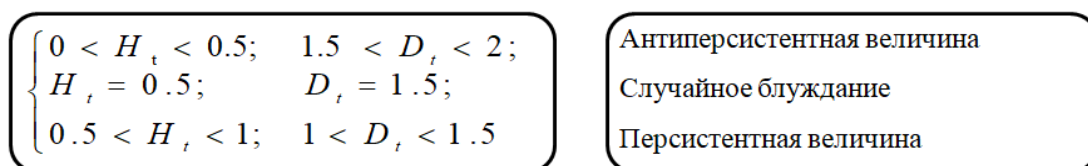


Рис. 4. Вид временного ряда в зависимости от величин  $H_t$  и  $D_t$

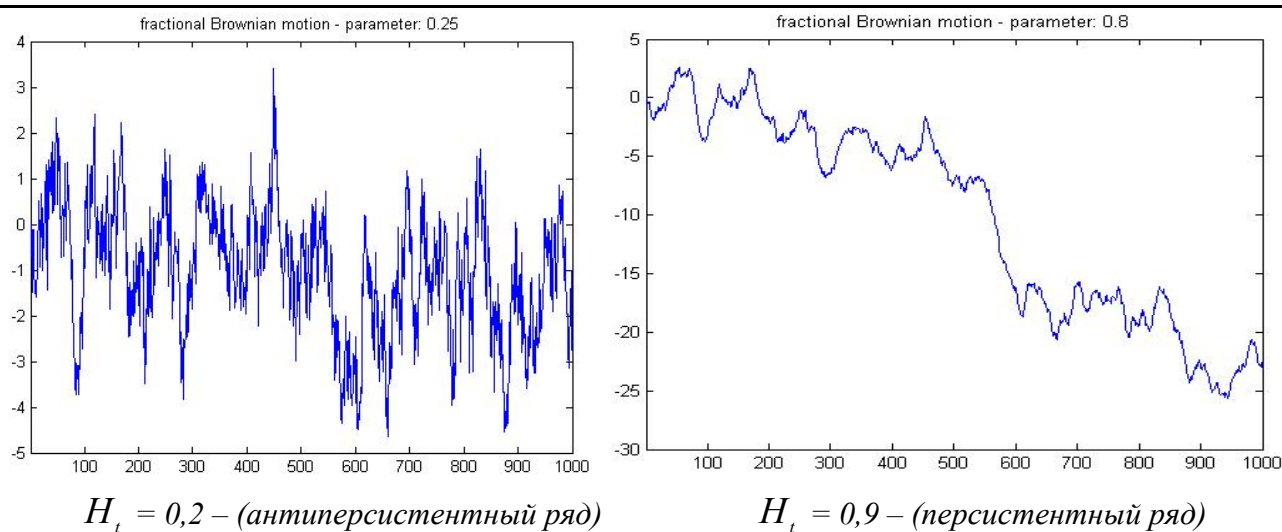


Рис. 5. Модель временного ряда

### Идентификация временного ряда

Задача структурно-параметрической идентификации будет выглядеть следующим образом.

Пусть имеются выходные значения  $y(t)$  ВР. Необходимо выбрать тип математической модели  $y_M(t)$  временного ряда, оптимизировать её параметры путём вычисления ошибки идентификации  $\varepsilon(t) = y(t) - y_M(t)$  и определения соответствия выходных и моделируемых значений ВР с использованием некоторого критерия.

Структурная схема идентификации ВР (см. рис. 6.) – это частная задача идентификации без наблюдаемого входного сигнала [1, 4].

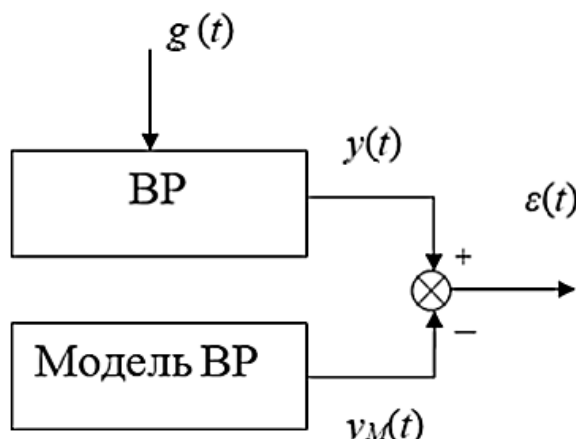


Рис. 6. Структурная схема идентификации ВР:  $y(t)$  – выходные данные ВР;  $y_M(t)$  – выходные данные модели ВР;  $\varepsilon(t)$  – разность (невязка) между выходными данными ВР и модели;  $g(t)$  – неконтролируемое возмущающее воздействие

Задача решается из условия минимума средней квадратической ошибки:

$$M \{ \rho[y(t), y_M(t)] \} = M \{ \varepsilon^2(t) \} \rightarrow \min ,$$

где  $\varepsilon(t) = y(t) - y_M(t)$  – ошибка идентификации;  $\rho[y(t), y_M(t)] = \varepsilon^2(t)$  – функция потерь;  $M$  – математическое ожидание.



**Математическая модель временного ряда**

Анализ ВР подразумевает, что данные включают в себя систематическую составляющую и случайный шум, который усложняет обнаружение регулярных компонент. Аддитивная модель представляет собой каждое значение временного ряда как сумму указанных выше компонент. В данной модели используем показатель хаотичности  $\chi_t$  следующего вида:

$$y_t = \chi_t + \eta_t + \varepsilon_t,$$

где  $\chi_t$  – показатель, отражающий меру хаотичности ряда и зависящий от  $H_t$  – показателя Херста или  $D_t$  – показателя фрактальной размерности;  $\eta_t$  – трендовая составляющая;  $t = t_0, t_1, \dots, t_n$  – моменты времени;  $\varepsilon_t$  – случайный шум.

Данную модель можно рассматривать как универсальную и применять для идентификации и построения прогнозных оценок ВР из различных предметных областей.

**Модифицированный комплексный подход обработки для анализа ВР**

Предлагается модифицированный комплексный подход обработки для анализа ВР, включающий себя следующие этапы:

1. Подготовительная выборка данных информационной системы (статистических данных) по интересующим параметрам в виде ВР.
2. Проведение комплексной обработки ВР методом фрактального (вычисление показателей хаотичности  $H_t$  и  $D_t$ ) и вейвлет-анализа.
3. Оценивание самоподобности на основе комплексного подхода фрактального и вейвлет-анализа для идентификации ВР.
4. Выявление внутренних закономерностей в поведении ВР и его прогнозировании на базе трендовой составляющей и показателя хаотичности.

**Выводы**

Данное комплексное применение позволит получать наиболее полную информацию об исследуемом процессе в виде количественных оценок (величина  $H_t$ ,  $D_t$ ) и в виде качественного анализа вейвлет-спектров. В результате будет получена объёмная информация о ВР, по которой можно его идентифицировать, выявлять закономерности в поведении системы и прогнозировать периоды предполагаемой устойчивости явления исследуемых процессов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Амосов, О. С. Фрактальный и вейвлет-анализ телекоммуникационных рядов информационной системы / О. С. Амосов, Д. С. Магола, Н. В. Муллер // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1(25). – С. 28-36.
2. Ким, В. А. Мультифрактальный анализ структурных превращений железа-армко при лазерной обработке / В. А. Ким, Н. Л. Катунцева, М. С. Кочетков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1(25). – С. 97-104.
3. Амосов, О. С. Фильтрация стохастических процессов с фрактальной структурой применительно к задачам обработки навигационной информации / О. С. Амосов, С. Г. Баена. – Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № IV-1(28). – С. 34-44.
4. Амосов, О. С. Исследование временных рядов с применением фрактального и вейвлет анализа / О. С. Амосов, Н. В. Муллер // Науковедение. – 2015. – № 3 (22). – С. 1-14.
5. Яковлев, А. Н. Введение в вейвлет-преобразование: учебное пособие / А. Н. Яковлев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.



Сухоруков С. И., Черный С. П., Мешков А. С., Киба Д. А.  
S. I. Sukhorukov, S. P. Cherniy, A. S. Meshkov, D. A. Kiba

## КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

### CONCEPT OF FORMING A CONTROL PROGRAM FOR A ROBOTIC LASER WELDING COMPLEX

**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: sergei.svan@gmail.com.  
**Sergei I. Sukhorukov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electro Drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergei.svan@gmail.com.

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kepapu@knastu.ru.  
**Sergey P. Cherniy** – PhD of Engineering, Head of the Department of Electro Drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Мешков Александр Сергеевич** – 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: kepapu@knastu.ru.  
**Alexander S. Meshkov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electro Drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Киба Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: pe@knastu.ru.  
**Dmirty A. Kiba** – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: pe@knastu.ru.

**Аннотация.** В статье предложена концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки. Приведён краткий анализ технологий сварки сложных изделий, таких как тонкостенные конструкции. Предложена функциональная схема роботизированного комплекса. Выполнен выбор оборудования для построения роботизированного комплекса. В связи с большим количеством разнородного оборудования в составе комплекса сделан вывод о необходимости формирования единой управляющей программы для сварки конкретного изделия. На основе анализа технических характеристик элементов системы управления комплекса сформированы типы команд, используемых в управляющей программе комплекса. Определены основные устройства, осуществляющие обработку управляющей программы. Предложена концепция формирования управляющей программы.

**Summary.** The article proposes the concept of forming a control program for a robotic laser welding complex. A brief analysis of welding technologies for complex products, such as thin-walled structures, is given. A functional diagram of a robotic complex is proposed. The choice of equipment for building a robotic complex has been made. Due to the large number of dissimilar equipment in the complex, it was concluded that it is necessary to form a single control program for welding a specific product. Based on the analysis of the technical characteristics of the elements of the control system of the complex, the types of commands used in the control program of the complex are formed. The main devices for processing the control program are determined. The concept of forming a control program is proposed.

**Ключевые слова:** управляющая программа, роботизированный комплекс, лазерная сварка, ПЛК, система управления.

**Key words:** control program, robotic complex, laser welding, PLC, control system.

УДК 007.52

### **Введение.**

Одним из наиболее распространённых на сегодня способов соединения металлических элементов различных конструкций является сварка. В большинстве случаев применяется электродуговая сварка, где расплавление кромок свариваемых элементов происходит под действием протекающего по ним тока [1]. К преимуществам такого способа сварки можно отнести широкую распространённость, возможность выполнения сварки вручную, а также большое количество специалистов, способных выполнять такие виды работ. Наряду с озвученными преимуществами все типы электродуговой сварки обладают следующими недостатками:

1. большая зона термического влияния;
2. наличие значительных температурных деформаций свариваемой детали;
3. повышенная сложность сварки тонкостенных конструкций (менее 2 мм толщины).

Некоторые виды современных высокотехнологичных производств, таких как авиастроение, предъявляют повышенные требования к качеству и точности геометрии изделий. Примером таких изделий могут служить элементы авиационных трубопроводных систем. Данные элементы отличаются малой толщиной стенки (менее 1 мм), сложной пространственной конфигурацией и изготавливаются из сложнообрабатываемых материалов (нержавеющие стали, алюминиевые сплавы, титан) [2]. При изготовлении таких элементов сегодня повсеместно применяется один из самых сложных видов электродуговой сварки – TIG-сварка. При этом сварка реализуется в ручном режиме, а для отдельных видов изделий процент брака может составлять до 20-30 %.

Всё это приводит к необходимости разработки и внедрения технологий, позволяющих повысить качество сварных соединений, снизить процент брака, а также автоматизировать процесс сварки. В качестве возможного варианта решения предлагается применение лазерного излучения для сварки деталей. Лазерная сварка отличается высоким качеством сварного соединения, малой зоной термического влияния и, как следствие, низкими температурными деформациями [3].

Отличительной особенностью лазерной сварки является необходимость высокой степени автоматизации технологического процесса – требуется в автоматизированном режиме управлять как режимами источника излучения, так и перемещением лазерного луча вдоль сварного шва. Это связано с малым диаметром светового пятна лазера и высокой требуемой точностью позиционирования луча относительно сварного шва. Обеспечить выполнение данных требований вручную невозможно, поэтому для реализации технологического процесса лазерной сварки предполагаются разработка и внедрение роботизированного комплекса, в рамках которого перемещение выходной оптики лазера будет осуществляться промышленным роботом-манипулятором [4].

Для построения такого комплекса потребуется значительное количество разнородного оборудования, для которого необходимо решить задачу одновременного программного управления отдельными устройствами, входящими в состав комплекса.

При проведении анализа научно-технических публикаций в области лазерной сварки было выявлено, что сама технология применения лазеров в задачах сварки является очень популярной на данный момент. Однако большинство исследований и статей посвящено преимущественно изучению физических процессов, происходящих в процессе воздействия лазера на различные металлы в процессе сварки [5; 6], а также исследованию структурных и прочностных характеристик металлов в зоне сварки при различных условиях [7; 8]. Работ, посвящённых автоматизации и роботизации лазерной сварки и разработке алгоритмов для управления такими автоматизированными комплексами, наоборот, относительно немного. Преимущественно такие работы ориентированы на повышение качества управления отдельными узлами и элементами автоматизированных и ро-

ботизированных систем. В качестве основного элемента в таких работах рассматриваются отдельные электропривода и различного рода регуляторы для управления ими. Одним из наиболее популярных направлений в данной области является применение интеллектуальных подходов [9; 10; 11; 12]. Однако вышеперечисленные работы не позволяют осуществлять управление всем роботизированным комплексом в целом.

Целью данной работы является разработка концепции формирования единой управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки с учётом необходимости реализации управления разнородным оборудованием в рамках этой программы.

#### **Структура роботизированного комплекса.**

Рассмотрим состав основного оборудования, необходимого для построения роботизированного комплекса лазерной сварки, и структуру комплекса.

Предлагаемая структура роботизированного комплекса приведена на рис. 1. В состав комплекса входит следующее основное оборудование, выполняющее соответствующие функции:

- лазерный источник (генерация лазерного излучения необходимой мощности);
- выходная оптика лазера (фокусировка лазерного луча);
- промышленный робот-манипулятор (позиционирование и перемещение выходной оптики по необходимой траектории с заданной скоростью);
- контроллер робота (управление приводами манипулятора для обеспечения требуемой траектории);
- блок WHAM (контроль состояния элементов выходной оптики лазера);
- механизм подачи проволоки (подача присадочного материала в зону сварки для повышения прочностных и качественных характеристик сварного соединения);
- клапан подачи защитного газа (обеспечение защиты расплавленного металла от влияния кислорода);
- внешнее защитное ограждение (активная защита внешних устройств и персонала от излучения);
- программируемый логический контроллер (общее управление работой всех элементов комплекса и синхронизация их действий);
- панель оператора (взаимодействие с оператором комплекса, отражение и архивирование основных технологических параметров);
- система безопасности комплекса (экстренная остановка комплекса при нештатных ситуациях).

В качестве основного технологического оборудования при построении опытного образца роботизированного комплекса выбраны следующие модели оборудования:

- волоконный иттербиевый лазер IPG мощностью 2 кВт;
- промышленный робот-манипулятор KUKA KR60-3;
- ПЛК Siemens S7-1500;
- панель оператора TP1200 Comfort.

Выбранное оборудование позволяет на техническом и программном уровнях обеспечивать взаимодействие всех элементов комплекса, однако для реализации конкретного технологического процесса требуются дополнительные алгоритмические и программные средства.

Рассмотрим функции отдельных элементов комплекса и направления передачи сигналов управления в системе:

1. Лазер: включение/выключение и настройка режимов работы лазера осуществляются посредством подачи на источник лазерного излучения необходимого набора дискретных и аналоговых сигналов. В соответствии с представленной структурой (см. рис. 1), сигналы подаются с ПЛК. Этот же ПЛК отслеживает ответные диагностические дискретные и аналоговые сигналы, поступающие с лазера.

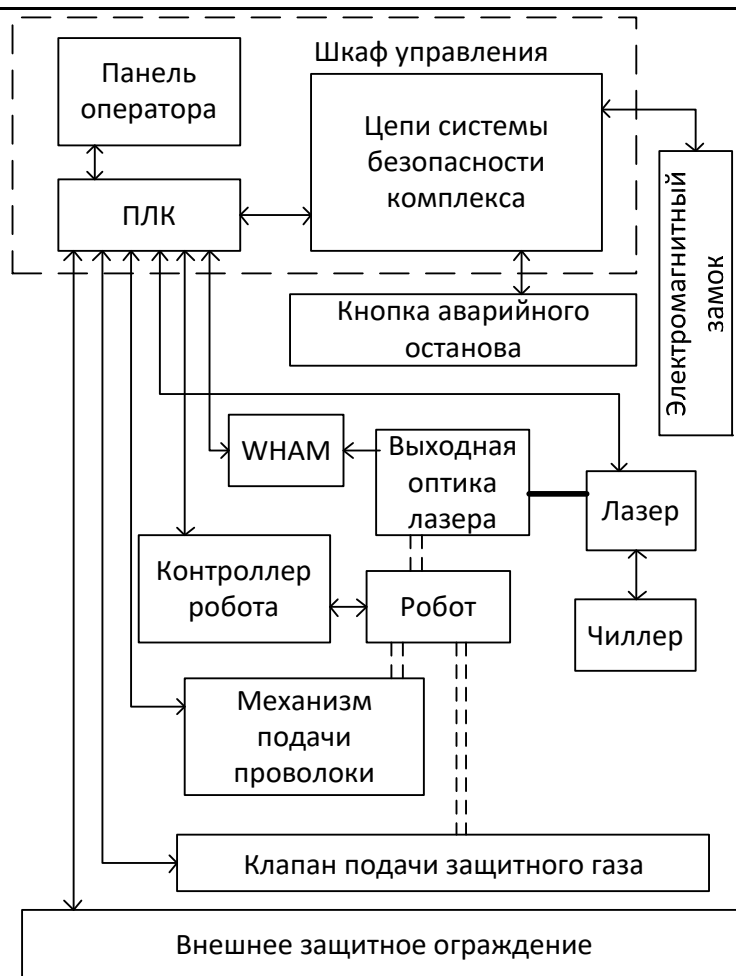


Рис. 1. Структура роботизированного комплекса лазерной сварки

2. Модуль WHAM: модуль контроля состояния выходной оптики лазера получает сигналы с датчиков, встроенных в блок выходной оптики, осуществляет их анализ и в случае выхода каких-либо параметров за допустимые пределы подаёт соответствующие дискретные сигналы на ПЛК.

3. Механизм подачи проволоки: управление механизмом подачи проволоки происходит также с применением дискретных и аналоговых сигналов от ПЛК. При этом ПЛК формирует сигналы задания, в соответствии с которыми встроенный в механизм контроллер формирует управляющие сигналы для приводов.

4. Клапан подачи защитного газа: управление клапаном осуществляется одним дискретным сигналом (открыт/закрыт). Так как синхронизацию действий оборудования в составе комплекса осуществляет ПЛК, то управляющий сигнал для клапана также поступает с ПЛК.

5. Внешнее защитное ограждение: внешнее защитное ограждение должно быть снабжено датчиками для определения попадания на него лазерного излучения. При этом сигналы с датчиков должны передаваться на ПЛК, управляющий работой системы, для принятия мер по обеспечению безопасности персонала и оборудования (например, выключение излучения и останов перемещения робота).

6. Панель оператора: взаимодействие с ПЛК осуществляется с применением стандартных средств и протоколов (панель оператора подключается к ПЛК по промышленной сети).

7. Промышленный робот-манипулятор: управление механикой робота (скорости и углы поворота двигателей отдельных осей) осуществляется штатным контроллером робота в соответствии с заданной траекторией. Таким образом, робот напрямую с системой управления роботизированного комплекса не взаимодействует – всё взаимодействие осуществляется через контроллер робота.



8. Контроллер робота: взаимодействие контроллера робота с системой управления роботизированным комплексом (ПЛК) осуществляется посредством промышленной информационной сети. Для обеспечения взаимодействия используется программный пакет KUKA mxAutomation. Данный пакет реализует протокол обмена данными и командами между контроллером робота и ПЛК и позволяет формировать сигналы задания на перемещение робота со стороны ПЛК.

#### **Структура управляющей программы.**

В описанной структуре роботизированного комплекса каждый из элементов оснащён своей локальной системой управления, которая обеспечивает выполнение базовых функций устройства. Однако только базовых функций недостаточно для корректной работы комплекса. Для выполнения в автоматическом режиме процесса сварки конкретного изделия необходима управляющая программа, которая будет содержать в себе траектории перемещения выходной оптики лазера, моменты включения/выключения излучения, параметры лазерного излучения, а также команды для управления вспомогательным технологическим оборудованием (клапаном подачи защитного газа, механизмом подачи проволоки).

Управляющая программа для реализации сварки конкретного типа изделия может быть скомпонована двумя способами:

1. управляющая программа разбита на отдельные фрагменты. Каждый из фрагментов отвечает за работу отдельного устройства и обрабатывается на этом устройстве.
2. управляющая программа сформирована в виде единого файла, предварительная обработка которого осуществляется на одном устройстве, а затем в виде набора управляющих сигналов и команд транслируется на остальные устройства.

К недостаткам первого подхода стоит отнести:

- необходимость подготовки нескольких различных файлов с программами для различных устройств;
- сложность подготовки управляющей программы, так как требуется в рамках подготовленных управляющих программ обеспечить синхронизацию действий разнородного оборудования;
- увеличение количества передаваемых сигналов синхронизации в системе и повышение требований к своевременности передачи сигналов.

В случае второго подхода управляющая программа формируется одним файлом и синхронизация большинства действий реализована на уровне последовательности управляющих команд. Дополнительные команды синхронизации указываются в программе в явном виде.

В связи с этим выбираем для реализации второй вариант компоновки управляющей программы.

В рамках управляющей программы необходимо реализовать управление следующими элементами комплекса: промышленным роботом-манипулятором, источником лазерного излучения, механизмом подачи проволоки и клапаном подачи защитного газа. Все остальные элементы фактически функционируют по заранее заложенным алгоритмам, передают необходимые сигналы на ПЛК и в постоянном получении управляющих команд не нуждаются.

Рассмотрим более подробно типы команд, которые должны быть реализованы в управляющей программе для выполнения сварки конкретного изделия.

Команды установки режимов работы лазера. Для обеспечения наилучшего качества сварки различных изделий, отличающихся материалом, толщиной и геометрической конфигурацией, необходимо управлять как мощностью лазерного излучения (основной параметр), так и режимом генерации (постоянный или импульсный). В первом случае команда включения лазерного излучения должна содержать только необходимую мощность излучения, во втором – мощность и частоту импульсов генерации излучения. В обязательном порядке должна быть предусмотрена команда отключения лазерного излучения.

Для управления механизмом подачи проволоки достаточно двух команд: начало подачи проволоки и останов подачи проволоки. В качестве аргумента в команде начала подачи проволоки используется линейная скорость перемещения проволоки.

Для управления клапаном подачи защитного газа также достаточно двух команд (открытие и закрытие клапана), однако в данном случае обе команды не требуют указания каких-либо аргументов.

Наиболее сложная система команд должна быть реализована для управления перемещением промышленного робота. В данном случае требуется реализация нескольких классов команд:

1. сервисные команды (инициализация, проверка состояния и др.);
2. команды настройки используемых систем координат (задание системы координат (СК) базы, СК инструмента);
3. команды управления перемещением инструмента.

Особенностью команд первого типа является то, что данные команды выполняются только один раз при запуске работы комплекса и при каждом запуске набор этих команд всегда одинаков. Поэтому команды первого типа выносятся в текст управляющей программы не будут, а их реализация будет осуществлена в виде фрагмента программы в ПЛК, выполняющегося при запуске.

Команды второго типа реализуются в виде двух команд (для задания координат инструмента и координат базы). В каждой из команд в качестве параметров указываются: номер базы или инструмента, координаты которого задаются; три координаты ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) в декартовой системе координат; три угла поворота ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) относительно осей декартовой системы координат.

Команды третьего типа должны соответствовать основным типам перемещения и командам задания скоростей и ускорений при перемещениях. В качестве основных типов перемещения необходимо выделить: прямолинейные перемещения, перемещения по дуге, перемещения «точка-точка». В качестве аргументов в описанных командах используются координаты конечной точки, в которую должен быть перемещён инструмент (для команды перемещения по дуге – также и координаты промежуточной точки, через которую проходит дуга). Большинство современных программных средств для подготовки управляющих программ для роботизированной обработки (CAD/CAM системы) генерируют последовательность перемещений именно с использованием этих трёх типов перемещений. В результате использование только этих трёх команд перемещений позволяет в дальнейшем автоматизировать подготовку управляющих программ с применением уже существующих CAD/CAM систем. В командах задания скоростей и ускорений в качестве аргументов используются соответственно величина скорости и ускорения последующих перемещений.

Готовая управляющая программа для выполнения сварки конкретного изделия представляет собой текстовый файл, в каждой следующей строке которого записана одна из вышеперечисленных команд с необходимыми параметрами. Данная программа обрабатывается системой управления комплекса, происходит интерпретация написанных команд и выполняются соответствующие действия.

#### **Анализ средств управления элементами роботизированного комплекса.**

В состав разрабатываемого роботизированного комплекса входит значительное количество локальных систем управления отдельными элементами комплекса, что приводит к необходимости анализа и выбора тех экземпляров оборудования, на которых будет осуществляться общая обработка управляющей программы для изготовления конкретного типа изделия. Рассмотрим имеющиеся системы управления с точки зрения требуемого функционала.

Система управления перемещением робота выполнена в виде контроллера робота. Алгоритмы работы контроллера робота ориентированы в первую очередь на управление всеми приводами, входящими в состав робота. Данная задача достаточно масштабна и требует выполнения в режиме реального времени для обеспечения требуемой точности перемещений. Поэтому реализация обработки общей управляющей программы роботизированного комплекса на базе контроллера робота не рекомендуется.

Система управления источником лазерного излучения представляет собой специализированный контроллер с закрытой программной и аппаратной архитектурой, поэтому реализация обработки управляющей программы на нём в рамках проводимого исследования невозможна.

Системы управления периферийными устройствами (модуль WHAM, механизм подачи проволоки, защитное ограждение) обладают сверхнизкой производительностью, достаточной



только для управления конкретным устройством, поэтому обработка управляющей программы на данных локальных системах управления также невозможна.

Из остального оборудования достаточной производительностью обладают промышленный ПЛК и панель оператора. На данном этапе следует отметить, что обработка управляющей программы роботизированного комплекса обладает рядом особенностей, а именно:

- управляющие программы такого рода обычно представляют собой текстовый файл с последовательностью команд;
- размеры управляющей программы могут достигать больших величин (единицы-десятки мегабайт информационного объёма и десятки тысяч команд в одной программе);
- устройство, на котором будет осуществляться обработка управляющей программы, должно позволять удобный и быстрый перенос новых программ, их хранение и выбор необходимой программы для обработки.

С учётом указанных особенностей, а также принципов функционирования ПЛК и панели оператора наиболее рациональным решением представляется первичная обработка файла с управляющей программой на панели оператора и дальнейшая трансляция последовательности команд на ПЛК. Это обусловлено следующими факторами:

- наличие USB-портов, большого объёма памяти и стандартных интерфейсов для упрощения работы с файлами в панели оператора;
- удобство реализации алгоритмов обработки текстовой информации за счёт использования скриптов в панели оператора;
- цикличность выполнения программы на ПЛК (такой способ выполнения программы привёл бы к значительным трудностям в реализации первичной обработки текстового файла с управляющей программой на ПЛК).

#### **Заключение.**

В рамках данной работы была предложена концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки. Приведён краткий анализ технологий сварки сложных изделий, таких как тонкостенные конструкции. Приведена функциональная схема роботизированного комплекса с выбором основного технологического оборудования для его реализации. Рассмотрены варианты компоновки управляющей программы. В результате анализа вариантов было принято решение о компоновке управляющей программы для выполнения сварки конкретного изделия в виде единого файла с последующей интерпретацией и передачей соответствующих команд на отдельные исполнительные устройства. Описаны команды и основные требования к ним, которые необходимо реализовать для построения единой управляющей программы. На основе анализа технических и программных особенностей оборудования комплекса с учётом специфики структуры управляющей программы был сделан вывод о том, что обработку программы необходимо выполнять в два этапа:

1. предварительное чтение и обработка файла с программой на базе панели оператора;
2. дальнейшая трансляция распознанных команд на ПЛК, который в свою очередь уже будет генерировать необходимые последовательности управляющих сигналов для остального оборудования.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Васильев, В. И. Введение в основы сварки: учеб. пособие / В. И. Васильев, Д. П. Ильященко, Н. В. Павлов; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 317 с.
2. Влияние режима сварки авиационных трубопроводов из нержавеющей стали на возникновение дефектов сварных швов / А. С. Кравченко, П. В. Бахматов, С. П. Мазур, В. С. Пицык // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № IV-1 (32). – С. 78-87.
3. Сухоруков, С. И. Обеспечение упрочнения сварных швов авиационных трубопроводов / С. И. Сухоруков, В. Н. Хрульков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Т. 16. – № 2 (182). – С. 57-63.

4. Сухоруков, С. И. Разработка структуры программно-аппаратного комплекса для управления роботизированным комплексом лазерной сварки тонкостенных конструкций / С. И. Сухоруков, В. Н. Хрульков // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 477-480.
5. Geng, Shaoning; Jiang, Ping; Shao, Xinyu; Guo, Lingyu; Gao, Xuesong «Heat transfer and fluid flow and their effects on the solidification microstructure in full-penetration laser welding of aluminum sheet», JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY, vol.46, pp. 50-63, 2020.
6. Xu, Xinkun; Song, Gang; Zhao, Shuang; Liu, Liming «Effect of distance between the heat sources on energy transfer behavior in keyhole during laser-GTA welding titanium alloy», JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES, vol. 55, pp. 317-325, 2020.
7. Ahmad, GN; Raza, MS; Singh, NK; Kumar, H «Experimental investigation on Ytterbium fiber laser butt welding of Inconel 625 and Duplex stainless steel 2205 thin sheets», OPTICS AND LASER TECHNOLOGY, vol. 126, 2020.
8. Jiang, Hao; Lei, Zhenkun; Bai, Ruixiang; Wu, Wen; Liu, Da; Guo, Zhenfei; Yan, Cheng; Dong, Honggang; Li, Mingqiang «Identifying elasto-plastic damage coupling model of laser-welded aluminum alloy by virtual field method and digital image correlation», OPTICS AND LASER TECHNOLOGY, vol. 129, 2020.
9. Бузикаева, А. В. Синтез энергосберегающего управления двигателем последовательного возбуждения / А. В. Бузикаева, С. П. Черный, В. И. Суздорф // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 23-28.
10. Стельмашук, С. В. Синтез следящего электропривода с контуром скорости, настроенного на модульный оптимум / С. В. Стельмашук, В. А. Бунаков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № IV-1 (28). – С. 54-62.
11. Стельмашук, С. В. Электропривод с компенсацией статического момента / С. В. Стельмашук, К. С. Аминов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 73-80.
12. Черный, С. П. Нечёткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С. П. Черный, А. А. Гусаров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1 (6). – С. 24-30.



Беляев А. С., Тырышкин А. В., Филипас А. А.  
A. S. Belyaev, A. V. Tyryshkin, A. A. Filipas

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПОРНОГО АКТИВНОГО ОБЕЗВЕШИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ MATLAB SIMULINK

## DESIGNING A REFERENCE ACTIVE WEIGHTLESSNESS SYSTEM FOR SPACECRAFT ELEMENTS USING MATLAB SIMULINK

**Беляев Александр Сергеевич** – аспирант отделения «Автоматизация и робототехника» Томского политехнического университета (Россия, Томск); 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: asb22@tpu.ru.

**Aleksandr S. Belyaev** – Post-Graduate Student, Tomsk Polytechnic University (Russia, Tomsk); Tomsk, 634050, 30, Lenina st. E-mail: asb22@tpu.ru.

**Тырышкин Александр Васильевич** – кандидат технических наук, доцент отделения «Автоматизация и робототехника» Томского политехнического университета (Россия, Томск); 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: tyryshkin@tpu.ru.

**Aleksandr V. Tyryshkin** – PhD in Engineering, Associate Professor, Member of IEEE Robotics and Automation Society, Tomsk Polytechnic University (Russia, Tomsk); Tomsk, 634050, 30, Lenina st. E-mail: tyryshkin@tpu.ru.

**Филипас Александр Александрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой – руководитель отделения «Автоматизация и робототехника» на правах кафедры Томского политехнического университета (Россия, Томск); 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: filipas@tpu.ru.

**Aleksandr A. Filipas** – PhD in Engineering, Associate Professor, Tomsk Polytechnic University (Russia, Tomsk); Tomsk, 634050, 30, Lenina st. E-mail: filipas@tpu.ru.

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены и проанализированы основные методы обезвешивания раскрываемых элементов космических аппаратов при наземных испытаниях. Предложена активная опорная система обезвешивания на основе мобильной робототехнической платформы и опорной стойки, жёстко закреплённой с обезвешиваемым элементом и свободно перемещающейся по специальной площадке, установленной на мобильной платформе. Разработана имитационная модель в среде Matlab Simulink с использованием блоков Simscape Multibody, и настроена система управления мобильной платформой так, чтобы не допускать выход опорной стойки за пределы опорной площадки мобильного робота. Смоделирована работа данной системы, и получены переходные характеристики.

**Summary.** In this paper, the main methods of weighting the deployable elements of spacecraft during ground tests are considered and analyzed. An active support system for weighting is proposed on the basis of a mobile robotic platform and a support stand rigidly fixed to the weighting element and freely moving along a special platform mounted on a mobile platform. A simulation model has been developed in the Matlab Simulink environment using Simscape Multibody blocks, and the mobile platform control system has been tuned so as not to allow the support leg to go beyond the mobile robot support platform. The operation of this system is simulated and transient characteristics are obtained.

**Ключевые слова:** обезвешивание, крылья солнечных батарей, наземные испытания, система автоматического управления, мобильная робототехническая платформа, моделирование, Matlab Simulink, регулирование по отклонению.

**Key words:** weightlessness, solar wings, ground testing, automatic control system, mobile robotic platform, simulation, Matlab Simulink, deflection control.

УДК 62-529

**Введение.** Бурное развитие космических технологий увеличивает необходимое количество устройств различного назначения, таких как искусственные спутники, планетоходы, станции и т.п. В своём большинстве данные устройства имеют складные конструкции, позволяющие уменьшить габариты во время доставки. При доставке устройств до места функционирования, например на геостационарную орбиту или Луну, устройство должно обеспечивать развёртывание данных кон-



струкций в рабочее состояние. В качестве таких конструкций могут выступать солнечные батареи, рефлекторы антенн и др. Чтобы проверить работоспособность раскрытия и рассчитать энергетический запас, необходимый для данной операции, проводят наземные испытания, для которых необходимо воссоздать условия невесомости. Наиболее широкое применение получили тросовые системы обезвешивания [1-4], которые делятся на пассивные, пассивно-активные и активные. Общее устройство тросовых систем можно представить следующим образом.

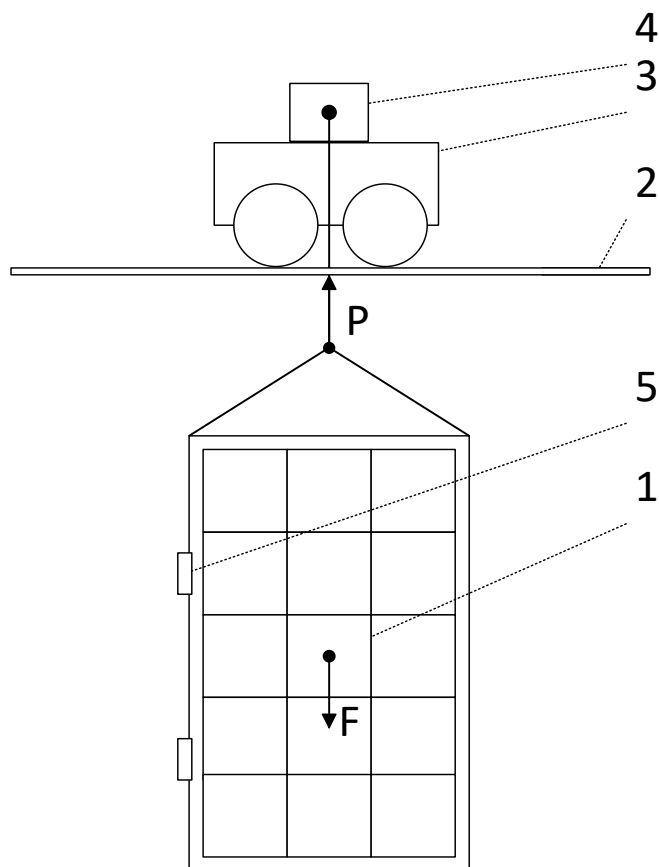


Рис. 1. Устройство тросовых систем обезвешивания

На рис. 1 цифрой 1 обозначен обезвешиваемый элемент, который может представлять собой как солнечную панель, так и спицу рефлектора. К потолку или другим конструкциям помещения, где проводятся испытания, закреплены направляющие 2, по которым передвигается каретка 3 с установленным на ней устройством обезвешивания 4. Панель крепится к корпусу космического аппарата или другой панели с помощью шарниров 5.

В основе пассивных систем обезвешивания заложено использование противовеса как устройства, создающего силу, равную весу обезвешиваемого элемента. Использование электропривода как устройства, создающего момент для компенсации веса обезвешиваемого элемента, легло в основу пассивно-активных систем. А использование электропривода ещё и для перемещения устройства обезвешивания привело к созданию полностью активных систем обезвешивания. Сравнение описанных выше видов систем представлено в табл. 1.

Кроме того, все виды тросовых систем являются распределёнными в пространстве, т.е. система энергоснабжения и системы управления находятся отдельно от каретки. Для минимизации ошибки обезвешивания наиболее подходящими являются полностью активные системы, поскольку они позволяют исключить нежелательный эффект присоединённых масс, а также изменять силу компенсации веса обезвешиваемого элемента в процессе раскрытия. Эти качества позволяют мак-



симально достоверно обеспечить обезвешивание элементов космических кораблей в земных условиях. Однако такие системы также имеют и недостатки, среди которых:

- большие массогабаритные параметры системы обезвешивания;
- сложность монтажа, наладки и настройки системы вследствие установки системы под потолком;
- распределённость системы в пространстве.

Таблица 1

Сравнение систем обезвешивания

Тип системы обезвешивания	За счёт чего осуществляется перемещение системы обезвешивания	Массо-габаритные характеристики	Алгоритмы настройки и управления	За счёт чего создаётся ошибка обезвешивания
Пассивная	Движение обезвешиваемого элемента	Большие из-за противовеса	Расчёт массы противовеса	За счёт эффекта присоединённых масс (наибольшие)
Пассивно-активная	Движение обезвешиваемого элемента	Средние из-за замены противовеса на электропривод	Система слежения по обратной связи через датчик веса	За счёт эффекта присоединённых масс (высокие)
Активная	За счёт электроприводов системы обезвешивания	Большие из-за увеличения числа приводов	2- или 3-контурная система слежения	За счёт ошибки позиционирования (наименьшие)

Альтернативным типом обезвешивания является опорное обезвешивание, осуществляемое с использованием колёсных и роликовых опор [9]. Данные системы бывают как пассивные, так и пассивно-активные и позволяют снизить массогабаритные характеристики и сложность монтажа по сравнению с тросовыми системами. Однако поскольку перемещение такого рода систем осуществляются пассивно, то есть исключительно за счёт движения обезвешиваемого элемента, то в системе присутствует эффект присоединённых масс, который увеличивает инерционность системы и приводит к возникновению моментов трения в шарнирах, приводящих к серьёзной ошибке обезвешивания и, как следствие, неоптимальному расчёту параметров системы раскрытия.

В работе [5] рассматривается концепция реализации системы опорного обезвешивания с использованием датчика силы в качестве устройства определения смещения обезвешиваемого элемента в пространстве. Однако в работе не рассмотрена система управления по вектору силы, для которой необходимо полностью описать динамику работы системы. К такой системе управления предъявляются повышенные требования по надёжности и быстродействию, что существенно усложнит систему управления. Кроме того, отклонение опорного стержня, соединяющего мобильную платформу и обезвешиваемый элемент, даже на небольшой угол приведёт к ошибке обезвешивания, что крайне нежелательно.

Поэтому цель данной работы заключена в разработке полностью активной системы опорного обезвешивания и системы управления ею.

**Структура системы обезвешивания.** На рис. 2 представлены структурная схема активной системы обезвешивания и схематичное изображение внешнего вида устройства.

На рис. 2, а показана структурная схема рассматриваемого устройства, где обозначены следующие элементы: 1 – мобильная платформа; 1.1i – i-й привод; 1.2i – всенаправленное колесо; 2 – контроллер; 3 – источник питания; 4 – устройство компенсации веса; 5 – датчик силы; 6 – опорная доска; 7 – устройство определения положения; 8 – опорная стойка; 9 – шариковая опора; 10 – крепление к обезвешиваемому элементу. Электрические соединения отмечены сплошной линией, а механические соединения – штриховой линией.

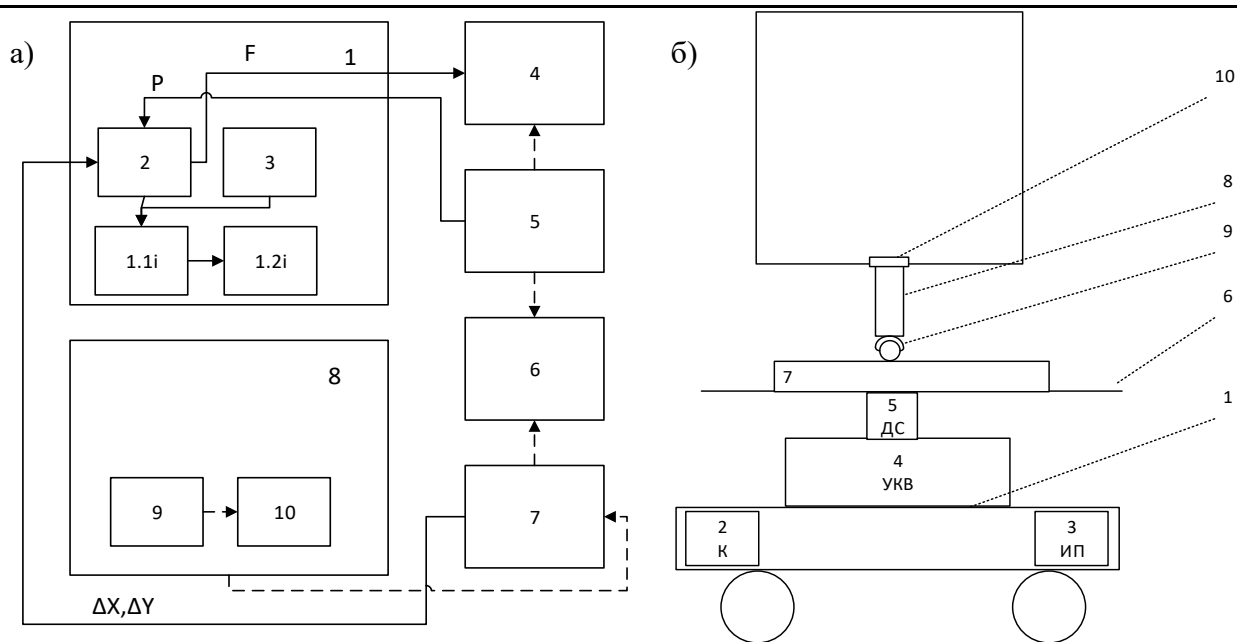


Рис. 2. Структурная схема системы обезвешивания (а) и схематичное изображение внешнего вида устройства обезвешивания (б)

Устройство работает следующим образом: на этапе монтажа к обезвешиваемому элементу, например солнечной батарее, прикрепляют вертикальную опорную стойку 8 при помощи п-образного крепления 10. С другой стороны опорная стойка, снабжённая шариковой опорой 9, устанавливается на опорную доску 6, чтобы устройство определения положения 7 могло определить положение шариковой опоры 9. Во время раскрытия обезвешиваемого элемента происходит перемещение опорной стойки 8 по опорной доске 6 за счёт свободного движения шариковой опоры 9, данное перемещение фиксируется блоком определения положения 7 и передаётся на контроллер 2, который, управляя приводами 1.1i мобильной платформы, перемещает её таким образом, чтобы центр опорной доски 6 возвращался под опорную стойку. Кроме того, данное устройство во время раскрытия определяет вес обезвешиваемого элемента при помощи датчика силы 5 и передаёт его на контроллер 2, который формирует управляющий сигнал для устройства компенсации веса 4, что позволяет компенсировать вес обезвешиваемого элемента.

Таким образом, данное устройство является полностью активным, то есть имеет возможность изменения силы компенсации веса во времени и перемещается с использованием встроенных в мобильную платформу электроприводов. Данное решение позволяет скомпенсировать вес обезвешиваемого элемента в земных условиях и исключить нежелательный эффект присоединённых масс.

#### Разработка имитационной модели и синтез системы управления в Matlab Simulink.

Для подтверждения работоспособности предложенного решения необходимо разработать систему управления мобильной платформой так, чтобы при движении обезвешиваемого элемента в пространстве опорная стойка всегда оставалась на опорной доске. Поскольку использование моделирования позволяет облегчить разработку и настройку систем управления, а также проверить работоспособность решения и учесть все проблемы до изготовления прототипа, была разработана имитационная модель в среде Matlab Simulink.

Так как наиболее важной является задача позиционирования мобильной платформы, в рамках модели не будет затронут контур компенсации веса, то есть будем считать, что настройка блока компенсации веса происходит на этапе монтажа и во время раскрытия изменение веса не происходит.

Для осуществления визуализации работы имитационной модели использованы блоки Simscape Multibody среды Matlab Simulink. С помощью блоков данной библиотеки создана упрощённая модель мобильной платформы, которая представляет собой куб с ребром 1 м, способный перемещаться по 2 направлениям – осям  $X$  и  $Y$  глобальной системы координат, а также обезвешиваемый элемент – солнечную панель, представленную в виде параллелепипеда размера  $2 \times 1 \times 0.1$  м, соединённую через шарнирное соединение, имеющую степень вращения вокруг вертикальной оси координат, с балкой, которая также соединена через шарнирное соединение с вертикальной опорой, имитирующей корпус космического корабля. Моделирование опорной стойки осуществляется за счёт использования цилиндрического блока, свободно перемещающегося по 2 осям и жёстко закреплённого к обезвешиваемому элементу. Для обеспечения согласования между блоками используются блоки кинематических преобразований, соединяющие центры координат всех объектов (тел). Полученная модель позволяет смоделировать динамику обезвешиваемого элемента и мобильной платформы, однако в ней не заложены моменты трения колёс и сопротивления, влияющие на мобильную платформу, поэтому данные воздействия заложены как возмущения в системе управления.

Для управления мобильной тележкой необходимо на вход имитационной модели подать силы, действующие на мобильную платформу вдоль осей  $X$  и  $Y$ , для этого необходимо определить кинематические взаимосвязи между моментами двигателей и силами, действующими на платформу. Для обеспечения возможности движения платформы в любом направлении используются платформы на голономных колёсах, которые бывают Omni и Mecanum типов, отличающихся углами поворота роликов. Для моделирования кинематики за прототип была взята робототехническая платформа Kuka YouBot, содержащая 4 Mecanum колеса с углом поворота роликов под 45 градусов.

В статье [8] рассмотрена кинематика мобильных платформ со всенаправленными колёсами любого типа и количества. Используя результаты данной работы, определим прямые и обратные кинематические преобразования:

$$\dot{\phi} = \frac{1}{R \cdot \sin(\delta)} \cdot (\sin(\alpha + \delta) \cdot (v_y + \omega \cdot a_x) + \cos(\alpha + \delta) \cdot (v_x - \omega \cdot a_y)), \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_x = \frac{R}{4} \cdot (M_1 + M_2 + M_3 + M_4) \\ F_y = \frac{R}{4} \cdot (-M_1 + M_2 + M_3 - M_4) \\ M_\omega = \frac{R}{4(L+l)} \cdot (-M_1 + M_2 - M_3 + M_4) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \frac{1}{R} \cdot (v_x + v_y + (-L-l) \cdot \omega) \\ \dot{\phi}_2 = \frac{1}{R} \cdot (-v_x + v_y + (L+l) \cdot \omega) \\ \dot{\phi}_3 = \frac{1}{R} \cdot (-v_x + v_y + (-L-l) \cdot \omega) \\ \dot{\phi}_4 = \frac{1}{R} \cdot (v_x + v_y + (L+l) \cdot \omega) \end{cases}, \quad (3)$$

где  $F_x$  – сила движения мобильной платформы вдоль оси  $X$ ;  $F_y$  – сила движения мобильной платформы вдоль оси  $Y$ ;  $M_\omega$  – момент вращения платформы;  $L$  – длина мобильной платформы;  $l$  – половина ширины мобильной платформы;  $M_i$  – момент вращения  $i$ -го колеса;  $\dot{\phi}_i$  – скорость

вращения  $i$ -го колеса;  $R$  – радиус колеса;  $v_x$  – скорость мобильной платформы вдоль оси  $X$ ;  $v_y$  – скорость мобильной платформы вдоль оси  $Y$ ,  $\omega$  – скорость вращения мобильной платформы.

Система уравнений (2) используется в блоке «Kinematics», а система уравнений (3) – в блоках «Kinematik\_OBR». В качестве двигателя, обеспечивающего движение мобильной платформы, выбран двигатель постоянного тока фирмы DunkenMotoren GR 80x80 в связке с редуктором той же фирмы PLG 60 с соотношением 12:1. Математическая модель двигателя постоянного тока описана в работах [6-7]. Однако поскольку имитационная модель платформы моделируется в блоках Simscape Multibody, то обратная связь по скорости вращения двигателя передаётся напрямую с блока «model» в математические модели двигателей с учётом преобразований через блок обратных кинематических преобразований. Для поддержания скорости вращения двигателя используется ПИД-регулятор скорости, настроенный на симметричный оптимум. Для управления движением платформы непосредственно по координатам вдоль осей  $X$  и  $Y$  системы координат платформы по каждой из осей также используется ПИД-регулятор с обратной связью по положению опорной стойки.

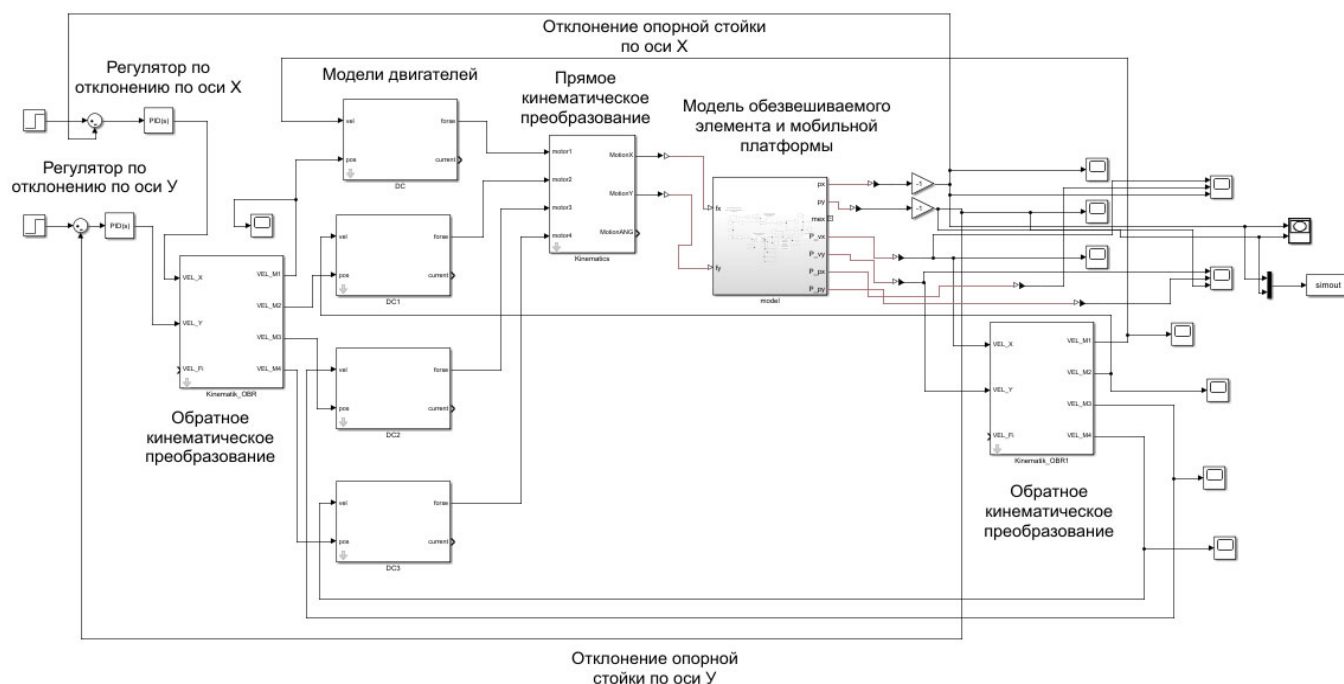


Рис. 4. Имитационная модель мобильной платформы с системой управления

Для проверки работоспособности вес панели взят 40 кг, вес мобильной платформы – 40 кг, вес штанги – 5 кг, вес опорной стойки – 2 кг. Для управления процессом раскрытия данной батареи во времени используется зависимость между углом поворота панели и моментом. Причём при достижении элементом требуемого (заданного) угла раскрытия происходит алгоритм «зачековки», то есть момент, подаваемый для управления, приравняется к 0 и элементы рассматриваются как единый механизм. Данный процесс реализуется на реальных солнечных батареях за счёт механических устройств. После чего панель производит колебания вблизи раскрывшегося положения с затухающей амплитудой, которые имитируют медленный процесс остановки в безвоздушной среде.

Кроме того, для проверки работоспособности и быстродействия системы начальное смещение опорной стойки относительно центра мобильной платформы было сдвинуто по осям  $X$  и  $Y$ , такая ситуация возможна при неточной начальной установке. Полученные переходные характеристики представлены на рис. 5.



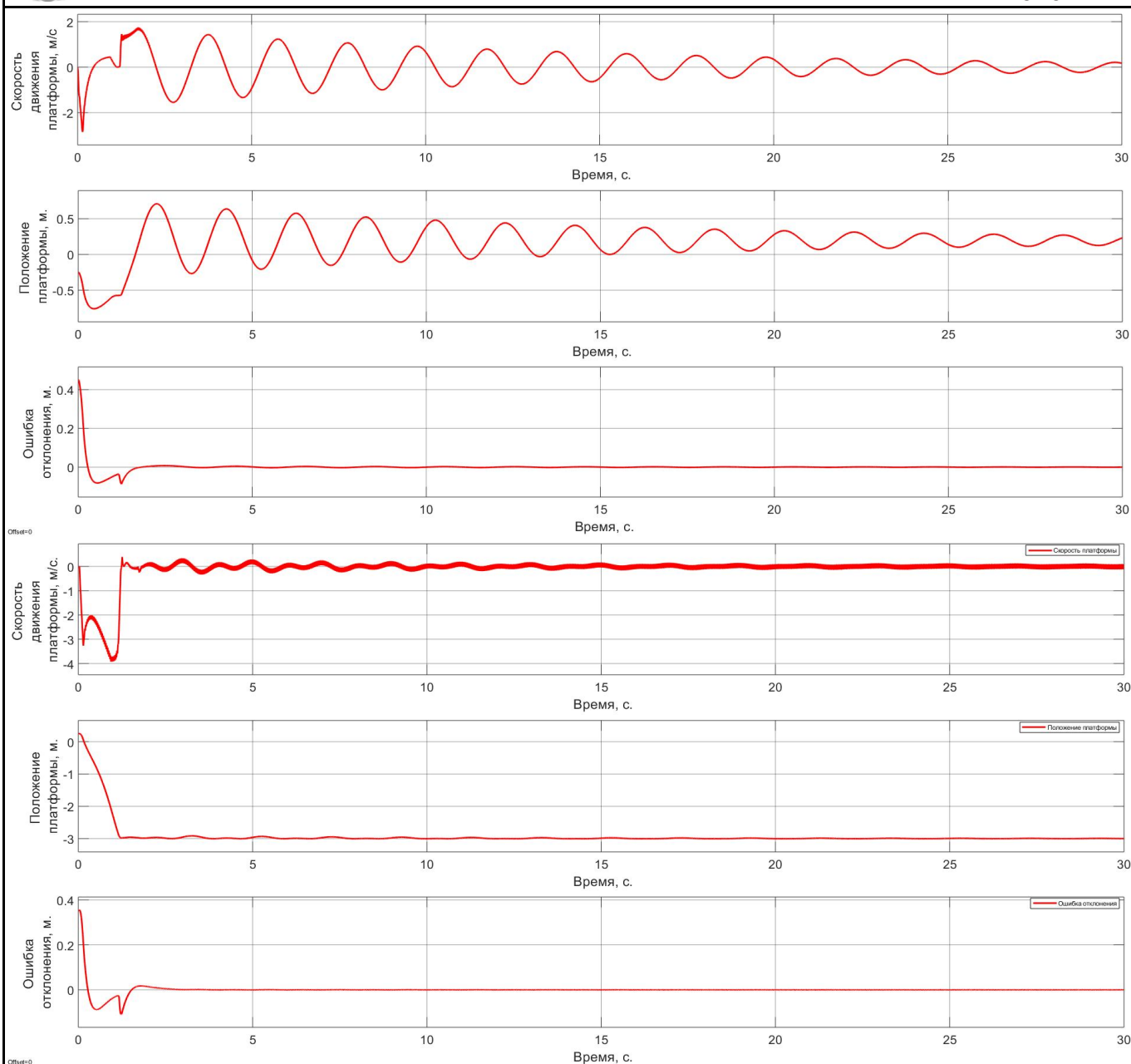


Рис. 5. Переходные характеристики скорости, положения и отклонения мобильной платформы по осям  $X$  и  $Y$

По данным переходным характеристикам можно наблюдать, что смещения положения опорной стойки за пределы опорной доски не происходит (см. рис. 5, характеристика «отклонение»), то есть находится в пределах  $[-0.5; 0.5]$  м по обеим осям координат. Динамическая ошибка по отклонению на протяжении всех режимов работы не превышает 0.12 м по обеим осям координат, а статическая ошибка не превышает 0,005 м. Из этого следует, что система успевает компенсировать рассогласование и мобильная платформа успевает обеспечивать задачу слежения за положением опорной стойки, следовательно, обеспечивается работа устройства обезвешивания.

**Вывод.** Системы обезвешивания необходимы при отработке наземных испытаний элементов космических аппаратов. Предложенное в работе решение основывается на использовании полностью активной опорной системы обезвешивания, в основе которой лежит использование мобильной робототехнической платформы и датчика определения положения опорной стойки, что

позволяет компенсировать эффект присоединённых масс пассивных и пассивно-активных систем опорного обезвешивания. Поскольку в процессе раскрытия меняется положение обезвешиваемого элемента, то для обеспечения обезвешивания разработана система управления мобильной платформой, не позволяющая опорной стойке сместиться за пределы опорной доски. Работоспособность системы управления проверена на имитационной модели в среде Matlab Simulink с применением блоков библиотеки Simscape Multibody, позволяющей моделировать различные механические системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зарницын, А. Ю. Исследование динамики следящих систем стенда с активной системой обезвешивания для испытаний раскрытия в земных условиях крыльев солнечных батарей / А. Ю. Зарницын, А. М. Малышенко // Молодёжь и современные информационные технологии: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск: ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 268-269.
2. Патент № 2468969 Российская Федерация, МПК В64G 7/00 (2006.01). Испытательный стенд для раскрытия батареи солнечной: № 2010151175/11: заявлено 13.12.2010; опубликовано 20.06.2012 / Билько В. В., Плетнёва Н. А., Плетнёв В. В. и др. – 2 с.
3. Патент № 2483991 Российская Федерация, МПК В64G 7/00 (2006.01), В64G 1/44 (2006.01). Стенд раскрытия панелей солнечной батареи: № 2011150074/11: заявлено 08.12.2011; опубликовано 10.06.2013 / Билько В. В., Плетнева Н. А., Сороколетов В. И., Шупляк Ю. П. – 9 с.
4. Патент № 2516880 Российская Федерация, МПК В64G 5/00 (2006.01), В64G 7/00 (2006.01), G01M 17/00 (2006.01). Способ испытаний многосвязной механической системы космического аппарата на функционирование и устройство для его осуществления: № 2012130434/11; заявлено 17.07.2012; опубликовано 27.01.2014 / Банкет В. Н., Евтеев А. Н., Катунский А. А. и др. – 2 с.
5. Трапп, С. А. Разработка и исследование робокара с управляемым движением по вектору силы: магистерская диссертация / С. А. Трапп; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт кибернетики (ИК), Кафедра систем управления и мехатроники (СУМ); науч. рук. А. М. Малышенко. – Томск, 2017. – 107 с.
6. Терёхин, В. Б. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink: учеб. пособие / В. Б. Терёхин, Ю. Н. Дементьев; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 307 с.
7. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособие / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер, В. И. Ключев. – Москва: Энергия, 1979. – 615 с.
8. Gfrerrer A. Geometry and kinematics of the Mecanum wheel // Computer Aided Geometric Design. – 2008. – Vol. 25, no. 9. – P. 784-791.
9. Kremer K. MAVEN Takes Final Test Spins, Flexes Solar Panels Before Imminent Trek to Florida Launch Site. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.universetoday.com/103858/maven-takes-final-test-spins-flexes-solar-panels-before-imminent-trek-to-florida-launch-site/> (дата обращения: 13.09.2020).
10. Kim K. K. Use of electrodynamic accelerators for aviation and space purposes // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Aviatsionnaya Tekhnika. – 2003. – Issue 1. – P. 27-31.



Гринкруг М. С., Новгородов Н. А.  
M. S. Grinkrug, N. A. Novgorodov

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬНЫМИ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ С УЧЁТОМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЕЁ НАГРУЗКИ**

**DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM OF THE DIESEL POWER PLANT CONTROL  
SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE UNIFORMITY OF ITS LOAD**

**Гринкруг Мирон Соломонович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая физика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: grin@knastu.ru.

**Miron S. Grinkrug** – PhD in Engineering, Associate Professor, General Physics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave. 27. E-mail: grin@knastu.ru.

**Новгородов Никита Александрович** – старший преподаватель кафедры «Общая физика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: nikitakms@yandex.ru.

**Nikita A. Novgorodov** – Senior Lecturer, General Physics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave. 27. E-mail: nikitakms@yandex.ru.

**Аннотация.** В статье представлен алгоритм работы системы управления дизель-генераторами на дизельной электростанции, позволяющий снизить потери топлива на выработку электроэнергии с учётом неравномерности нагрузки электростанции. Рассмотрены функции прогнозирования изменения мощности нагрузки, определения времени включения ДГ на примере трёхгенераторной дизельной электростанции.

**Summary.** The article presents an operation algorithm for the diesel generators control system at a diesel power plant, which allows to reduce power generation fuel losses, taking into account the uneven load of the power plant. The functions of predicting changes in load power, determining the time of diesel generator switching on are considered using the example of a three-generator diesel power plant.

**Ключевые слова:** дизельная электростанция, дизель-генератор, система управления, алгоритм, нагрузка.

**Key words:** diesel power plant, diesel generator, control system, algorithm, load.

УДК 621.311.236

На территории Дальневосточного региона располагается большое количество малых населённых пунктов, удалённых от районных центров на сравнительно большое расстояние [1]. Электроснабжение этих населённых пунктов зачастую осуществляется от дизельных электростанций (ДЭС) с одним или несколькими дизель-генераторами (ДГ) в своём составе. Топливо, необходимое для работы ДЭС, постоянно растёт в стоимости. В себестоимости электроэнергии затраты на топливо составляют от 60 до 80 %, поэтому в настоящее время цена электроэнергии доходит до 70 рублей за кВт·ч и постоянно растёт. Вследствие этого проблема снижения расхода топлива, необходимого для выработки электроэнергии, является актуальной. В настоящее время основные расходы топлива на ДЭС происходят в дизель-генераторах. Максимальный КПД дизель-генератора может достигать 40 %. Такие параметры, как правило, достигаются при номинальной нагрузке ДГ. При снижении нагрузки ДГ его КПД падает, а расход топлива, необходимого для выработки электроэнергии, возрастает.

Согласно исследованию [2], нагрузки ДЭС могут меняться в диапазоне 20...100 % от максимальной мощности нагрузки и ниже. По этой причине дизель-генераторы работают при неоптимальных режимах, вызывающих рост расхода топлива на производство электрической энергии [4].

В дополнение к этому неоптимальный выбор необходимых мощностей ДГ или работа нескольких ДГ одного типа на общую нагрузку может только усугубить проблему роста расхода топлива [5; 6; 7; 8; 9; 10].

Изменения удельного расхода топлива в зависимости от нагрузки ДГ [3] описывается формулами

$$\bar{g} = 0,0811 \cdot (\bar{P})^{-1,385} + 0,912; \quad \bar{P} = \frac{P}{P_{\text{ном}}}; \quad \bar{g} = \frac{g}{g_{\text{ном}}},$$

где  $\bar{P}$  – суммарная относительная мощность дизель-генератора;  $P$  – текущее значение суммарной мощности дизель-генератора, кВт;  $P_{\text{ном}}$  – номинальная мощность дизель-генератора, кВт;  $\bar{g}$  – относительный удельный расход ДГ;  $g$  – текущее значение удельного расхода топлива ДГ на выработку электроэнергии, кг/кВт·ч;  $g_{\text{ном}}$  – номинальное значение удельного расхода топлива ДГ на выработку электроэнергии при мощности нагрузки, равной номинальной мощности ДГ, кг/кВт·ч.

В работе [2] была рассмотрена методика ступенчатого переключения ДГ на примере двухгенераторной ДЭС с учётом времени, требуемого для разогрева двигателей ДГ. Для осуществления переключения из условия снижения расхода топлива рассчитывались мощности нагрузок дизель-генераторов малой и большой мощности. На всём диапазоне изменения нагрузки было выделено три участка, разделённых расчётными значениями мощности нагрузки  $P_n$ :  $P_{\text{кр1}}$  – мощность нагрузки, при которой равны удельные расходы топлива обоих дизель-генераторов;  $P_{\text{кр2}}$  – мощность нагрузки, при которой расход топлива в случае работы одного дизель-генератора равен расходу топлива при работе обоих дизель-генераторов на ту же нагрузку.

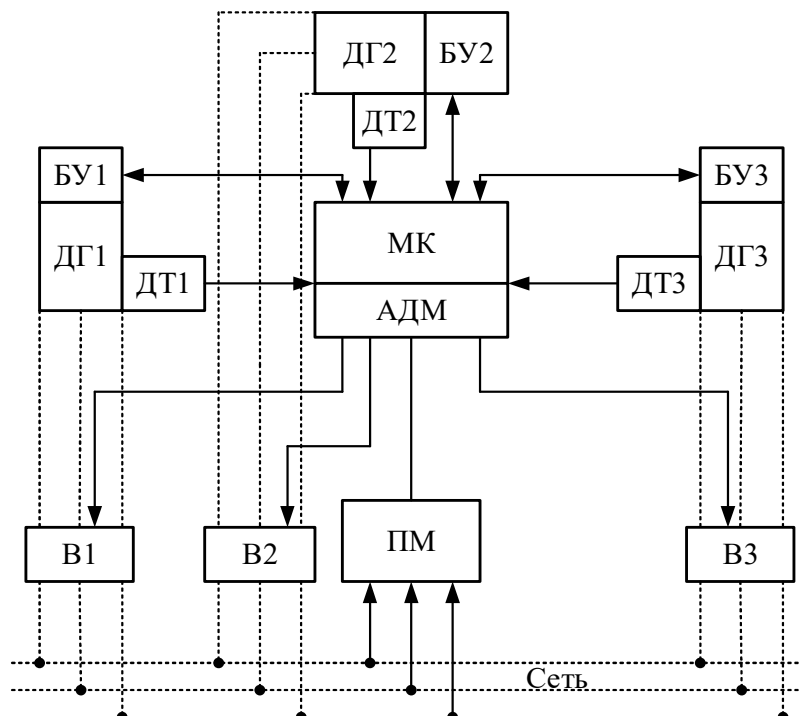
Все переключения в схеме производятся с выдержкой времени, необходимой для разогрева двигателей соответствующих дизель-генераторов, которая определяется с учётом фактической температуры двигателя и нормальной эксплуатационной температуры двигателя.

Там же [2] приведена блочная схема системы управления дизель-генераторами, содержащая блоки управления работой дизель-генераторов, датчики температуры двигателей, микроконтроллер, преобразователь мощности нагрузки и выключатели, коммутирующие дизель-генераторы к сети электроснабжения. На каждом этапе работы системы управления микроконтроллер определяет необходимость коммутации ДГ в сеть и количество ДГ, работающих на полную нагрузку.

Когда нагрузка ДЭС мала ( $P_n < P_{\text{кр1}}$ ) и отсутствует тенденция к её увеличению ( $\frac{dP_n}{dt} < 0$ ), в работе находится ДГ меньшей мощности. При росте нагрузки ( $\frac{dP_n}{dt} > 0$ ) определяется момент времени коммутации ДГ большей мощности  $t_{\text{д1}}$  с учётом фактической температуры второго двигателя. При дальнейшем увеличении нагрузки в области  $P_{\text{кр1}} < P_n < P_{\text{кр2}}$  возможен случай спада и роста мощности нагрузки. В соответствии с этим определяются моменты коммутации  $t_{\text{д2}}$  (при снижении нагрузки и возврате в область  $P_n < P_{\text{кр1}}$ ) и  $t_{\text{д3}}$  (при росте мощности нагрузки). При большой нагрузке ДЭС, когда  $P_n > P_{\text{кр2}}$ , но  $\frac{dP_n}{dt} < 0$ , включаются в работу оба ДГ и определяется  $t_{\text{д4}}$  – момент времени коммутации при снижении нагрузки и возврате во вторую область.

Данная схема управления ДГ не учитывает возможность прогнозирования изменений мощности нагрузки за счёт использования расчётных методов и современных средств фиксирования параметров электрооборудования, таких как микропроцессорные реле, регистраторы энергетических параметров и т.д. Для более оптимального снижения потерь от неравномерности нагрузки целесообразно также увеличить число дизель-генераторов на электростанции до трёх. По полученным данным [3] при максимальной мощности нагрузки свыше 1800...2000 кВт целесообразна установка на ДЭС трёх дизель-генераторов. Это позволяет экономить более 10 % топлива в год. Данная работа посвящена разработке системы управления трёхгенераторной ДЭС с учётом прогнозирования изменения нагрузки.

На рис. 1 приведена схема управления тремя дизель-генераторами ДЭС, включающая датчики температуры для каждого из трёх ДГ и микроконтроллер с архивом данных о предыдущих переключениях.



ДГ1 – дизель-генератор меньшей мощности; ДГ2 – дизель-генератор средней мощности; ДГ3 – дизель-генератор большей мощности; ДТ1, ДТ2, ДТ3 – датчики температуры дизель-генераторов; МК – микроконтроллер; АДМ – архив данных микроконтроллера; ПМ – преобразователь мощности; В1, В2, В3 – выключатели нагрузок; БУ1, БУ2, БУ3 – блоки управления дизель-генераторов

Рис. 1. Блочная схема системы управления ДГ

Данная схема работает по следующему принципу. При малых нагрузках работает ДГ меньшей мощности. При росте нагрузки последовательно подключаются ДГ большей мощности, а ДГ меньшей мощности отключаются. В дальнейшем при повышении нагрузки происходит последовательное подключение пар ДГ, и при больших нагрузках, близких к максимальным, работают все три ДГ.

Для расчёта новых моментов времени коммутации ДГ с учётом их текущей температуры необходимо спрогнозировать изменение нагрузки ДЭС во времени. При работе ДЭС с тремя генераторами на меняющуюся нагрузку возможно в общем случае семь различных сочетаний работы ДГ:

1. работает только первый генератор малой мощности ДГ1 ( $P_n < P_{кр1}; P_n < P_{ДГ1ном}$ );
2. работает только второй генератор средней мощности ДГ2 ( $P_n < P_{кр2}; P_n < P_{ДГ2ном}$ );
3. работает только третий генератор большой мощности ДГ3 ( $P_n < P_{кр3}; P_n < P_{ДГ3ном}$ );
4. работают в паре генераторы ДГ1 и ДГ2 ( $P_n < P_{кр4}; P_n < P_{ДГ1ном} + P_{ДГ2ном}$ );
5. работают в паре генераторы ДГ1 и ДГ3 ( $P_n < P_{кр5}; P_n < P_{ДГ1ном} + P_{ДГ3ном}$ );
6. работают в паре генераторы ДГ2 и ДГ3 ( $P_n < P_{кр6}; P_n < P_{ДГ2ном} + P_{ДГ3ном}$ );
7. работают все генераторы ДГ1, ДГ2, ДГ3 на всю нагрузку ( $P_n > P_{кр6}; P_n < P_{ДГ1ном} + P_{ДГ2ном} + P_{ДГ3ном}$ ).

Значения мощностей переключений ДГ  $P_{кр1}, P_{кр2}, P_{кр3}, P_{кр4}, P_{кр5}, P_{кр6}$  определяются из следующих условий:

1.  $P_{кр1}$  – мощность нагрузки, при которой равны расходы топлива, необходимого для производства электроэнергии ДГ1 и ДГ2;



2.  $P_{кр2}$  – мощность нагрузки, при которой расходы топлива, необходимого для производства электроэнергии ДГ2 и ДГ3, равны;

3.  $P_{кр3}$  – мощность нагрузки при которой расход топлива, необходимого для производства электроэнергии ДГ3, равен суммарному расходу топлива при работе ДГ1 и ДГ2;

4.  $P_{кр4}$  – мощность нагрузки, при которой суммарный расход топлива, необходимого для производства электроэнергии при работе ДГ1 и ДГ2, равен суммарному расходу топлива при работе ДГ1 и ДГ3;

5.  $P_{кр5}$  – мощность нагрузки, при которой суммарный расход топлива, необходимого для производства электроэнергии при работе ДГ1 и ДГ3, равен суммарному расходу топлива при работе ДГ2 и ДГ3;

6.  $P_{кр6}$  – мощность нагрузки, при которой суммарный расход топлива, необходимого для производства электроэнергии при работе ДГ2 и ДГ3, равен суммарному расходу топлива при работе всех генераторов ДЭС.

Методика определения  $P_{кр1}$ ,  $P_{кр2}$ ,  $P_{кр3}$ ,  $P_{кр4}$ ,  $P_{кр5}$  приведена в [3]. Исходными данными для этих расчётов являются номинальные значения мощностей и удельных расходов ДГ. Аналогичным способом может быть получена и формула для определения  $P_{кр6}$ . Она определяется из следующего уравнения, которое выражает условие равенства расходов топлива, необходимого для производства электроэнергии при работе двух ДГ и трёх ДГ:

$$\frac{g_{ном1}P_{ном1} + g_{ном2}P_{ном2}}{P_{ном1} + P_{ном2}} \cdot \left[ c + a \cdot \left( \frac{P_{кр6}}{P_{ном1} + P_{ном2}} \right)^b \right] =$$

$$= \frac{g_{ном1}P_{ном1} + g_{ном2}P_{ном2} + g_{ном3}P_{ном3}}{P_{ном1} + P_{ном2} + P_{ном3}} \cdot \left[ c + a \cdot \left( \frac{P_{кр6}}{P_{ном1} + P_{ном2} + P_{ном3}} \right)^b \right],$$

где  $a = 0,0811$ ;  $b = -1,385$ ;  $c = 0,912$  – постоянные коэффициенты аппроксимации, полученные в [3].

Мощность нагрузки  $P_n$  фиксируется блоком преобразователя мощности нагрузки, в котором содержатся датчики тока нагрузки по каждой фазе отходящей от ДЭС линии и микроконтроллер для расчёта мощности нагрузки по каждой фазе ДЭС и суммарной нагрузки ДЭС. Значения нагрузок фиксируются за определённый период времени и сопоставляются с прогнозными, которые либо рассчитываются по формулам, либо берутся из архива данных МК. Текущая температура ДГ  $T_\phi$  замеряется соответствующими датчиками температуры, установленными на каждом генераторе. Время разогрева двигателей соответствующих ДГ определяется согласно следующему уравнению:

$$t_p = \Delta t_n - \frac{\Delta t_n}{\Delta T_{ном}} \cdot T_\phi, \quad (1)$$

где  $T_\phi$  – фактическая температура дизель-генератора, °С;  $\Delta T_{ном}$  – разность температур, необходимая для прогрева ДГ до нормальной температуры эксплуатации, °С;  $\Delta t_n$  – время, за которое текущая мощность нагрузки достигнет мощности, при которой необходимо переключаться на другую комбинацию ДГ.

Микроконтроллер МК осуществляет функции:

1. реализации общего алгоритма работы системы управления;
2. использования в алгоритме и сохранения в архиве данных значений токов нагрузки по каждой фазе ДЭС (текущая нагрузка ДЭС), получаемых от блока преобразователя мощности ПМ;
3. организации прогнозирования изменения мощности нагрузки за счёт использования данных (заложенных в программу МК) суточных, сезонных и годовых типовых графиков нагрузки ДЭС или архива данных за предыдущие периоды работы системы (при их наличии);
4. осуществления предварительного разогрева двигателей, подключаемых к нагрузке ДГ, за счет расчёта времени, требуемого на разогрев, и моментов времени коммутации выключателей ДГ;
5. исключения возможности появления аварийных режимов (перегрузка ДГ);



6. сигнализации о режимах работы ДЭС оперативному персоналу.

На основании схемы (см. рис. 1) можно организовать алгоритм управления, заключающийся в следующем:

1. При небольшом уровне нагружения ДЭС ( $P_n < P_{кр1}$ ) ДГ1 работает на всю нагрузку, выключатель В1 при этом включён, а выключатели В2 и В3 отключены. Данные об уровне текущей нагрузки ДЭС с преобразователя мощности ПМ поступают на вход МК, в программу которого уже введены значения времени разогрева дизель-генераторов ДГ1 –  $t_{р1}$ , ДГ2 –  $t_{р2}$  и ДГ3 –  $t_{р3}$ , найденные по формуле (1). В момент времени, когда расчётное (спрогнозированное) время  $\Delta t_n = t_{р2}$ , начинается разогрев двигателя генератора средней мощности ДГ2.

2. В момент времени, когда необходимо включить в работу второй генератор, т.е. когда  $P_n = P_{кр1}$  и есть устойчивая тенденция к росту нагрузки  $\frac{dP_n}{dt} > 0$ , ДГ2 уже разогрет до требуемой температуры, сигнал его готовности к принятию нагрузки поступает на аналоговые входы МК. Микроконтроллер подаёт сигналы: на включение выключателя В2, а затем с выдержкой времени сигнал на отключение выключателя В1 и сигнал к БУ1 на остановку ДГ1 (на всю нагрузку работает ДГ2). Когда спрогнозированное значение  $\Delta t_n = t_{р3}$ , начинается разогрев двигателя генератора большой мощности ДГ3.

3. Если блоком ПМ фиксируется дальнейший рост нагрузки  $\frac{dP_n}{dt} > 0$  и в архиве данных МК имеется устойчивая тенденция к росту нагрузки (за предыдущие периоды измерений) вплоть до уровня  $P_n = P_{кр2}$ , ДГ3 включается в работу за счёт подачи сигнала от МК к БУ3 и сигнала с выдержкой времени к выключателю В3. После этого подаются сигналы на отключение ДГ2, а затем с выдержкой времени – на отключение его выключателя нагрузки В2. На всю нагрузку работает ДГ3 большой мощности.

4. Если рост текущей нагрузки продолжается, прогнозное значение мощности нагрузки растёт, тогда при  $\Delta t_n = t_{р1} + t_{р2}$  необходимо начать разогрев двигателей ДГ1 и ДГ2. Когда мощность нагрузки достигает значения  $P_n = P_{кр3}$ , МК подаёт сигналы к БУ1 и БУ2 на включение ДГ1, ДГ2 и с выдержкой времени сигналы на включение В1 и В2, а затем сигнал на отключение ДГ3 и выключателя В3. В работе на всю нагрузку остаётся пара ДГ1 и ДГ2.

5. Если текущая нагрузка ДЭС продолжает расти вместе с прогнозным значением мощности нагрузки, фиксируется значение  $\Delta t_n = t_{р3}$ , при превышении которого необходимо начать разогрев двигателя ДГ3. Когда мощность нагрузки равна  $P_n = P_{кр4}$ , подаются сигналы к БУ3 на включение ДГ3, затем сигнал на включение В3, сигнал к БУ2 на отключение ДГ2 и сигнал на отключение В2. В работе на всю нагрузку находится пара ДГ1 и ДГ3.

6. При дальнейшем росте текущей нагрузки и получении данных об устойчивом росте прогнозной нагрузки фиксируется равенство  $\Delta t_n = t_{р2}$ , требуемое для разогрева ДГ2. Если мощность нагрузки превосходит значение  $P_n = P_{кр5}$ , МК подаёт сигналы к БУ2 на включение ДГ2 (в этот момент его двигатель полностью разогрет). Затем поступает сигнал на включение выключателя В2 и с выдержкой времени сигнал к БУ1 на отключение ДГ1 и к В1 на его отключение. В результате в работе на этом участке находятся генераторы ДГ2 и ДГ3.

7. Если нагрузка ДЭС продолжает расти вплоть до максимальной, фиксируется значение  $\Delta t_n = t_{р1}$ , требуемое для разогрева ДГ1. В момент времени, когда мощность нагрузки преодолевает значение  $P_n = P_{кр6}$ , МК посылает сигнал к БУ1 на включение ДГ1, затем с выдержкой времени поступает сигнал на включение выключателя В1. В результате в работе на последнем участке находятся все три генератора.

В случае фиксации снижения текущей мощности нагрузки или устойчивого падения прогнозного значения мощности нагрузки  $\frac{dP_n}{dt} < 0$  на каком-либо участке все перечисленные операции алгоритма выполняются в обратном порядке с учётом расчётного времени разогрева ДГ.

В результате работы данного алгоритма системы управления реализуются ступенчатое управление мощностью ДЭС и более точная подстройка под изменение её нагрузки, а значит, и большее снижение расхода топлива, необходимого для выработки электроэнергии каждым дизель-генератором.

#### **Заключение**

В данной работе рассмотрен алгоритм работы системы управления коммутацией ДГ на трёх-генераторной ДЭС с учётом неравномерности её нагрузки. За счет выбора оптимальных режимов работы дизель-генераторов с реализацией функции прогнозирования изменения мощности нагрузки ДЭС и определения моментов времени коммутации ДГ на нагрузку, более точного распределения мощности нагрузки по трём ДГ достигается снижение суммарного расхода топлива, затрачиваемого на производство электроэнергии ДЭС.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Громов, А. А. Системы электроснабжения на базе автономных установок / А. А. Громов, В. Л. Колякин, А. С. Толочкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 4-9.
2. Новгородов, Н. А. Управление дизель-генераторами дизельных электростанций с учётом изменения нагрузки электростанции / Н. А. Новгородов, М. С. Гринкруг, Ю. И. Ткачева // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2014. – № 1-2. – С. 45-50.
3. Гринкруг, Я. С. Управление режимами работы дизельных электростанций в автономных сетях электро-снабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Гринкруг Яков Соломонович. – Комсомольск-на-Амуре, 2006. – 171 с.
4. Майорова, Ю. А. Способы снижения потребления топлива дизельными электростанциями / Ю. А. Майорова, Е. В. Пашук, Н. Н. Смокталь // Энергетические установки и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 77-87.
5. Лобов, М. Ю. Некоторые особенности выбора и эксплуатации электроагрегатов и электростанций с двигателями внутреннего сгорания в современных условиях / М. Ю. Лобов // Труды ЦНИИС. Санкт-Петербургский филиал. – 2016. – Т. 1. – № 1 (2). – С. 96-104.
6. Рамадан, А. Моделирование автономных энергокомплексов на основе ВИЭ для изолированных потребителей в среде MATLAB Simulink / А. Рамадан, Р. С. Денисов // Вестник аграрной науки Дона. – 2017. – № 3 (39). – С. 11-20.
7. Сопот, В. Н. Дизельные двигатели отечественного производства для ВВСТ / В. Н. Сопот, В. П. Булай, И. О. Тимофеев // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. – 2019. – № 2 (12). – С. 237-260.
8. Takahashi, R. Stability Enhancement of Small-Scale Power Grid with Renewable Power Sources by Variable Speed Diesel Power Plant / R. Takahashi, A. Umemura, J. Tamura // Journal of Power and Energy Engineering. – 2020. – Vol. 8. – P. 1-17.
9. Особенности построения автономной ветро-дизельной системы электроснабжения объектов с электро-приёмниками разного типа / Е. Т. Ербаев, И. И. Артюхов, С. Ф. Степанов, С. В. Молот // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 121.
10. Ершов, С. В. Перспективные схемы ветро-дизельных установок / С. В. Ершов, С. О. Смолин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 49-54.



**Стельмашук С. В., Челухин В. А.**  
**S. V. Stelmashchuk, V. A. Челухин**

**СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОДНОТИПНЫМИ ОБЪЕКТАМИ БЕЗ УЧЁТА ПЕРЕКРЁСТНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ СЕПАРАТНЫМИ КАНАЛАМИ**

**COORDINATED CONTROL OF ONE-TYPE PLANTS EXCLUDING CROSS-CONNECTION BETWEEN SEPARATE CHANNELS**

**Стельмашук Сергей Валерьевич** – 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: rukdpsv@rambler.ru.

**Sergei V. Stelmashchuk** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin St., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

**Челухин Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности автоматизированных систем Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 8(909)898-02-31. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.

**Mr. Vladimir A. Chelukhin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information Security Automated Systems, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(909)898-02-31. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос управления взаимосвязанными приводами. В рамках статьи проведено исследование использования метода согласованного управления при условии, что не будут учитываться естественные связи, действующие между приводами. Влияние таких связей воспринимается как внешнее возмущение. Это позволяет пренебрегать физическими особенностями этих связей, например, жёсткостью ленты конвейера или вязкостью обрабатываемого каландром материала. Соответственно, нет необходимости в разработке дополнительных идентификаторов данных физических параметров. При исследовании было принято допущение, что отдельные приводы настроены на модульный оптимум. Это приводит к тому, что система согласованного управления имеет одностипные сепаратные каналы. Такой приём значительно облегчает разработку регуляторов системы согласованного управления. Исследование применения метода согласованного управления без учёта перекрёстных связей показало, что настройка регуляторов системы согласованного управления является унифицированной и не зависит от особенностей взаимосвязей между приводами.

**Summary.** The article deals with the issue of controlling interconnected drives. The article examines the use of the coordinated control method, provided that the natural connections between the drives are not taken into account. The influence of such connections is perceived as an external disturbance. This allows you to ignore the physical features of these connections, such as the rigidity of the conveyor belt or the viscosity of the material processed by the calender. Accordingly, there is no need to develop additional identifiers for these physical parameters. In the study, it was assumed that individual drives are configured for a modular optimum. This leads to the fact that the coordinated control system has the same type of separate channels. This technique greatly facilitates the development of controllers for a coordinated control system. The study of the application of the method of coordinated control without taking into account cross-links showed that the setting of the controllers of the coordinated control system is unified and does not depend on the features of the relationships between the drives.

**Ключевые слова:** согласованное управление, взаимосвязанный электропривод.

**Key words:** coordinated control, interconnected electric drive.

УДК 681.516.52

**Введение.** Во многих отраслях промышленности используется многосвязный электропривод. Это устройства транспортировки (шахтные конвейеры, устройства перемотки ленты и т.д.) и устройства обработки материала (каландры, прокатные станы и т.д.), а также многокоординатные станки с контурной обработкой, манипуляционные роботы и др. [1].

При разработке системы согласованного управления учитываются параметры перекрёстных связей между сепаратными каналами. Для многих многоприводных агрегатов, таких как манипулятор или многокоординатный станок, взаимосвязи между приводами либо отсутствуют, либо являются технически определёнными. Например, взаимодействие между приводами многокоординатного станка обусловлено кривой контурной обработки детали.

Для устройств транспортировки и обработки материалов характерными являются связи, обусловленные наличием упругости, вязкости, пластичности и других характеристик. Такие характеристики являются трудноучитываемыми [2]. В этом случае возникает необходимость применения адаптивных регуляторов, где осуществляется идентификация параметров перекрёстных связей и выполняется настройка параметров регуляторов системы согласованного управления.

Объект согласованного управления является многомерным. Соответственно, идентифицируемые параметры перекрёстных связей увеличиваются прямо пропорционально многомерности объекта согласованного управления. Это приводит к структурному усложнению адаптивного регулятора [3].

В статье рассматривается использование метода согласованного управления для сепаратных каналов взаимосвязанного привода, но без учёта каналов связи между ними. Удовлетворение функциональных соотношений (или уравнений относительного движения) и уравнения усреднённого движения [4] обеспечивается за счёт статической инвариантности по возмущающему воздействию [5]. То есть межканальные связи воспринимаются как внешнее возмущение, и регуляторы каналов относительного и усреднённого движения [4] синтезируются так, чтобы обеспечивался необходимый астатизм каналов. Это обеспечивает только статическую инвариантность. В динамическом режиме уравнения относительного и усреднённого движения могут не удовлетворяться. Это ограничивает использование рассматриваемого подхода только системами стабилизации регулируемых параметров, такими как устройства транспортировки или обработки материала. Для следящих систем или систем программного управления рассматриваемый подход неприменим.

**Постановка задачи.** Для обеспечения однотипности объектов сепаратных каналов предполагается, что все приводы устройства транспортировки или обработки настроены на модульный оптимум с одинаковой малой постоянной времени:

$$W_0(p) = \frac{y_j(p)}{u_j(p)} = \frac{1}{2T_{\mu 0}^2 p^2 + 2T_{\mu 0} p + 1},$$

где  $W_0(p)$  – передаточная функция сепаратного канала;  $u_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  – управляющее воздействие;  $y_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  – регулируемая переменная (скорость или угол поворота вала привода), здесь  $m$  – количество сепаратных каналов;  $T_{\mu 0}$  – малая постоянная времени привода сепаратного канала.

Структурная схема объекта согласованного управления представлена на рис. 1.

Для упрощения решения задачи синтеза в силу малости пренебрежём в знаменателе передаточной функции сепаратного канала  $W_0$  членом высшего порядка  $2T_{\mu 0}^2 p^2$  [6]. В результате образуется передаточная функция сепаратного канала в виде апериодического звена 1-го порядка ( $n_1 = 1$ ):

$$W_0(p) \approx \frac{1}{T_{\mu} p + 1},$$

где  $T_{\mu} = 2T_{\mu 0}$  – малая постоянная времени системы согласованного управления.



Передаточная функция канала связи  $W_1(p) = 0$ . Тогда в соответствии с [7] матричное описание объекта согласованного управления будет представлять собой

$$\dot{x} = Ax + Bu; \quad y = Cx, \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_\mu} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_\mu} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{T_\mu} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_\mu} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_\mu} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{T_\mu} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

где  $A$  – системная матрица объекта согласованного управления размером  $[n \times n]$ ;  $B$  – входная матрица объекта согласованного управления размером  $[n \times m]$ ;  $C$  – выходная матрица объекта согласованного управления размером  $[m \times n]$ ;  $x = [x_1 \dots x_n]^T$  – вектор состояния объекта согласованного управления размером  $[n \times 1]$ ;  $u = [u_1 \dots u_m]^T$  – входной вектор (или вектор управления) объекта согласованного управления размером  $[m \times 1]$ ;  $y = [y_1 \dots y_m]^T$  – выходной вектор (или вектор регулируемых переменных) объекта согласованного управления размером  $[m \times 1]$ ;  $n = mn_1$  – порядок объекта согласованного управления.

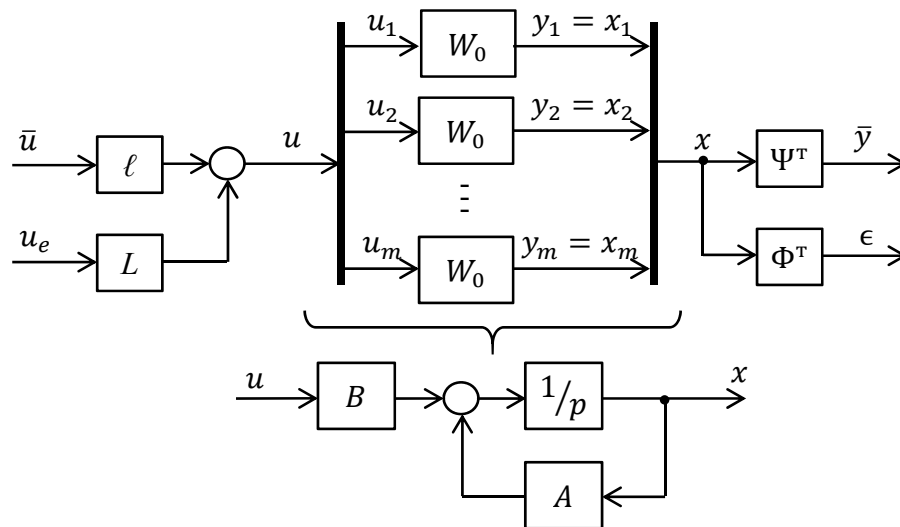


Рис. 1. Объект согласованного управления

Так как  $n_1 = 1$ , то  $n = m$ . В этом случае вектор состояния  $x$  совпадает с выходным вектором объекта согласованного управления  $y = x$ .

Сигналами выходного вектора у приводов устройств транспортировки и обработки являются скорость или угол вращения валов двигателей. Для систем стабилизации устройств транспортировки и обработки главным условием является равенство скоростей или углов вращения приводов, т.е. удовлетворение функциональных соотношений

$$y_1 = y_2; \quad y_2 = y_3; \quad \dots \quad y_{m-1} = y_m.$$

Из функциональных соотношений составляются уравнения относительного движения:

$$\epsilon_1 = y_1 - y_2; \quad \epsilon_2 = y_2 - y_3; \quad \dots \quad \epsilon_{m-1} = y_{m-1} - y_m,$$

где  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_{m-1}$  – сигналы рассогласования, образующие вектор относительного движения  $\epsilon = [\epsilon_1 \dots \epsilon_{m-1}]^T$ .

В векторной форме:

$$\epsilon = \Phi^T y = \Phi^T x,$$

где  $\Phi$  – матрица коэффициентов уравнения относительного движения размером  $[m \times m - 1]$ :

$$\Phi^T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Регулируемым параметром системы согласованного управления является скалярная величина, называемая усреднённой переменной:

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j.$$

В векторной форме:

$$\bar{y} = \Psi^T y = \Psi^T x,$$

где  $\Psi$  – матрица коэффициентов уравнения усреднённого движения размером  $[m \times 1]$ :

$$\Psi^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & \dots & \frac{1}{m} \end{bmatrix}.$$

В результате формируется преобразование переменных состояния объекта согласованного управления в выходные координаты:

$$\begin{bmatrix} \epsilon \\ - \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi^T \\ - \\ \Psi^T \end{bmatrix} x. \quad (2)$$

В качестве управления устройствами транспортировки и обработки используется либо напряжение якоря (для приводов постоянного тока), либо частота статора (для приводов переменного тока). И тот, и другой параметр определяют скорость холостого хода (синхронную скорость) привода  $\omega_0$  [6]. Именно параметр  $\omega_0$  определяет входной вектор  $u$ . В системе согласованного управления сигналы входного вектора  $u_j$  формируются сигналами относительного управления  $u_{e1}, \dots, u_{e_{m-1}}$  и сигналом усреднённого управления  $\bar{u}$ :

$$u = Lu_e + l\bar{u}, \quad (3)$$

где  $u_e = [u_{e1} \dots u_{e_{m-1}}]^T$  – вектор относительного управления;  $L$  – матрица коэффициентов относительного управления размером  $[m \times m - 1]$ ;  $l$  – вектор коэффициентов усреднённого управления размером  $[m \times 1]$ .

Матрицу  $L$  и вектор  $l$  определим как в [7] для системы однотипных объектов:

$$L = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} m-1 & m-2 & m-3 & \dots & 2 & 1 \\ -1 & m-2 & m-3 & \dots & 2 & 1 \\ -1 & -2 & m-3 & \dots & 2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -1 & -2 & -3 & \dots & -m+2 & -m+1 \end{bmatrix}; \quad l = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Используя выражения (1), (2) и (3), получаем представление объекта согласованного управления в виде двух несвязанных между собой каналов [7]: канал усреднённого движения  $\epsilon = W_{0e}(p)u_e$  и канал относительного движения  $\bar{y} = W_{0x}(p)\bar{u}$ . Для каждого канала выполняется синтез соответственно регулятора усреднённого и регулятора относительного движения.

**Синтез регулятора относительного движения.** В соответствии с методом согласованного управления [4; 7] матричная передаточная функция объекта канала относительного движения

$$W_{0e}(p) = \frac{\epsilon(p)}{u_e(p)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_\mu p + 1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_\mu p + 1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{T_\mu p + 1} \end{bmatrix}.$$

Канал относительного движения представляет собой  $(m - 1)$  не связанных между собой объектов с одинаковыми передаточными функциями, которые будем обозначать так же, как и матричную передаточную функцию:

$$W_{0e}(p) = \frac{1}{T_\mu p + 1}.$$

В соответствии с выводами, сделанными в [5], для обеспечения статической инвариантности по возмущению система регулирования канала относительного движения должна иметь астатизм. Для этого используем ПИ-регулятор.

На рис. 2 представлена структурная схема с ПИ-регулятором для отдельного объекта канала относительного движения.

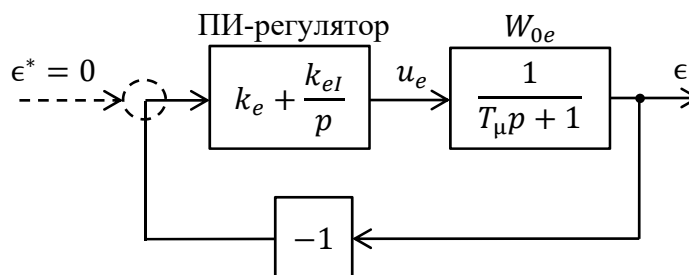


Рис. 2. Система регулирования канала относительного движения с ПИ-регулятором

Для настройки системы регулирования канала относительного движения на стандартную форму приравняем передаточную функцию замкнутой системы к стандартной форме:

$$W_e(p) = \frac{\epsilon(p)}{\epsilon^*(p)} = \frac{\frac{k_{el}}{T_\mu} \left( \frac{k_e}{k_{el}} p + 1 \right)}{p^2 + \frac{1 + k_e}{T_\mu} p + \frac{k_{el}}{T_\mu}} = \frac{\omega_0^2}{p^2 + \alpha \omega_0 p + \omega_0^2},$$

где  $\omega_0$  – среднегеометрический корень, определяющий быстродействие системы;  $\alpha$  – коэффициент формы настройки, например, для биномиальной формы  $\alpha = 2$ , для формы Баттерворта  $\alpha = \sqrt{2}$  и др.

Приравнявая коэффициенты членов знаменателей при равных степенях, получим выражения для коэффициентов ПИ-регулятора:

$$k_e = \alpha \omega_0 T_\mu - 1; \quad k_{el} = \omega_0^2 T_\mu.$$

В числителе замкнутой системы возникает полином первого порядка, что не соответствует стандартной форме. Для решения этой проблемы необходимо использовать биномиальную форму ( $\alpha = 2$ ) при  $\omega_0 = 1/T_\mu$ . Тогда  $k_e = 1$ ,  $k_{el} = 1/T_\mu$ . В этом случае передаточная функция замкнутой системы регулирования сигналов рассогласования (канала относительного движения)

$$W_e(p) = \frac{\frac{1}{T_\mu^2}(T_\mu p + 1)}{p^2 + \frac{2}{T_\mu}p + \frac{1}{T_\mu^2}} = \frac{T_\mu p + 1}{T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1} = \frac{T_\mu p + 1}{(T_\mu p + 1)^2} = \frac{1}{T_\mu p + 1}.$$

Это означает, что быстродействие сигналов рассогласования является таким же, как и объект канала относительного движения  $W_{0e}$ . В этом случае влияние членов высшего порядка сепаратных каналов сказывается на качестве регулирования. Для устранения этого влияния необходимо снизить быстродействие контура регулирования канала относительного движения. Здесь нужно использовать И-регулятор. Для этого для биномиальной формы примем  $\omega_0 = 1/2T_\mu$ . Тогда  $k_e = 0$ ,  $k_{el} = 1/4T_\mu$ . В этом случае

$$W_e(p) = \frac{\frac{1}{4T_\mu^2}}{p^2 + \frac{1}{T_\mu}p + \frac{1}{4T_\mu^2}} = \frac{1}{4T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p + 1} \approx \frac{1}{4T_\mu p + 1}.$$

Видно, что инерционность канала относительного движения при И-регуляторе с настройкой на биномиальную форму в четыре раза выше, чем объект этого канала. Если применить для настройки форму Баттерворта ( $\alpha = \sqrt{2}$ ) при  $\omega_0 = 1/\sqrt{2}T_\mu$ , то параметры регулятора  $k_e = 0$ ,

$k_{el} = 1/2T_\mu$ , а передаточная функция канала

$$W_e(p) = \frac{\frac{1}{2T_\mu^2}}{p^2 + \frac{1}{T_\mu}p + \frac{1}{2T_\mu^2}} = \frac{1}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1} \approx \frac{1}{2T_\mu p + 1}.$$

Видно, что инерционность увеличилась только в два раза. Настройка на форму Баттерворта второго порядка соответствует настройке на модульный оптимум.

Канал относительного движения имеет размерность  $m - 1$ . Следовательно, регулятор относительного движения будет иметь матричный вид размером  $[m - 1 \times m - 1]$ :

$$K_e = \begin{bmatrix} k_e & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_e & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_e \end{bmatrix}; \quad K_{el} = \begin{bmatrix} k_{el} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_{el} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_{el} \end{bmatrix}.$$

**Синтез регулятора усреднённого движения.** В соответствии с методом согласованного управления [4; 7] передаточная функция объекта канала усреднённого движения

$$W_{0\bar{x}}(p) = \frac{\bar{y}(p)}{\bar{u}(p)} = \frac{1}{T_\mu p + 1}.$$

Также, по аналогии с каналом относительного движения, для обеспечения статической инвариантности по возмущению обеспечим систему регулирования канала усреднённого движения астатизмом первого порядка с помощью ПИ- или И-регулятора (см. рис. 3).

По аналогии параметры регулятора канала усреднённого движения будут определяться так же, как и регулятора канала относительного движения. Параметры регуляторов согласованного управления при различных настройках сведены в табл. 1.

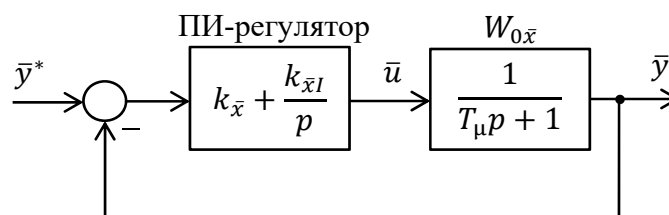


Рис. 3. Система регулирования канала усреднённого движения с ПИ-регулятором

Таблица 1

### Параметры регуляторов согласованного управления

Регулятор	ПИ-регулятор с настройкой на би- номинальную форму	И-регулятор с настрой- кой на биноминальную форму	И-регулятор с настройкой на форму Баттерворта (модульный оптимум)
Относительно- го движения	$k_e = 1, k_{el} = 1/T_\mu$	$k_e = 0, k_{el} = 1/4T_\mu$	$k_e = 0, k_{el} = 1/2T_\mu$
Усреднённого движения	$k_{\bar{x}} = 1, k_{\bar{x}l} = 1/T_\mu$	$k_{\bar{x}} = 0, k_{\bar{x}l} = 1/4T_\mu$	$k_{\bar{x}} = 0, k_{\bar{x}l} = 1/2T_\mu$
Среднегеомет- рический корень	$\omega_0 = 1/T_\mu$	$\omega_0 = 1/2T_\mu$	$\omega_0 = 1/\sqrt{2}T_\mu$

На рис. 4 представлено подключение регуляторов относительного и усреднённого движения к объекту согласованного управления.

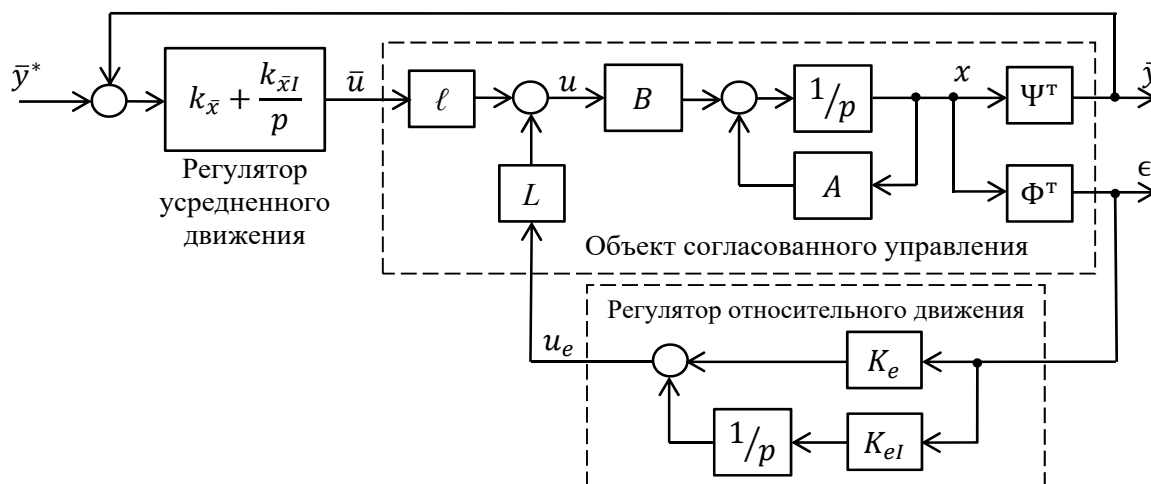


Рис. 4. Регуляторы согласованного управления

**Пример согласованного управления устройством обработки.** Рассмотрим согласованное управление трёхвалковым каландром (см. рис. 5), где необходимо поддерживать равенства скорости вращения валков.

Математическая модель механической части взаимосвязанного электропривода каландра:

$$\begin{aligned} J\dot{\omega}_1 &= M_1 - \underbrace{\beta(\omega_1 - \omega_2)}_{M_{12}} - M_{c1}; \\ J\dot{\omega}_2 &= M_2 - \underbrace{\beta(\omega_2 - \omega_1)}_{M_{21}} - \underbrace{\beta(\omega_2 - \omega_3)}_{M_{23}} - M_{c2}; \end{aligned}$$



$$J\dot{\omega}_3 = M_3 - \underbrace{\beta(\omega_3 - \omega_2)}_{M_{32}} - M_{c3},$$

где  $M_1, M_2, M_3$  – электромагнитные моменты электроприводов ЭП1, ЭП2 и ЭП3 соответственно;  $M_{c1}, M_{c2}, M_{c3}$  – моменты нагрузки, возникающие распорными усилиями при прохождении обрабатываемого материала между валками;  $M_{12}, M_{21}, M_{23}, M_{32}$  – моменты вязкого трения, возникающие между валками благодаря вязкости обрабатываемого материала;  $\beta$  – вязкость обрабатываемого материала;  $J$  – момент инерции электропривода валка ЭП1, ЭП2 и ЭП3.

Моменты вязкого трения образуют перекрёстные связи между электроприводами. В соответствии с рассматриваемым подходом применим метод согласованного управления к данному устройству без учёта перекрёстных связей. Используем электропривод постоянного тока с настроенными контурами тока и скорости на модульный оптимум.

Примем, что целью согласованного управления является регулирование среднего значения скоростей приводов при условии равенства этих скоростей между собой:

$$\bar{\omega} = \frac{1}{3}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3); \quad \omega_1 = \omega_2; \quad \omega_2 = \omega_3. \quad (4)$$

Тогда матрицы коэффициентов:

$$\Phi^T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}; \quad \Psi^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}; \quad L = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}; \quad l = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

При исследовании данного вида электропривода в обоих контурах движения использовалось различное сочетание регуляторов (см. табл. 1). При этом анализ качества регулирования проводился при различных значениях вязкости. Анализ показал, что наилучшее качество регулирования достигается при использовании И-регулятора в канале относительного движения с настройкой на биномиальную форму и И-регулятора в канале усреднённого движения с настройкой на форму Баттерворта. На рис. 6 представлена структурная схема системы согласованного управления электроприводами трёхвалкового каландра.

Передаточная функция электропривода  $W_0$  представлена при пренебрежении членом высшего порядка в контуре скорости  $2T_{\mu c}^2 p^2$ , где  $T_{\mu c}$  – малая постоянная времени контура скорости. Тогда передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$\underbrace{\frac{k_{от}J}{k_{ос}C\Phi 2T_{\mu c}} \frac{1/k_{от}}{T_{\mu c}p + 1}}_{K_{pc}} C\Phi \frac{1}{Jp} k_{ос} = \frac{1}{2T_{\mu c}(T_{\mu c}p + 1)} \cdot \frac{1}{p} = \frac{1}{2T_{\mu c}^2 p^2 + 2T_{\mu c}p} \approx \frac{1}{T_{\mu}} \cdot \frac{1}{p},$$

где  $T_{\mu} = 2T_{\mu c}$  – малая постоянная времени системы согласованного управления;  $K_{pc}$  – коэффициент регулятора скорости при настройке на модульный оптимум;  $k_{от}, k_{ос}, C\Phi$  – параметры электропривода: коэффициенты датчиков тока и скорости, а также коэффициент двигателя соответственно.

Перекрёстные связи на рис. 6 обозначены пунктирными линиями. Коэффициенты регуляторов системы согласованного управления рассчитываются без учёта перекрёстных связей:

$$k_{\bar{x}l} = \frac{1}{2T_{\mu}}; \quad k_{el} = \frac{1}{4T_{\mu}}.$$

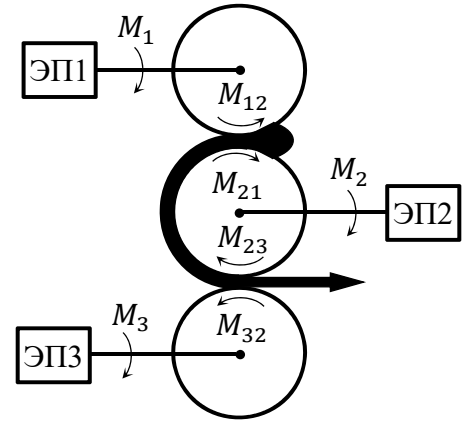


Рис. 5. Кинематическая схема трёхвалкового каландра

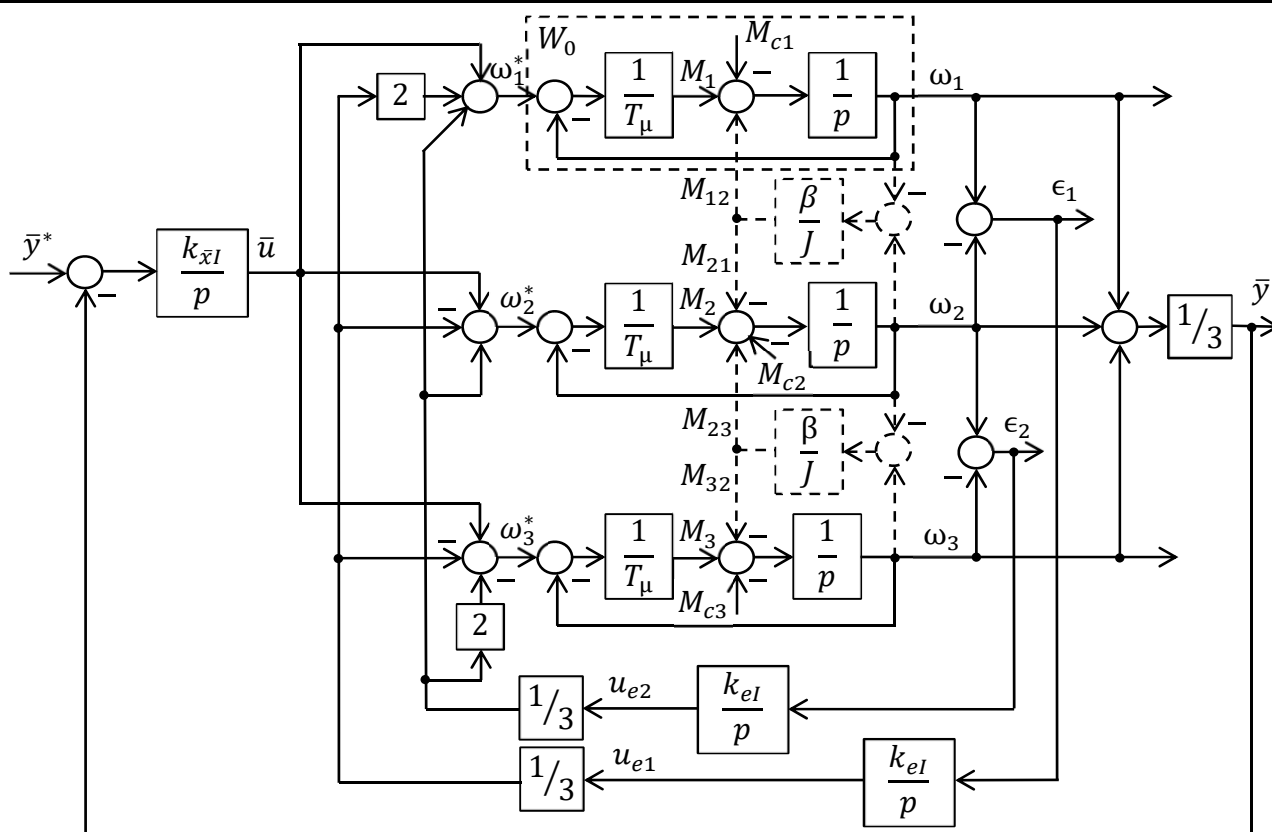


Рис. 6. Структурная схема системы управления трёхвалковым каландром

На валы двигателей электропривода каландра подавались номинальные моменты нагрузки. Исследование показало, что критическое значение вязкости  $\beta$ , при котором система управления неустойчива, образует пиковые значения момента вязкого трения, равные примерно 20 % от номинального момента нагрузки. На рис. 7 представлены переходные процессы скорости при вязкости обрабатываемого материала вдвое меньше критического.

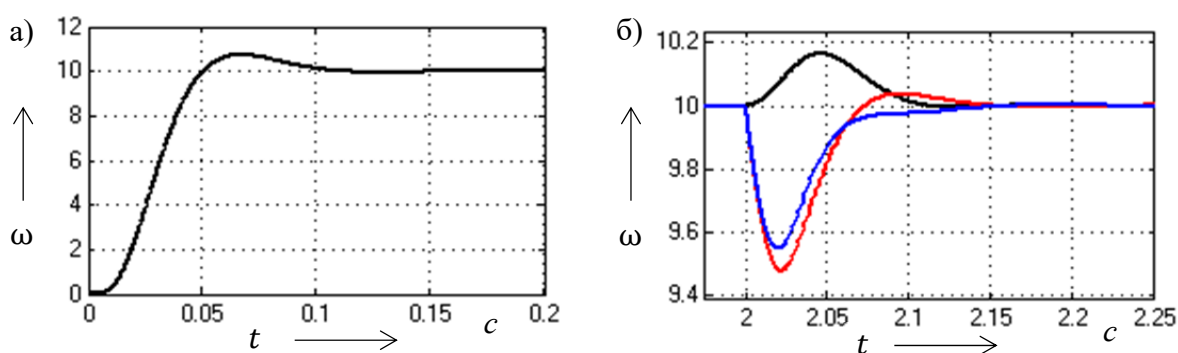


Рис. 7. Переходные процессы скорости вращения валков каландра при пуске (а) и при вхождении обрабатываемого материала между вторым и третьим валком (б)

**Пример согласованного управления устройством транспортировки.** Рассмотрим в качестве устройства транспортировки конвейер с тремя двигателями. Принципиальным отличием от электропривода каландра является наличие в качестве перекрёстных связей моментов упругости, которые зависят от разности углов вращения:

$$J\dot{\omega}_1 = M_1 - \underbrace{c(\varphi_1 - \varphi_2)}_{M_{12}} - M_{c1};$$

$$J\dot{\omega}_2 = M_2 - \underbrace{c(\varphi_2 - \varphi_1)}_{M_{21}} - \underbrace{c(\varphi_2 - \varphi_3)}_{M_{23}} - M_{c2};$$

$$J\dot{\omega}_3 = M_3 - \underbrace{c(\varphi_3 - \varphi_2)}_{M_{32}} - M_{c3};$$

$$\dot{\varphi}_1 = \omega_1; \quad \dot{\varphi}_2 = \omega_2; \quad \dot{\varphi}_3 = \omega_3,$$

где  $M_{c1}, M_{c2}, M_{c3}$  – моменты нагрузки, возникающие под действием груза, перемещающегося по конвейеру;  $M_{12}, M_{21}, M_{23}, M_{32}$  – моменты упругости, возникающие при натяжении ленты конвейера;  $c$  – упругость ленточного материала;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – угол поворота вала электродвигателя.

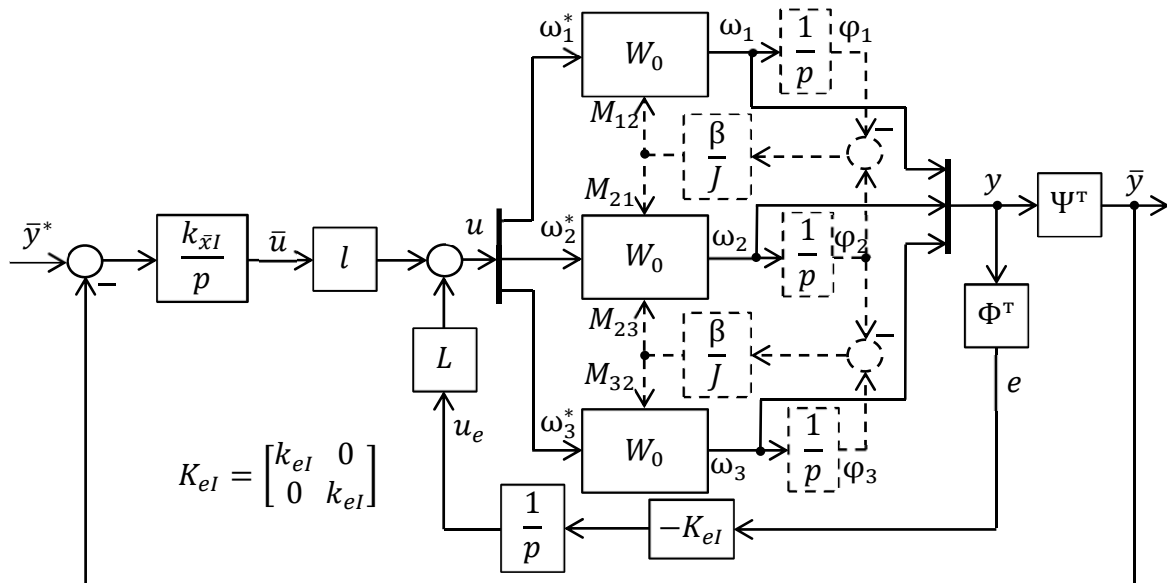


Рис. 8. Структурная схема системы управления конвейером

Если осуществлять синтез с учётом перекрёстных связей, то сепаратный канал должен описываться передаточной функцией второго порядка за счёт дифференциальной связи между скоростью и углом поворота. Это усложнило бы систему согласованного управления. Синтез без учёта перекрёстных связей приводит к тому, что система согласованного управления конвейером при выполнении той же цели управления (4) имеет те же регуляторы, что и в предыдущем примере. На рис. 8 представлена структурная схема согласованного управления скоростью электроприводов конвейера, а на рис. 9 – графики переходных процессов скоростей при пуске и возникновении нагрузки при перемещении груза на участке второго электродвигателя конвейера.

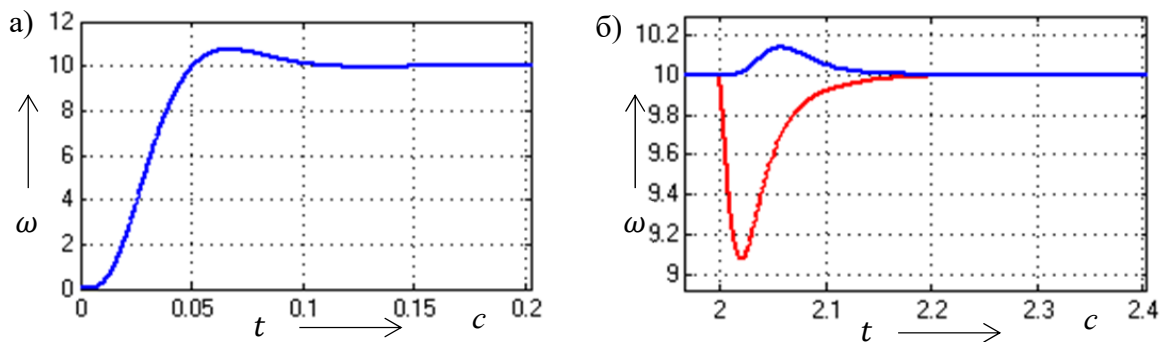


Рис. 9. Переходные процессы скорости электроприводов конвейера при пуске (а) и при появлении нагрузки на валу второго двигателя (б)

**Выводы.** Использование подхода статической инвариантности по возмущающему воздействию каналов относительного и усреднённого движения [5] с одностипными сепаратными каналами позволяет использовать стандартные настройки регуляторов без учёта перекрёстных связей для большого круга взаимосвязанных электроприводов. Качество регулирования сохраняется даже при пренебрежении членом высокого порядка в передаточной функции сепаратного канала. Отсутствие учёта перекрёстных связей даёт преимущество в унификации настройки системы регулирования скорости. Все привода со стандартной настройкой имеют одинаковую передаточную функцию замкнутой системы регулирования отдельного сепаратного канала вне зависимости от особенностей привода. В результате использование стандартной настройки на уровне согласованного управления приводит к унификации настройки регуляторов многоприводных систем вне зависимости от особенностей перекрёстных связей между сепаратными каналами.

Передаточные функции  $W_{0e}$  и  $W_{0\bar{x}}$  первого порядка позволяют применить интеллектуальную систему управления на основе нечёткой логики, где проблемой является информационная избыточность нечётких регуляторов. Уменьшение порядка передаточной функции каналов приводит к снижению информационной избыточности нечётких систем управления и позволяет существенно упростить возможность реализации нечёткого регулятора [8]. Также в [9] указывается, что нечёткие регуляторы обладают робастностью к изменению параметров объектов систем со стандартной настройкой. Использование нечётких регуляторов позволит нивелировать влияние члена высшего порядка в передаточных функциях  $W_{0e}$  и  $W_{0\bar{x}}$  и, как результат, повысить быстродействие системы. Отдельные нечёткие регуляторы каналов относительного движения можно объединить в один нечёткий регулятор, реализуемый на основе пространственных функций принадлежности [10].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Плотников, Е. А. Разработка моделей систем электроприводов промышленного робота на основе принципов модального управления / Е. А. Плотников, А. И. Горькавый // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2019. – С. 398-401.
2. Соловьёв, В. А. К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объемного формования / В. А. Соловьёв, Н. Е. Дерюжкова, Джо Аунг Хтет // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1(30). – С. 54-57.
3. Мирошник, И. В. Адаптивное управление пространственным движением нелинейных объектов / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров // АиТ. – 1991. – № 9. – С. 78-87.
4. Стельмашук, С. В. Согласованное управление устройством транспортировки ленты с модальными регуляторами / С. В. Стельмашук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-2(38). – С. 28-40.
5. Стельмашук, С. В. Оценка точности системы согласованного управления с учётом возмущающего воздействия / С. В. Стельмашук // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1(41). – С. 9-17.
6. Автоматизированный электропривод промышленных установок / под ред. Г. Б. Онищенко. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
7. Мирошник, И. В. Согласованное управление многоканальными системами / И. В. Мирошник. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 128 с.
8. Анализ возможностей снижения информационной избыточности нечётких регуляторов / С. П. Черный, А. А. Духно, Д. Ю. Чигрин, Б. Н. Толибов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1(30). – С. 19-25.
9. Анализ влияния параметров объекта управления на основные характеристики нечёткого регулятора / С. П. Черный, А. В. Бузикаева, Е. О. Полей, Чжо Мин У // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1(33). – С. 28-33.
10. Один из подходов к реализации модели нечёткого логического регулятора с пространственными функциями принадлежности / С. П. Чёрный, С. А. Васильченко, А. С. Гудим, Е. О. Полей, А. В. Бузикаева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2018. – № IV-1(36). – С. 25-32.

**Бормотин К. С., Герасимов К. Е., Романютин М. И.**  
**K. S. Bormotin, K. E. Gerasimov, M. I. Romanyutin**

## **ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПАНЕЛЕЙ ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ**

## **A NUMERICAL METHOD FOR OPTIMIZING THE KINEMATIC SCHEME OF DOUBLE CURVATURE PANELS SHAPING**

**Бормотин Константин Сергеевич** – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: cvmi@knastu.ru.

**Konstantin S. Bormotin** – Doctor of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Professor of the Department of Aircraft Construction, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: cvmi@knastu.ru.

**Герасимов Константин Евгеньевич** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Konstantin E. Gerasimov** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Романютин Михаил Иванович** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Mikhail I. Romanyutin** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В статье разрабатывается и исследуется численный метод решения задач оптимального управления в механике деформируемого твёрдого тела с помощью САЕ-систем. Данный метод используется для определения оптимальной кинематической схемы деформирования заготовки в технологических процессах формообразования, в результате которых деталь приобретает необходимую остаточную кривизну и минимальную повреждённость. В качестве устройств для формоизменения изделий из листов и панелей рассматривается оборудование с числовым программным управлением, в частности реконфигурируемый стержневой пуансон и обтяжное оборудование. Технологические процессы изготовления деталей в данном случае проводятся в режиме ползучести и пластичности соответственно. В качестве критерия оптимизации рассматривается значение повреждённости материала в ползучести и пластичности. Вычисление оптимального пути деформирования заготовки выполняется с помощью моделирования и анализа нелинейного деформирования панели с контактными ограничениями методом конечных элементов. На основе дискретной формулировки задачи оптимального управления реализуется метод динамического программирования. В пространство решений задач оптимизации разработанными методами должны быть включены немонотонные траектории деформирования, учитывающие частичную разгрузку.

**Summary.** The article develops and investigates a numerical method for solving optimal control problems in the mechanics of a deformable rigid body using CAE systems. This method is used to determine the optimal kinematic scheme for deformation of the workpiece in the technological processes of shaping, as a result of which the part acquires the necessary residual curvature and minimal damage. As devices for forming products from sheets and panels, numerically controlled equipment is considered, in particular, a reconfigurable core punch and tightening equipment. Technological processes for the manufacture of parts in this case are carried out in the creep and plasticity modes, respectively. The value of material damage in creep and plasticity is considered as an optimization criterion. The calculation of the optimal deformation path of the workpiece is performed by modeling and analyzing the nonlinear deformation of a panel with contact constraints by the finite element method. A discrete optimal control problem is formulated, which is solved by the dynamic programming method. Non-monotonic deformation trajectories, taking into account partial unloading, should be included in the space of solutions of optimal control problems by the developed methods.

**Ключевые слова:** упругость, пластичность, ползучесть, формообразование, повреждённость, метод конечных элементов, задача оптимального управления, метод динамического программирования.





**Key words:** elasticity, plasticity, creep, shaping, damage, finite element method, optimal control problem, dynamic programming method.

УДК 519.853.6,517.97,539.3

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Хабаровского края Российской Федерации (№74С / 2020 от 24.08.2020).

**Введение.** В настоящее время для изготовления в производстве деталей деформированием существует ряд станков (например, станок профилегибочный роликовый, станок профилегибочный растяжной, машина листогибочная вальцовая с числовым программным управлением (ЧПУ), обтяжные прессы с ЧПУ и т.д.), управление которыми основывается на эмпирических данных, упрощённых математических моделях и опыте технологов. В этом случае для определения параметров управления в технологических процессах требуется анализ большого количества экспериментальных и натурных производственных данных, что требует значительных материальных и временных затрат. Таким образом, если учесть в процессе деформирования накопление в материале повреждённости, актуальным направлением исследований является поиск рациональных температурно-скоростных кинематических и статических режимов формоизменения заготовок, обеспечивающих заданные остаточные деформации и максимальное сбережение ресурса материала конструкции.

В авиастроении большое количество деталей представляет собой крупногабаритные монолитные, монолитно-сборные и оребрённые панели из облегчённых высокопрочных конструкционных сплавов. Большинство деталей типа обшивок и элементов шпангоутов имеет переменную кривизну и толщину. Формоизменение таких тонкостенных конструкций выполняется процессами пластического деформирования при обычных и повышенных температурах [1; 6; 7; 12; 20; 21; 22; 24].

В данной работе рассматривается изготовление деталей по технологии обтяжки с растяжением на прессе и формообразование в режиме ползучести с помощью реконфигурируемого стержневого пуансона [12; 21]. В первом случае необходимая остаточная форма панели задаётся путём прижатия к обтяжному пуансону и растяжения. Во втором случае упреждающая поверхность панели задаётся пуансоном и матрицей посредством двух систем соосно расположенных стержней, перемещение которых задаётся ЧПУ.

Для обеспечения высокого качества изделия и точности окончательной геометрической формы детали после освобождения её от оснастки необходима оценка параметров формообразования с учётом анализа полноразмерных теоретических моделей. На сегодняшний день общепринятым способом для расчёта эффектов различных параметров, участвующих в процессах формообразования металлических изделий, стало использование в анализе процессов обработки металлов давлением метода конечных элементов. В частности, рассматривается оценка пружинения алюминиевых сплавов в процессах формообразования [17; 18].

Обтяжные прессы обеспечивают реализацию различных схем формообразования обшивок одинарной и двойной кривизны [13; 14], в частности, для выравнивания толщины заготовки применяется кинематическая схема процесса обтяжки с разгрузками [9; 10].

Таким образом, для формообразования данными технологиями необходимо знать форму оснастки (пуансона, стержневого реконфигурируемого пуансона), задающей упреждающую форму панели. Величина отклонения после разгрузки от необходимой геометрии и качество изделия зависят от режима формовки, свойства материала и способа деформирования. Рационально изменяя данные параметры, можно уменьшить геометрические отклонения и, соответственно, доводочные работы.

В данной работе в качестве критерия выбора оптимальной траектории деформирования задаётся работа рассеяния в пластичности и ползучести, характеризующая повреждённость материала. Допустимое пространство решений задач оптимального управления включает немонотонные траектории деформирования, учитывающие частичную разгрузку.

**Формулировка задач оптимального управления при формообразовании тонкостенных конструкций.** Задача оптимального формообразования тонкостенных конструкций в условиях ползучести с помощью реконфигурируемого стержневого пуансона сводится к расчёту оптимальной кинематической схемы движения стержней.

Пусть  $V \subset R^3$  – область деформируемого тела с границей  $S$ . Контактная поверхность жёстких тел с деформируемым обозначается через  $S_c$  ( $S_c \subset S$ ), векторы перемещений деформируемого тела и векторы перемещений контактных тел –  $u = (u_1, u_2, u_3)$ ,  $\bar{u} = (\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3)$ .

Модель процесса формообразования в условиях ползучести с учётом малых деформаций, но больших перемещений и поворотов (общая Лагранжева формулировка [8]) представляется в виде квазистатического вариационного принципа с функционалом

$$J_1(\dot{\bar{u}}, \dot{u}) = \dot{W}_c + a(\dot{u}, \dot{u}) \text{ при } \dot{\bar{u}}|_{S_c} = \dot{\bar{u}}^*, \quad (1)$$

где  $\dot{\bar{u}}^*$  – заданные скорости перемещений контактных тел в момент времени  $t$ , здесь  $t \in [0, T]$  – время деформирования;  $W_c$  – контактные потенциалы [3];

$a(\dot{u}, \dot{v}) = \int_V [\partial E(\dot{u}_{i,j}) / \partial \dot{u}_{i,j}] \dot{v}_{i,j} dV$ ,  $E(\dot{u}_{i,j}) = (1/2) c_{ijpl} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{pl} - c_{ijpl} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{pl}^c + (1/2) \sigma_{ij} \dot{u}_{p,i} \dot{u}_{p,j}$ ,  $c_{ijpl}$  – компоненты тензора упругих констант,  $\dot{\epsilon}_{ij} = (1/2)(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i} + \dot{u}_{p,i} u_{p,j} + u_{p,i} \dot{u}_{p,j})$ ,  $u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ; компоненты скоростей

деформаций ползучести  $\dot{\epsilon}_{ij}^c = \gamma s_{ij}$ ,  $\gamma = \frac{3}{2} B \bar{\sigma}^{\eta-1}$ ,  $s_{ij}$  – компоненты девиатора тензора напряжений,  $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2 s_{ij} s_{ij}}$  – эффективное напряжение,  $B$ ,  $\eta$  – константы материала;  $i, j, p, l = 1, 2, 3$ .

Второй тензор напряжений Пиола – Кирхгофа может быть определён через скорости деформаций:

$$\dot{\sigma}_{ij} = c_{ijpl} (\dot{\epsilon}_{pl} - \dot{\epsilon}_{pl}^c).$$

Таким образом, математическая формулировка задачи оптимального управления включает уравнения механики, полученные из условий стационарности (1), и функционал, характеризующий параметр повреждённости:

$$J_2 = \int_0^T \int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^c dV dt \rightarrow \inf. \quad (2)$$

В данной задаче вычисляется оптимальная функция для кинематической схемы перемещения стержней  $f(t): \bar{u}(t) = f(t) \bar{u}^*$ , где  $\bar{u}^*$  – решение обратной задачи с линейной функцией по методу в [2].

Для технологии обтяжки вычисляется оптимальная кинематическая схема движения зажимов по критерию наименьшей повреждённости. Краевые смещения, определяющие движение зажимов обтяжного оборудования, задаются в области  $S_b$ .

Модель кинематического формообразования обтяжкой на пуансоне представляется в виде квазистатического вариационного принципа с функционалом

$$J_3(\dot{\bar{u}}, \dot{u}) = W_c + a(\dot{u}, \dot{u}) \text{ при } \dot{u}|_{S_b} = \dot{u}^*,$$

где  $E(\dot{u}_{i,j}) = \frac{1}{2} c_{ijpl} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{pl} - c_{ijpl} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{pl}^p + \frac{1}{2} \sigma_{ij} \dot{u}_{p,i} \dot{u}_{p,j}$ ,  $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$  – компоненты скоростей пластических деформаций ( $\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial \hat{f}}{\partial \sigma_{ij}}$ ,  $\lambda > 0$ , уравнение  $\hat{f} = 0$  определяет поверхность текучести в пространстве компонент девиатора тензора напряжений).

Задача оптимального управления включает уравнения механики деформируемого твёрдого тела и функционал оптимизации

$$J_4 = \int_0^T \int_V \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p dV dt \rightarrow \inf, \quad (3)$$

где  $t$  – параметр деформирования.

В этом случае будет определяться кинематическая схема движения зажимов с минимальной повреждённостью материала в пластичности.

**Численный метод оптимизации кинематической схемы формообразования панелей.** Конечно-элементные уравнения задач деформирования имеют вид [8; 23]

$${}^{t+dt} \mathbf{K}^{(r-1)} \Delta \mathbf{U}^{(r)} = {}^{t+dt} \mathbf{R}^{(r-1)}, \quad (4)$$

где  ${}^{t+dt} \mathbf{K}^{(r-1)}$  – матрица жёсткости, учитывающая контактные ограничения;  ${}^{t+dt} \mathbf{R}^{(r-1)}$  – вектор внутренних и внешних сил;  $t + dt$  – значение параметра нагружения;  $(r-1)$  – номер итерации метода Ньютона – Рафсона.

Для приближённого решения задачи оптимального управления время деформирования разбивается дополнительно на отрезки:  $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_N = T$ . При условии  $dt \leq t_{k+1} - t_k$  функционал (2) заменяется формулой

$$\bar{J}_2 = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{t=t_k}^{t_{k+1}} \sum_V {}^t \sigma_{ij} \Delta \varepsilon_{ij}^c \rightarrow \inf. \quad (5)$$

С учётом дискретных по времени уравнений пошаговой процедуры интегрирования (4) и минимизируемого функционала (5) строится функция Беллмана, и дискретная задача оптимального управления решается методом динамического программирования [5; 11].

Для задач деформирования тел в условиях пластичности с учётом дискретизации параметра нагружения функционал (3) принимает вид

$$\bar{J}_4 = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{t=t_k}^{t_{k+1}} \sum_V {}^t \sigma_{ij} \Delta \varepsilon_{ij}^p \rightarrow \inf. \quad (6)$$

Уравнения (4) и критерий оптимизации (6) образуют дискретную задачу оптимального управления.

В случае аддитивных задач может быть применён алгоритм решения, который представляет собой многошаговый процесс сжатия множества конкурентоспособных вариантов [5; 11]. На каждом шаге алгоритма выполняется исключение некоторого множества вариантов, которое не содержит оптимального варианта.

Для разработки алгоритма оптимизации при деформировании заготовки в реконфигурируемом пуансоне в качестве управляющих параметров вводится вектор-функция перемещений узловых точек контактных тел на границе  $S_c$  (стержней) в виде  $\bar{\mathbf{U}}_z(t) = f(t) \bar{\mathbf{U}}_z^*$ , где  $\bar{\mathbf{U}}_z^*$  – решение обратной задачи с линейной функцией  $f(t)$  [2], обеспечивающее необходимую остаточную форму панели. В этом случае строится сетка в пространстве  $(t, z)$ . Шаг по аргументу  $t$  задан и равен  $\Delta t$ , по переменной  $z$  –  $\Delta z$ . Узлы сетки обозначим через  $P_m(n)$ . Индекс  $n$  означает номер гиперплоско-

сти  $\Sigma_n$  при заданном значении  $t$ , а индекс  $m$  означает номер узла в гиперплоскости  $\Sigma_n$ . Каждые два узла, лежащие в гиперплоскостях  $P_q(n)$  и  $P_m(n+1)$ , соединены отрезками, длины этих отрезков обозначаются [11]  $l_{qm}(n) = f_n(P_q(n), P_m(n+1))$ .

Вектор-функция  $U(t)$  перемещений узлов, расположенных на торцах панели (граница  $S_b$ , см. рис. 1), при технологии обтяжки на прессе задаётся компонентами в виде  $U_x(t) = f_1(t)U_x^*$ ,  $U_z(t) = f_3(t)U_z^*$ , где  $U_x^*$ ,  $U_z^*$  – решение обратной задачи, обеспечивающее заданную остаточную форму панели [2]. Таким образом, исходная панель расположена так, что траектория движения краёв панели при продольной обтяжке задаётся компонентами по оси  $x, z$ . Необходимо найти оптимальную кинематическую схему движения зажимов  $U_z = f(U_x)$ . Для использования рекуррентных соотношений Беллмана в пространстве  $(x, z)$  строится сетка. Шаг по аргументу  $x$  задан и равен  $\Delta_x$ , по переменной  $z$  –  $\Delta_z$ . При обозначении узлов сетки через  $P_m(n)$  индекс  $n$  будет означать номер гиперплоскости  $\Sigma_n$  при заданном значении  $x$ , а индекс  $m$  – номер узла в гиперплоскости  $\Sigma_n$ .

В результате таких операций можно получить граф, в котором роль вершин играют узлы  $P_m(n)$  и вместо исходной задачи будет рассматриваться задача поиска на этом графе кратчайшего пути, соединяющего гиперплоскости  $\Sigma_0$  и  $\Sigma_N$ . Обозначая через  $l_m(n)$  ломанную кратчайшей длины, соединяющую узел  $P_m(n)$  с гиперплоскостью  $\Sigma_0$ , можно прийти к рекуррентному соотношению [11]:

$$l_s(n+1) = \min_m \{l_m(n) + l_{ms}(n)\}.$$

Минимум берётся по тем номерам  $m$ , для которых узлы лежат в допустимой области  $G_n$  и принадлежат гиперплоскости  $\Sigma_n$ .

Программная реализация метода динамического программирования для расчёта функций  $\bar{U}(t) = f(t)\bar{U}^*$  выполняется с помощью следующего способа задания граничных условий при решении задач (4). Дискретизация множества для метода динамического программирования определяется по формулам

$$\Delta t = t_k - t_{k-1} = \frac{T}{N}, \quad k = 1, \dots, N, \quad t_0 = 0, \quad \Delta_z = \frac{\bar{U}_z^*}{M}.$$

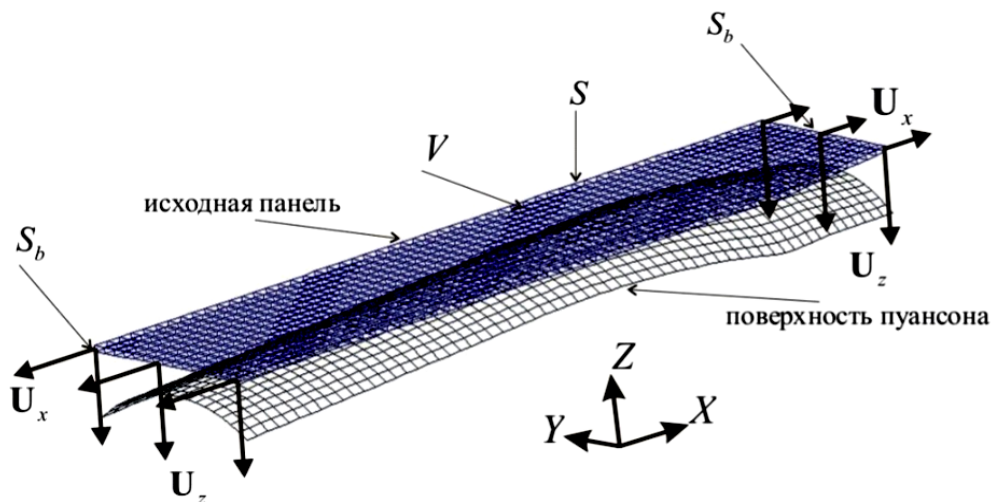


Рис. 1. Конечно-элементная модель исходной панели и поверхность пуансона

На каждом интервале  $[t_{k-1}, t_k]$  при решении задачи уравнениями (4) задаются граничные условия на перемещения контактных тел  $\Delta \bar{U}_z$  по следующему алгоритму:

$$\Delta t_{step} = n_{t_k} \Delta t,$$

$\Delta \bar{U}_z = (n_{z_k} - n_{z_{k-1}}) \frac{\Delta z}{\Delta t} dt$ , пока  $\Delta t_{step} \leq t + dt$ , иначе  $k = k + 1$  и повторное выполнение операций.

Граничные условия на всех интервалах  $[t_{k-1}, t_k]$  могут быть представлены с помощью системы параметров

$$[n_{t_1}, n_{z_1}; n_{t_2}, n_{z_2}; \dots; n_{t_N}, n_{z_N}], \quad (7)$$

где  $n_{t_k}$  могут принимать значения  $0, 1, \dots, N$  (при условии  $n_{t_k} > n_{t_{k-1}}$ ), а  $n_{z_k}$  – принимать значения  $0, 1, \dots, M$ .

Программная реализация метода динамического программирования для расчёта функций  $f_x(t)$ ,  $f_z(t)$ , обеспечивающих рациональную зависимость  $U_z = f(U_x)$ , выполняется с помощью следующего способа задания граничных условий при решении задач (4). При обтяжке растяжение должно проходить по касательной к краю пуансона, уравнение которой имеет вид  $z = \alpha x + z_0$ . Шаги метода динамического программирования вычисляются по формуле

$$\Delta t = t_k - t_{k-1} = \frac{1}{N} \text{ (при } n_{z_1} = 0), \Delta t = t_{k+1} - t_k = \frac{1}{N+1} \text{ (при } n_{z_1} \neq 0), k = 1, \dots, N, t_0 = 0,$$

$$\Delta_x = \frac{U_x^*}{N}, \Delta_z = \frac{U_z^*}{M}.$$

На каждом интервале  $[t_{k-1}, t_k]$  при решении задачи уравнениями (4) задаются граничные условия на перемещения  $(\Delta U_x, \Delta U_z)$ :

$$\Delta U_x = 0, \Delta U_z = n_{z_k} \Delta_z \frac{dt}{\Delta t} \text{ (при } n_{x_k} = 0),$$

$$\Delta U_x = \frac{\Delta_x dt}{\Delta t}, \Delta U_z = (n_{z_k} - n_{z_{k-1}}) \frac{\Delta_z}{\Delta_x} \Delta U_x + \alpha U_x \frac{dt}{\Delta t} \text{ (при } n_{x_k} \neq 0), U_x = n_{x_k} \Delta U_x.$$

Граничные условия на всех интервалах  $[t_{k-1}, t_k]$  могут быть представлены с помощью системы параметров

$$[n_{x_1}, n_{z_1}; n_{x_2}, n_{z_2}; \dots; n_{x_N}, n_{z_N}], \quad (8)$$

где  $n_{x_k}$  могут принимать значения  $0, 1, \dots, N$ , а  $n_{z_k}$  – значения  $0, 1, \dots, M$ .

**Результаты моделирования и оптимизации.** Анализ кинематических схем деформирования выполняется с помощью моделирования процесса многоточечного формообразования квадратной пластинки в установке с верхней и нижней матрицей, включающих по четыре стержня. Материал пластинки имеет следующие характеристики упругости: модуль Юнга  $E = 7000 \text{ кг/мм}^2$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0.4$ . Стадия установившейся ползучести при сжатии и при растяжении описывается законом Нортонa с разными значениями коэффициента  $B$ :

– сжатие:  $B_1 = 0.25 \cdot 10^{-14} (\text{кг/мм}^2)^{-n_1} (\text{час})^{-1}$ ,  $n_1 = 8$ ;

– растяжение:  $B_2 = 0.5 \cdot 10^{-14} (\text{кг/мм}^2)^{-n_2} (\text{час})^{-1}$ ,  $n_2 = 8$ .

Расчёт конечного положения стержней, обеспечивающих необходимую упреждающую форму панели, выполняется итерационным методом решения обратной задачи [2]. Пусть конечное положение стержней известно. При движении контактных тел максимальное значение энергии рассеяния в пластинке, при исключении мест смятия, образуется в области перегиба (см. рис. 2).



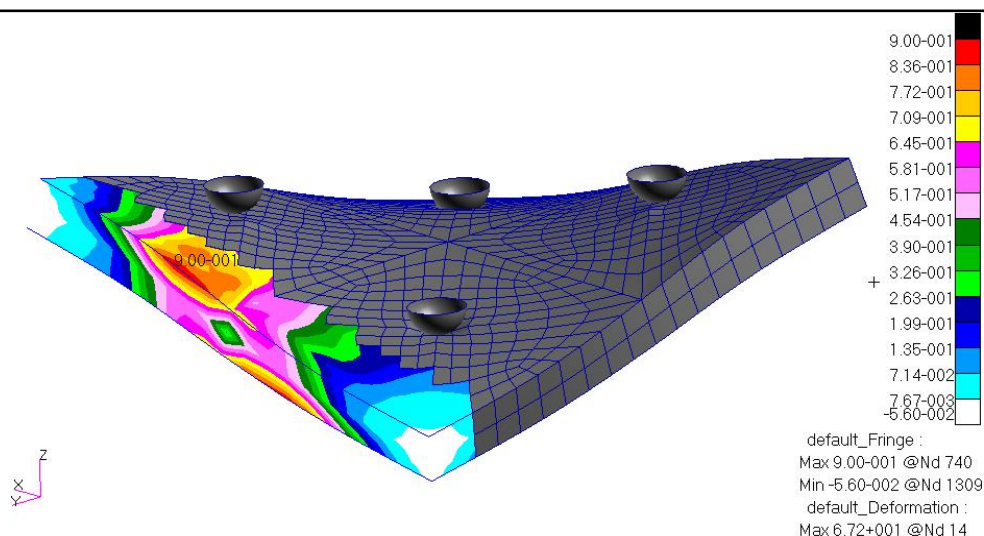
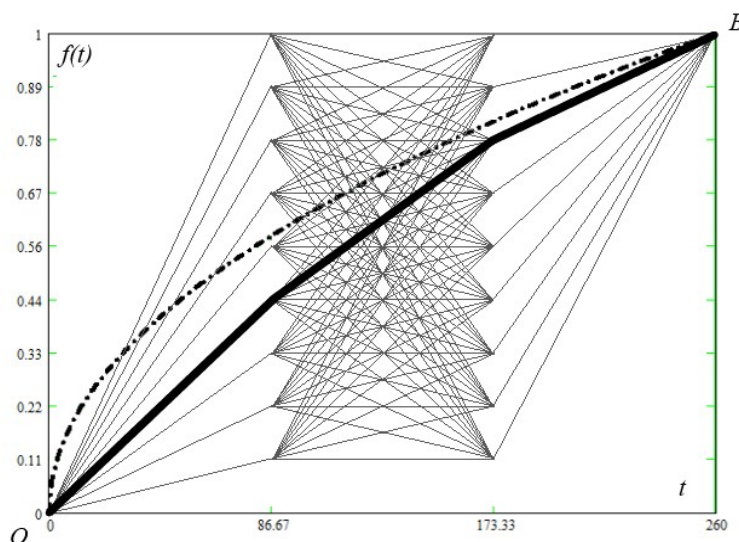


Рис. 2. Деформированная конфигурация пластинки и максимальное значение энергии рассеяния

Решение задачи оптимизации траектории деформирования сводится к перебору вариантов при каждом параметре  $t_k$ . Набор функций  $f(t)$  задаётся ломанными линиями, проходящими от точки  $O$  к точке  $B$  (см. рис. 3, 4). Известно аналитическое решение задачи оптимального деформирования пластинки [15], которое представлено штрихпунктирной кривой. Среди заданных возможных вариантов находится оптимальный путь деформирования по критерию энергии рассеяния в области перегиба при  $N = 3$ ,  $M = 9$  (сплошная жирная линия на рис. 3) и  $N = 5$ ,  $M = 9$  (сплошная жирная линия на рис. 4). Как видно, оптимальное решение, полученное методом динамического программирования, приближается к аналитической кривой и не совпадает с линейной функцией.

Рис. 3. Варианты законов движения контактных тел при  $N = 3$ ,  $M = 9$  и оптимальная функция

В случае обтяжки анализируются различные кинематические схемы движения зажимов при формообразовании панели. Размеры исследуемой заготовки  $309 \times 83 \times 2$  мм (см. рис. 1). Заготовка имеет свойства материала 1163Т: модуль Юнга  $E = 7454$  кг/мм<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.34$ , предел текучести  $\sigma_T = 29.85$  кг/мм<sup>2</sup>, модуль линейного упрочнения  $E_T = 200.75$  кг/мм<sup>2</sup>. Для применения предлагаемого метода оптимизации задаются необходимые значения  $U_x^*$ ,  $U_z^*$  на краях панели.

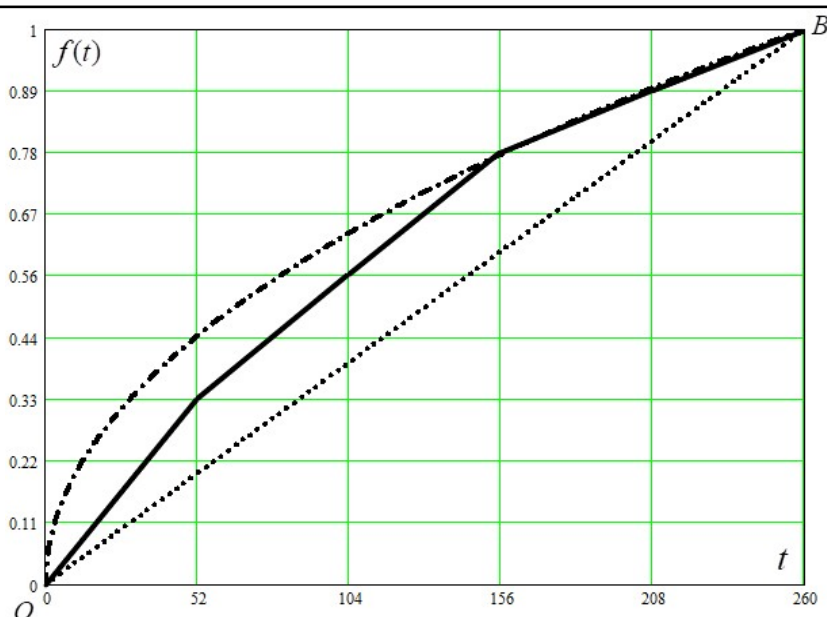


Рис. 4. Оптимальная функция движения контактных тел при  $N = 5$ ,  $M = 9$  в сравнении с аналитическим решением

Результаты расчёта, определяющего оптимальный закон движения зажимов обтяжного оборудования при  $N = M = 2$  и  $N = M = 3$  даны на рис. 5 (сплошная жирная линия – оптимальная кинематическая схема). Функции, задающие изменение перемещений  $U_x(t)$ ,  $U_z(t)$  по параметру деформирования, представлены на рис. 6. Как видно, оптимальная траектория обеспечивает прижатие к пуансону, разгрузку с выпрямлением панели и повторное прижатие к пуансону с растяжением. Такая ступенчатая схема обтяжки с растяжением согласуется с данными работы [10].

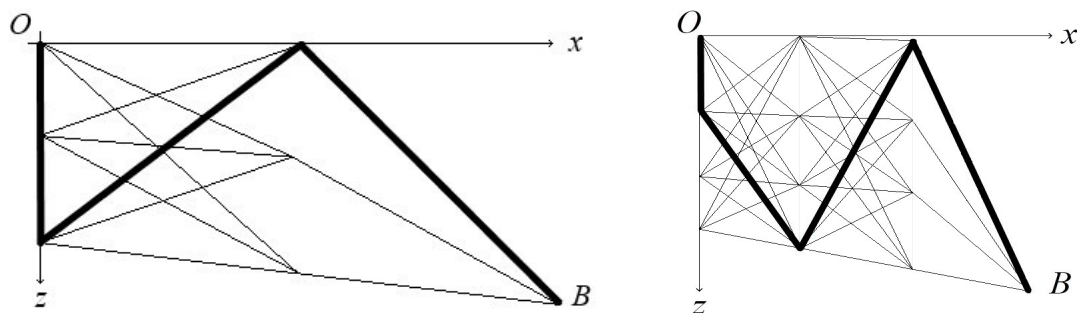
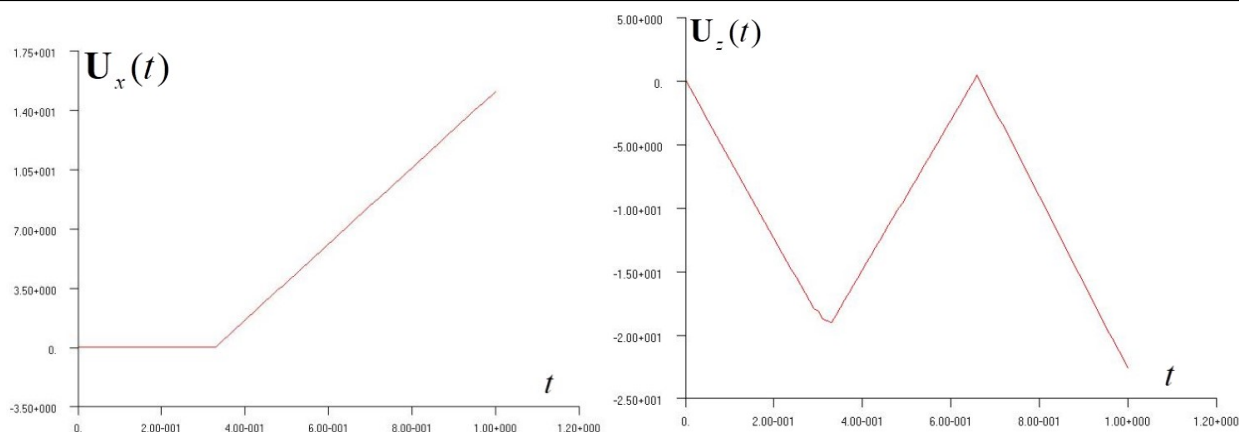


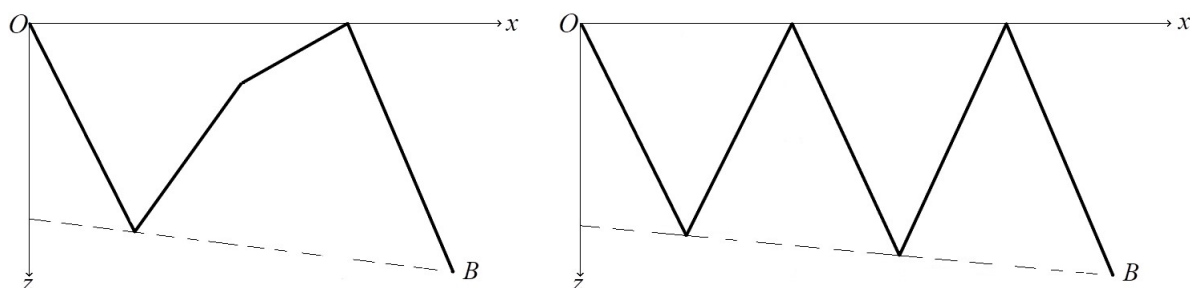
Рис. 5. Оптимальная траектория деформирования  $U_z = f(U_x)$  по технологии обтяжки при  $N = M = 2$ ,  $N = M = 3$  и возможные траектории

При увеличении  $N$  и  $M$  количество переходов увеличивается (см. рис. 7). Последние данные по формообразованию панелей обтяжкой требуют в кинематических схемах учитывать участки с разгрузкой, т.е. процесс формообразования должен проходить в несколько переходов. В таком случае циклического упругопластического деформирования необходимо учитывать изменения напряжённо-деформированного состояния по мере накопления числа циклов нагружения.

Вычисления рекуррентных соотношений выполняются путём построения итераций с различными системами параметров (7), (8) и решения уравнений (4). Вычисление уравнений метода конечных элементов с вводом необходимых граничных условий и выводом значений критерия оптимизации осуществляется в системе MSC.Marc с помощью внедрения пользовательских программ [19].

Рис. 6. Графики функций  $U_x(t)$ ,  $U_z(t)$  для задания перемещений при  $N = M = 2$ 

В задаче оптимального деформирования в ползучести с одним узлом в начальной и конечной гиперплоскости при  $N = 3$ ,  $M = 9$  общее количество вариантов траекторий будет  $9 \cdot 9 = 81$ . Пусть время расчёта задачи деформирования в ползучести при  $T = \Delta t$  занимает  $r$  часов. Тогда для расчёта всех вариантов траекторий потребуется  $81 \cdot 3 \cdot r = 243r$  часов. При использовании алгоритма метода динамического программирования потребуется  $9 \cdot 9 \cdot 2 \cdot r + 9 \cdot 3 \cdot r = 189r$  часов. Для случая  $N = 5$ ,  $M = 9$  время расчёта всех вариантов траекторий будет  $9 \cdot 9 \cdot 9 \cdot 9 \cdot 5 \cdot r = 32805r$  часов, а при реализации разработанного алгоритма –  $9 \cdot 9 \cdot 2 \cdot r + 9 \cdot 9 \cdot 3 \cdot r + 9 \cdot 9 \cdot 4 \cdot r + 9 \cdot 5 \cdot r = 774r$  часов.

Рис. 7. Оптимальная траектория деформирования  $U_z = f(U_x)$  по технологии обтяжки при  $N = M = 4$ ,  $N = M = 5$ 

В задаче деформирования в пластичности с  $M+1$  узлами в начальной и одним узлом в конечной гиперплоскости при  $N = M = 2$  общее количество вариантов траекторий  $3 \cdot 3 = 9$ . Время расчёта задач деформирования в пластичности примем одинаковым и равным  $r$ . Тогда для расчёта всех вариантов траекторий потребуется  $9r$  часов. При использовании алгоритма метода динамического программирования потребуется  $3 \cdot 3 \cdot r + 3 \cdot r = 12r$  часов. В случае  $N = M = 3$  время расчёта всех вариантов траекторий будет  $4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot r = 64r$  часов, а при реализации разработанного алгоритма –  $4 \cdot 4 \cdot r + 4 \cdot 4 \cdot r + 4 \cdot r = 36r$  часов.

Для сокращения времени расчёта набора задач в рекуррентных соотношениях разработан алгоритм параллельного конечно-элементного анализа на кластере вычислительных машин, при котором задачи для каждого набора (7) или (8) распределяются по машинам. Реализация алгоритма выполняется с помощью протокола распределённой модели COM (Distributed COM). Время работы последовательного и параллельного алгоритмов анализируется с помощью коэффициентов ускорения  $S_m = \frac{T_1}{T_m}$  и эффективности  $E_m = \frac{S_m}{m}$  ( $T_m$  – время параллельного алгоритма на кластере



из  $m$  рабочих станций,  $T_1$  – время выполнения последовательного алгоритма на одной машине, см. табл. 1) на вычислительном кластере, включающем 2 ноутбука на базе процессора Intel Core i5-8300 с оперативной памятью 8 Gb.

Таблица 1

Сравнение времени работы последовательного и параллельного алгоритмов

Задача	Число узлов	$T_m$ , с	$S_m$	$E_m$
Расчёт в ползучести при $N = 3, M = 3$	1	27 458	-	-
	2	15 443	1.78	0.89
Расчёт в пластичности при $N = M = 2$	1	7543	-	-
	2	4460	1.69	0.85

Данные результаты времени расчёта свидетельствуют о перспективности увеличения вычислительных узлов кластера.

**Заключение.** Таким образом, рассмотренный метод решения задачи оптимального управления приводит к последовательности вспомогательных простых задач минимизации. Так как в процессе расчёта исключаются неоптимальные траектории, то данный метод уменьшает объём вычислений в сравнении с перебором всевозможных путей деформирования. Разработанный метод учитывает немонотонные траектории деформирования с участками разгрузки, сложную геометрию модели и свойства материала. В сравнении с методом в [3; 4] здесь увеличено множество вариантов для анализа оптимального.

Анализ результатов решения задач по оптимизации кинематических схем формообразования демонстрирует зависимость оптимальной траектории от дискретизации допустимого множества. Таким образом, необходимо разрабатывать и использовать уточняющие методы решения задач оптимального деформирования с возможностью распределения алгоритма на кластере машин.

В случае циклического упругопластического деформирования (в процессах формообразования обтяжкой) возможно использование модели циклически упрочняющихся и разупрочняющихся материалов [16].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аннин, Б. Д. Моделирование процессов формообразования панелей крыла самолёта SSJ-100 / Б. Д. Аннин, А. И. Олейников, К. С. Бормотин // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т. 51. – № 4. – С. 155-165.
2. Бормотин, К. С. Итеративный метод решения геометрически нелинейных обратных задач формообразования элементов конструкций в режиме ползучести / К. С. Бормотин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2013. – Т. 53. – № 12. – С. 145-153.
3. Бормотин, К. С. Метод динамического программирования в задачах оптимального деформирования панели в режиме ползучести / К. С. Бормотин, Вин Аунг // Вычислительные методы и программирование. – 2018. – Т. 19. – С. 470-478.
4. Бормотин, К. С. Численный метод оптимизации процесса формообразования панелей обтяжкой / К. С. Бормотин, Вин Аунг // Вычислительные методы и программирование. – 2019. – Т. 20. – С. 386-395.
5. Васильев, Ф. П. Методы оптимизации / Ф. П. Васильев. – М.: Факториал Пресс, 2002. – 824 с.
6. Веричев, С. Н. Формообразование изгибом в режиме пластичности элементов самолётных конструкций / С. Н. Веричев, Б. В. Горев, И. А. Банщикова // Обработка металлов. – 2014. – № 4 (65). – С. 85-93.
7. К вопросу обработки материалов давлением в режиме ползучести / Б. В. Горев, И. Д. Клопотов, Г. А. Раевская, О. В. Соснин // Прикладная механика и техническая физика. – 1980. – № 5. – С. 185-191.
8. Коробейников, С. Н. Нелинейное деформирование твёрдых тел / С. Н. Коробейников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 262 с.
9. Михеев, В. А. Совершенствование процессов формообразования обтяжкой оболочек двойной кривизны / В. А. Михеев, А. Ф. Гречникова, А. А. Кузина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 4. – С. 217-224.

10. Выбор кинематической схемы формообразования обтяжкой обводообразующих оболочек сложной пространственной формы / В. А. Михеев, Ю. С. Клочков, А. А. Кузина, А. Ф. Гречникова, Д. В. Савин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 5 (36). – С. 239-245.
11. Моисеев, Н. Н. Элементы теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1975. – 528 с.
12. Молод, М. В. Управление процессом формообразования обшивок на оборудовании с ЧПУ / М. В. Молод // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 12-2. – С. 62-64.
13. Погарцева, М. М. Методика создания управляющих программ для обтяжных прессов, применяемых в авиационной промышленности / М. М. Погарцева // Сибирский журнал науки и технологий. – 2017. – Т. 18. – № 2. – С. 404-414.
14. Феоктистов, С. И. Определение геометрических параметров технологического процесса получения деталей летательных аппаратов из прессованных профилей методом изгиба с последующим фрезерованием / С. И. Феоктистов, С. В. Белых, М. М. Погарцева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № I-1(13). – С. 4-11.
15. Цвелодуб, И. Ю. Об оптимальных путях деформирования в условиях ползучести. Некоторые приложения к задачам обработки материалов давлением / И. Ю. Цвелодуб // Изв. АН СССР. МТТ. – 1987. – № 6. – С. 128-136.
16. Шитиков, А. В. Модель упругопластичности при циклическом деформировании материалов / А. В. Шитиков, С. А. Шитиков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № IV-1(32). – С. 30-35.
17. Huang Lin. FEM analysis of spring-backs in age forming of aluminum alloy plates / Huang Lin, Wan Min, Chi Cailou, Ji Xiusheng // Chinese Journal of Aeronautics. – 2007. – Vol. 20. – Pp. 564-569.
18. Lihua, Z. Study on springback behavior in creep age forming of aluminium sheets / Z. Lihua, L. Jianguo, H. Minghui // Advanced Science Letters. – 2013. – Vol. 19. – № 1. – Pp. 75-79.
19. Marc 2016, Vol A: Theory and User Information, MSC.Software Corporation <http://www.mssoftware.com/product/marc>.
20. Ribeiro, F. C. Creep age forming: a short review of fundamentals and applications / F. C. Ribeiro, E. P. Marinho, D. J. Inforzato, P. R. Costa and G. F. Batalha // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2010. – Vol. 43. – № 1.
21. Simon, D. A reconfigurable tooling system for producing plastic shields / D. Simon, L. Kern, J. Wagner, G. Reinhart // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 17. – Pp. 853-858.
22. Wang, W.W. A new flexible sheet metal forming method and its stamping process / W.W. Wang, B. B. Jia, J. B. Yu // Proc. of the 14th IFToMM World Congress. – 2015.
23. Wriggers, P. Computational contact mechanics / Wriggers P. – Heidelberg: Springer, 2006.
24. Yan Yu. Design and optimization of press bend forming path for producing aircraft integral panels with compound curvatures / Yan Yu, Wan Min, Wang Haibo, Huang Lin // Chinese Journal of Aeronautics. – 2010. – Vol. 23(2). – Pp. 274-282.





Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.  
K. I. Kim, K. K. Kim, S. N. Ivanov

## ЭКСПЕРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЕЛЕЯ-ТЕЙЛОРА

### EXPERT STUDY OF MAGNETIC FIELD INFLUENCE ON RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY

**Ким Константин Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Konstantin I. Kim** – Dr. Sc., Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru.

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

**Konstantin K. Kim** – Dr. Sc., Professor, Trinity College, Cambridge University, Great Britain. Professor, Dr. habil.; Member of IEEE, NYAS, EANS, Head of Theoretical electrical engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia. 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** – Dr. Sc., Professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-na-Amure); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-na-Amure, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Аннотация.** В статье обоснована необходимость проведения и приведены результаты исследования влияния магнитного поля на характер протекания многокомпонентных проводящих жидкостей. Проведён анализ методов исследования и принимаемых допущений при изучении неустойчивости Релея – Тейлора. Предложен подход, позволяющий сделать вывод, что осевые составляющие магнитной индукции оказывают стабилизирующее действие и демпфируют процесс разрушения нижней границы рабочей поверхности жидкости. Приведены экспериментальные подтверждения повышения устойчивости системы при продольном и/или поперечном воздействии магнитного поля.

**Summary.** The article substantiates the necessity of conducting and presents the results of the study of the influence of the magnetic field on the flow of multicomponent conducting fluids. The research methods and assumptions used in the study of Rayleigh-Taylor instability are analyzed. An approach is proposed that allows us to conclude that the axial components of magnetic induction have a stabilizing effect and dampen the process of destruction of the lower boundary of the liquid working surface. Experimental evidence for increasing the system stability under the longitudinal and/or transverse influence of a magnetic field is presented.

**Ключевые слова:** гидродинамика, турбулентное течение, неустойчивость, эксперимент.

**Key words:** hydrodynamics, turbulent flow, instability, experiments.

УДК 538.4

**Введение.** Современные программные средства и технологии на основе программно-аппаратной архитектуры (Compute Unified Device Architecture) позволяют производить мультифизическую симуляцию с использованием графических процессоров, реализующих произвольные

вычисления на видеокартах. Особенно эффективны такие вычисления при моделировании и анализе задач гидродинамики. Практическим примером такой задачи является неустойчивость Релея – Тейлора – результат турбулентного течения гидродинамического характера, возникающего в различных технических устройствах. Такие режимы имеют место в многокомпонентной системе, находящейся во внешнем силовом поле. Известна подобная задача Рихтмайера – Мешкова, в которой система подвергается импульсному воздействию, в литературе она изучается отдельно. Важной практической областью, на которую ориентирована рассматриваемая задача, являются системы инерциального термоядерного синтеза. В этих системах имеет место эффект неустойчивого сжатия вещества, что ведёт к возникновению неустойчивости Релея – Тейлора.

Другим относительно более простым примером предметной области являются перекачивающие электромеханические устройства на основе теплогенерирующих электромеханических преобразователей [1–4].

Численное моделирование или расчёт по уравнениям гидродинамики турбулентных течений связаны с ограниченными вычислительными ресурсами. Создание параметрических моделей и применение эмпирических зависимостей не имеют адекватного описания процесса турбулентного перемешивания и применимы для частных случаев.

Задачей экспертного исследования является получение базы экспериментальных данных для синтеза математической модели процессов перемешивания Релея – Тейлора.

**Постановка задачи.** Развитие процесса разрушения поверхности раздела двух жидкостей, имеющих разную плотность, вначале определяется неустойчивостью Релея – Тейлора. В связи с этим возникает вопрос о степени влияния магнитного поля на данную неустойчивость. Для решения этой задачи изучалась деформация поверхности раздела между ртутью и воздухом в гравитационном поле во времени.

В замкнутом канале из органического стекла с внутренним поперечным сечением  $20 \times 50 \text{ мм}^2$  создавался столб ртути высотой около 85 мм при давлении воздуха под ртутью 0,1 МПа. В исходном состоянии нижняя граница ртути формировалась с использованием сетки с размером ячейки в свету 0,25 мм. Сетка выполнялась из латунной проволоки диаметром 0,2 мм, прикреплялась к механическому штоку с электрическим приводом и покрывалась тонким слоем воска. В фиксированный момент времени с помощью электрического привода происходил отрыв сетки от ртутного столба и производилась видеофиксация нижней границы столба. Эксперименты проводились для трёх случаев: без магнитного поля, с поперечным и с продольным магнитным полем.

Сопоставление кадров, соответствующих одному и тому же моменту времени из интервала 0...0,1 с, позволило сделать следующие выводы:

1. В отсутствие магнитного поля поверхность раздела носит существенно нерегулярный характер.
2. Магнитное поле, как продольное, так и поперечное, сглаживает поверхность раздела и затягивает процесс её разрушения.
3. Высота области, в которой происходит деформация границы ртути при  $t \leq 0,1$  с и магнитном поле 0,25 Тл, составляет 1,5...2 см.

Неустойчивость Релея – Тейлора на начальной стадии проявляется в том, что частицы жидкостей, расположенных вблизи поверхности раздела, совершают поперечные колебания с нарастающей амплитудой. В дальнейшем эти колебания переходят в вихревое движение, которое прогрессирует и приводит к полному разрушению исходной границы.

В работах по неустойчивости Релея – Тейлора в магнитном поле рассматривались в основном идеализированные модели жидкостей. В работах [5; 6] жидкость предполагалась идеально проводящей, в [7] рассмотрен случай невязких жидкостей, но с конечной электропроводностью. Вместе с тем для обоснования асимптотического решения электропроводность в [7] принималась весьма значительной.

Попытка рассмотрения вопросов по применению поршневых жидкометаллических потоков в энергетических цепях привела к необходимости усовершенствования исследуемой модели жид-

кости [8]. В этой работе задача Релея – Тейлора рассмотрена для вязкой жидкости с конечной электропроводностью. На величину вязкости и электропроводности ограничения не накладывались.

Мотивацией к проведению данной работы послужила необходимость экспериментальной проверки ряда выводов [8], касающихся роли магнитного поля в неустойчивости Релея – Тейлора.

В эксперименте начальное (равновесное) состояние соприкасающихся друг с другом жидкостей разной плотности создавалось искусственным путём. Формирование нижней границы верхней жидкости с большей плотностью выполнялось с помощью сетки, имеющей плохую смачиваемость. В результате в первоначальном состоянии принудительно увеличивалось действие сил поверхностного натяжения жидкости. Из-за этого модели начальных состояний жидкостей в [8] и в описываемом эксперименте не были, строго говоря, адекватными. Поэтому экспериментом предусматривалось лишь качественное рассмотрение некоторых из выводов [8].

**Описание экспериментальной установки.** Схема установки дана на рис. 1. Здесь используются следующие обозначения: 1 – герметизированный канал прямоугольного сечения; 2 – магнитная система, полюсы которой выполнены шихтованными в продольном направлении; 3 – поршень, снабжённый механическим штоком 4; 5 – трос, соединяющий шток с электрическим приводом; 6 – ртутный столб; 7 и 8 – скоростные видеокамеры типа DVR; 9 – источник света; 10 – видеопроектор.

Канал был выполнен из органического стекла. Герметизация канала обеспечивалась уплотнительными пробками, устанавливаемыми на его концах. Внутреннее сечение канала –  $20 \times 50 \text{ мм}^2$ , длина канала – 400 мм. Давление воздуха в канале – 0,1 МПа.

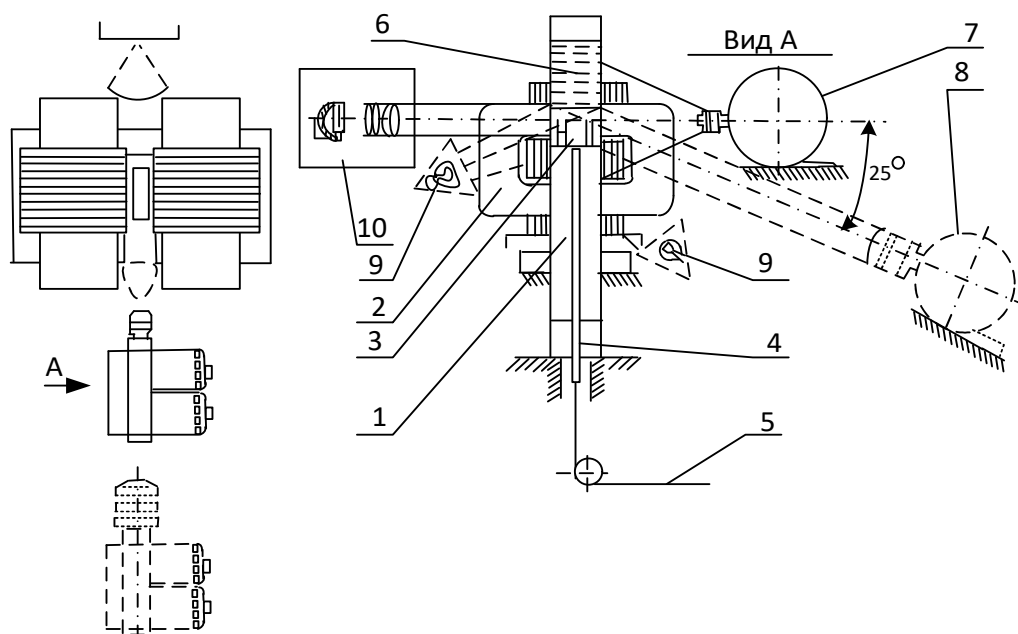


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Поршень состоит из остова и сетки. В остове из органического стекла имелись два продольных канала, соединённых в верхней части остова с поперечным коллектором. В верхней стенке коллектор имел равномерно распределённые отверстия для осуществления перехода воздуха из одной части канала в другую при движении поршня жидкого металла. Места между отверстиями обрабатывались таким образом, чтобы в этом месте образовывались остроконечные выступы – шипы. На шипы натягивалась сетка из латунной проволоки диаметром 0,2 мм. Сетка была жёстко прикреплена к остову поршня. Для уменьшения смачиваемости сетка покрывалась слоем воска. Диаметр сеточной ячейки в свету равнялся 0,25 мм. В результате обеспечивалась равномерность поступления воздуха по всей рабочей поверхности поршня.

Основу магнитной системы составлял электромагнит постоянного тока с двумя магнитопроводами Ш-образной формы. В зазоре (30 мм) между магнитопроводами был расположен канал. Расстояние между осями соседних полюсов равнялось 70 мм.

На рис. 2 приведено распределение магнитного поля ( $B_x$  и  $B_z$  – компоненты индукции в одном масштабе) по оси  $x$ .

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** Вначале ртутный столб 6 устанавливался вертикально в канале 1 с помощью сетки поршня 3. В фиксированный момент времени ( $t = 0$ ) эксперимента поршень приводился в движение электроприводом и столбик ртути внезапно лишался подпора, оказываясь только под воздействием сил гравитации и давления воздуха снизу (0,1 МПа). На начальном этапе скорость поршня по данным видеосъёмки составляла  $90 \text{ см/сек}^{-1}$ . Одновременно в течение 2 с выполнялась видеосъёмка нижней границы ртути.

Исследовались три случая: I – в отсутствии магнитного поля; II – с поперечным полем; III – с продольным полем. В исходном состоянии сетчатая поверхность поршня устанавливается на уровне плоскости с  $B_x = 0$ , поэтому движение нижней границы столбика ртути в течение эксперимента происходило в области, в которой силовые линии внешнего поля ориентированы в основном поперёк канала, столбик смещался на 20 мм за 0,1 с. Поверхность сетки устанавливалась на уровне плоскости с  $B_z = 0$ , в результате величина продольного поля в области эксперимента была того же порядка, что и поперечного.

Для практики наибольший интерес вызывают случаи, когда поверхность раздела между жидкостями в равновесном состоянии имеет плоскую форму и перпендикулярна вектору ускорения поля сил тяжести либо когда эта поверхность вогнутая и выпуклостью обращена вниз. Поэтому далее рассматриваются только эксперименты с прямым поршнем, причём его рабочая (сетчатая) поверхность перпендикулярна стенкам канала, и с поршнем с вогнутой поверхностью. Эксперимент с поршнем с вогнутой поверхностью имел своей целью определение степени влияния на неустойчивость поверхности раздела её кривизны.

Оценки по применению поршневых жидкометаллических потоков в энергетических целях показали, что необходимое время существования жидких поршней составляет 0,1 с и менее. В связи с этим основное внимание в экспериментах отводилось наблюдению поведения поверхности раздела в интервале  $0 \dots 0,1$  с. Нижеприведённые экспериментальные данные отвечают указанному отрезку времени.

Рассмотрим сначала случай без магнитного поля. Здесь нижняя граница ртутного столба имела существенно нерегулярный характер. Кроме того, кадры видеосъёмок для одного и того же момента времени в различных экспериментах выявили различие в форме нижней границы. В одном случае ртуть перетекала к одной из стенок канала. Перетекание со временем усиливалось, в результате нижняя граница ртути в среднем имела вид косой плоскости, причём угол наклона изменялся. В другом случае обнаружила себя тенденция преимущественного протекания ртути вдоль обеих стенок канала. Имели место и промежуточные случаи.

Вариации форм границы свидетельствуют о неодинаковости начальных условий в экспериментах и их влиянии на рассмотренную разновидность границы ртути. Несмотря на восковое покрытие сетки, вероятно, она всё же смачивалась, к тому же степень смачиваемости в разных опытах была различной. Аргументом для такого предположения является тот факт, что при нарастании процесса разрушения поверхности раздела последняя старалась сохранить первоначальный

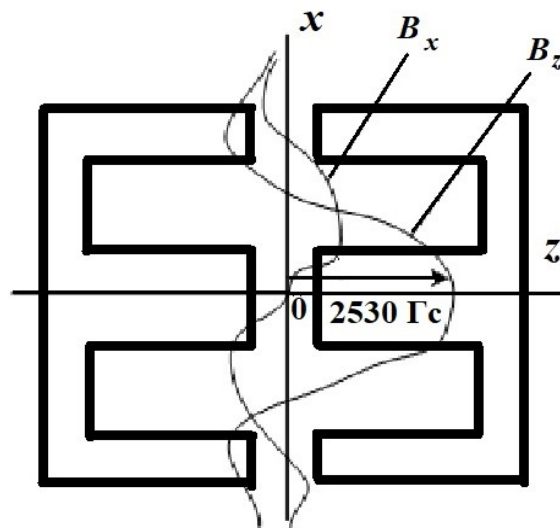


Рис. 2. Распределение магнитного поля в зазоре электромагнита

вид и в результате этого в большей степени изменения касались величины деформации, нежели её формы. В этом заключалась характерная особенность всех опытов без магнитного поля, выполненных при различных формах рабочей поверхности поршня.

В присутствии магнитного поля граница ртути выпрямлялась и сглаживалась, что свидетельствовало о регуляризации процесса разрушения контактной поверхности под действием магнитного поля, в результате чего роль начальных условий становилась менее существенной.

Эволюция процесса разрушения нижней ртутной границы со временем показана на рис. 3 и 4, где приведены кривые, построенные по данным видеосъёмок. По этим кривым можно получить представление о характере и величине деформации нижней границы ртути. На рис. 3 и 4 области, занятые ртутью и воздухом, обозначены соответственно Р и В. Рис. 3 относится к поршню с плоской рабочей поверхностью. Эти рисунки иллюстрируют следующие эксперименты: I – в отсутствие магнитного поля, II – с поперечным магнитным полем и III – с продольным. Видеосъёмка, осуществлённая камерой 8, установленной под определённым углом к каналу (см. рис. 1), дала возможность выявить, что при разрушении нижней границы ртутного столбика на поверхности раздела между ртутью (Р) и воздухом (В) образуются ямы и вздутия – пузыри.

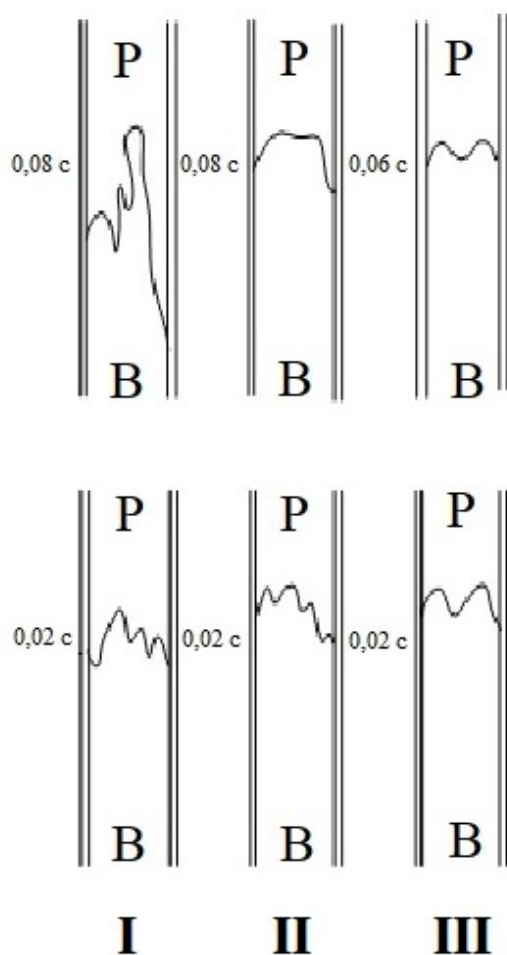


Рис. 3. Эволюция деформации нижней границы ртути со временем (в исходном состоянии граница плоская)

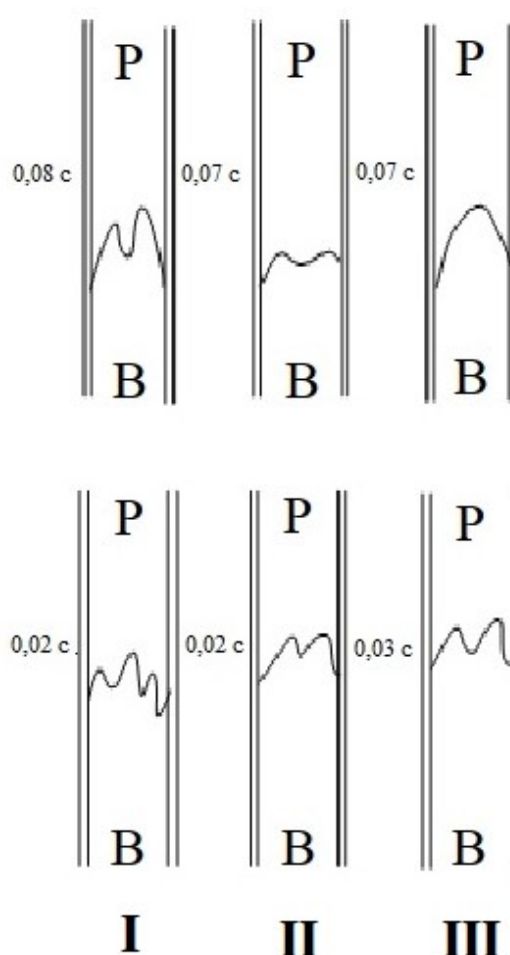


Рис. 4. Эволюция деформации нижней границы ртути со временем (в исходном состоянии граница выпуклая)

Из приведённых рисунков можно сделать вывод, что магнитное поле (и продольное, и поперечное) играет позитивную роль при возникновении неустойчивости Релея – Тейлора, которая заключается в том, что процесс разрушения нижней границы рабочей поверхности поршня замедляется.



Волны, определяющие возмущение поверхности раздела, носят поперечный характер. Продольное магнитное поле воспринимает колебания частиц вещества в направлении, перпендикулярном к невозмущённой поверхности раздела, как движение поперёк поля вещества, находящегося в зазоре между невозмущённой и возмущённой поверхностями раздела.

Это связано с тем, что колебание отдельных частиц происходит со сдвигом во времени. Силы Ампера, возникающие в указанном объёме вещества, действуют против движения волны. В связи с этим скорость движения волны уменьшается, в результате снижается частота колебаний частиц вещества, падает инкремент колебаний. Можно говорить, что продольное магнитное поле во всех случаях уменьшает возмущения, что согласуется с приведёнными экспериментальными данными.

Если внешнее магнитное поле направлено поперёк канала, то для выяснения его роли необходимо найти распределение индуцированного магнитного поля, обусловленного возмущением поверхности раздела, и определить направление магнитного давления. Сопоставляя это направление с направлением движения отдельных частиц, можно прийти к заключению, что поперечное магнитное поле оказывает стабилизирующее действие на нарастающую в отсутствие магнитного поля волну и ослабляет её затухание, если эта волна генерировалась в отсутствие магнитного поля. Эксперименты однозначно определили позитивное влияние поперечного магнитного поля. Это говорит о том, что начальные амплитуды мод с отрицательным инкрементом в отсутствие магнитного поля незначительны, поэтому в поведении возмущённой поверхности раздела данные моды заметной роли не играют.

В экспериментах магнитные поля были относительно слабыми (см. рис. 2). По мере увеличения магнитных полей их стабилизирующая роль возрастает [8].

В заключение следует отметить, что выбор ртути в качестве верхней жидкости был обусловлен желанием создать в эксперименте наиболее неблагоприятные отношения неустойчивости, а выбор относительно больших поперечных размеров ртутного столба ( $20 \times 50 \text{ мм}^2$ ) – стремлением получить надёжные выводы.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для обоснования и синтеза математической модели неустойчивости Релея – Тейлора с учётом особенностей параметризованных технических систем, для которых характерны турбулентные перетоки рабочей жидкости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы: моногр. / К. К. Ким, С. Н. Иванов, В. М. Кузьмин. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 418 с.
2. Ким, К. К. Электромеханические генераторы тепловой энергии: моногр. / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 289 с.
3. Алгоритм CFD-моделирования процесса тепломассопереноса в совмещённом электротехническом устройстве / С. Н. Иванов, К. К. Ким, О. В. Приходченко, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 65-72.
4. Ким, К. К. Гидродинамическое моделирование гибридных энергетических устройств с использованием CFD-технологий / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – Вып. 2. – С. 161-169.
5. G. Taylor. Proc. Roy. Soc., 1950, A, 201, 192.
6. Zabusky N. J., Zeng S, Ray J., Samtaney R. Vortical Projectiles from Shock-Bubble Interactions / Proc. of 6th International Workshop on The Physics of Compressible Turbulent Mixing (Marseille, 18-21 June, 1997, France) p. 539.
7. Исследование неустойчивости Релея – Тейлора в задаче лазерного термоядерного синтеза и сравнение различных расчётных методик путём вейвлет-кодирования исходных физических полей и последующей их нейросетевой обработки / А. С. Нужный, В. Б. Розанов, Р. В. Степанов, С. А. Шумский. – М.: Препринт, Физический институт им. П. Н. Лебедева, 2003. – 32 с.
8. Ким, К. И. МГД-генераторы на поршневых потоках / К. И. Ким, К. К. Ким. – М.: Маршрут, 2005. – 300 с.



Бузикаева А. В., Черный С. П.  
A. V. Buzikaeva, S. P. Cherny

**АНАЛИЗ МНОГОКАСКАДНЫХ НЕЧЁТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ СУГЕНО И МАМДАНИ  
ВО ВНЕШНЕМ КАСКАДЕ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**ANALYSIS OF SUGENO AND MAMDANI MULTI-STAGE FUZZY REGULATORS  
IN THE EXTERNAL STAGE FOR CONTROL SYSTEMS OF AC ELECTRIC DRIVES**

**Бузикаева Алина Валерьевна** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keapu@knastu.ru.

**Alina V. Buzikaeva** – Post-graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keapu@knastu.ru.

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keapu@knastu.ru.

**Sergey P. Cherny** – PHD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department of Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keapu@knastu.ru.

**Аннотация.** В работе представлена модель системы электропривода переменного тока с сочетанием алгоритмов нечёткого вывода во внешнем и внутреннем каскаде Сугено-Мамдани и Сугено-Сугено соответственно. Проведён анализ применения многокаскадных систем с использованием различных алгоритмов нечёткого вывода во внутреннем каскаде. Выявлены достоинства и недостатки использования мягких вычислений в системе интеллектуального управления электроприводом переменного тока. Методика, основанная на технологии многокаскадного управления, позволяет существенно расширить возможности этого подхода и сократить трудоёмкость при реализации систем управления.

**Summary.** The paper presents a model of an AC electric drive system with a combination of fuzzy inference algorithms in the external and internal cascade, Sugeno-Mamdani and Sugeno-Sugeno, respectively. The analysis of the use of multistage systems using various algorithms of fuzzy inference in the internal stage is carried out. The advantages and disadvantages of using soft computing in the intelligent control system of an AC electric drive are revealed. a methodology based on multistage control technology can significantly expand the capabilities of this approach and reduce the complexity of the implementation of control systems.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления, нечёткий логический регулятор, электропривод переменного тока.

**Key words:** intelligent control system, fuzzy logic controller, AC electric drive.

УДК 004.896

**Введение.** В настоящее время существует множество различных систем, функционирование которых осуществляется с применением целого ряда методик, использующих в своей основе элементы искусственного интеллекта. К таким системам относятся и системы, базирующиеся на теории нечётких множеств. Эти подходы находят своё применение там, где традиционные методы малоэффективны или в результате неприемлемы из-за отсутствия полного и точного понимания о функционировании и целях существования таких объектов регулирования. Использование так называемых нечётких систем управления, в основе работы которых лежит технология применения мягких вычислений, является в настоящее время актуальным способом реализации процедур

управления и имеет широкие перспективы развития в будущем. Получение качественных переходных процессов системы автоматического управления достигается при условии точного математического описания модели и при наличии достоверной системы ограничений. Реализация законов управления технологическим процессом с использованием интеллектуального подхода, основанного на теории нечётких множеств, зачастую ограничивается применением одного модуля, организованного на единственном алгоритме вывода.

Структурные и функциональные схемы большинства общепринятых электроприводов переменного тока в настоящее время определены. Поэтому проектирование систем автоматического регулирования электроприводами сводится в основном к синтезу параметров регуляторов, исходя из необходимого качества выходных характеристик двигателя или рабочего органа производственного механизма. В то же время продолжают развиваться и совершенствоваться новые системы автоматического регулирования в электроприводе на основе структурных схем и систем с нечёткой логикой [1; 2].

Большинство новых алгоритмов управления электроприводами переменного тока реализуется на основе общей теории автоматического управления. Однако поставленная задача может быть решена и нетрадиционными методами. Одним из таких решений является алгоритм управления электроприводом переменного тока с применением методов нечёткой логики. В нечёткой логике стратегия управления подобна процессу ассоциативного мышления человека. Именно поэтому системы с элементами нечёткой логики принято относить к искусственно интеллектуальным.

Одним из направлений развития нечётких систем управления является построение регулятора, использующего многокаскадную схему нечёткого вывода. Введение многокаскадности позволяет существенно повысить интеллектуальность системы, что впоследствии позволит значительно расширить диапазон применения нечётких систем. Первый каскад нечёткого регулятора можно рассматривать как экспертную систему, которая на основе имеющихся входных данных производит управление регуляторами, находящимися во втором каскаде.

Реализация законов управления сложным технологическим процессом с использованием интеллектуального подхода, основанного на теории нечётких множеств, зачастую ограничивается применением одного модуля, организованного на единственном алгоритме вывода. Типичным объектом управления для такого рода систем являются модели электроприводов переменного тока. Нечёткий регулятор в таких системах, как правило, моделирует ПИ- или ПИД-закон управления с учётом ряда дополнительных информационных каналов. В целом, реализация систем управления, содержащих элементы нечёткой логики, позволяет сформировать различные сложные законы регулирования, при этом существенно увеличивая алгоритмическую сложность основных блоков самого нечёткого регулятора. Ограничивающими факторами при этом будут как количество лингвистических переменных на входах и выходах, объём базы знаний, так и сложность при выборе алгоритма вывода и формы функций принадлежности. Кроме того, в случае выбора электропривода переменного тока в качестве объекта управления добавляются ряд дополнительных проблем, связанных с существенным количеством контуров регулирования, в том числе взаимосвязанных, а также существенный порядок объекта регулирования при его математическом описании [3].

**Модель многокаскадного нечёткого логического регулятора с сочетанием алгоритмов Сугено-Мамдани.** Математическая модель системы управления, представленная структурной схемой, характеризуется как высоким порядком, так и сложной функциональной зависимостью координат. Поэтому реализация нечёткого регулятора с использованием традиционного подхода будет сопровождаться рядом проблем при настройке базы правил, выборе количества и вида функций принадлежности, а также числа информационных входов. Введём в систему интеллектуальное переключающее устройство, которое предназначено для моделирования функции принадлежности пространственной формы. Структурная схема системы регулирования электроприводом переменного тока с многокаскадным нечётким логическим регулятором (МНЛР) с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани представлена на рис. 1.

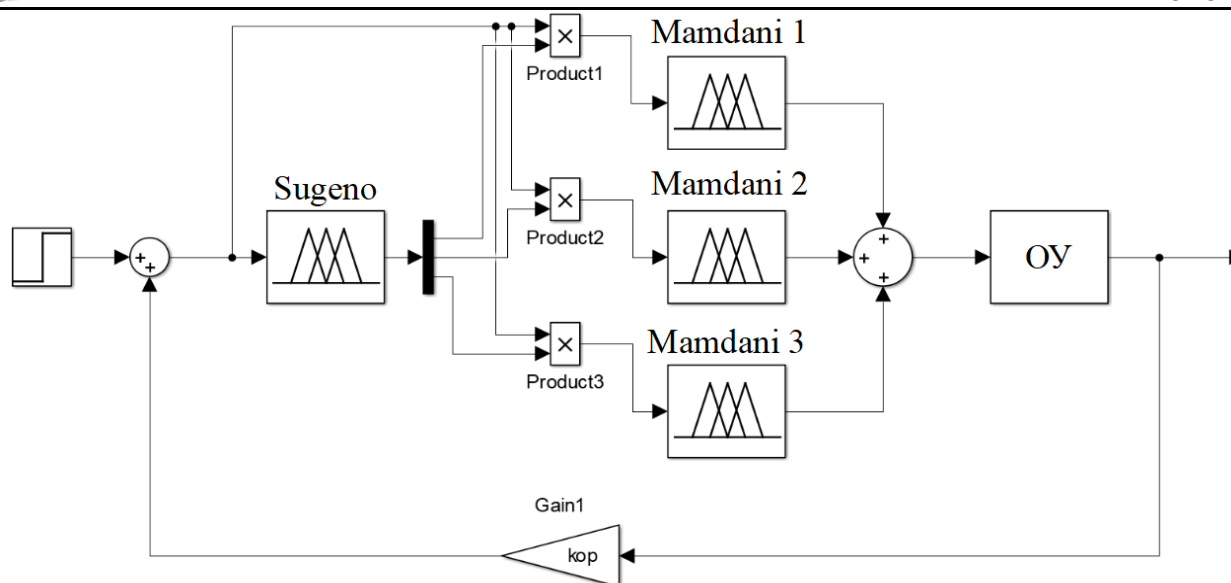


Рис. 1. Структурная схема системы регулирования с МНЛР с алгоритмом вывода Сугено-Мамдани

Для формирования модели нечёткого регулятора с пространственными функциями принадлежности необходимо реализовать сложную многокаскадную интеллектуальную систему, включающую в себя ряд простейших регуляторов Мамдани, имеющих единственные функции принадлежности на входе и выходе, и интеллектуальное переключающее устройство с алгоритмом вывода Сугено, обладающее единственной лингвистической переменной на входе и тремя информационными выходами.

Первый каскад в интеллектуальном модуле можно рассматривать как систему, которая на основе имеющихся данных производит управление регуляторами, которые находятся во втором каскаде, и представляет собой внешний интеллектуальный переключатель как часть пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора – устройства в управляющем контуре с обратной связью. Такая структура используется в системах автоматического управления для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса.

На рис. 2 приведена модель интеллектуального переключающего устройства с алгоритмом вывода Сугено-Мамдани [4].

Звено, реализующее функции интеллектуального переключения, имеет на своём входе одну лингвистическую переменную *input1* и анализирует сигнал ошибки. Формализация выходных сигналов регулятора выполняется лингвистическими переменными *output1*, *output2* и *output3*, в основе логического вывода интеллектуального переключающего устройства реализуется алгоритм Сугено (см. рис. 3). Основными задачами, возлагаемыми на такую структуру, являются интеллектуальная оценка и выбор соответствующих нечётких регуляторов второго каскада, настроенных на различные диапазоны управления.

Выбор области определения базовых терм-множеств лингвистических переменных осуществляется экспертно, исходя из знаний о переходном процессе системы с классическим регулятором. В блоке фазификации для базового терм-множества лингвистической переменной использованы три аппроксимированные функции принадлежности трапецевидной формы (см. рис. 4).

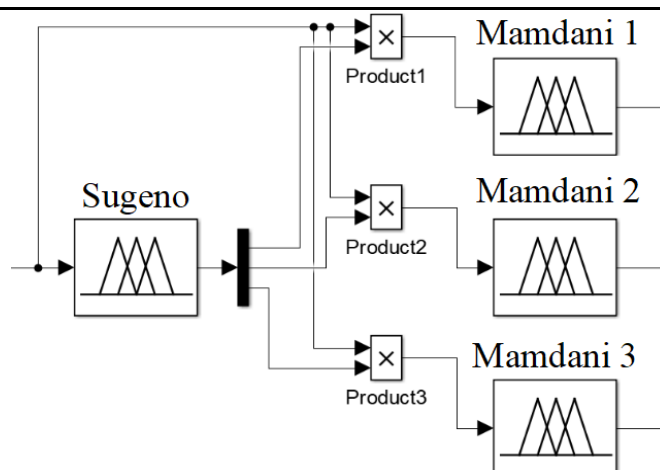


Рис. 2. Модель интеллектуального переключающего устройства с алгоритмом вывода Сугено-Мамдани

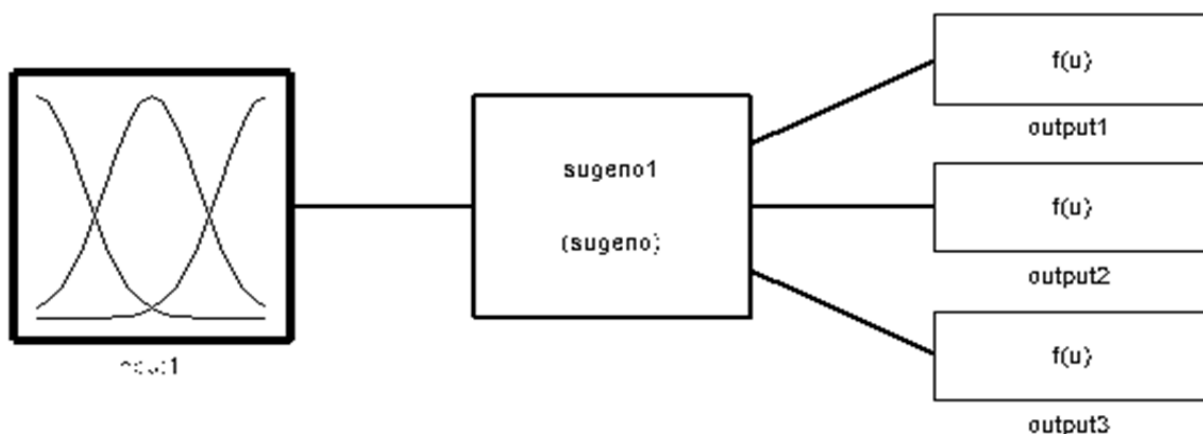


Рис. 3. Функциональная схема нечёткого логического регулятора

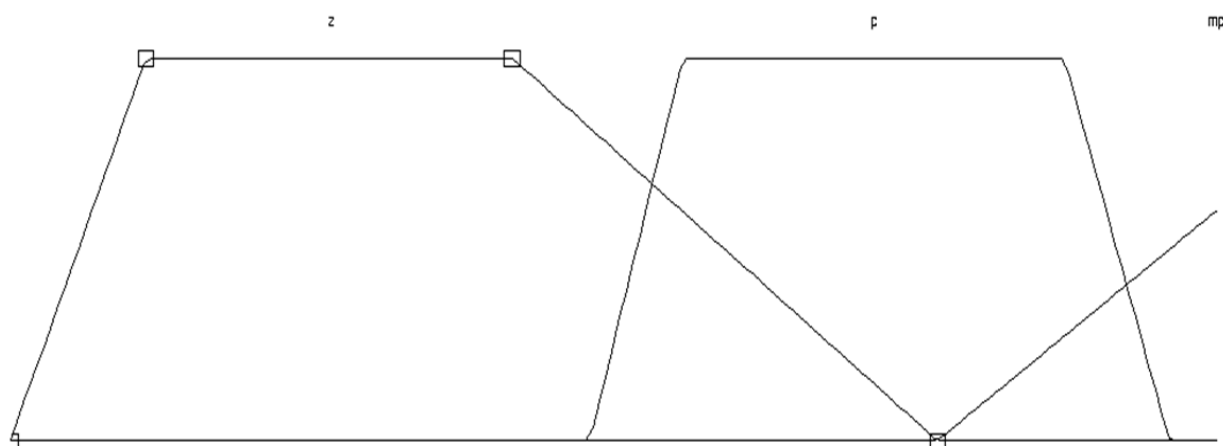


Рис. 4. Функции принадлежности при формализации понятия «ошибка по положению»

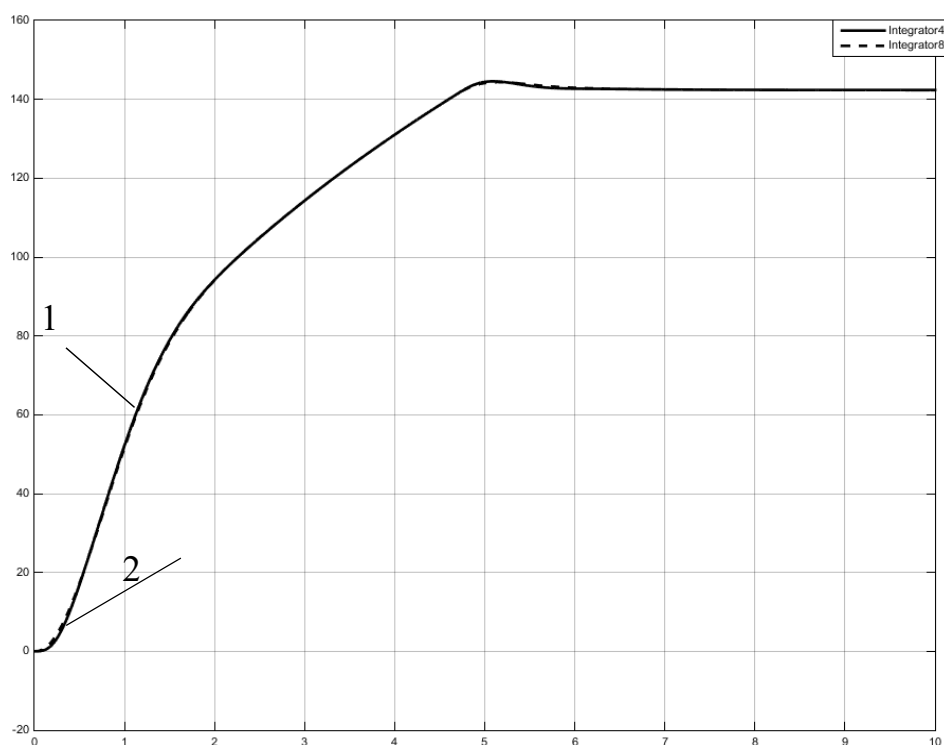


Фрагмент продукционной базы правил, реализующий нечёткий вывод Сугено, представлен следующими тремя правилами:

1. Если «input1» есть Z, то «output1» = 0, «output2» = 1, «output3» = 0;
2. Если «input1» есть P, то «output1» = 1, «output2» = 0, «output3» = 0;
3. Если «input1» есть MP, то «output1» = 0, «output2» = 0, «output3» = 1.

Настройка вложенного каскада интеллектуального модуля, включающего в себя три простейших регулятора с алгоритмом вывода Мамдани, выполняется аналогичным образом. Основной проблемой при реализации модели является настройка блока дефаззификации.

График переходных процессов (см. рис. 5) иллюстрирует качество реализации законов управления по основным показателям. Полученная система обладает не худшими показателями, чем классическая система управления электроприводом переменного тока. Кроме того, в статическом режиме обе системы имеют одинаковый заданный уровень. Применение методов мягких вычислений позволило получить качественный переходный процесс без использования вычислительных процедур, требующих существенных затрат вычислительных ресурсов [5].



1 – выходной сигнал классической СУ; 2 – выходной сигнал СУ с МНЛР

Рис. 5. График выходных характеристик системы автоматического регулирования электроприводом переменного тока

**Модель многокаскадного нечёткого логического регулятора с сочетанием алгоритмов Сугено-Сугено.** При моделировании интеллектуальной системы с применением многокаскадного нечёткого регулятора с алгоритмом вывода Сугено-Сугено внешний каскад такой структуры выполняет функцию интеллектуального переключающего устройства, которое управляет регуляторами внутреннего каскада, основываясь на имеющихся входных данных. В современных системах автоматического регулирования применение подобных структур обусловлено формированием управляющего сигнала, результатом которого возможно получить качественные характеристики переходных процессов.

На рис. 6 приведена модель интеллектуального переключающего устройства с алгоритмом вывода Сугено-Сугено.

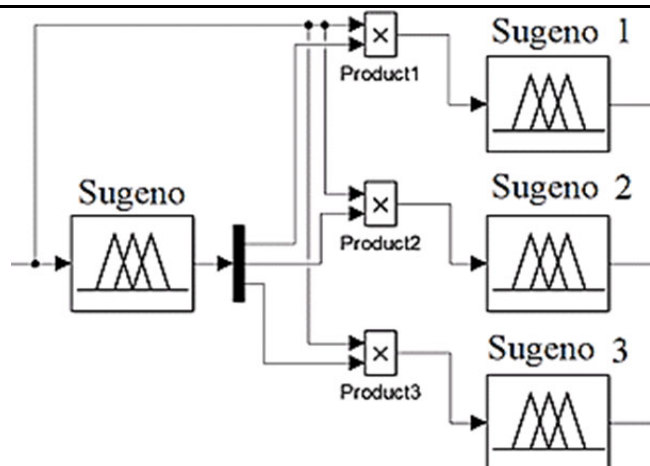
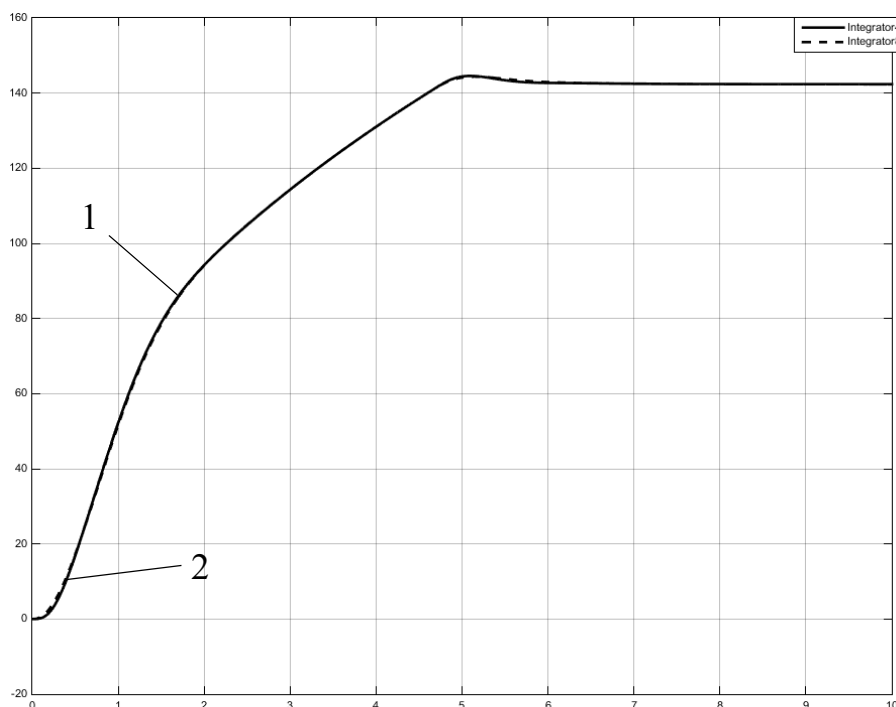


Рис. 6. Модель интеллектуального переключающего устройства с алгоритмом вывода Сугено-Сугено

Настройка интеллектуального переключающего устройства с алгоритмом вывода Сугено-Сугено выполнялась подобным образом, как и настройка многокаскадного нечёткого регулятора Сугено-Мамдани. Поскольку в интеллектуальных системах типа Мамдани значения выходной переменной задаются нечёткими термами, то отличия между сочетаниями алгоритмов нечёткого логического вывода Сугено-Мамдани и Сугено-Сугено связаны с реализацией блока дефаззификации и обусловлены особенностями алгоритма вывода.

Результаты моделирования, приведённые на рис. 7, наглядно показывают правомерность внедрения технологии применения многокаскадных нечётких регуляторов в системах управления электроприводами переменного тока. Такая методика позволяет реализовывать законы управления любой сложности и получать качественные переходные процессы.

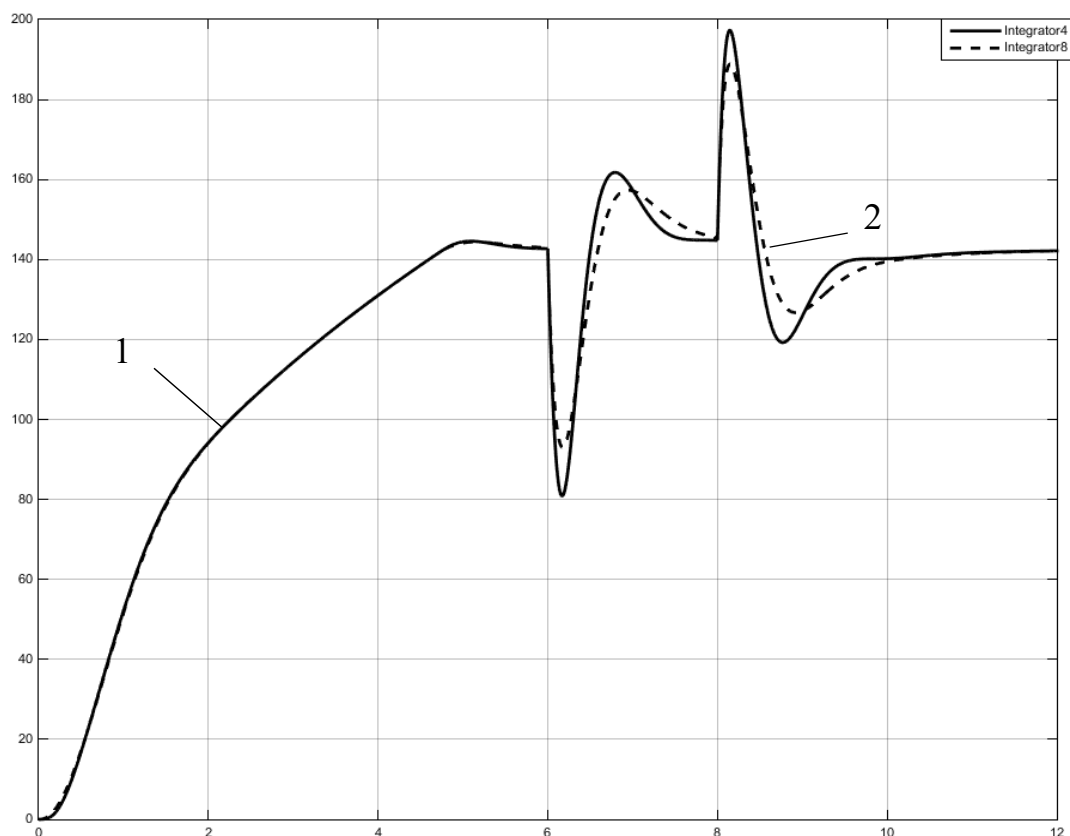


1 – выходной сигнал классической СУ; 2 – выходной сигнал СУ с МНЛР

Рис. 7. График выходных характеристик системы автоматического регулирования электроприводом переменного тока

Главным достоинством системы управления с применением теории мягких вычислений является её гибкость и робастность к целому ряду внешних и внутренних воздействий.

**Анализ эффективности применения интеллектуального многокаскадного переключателя.** Одним из способов проверки устойчивости и робастности настроенной системы является подача статического возмущающего воздействия на классическую систему и на систему с интеллектуальным переключателем. Корректно настроенная система должна обрабатывать такой сигнал и выходить на определённое установившееся значение. Результаты моделирования классической системы и системы с интеллектуальным переключающим устройством с сочетаниями выводов в каскаде Сугено-Мамдани и Сугено-Сугено приведены на рис. 8 и 9 [6; 7].

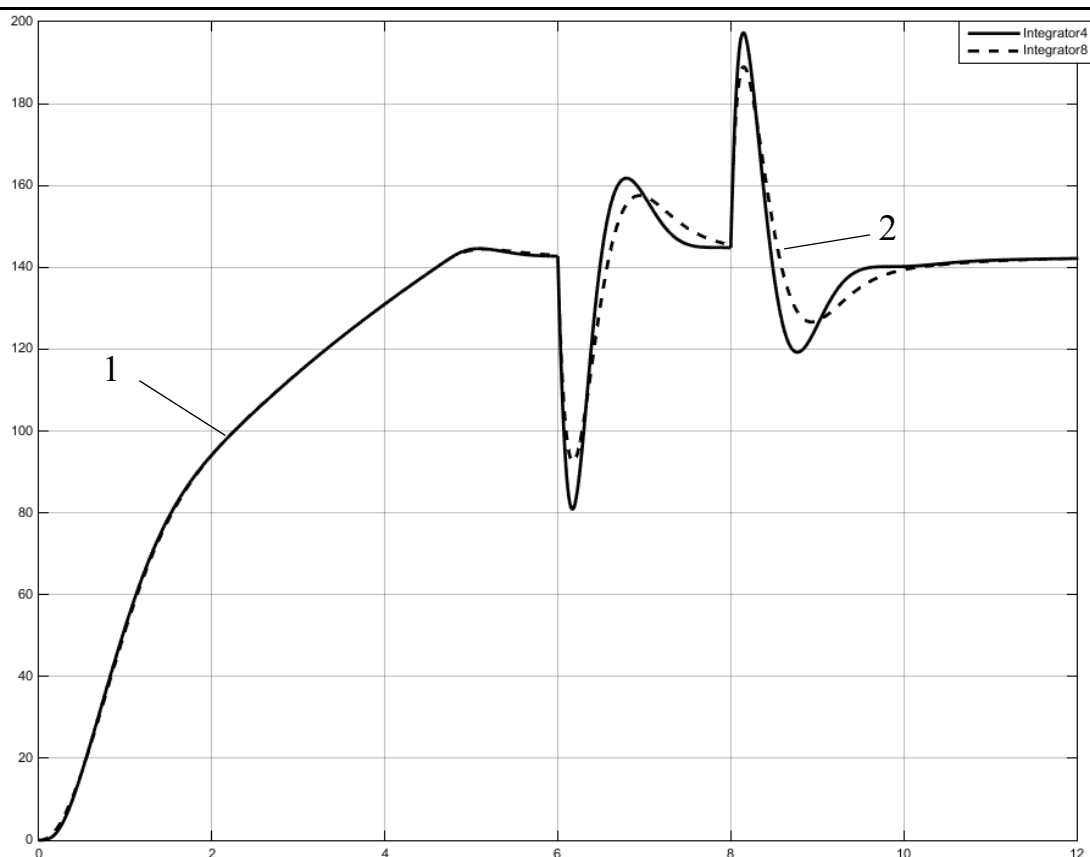


1 – выходной сигнал классической СУ; 2 – выходной сигнал СУ с МНЛР

Рис. 8. График выходных характеристик интеллектуальной системы автоматического регулирования электроприводом переменного тока с алгоритмом вывода Сугено-Мамдани

Анализ графика переходных процессов системы управления, имеющей во внутреннем каскаде нечёткий регулятор с алгоритмом вывода Мамдани, указывает на правомерность применения метода мягких вычислений при реализации модели нечёткой системы управления электроприводом переменного тока. Также необходимо отметить, что использование алгоритма Мамдани позволяет совершать более гибкую настройку системы. Универсальность и простота расширения такой многокаскадной интеллектуальной системы связана лишь с увеличением количества простейших нечётких регуляторов во внутреннем каскаде.

Подобным образом было подано возмущение на систему с сочетанием нечётких логических выводов интеллектуального переключателя Сугено-Сугено (см. рис. 9).



1 – выходной сигнал классической СУ; 2 – выходной сигнал СУ с МНЛР

Рис. 9. График выходных характеристик интеллектуальной системы автоматического регулирования электроприводом переменного тока с алгоритмом вывода Сугено-Сугено

В результате моделирования сложной системы управления с использованием многокаскадного нечёткого логического регулятора с алгоритмами вывода Сугено-Сугено было выявлено, что полученная система обладает не худшими показателями, чем классическая система управления электроприводом переменного тока (см. рис. 9). Применение методов мягкого вычисления позволило повысить функциональность системы и сохранить основные показатели по качеству переходного процесса. Несмотря на функциональную сложность такого объекта регулирования, как электропривод переменного тока, настройка интеллектуального многокаскадного регулятора выполняется проще и позволяет получать адаптированные переходные характеристики относительно алгоритма вывода Сугено, что доказывает существенный интеллектуальный потенциал регулятора Мамдани.

Технология внедрения многокаскадных нечётких регуляторов в системы управления электроприводами переменного тока позволяет реализовывать законы управления любой сложности и получать качественные переходные процессы. Первый каскад синтезированных устройств производит экспертную оценку регулятора, в то время как второй каскад непосредственно генерирует управляющее воздействие на объект управления. Особенности применения того или иного алгоритма во внутреннем каскаде чаще всего диктуются спецификой функционирования объекта управления, а также теми критериями, которые могут быть на него наложены. Оба каскада ориентированы в разных предметных областях, и, как результат, управляющий сигнал стал более чувствителен к изменению параметров системы. Анализ результатов моделирования указывает на правомерность применения метода мягких вычислений при реализации модели нечёткой системы управления электроприводами переменного тока с учётом всех особенностей, сложностей и набора допущений при реализации математического описания.



Представленная в работе методика моделирования многокаскадных систем управления позволяет повысить адаптивность, точность и гибкость при регулировании достаточно сложных технологических объектов. Развитие данной технологии позволит выполнять синтез и моделирование систем с достаточно широким набором элементов во внутреннем каскаде, которые реализуют набор различных управленческих структур для сложных объектов регулирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 800 с.
2. Смирнова, В. И. Основы проектирования и расчёта следящих систем / В. И. Смирнова, Ю. А. Петров, В. И. Разинцев. – М.: Машиностроение, 1983. – 295 с.
3. Стельмашук, С. В. Согласованное управление устройством транспортировки ленты с модальным регулятором / С. В. Стельмашук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-1 (38). – С. 28-40.
4. Леоненков, А. В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
5. Соловьев, В. А. Нечёткие алгоритмы управления статическим тиристорным компенсатором в системе электроснабжения с переменной нагрузкой / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 51-58.
6. Susdorf V. I. Optimization of Series Motor Drive Dynamics / S. P. Cherniy, A. V. Buzikayeva // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon).
7. Шекшня, В. Л. Следящие системы / В. Л. Шекшня, С. А. Хризолизова. – М.: МЭИ, 1966. – 140 с.



## МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

**Отряскина Т. А., Кравченко Е. Г.**  
**T. A. Otryaskina, E. G. Kravchenko**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИИ**

### **INVESTIGATION OF THERMODYNAMIC PROCESSES IN CHIP FORMATION**

**Отряскина Татьяна Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: knastu2000@mail.ru.

**Tatyana A. Otryaskina** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: knastu2000@mail.ru.

**Кравченко Елена Геннадьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

**Elena G. Kravchenko** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

**Аннотация.** С использованием в машиностроении труднообрабатываемых материалов требуются новые подходы к оптимизации процесса резания. В настоящее время основной задачей теории резания является установление связи между теплофизикой процесса резания и теорией упругой деформации, что позволит управлять процессом резания и снизит негативные явления стружкообразования.

**Summary.** New approaches are required to optimize the cutting process when using hard-to-process materials in mechanical engineering. Currently, one of the most important tasks of technological science is to establish a connection between the thermophysics of the cutting process and the theory of elastic deformation, which would allow controlling the cutting process and reduce the negative phenomena of chip formation.

**Ключевые слова:** резание, пластическая деформация, термодинамика, стружка.

**Key words:** cutting process, plastic deformation, thermodynamics, chips.

УДК 621.7.015

#### **Введение**

С использованием в практике труднообрабатываемых и жаропрочных сплавов, с внедрением новых способов обработки традиционные методы оптимизации процесса резания оказываются неэффективными, что связано с особенностью деформационных процессов при резании и структурными преобразованиями, деформационным упрочнением и структурной приспособляемостью всех элементов процесса.

С позиции современных веяний науки, такой как физическая мезомеханика, структурные преобразования при пластической деформации в процессе резания рассматриваются на основе присутствия множества разномасштабных уровней деформации, а также связи термодинамических процессов неравновесной системы при деформации.

Применение физической мезомеханики к процессу стружкообразования металлов позволяет глубже понять физику этого процесса, она раскрывает новые пути для прогнозирования и модернизации обработки резанием. Процесс стружкообразования является объектом исследования физической мезомеханики и одновременно актуальной моделью высокоскоростного деформационного процесса.

Достигнутые успехи в области изучения процесса резания требуют постоянного уточнения в связи с развитием знаний в ряде родственных областей науки. Для того чтобы количественно

описать структурные изменения деформируемого материала в процессе резания на различных уровнях (микро- и мезомасштабном), необходимо внедрение количественных показателей интерфейса структурного состояния стружки и поверхности после обработки. В данной работе представлен первоначальный подход к этой проблеме.

### Методика исследования

Исследования опирались на использование современных разделов теории резания металлов, материаловедения, теории упругих деформаций, основ физической мезомеханики, процессов механической и физико-технической обработки.

Экспериментальные исследования проводились с использованием металлографического микроскопа Микро-200. Полученные в процессе исследования изображения микроструктур обрабатывались с помощью программ Image.Pro.Plus.5.1, DynAnalyzer.

Поверхностные деформационные процессы на стружке рассматривались с помощью микроскопа БМ 200М при 30-кратном увеличении. Была исследована поверхность стружки после контакта с рабочей поверхностью режущего клина. По цветам побежалости с внутренней стороны стружки определялась контактная температура в зоне обработки конструкционного материала. Цвета побежалости, относящиеся к определённому значению температуры резания, указаны в табл. 1.

Таблица 1

Цвета побежалости, образующиеся при воздействии различных значений температур

Цвет	Наименование	Температура, °С
	Светло-соломенный	200
	Светло-жёлтый	225
	Соломенно-жёлтый	240
	Коричнево-жёлтый	255
	Красно-коричневый	265
	Пурпурно-красный	275
	Фиолетовый	285
	Ярко-синий	295
	Светло-синий	310
	Серый	325
	Тёмно-коричневый	530...580
	Коричнево-красный	580...650
	Тёмно-красный	650...730
	Темно-вишнёво-красный	730...800
	Светло-красный	830...900
	Оранжевый	900...1000

### Термодинамические процессы при резании металлов

При обработке в процессе стружкообразования возникает зона образования тепловой энергии, что приводит к повышению температуры  $Q$ . Зона образования тепла включает в себя три основных источника, представленных на рис. 1 [5].

Первой зоной выделения тепла является сдвиг металла, как следствие высокая активность пластической деформации мощностью  $q_{пл}$ .

Второй зоной выделения тепла является трение между режущим клином и обрабатываемой поверхностью мощностью  $q_{тз}$ .

Третьей зоной выделения тепла является трение между режущим клином и сходящей стружкой на участке 0-1 мощностью  $q_{тп}$ .

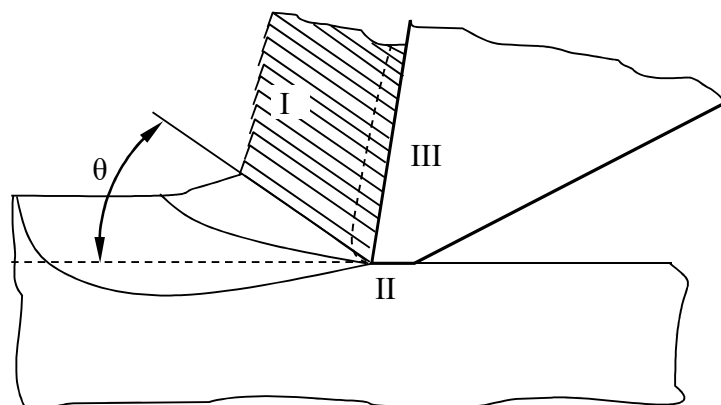


Рис. 1. Источники возникновения тепловой энергии

В совокупности вся тепловая энергия, образованная в зоне резания, распределяется по носителям, указанным на рис. 2 соответствующими стрелками, вследствие чего начинают нагреваться стружка, деталь и инструмент, производящие значительное воздействие на весь процесс резания. Базируясь на законе сохранения тепловой энергии, запишем уравнения теплового баланса:

$$q_{пд} + q_{тп} + q_{тз} = Q_{стр} + Q_{заг} + Q_{инс} + Q_{ок.ср}, \quad (1)$$

где представлены количественные значения тепловой энергии, поступающей от описанных источников тепла, указанных в левой части уравнения, и источников, распределяющих весь объём тепловой энергии (стружка  $Q_{стр}$ , заготовка  $Q_{заг}$ , инструмент  $Q_{инс}$ , окружающая среда  $Q_{ок.ср}$ ).

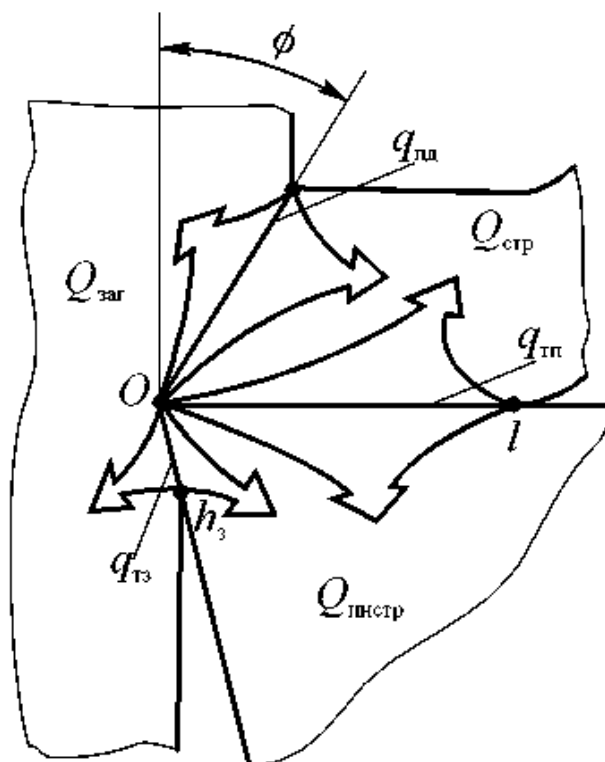


Рис. 2. Зоны образования и направления распределения тепла при резании

Значения данных величин напрямую связаны с условиями обработки, физико-механическими свойствами марки металла детали и инструмента, с параметрами геометрической заточки инструмента. При резании низколегированных металлов наблюдается, что максимальное количество тепловой энергии переходит в стружку, а в случае шлифования максимальное количество теплоты уходит в заготовку. При обработке высоколегированных сталей с низкой теплопроводностью максимальная тепловая энергия фиксируется в зоне резания или уходит в инструмент, что негативно сказывается на стойкости инструмента. Для повышения стойкости инструмента необходимо изменять параметры резания, например уменьшать подачу или частоту вращения заготовки.

Формирование взаимосвязи между термодинамикой и деформационными процессами при обработке металлов резанием является одной из важнейших задач теории резания, решение которой позволит оптимизировать режимы резания.

Процесс обработки металлов является процессом разрушения металла, сопровождающимся высокоскоростной пластической деформацией. Следовательно, обрабатываемый материал проделывает путь в несколько этапов от упругой деформации до отделения стружки от материала, что отображается в различных схемах деформационного нагружения. В первоначальный момент процесса резания начинают развиваться деформационные процессы, а также зарождаются источники тепловой энергии. В момент отрыва стружки от материала тепловые источники демонстрируют наивысшую активность, которая в дальнейшем развивается и оказывает воздействие на тенденцию изменения структуры при формировании стружки. При максимальной температуре резания в стружке возникают различные термические процессы (отжиг, диффузия дефектов, кристаллизация и т.д.). Такие процессы оказывают сильное воздействие на формирование структурных элементов и границы фрагментирования. Границы фрагментированных элементов обладают интерфейсными свойствами, по которым можно опередить процессы, происходящие при формировании стружки. Хотя при остывании интерфейсные свойства отчасти утрачиваются, они по-прежнему содержат полезную информацию.

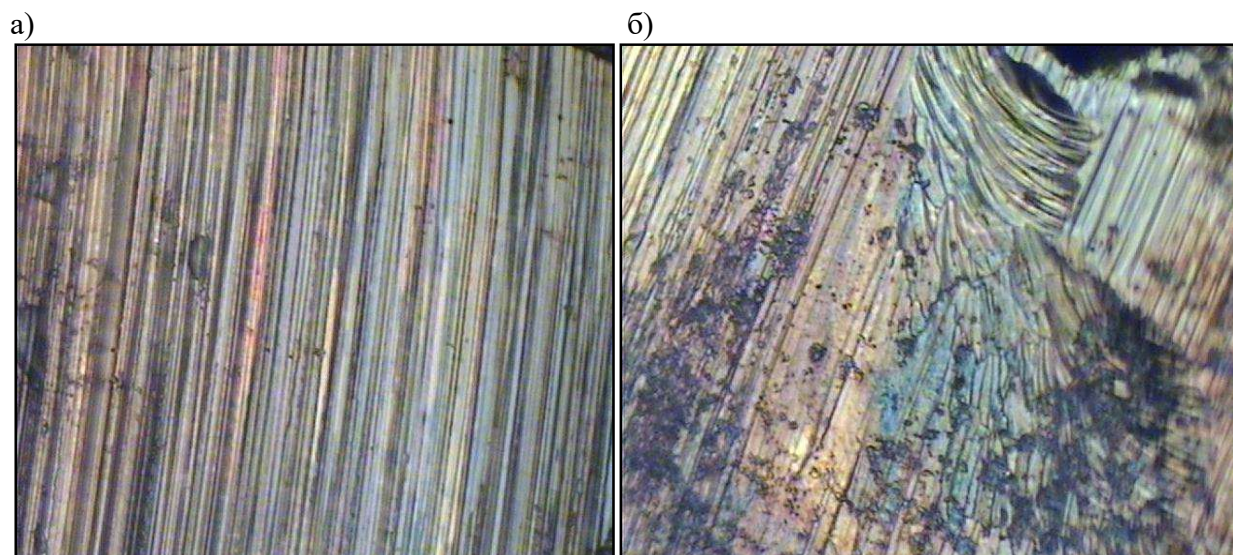


Рис. 3. Контактная поверхность сливной стружки со следами побежалости (x500)  
а – стружка со следами копирования микрошероховатости режущего лезвия,  
б – стружка со следами структурной фрагментации стружки

Из исследования контактной поверхности стружки можно заключить, что процесс фрагментации элементов стружки носит более глобальный характер и захватывает всю толщину стружки независимо от направления сдвига (рис. 3). Параллельные неровности, находящиеся на

всей ширине стружки, это не дублирование микронеровностей режущей поверхности, а результат структурной фрагментации стружки, что наглядно видно на рис. 3, б. Нарушение параллельности неровностей является высокой активностью термопластических процессов, что подтверждается и цветами побежалости.

### **Заключение**

Взаимодействие снимаемого материала и поверхности режущего клина, выраженное в механических и энергетических процессах, во многом зависит от деформации при стружкообразовании и термопластических процессов. Это вызывает особый интерес к связи между мезомеханикой и термодинамикой процесса стружкообразования. Внешнее воздействие на все диссипативные каналы при формировании стружки за счёт сторонних сил допускает снижение напряжённого состояния контактного взаимодействия внутренней поверхности стружки и режущей поверхности инструмента, что позволяет найти новые пути к увеличению производительности обработки и её качеству. Снижение эффективности работы диссипативных каналов, процесс формирования стружки проходят более медленно, при этом источники распространения процесса разрушения будут иметь более плавный характер формирования несплошностей. С увеличением эффективности работы диссипативных каналов процесс разрушения металлов будет иметь более хрупкий характер, что сказывается на типе стружки.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Васин, С. А. Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учеб. для вузов / С. А. Васин, А. С. Верецака, В. С. Кушнер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 448 с.
2. Власов, В. Т. Физическая теория процесса «Деформация – разрушение». Ч. 1. Физические критерии предельных состояний материала / В. Т. Власов, А. А. Дубов. – М.: ЗАО «Тиссо», 2007. – 517 с.
3. Ким, В. А. Влияние пластической деформации при резании металлов на микроструктуру поверхностного слоя / В. А. Ким, Т. А. Отряскина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № II-1(2). – С. 88-92.
4. Неймарк, А. В. Термодинамический метод расчёта поверхностной фрактальной размерности / А. В. Неймарк // Письма в ЖЭТФ. – 1990. – Т. 51, вып. 10. – С. 535-538.
5. Резников, А. Н. Теплофизика процессов в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 288 с.
6. Ким, В. А. Структурно-количественные соотношения процесса стружкообразования / В. А. Ким, Т. А. Отряскина // Технология машиностроения. – 2014. – № 11. – С. 16-20.
7. Кравченко, Е. Г. Механизм завивания стружки на основе синергетического подхода / Е. Г. Кравченко // Металлообработка. – 2014. – № 5 (83). – С. 41-45.





Саблин П. А., Щетинин В. С.  
P. A. Sablin, V. S. Shchetinin

## ВЫСОТА МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ И ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ – КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

## MICRO-ROUGHNESS HEIGHT AND ROUGHNESS PARAMETERS – A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF TREATED SURFACE QUALITY

**Саблин Павел Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. +7(4217)241-171. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

**Pavel A. Sablin** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013; tel. +7(4217)241-171. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

**Щетинин Владимир Сергеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. +7(4217)241-171. E-mail: schetynin@mail.ru.

**Vladimir S. Shchetinin** – Doctor of Engineering, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013; tel. +7(4217)241-171. E-mail: schetynin@mail.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы влияния пространственных колебаний режущего инструмента на шероховатость обработанной поверхности. Рассмотрены параметры процесса резания, влияющие на интенсивность и частоту колебаний вершины режущего инструмента. Из статьи следуют выводы, что шероховатость поверхности зависит от относительных колебательных процессов обрабатываемой детали и режущей кромки инструмента в рабочем пространстве, во многом вызванных процессом стружкообразования.

**Summary.** The article deals with the influence of spatial vibrations of the cutting tool on the roughness of the treated surface. The parameters of the cutting process that affect the intensity and frequency of vibrations of the cutting tool tip are considered. The article concludes that the surface roughness depends on relative vibrational processes of the workpiece and the cutting edge of the tool in the working space, largely caused by the chip formation process.

**Ключевые слова:** параметры шероховатости; качество поверхности; динамика процесса резания.

**Key words:** roughness parameters; surface quality; dynamics of the cutting process.

УДК 621.91

Современное развитие техники и технологий предъявляет повышенные требования к качеству изготовления деталей для различных узлов и агрегатов. Так, например, при изготовлении ряда деталей летательных аппаратов [1; 10] возникает необходимость снятия очень большого объема материала (до 90 %), при этом очень остро стоит вопрос применения высокопроизводительной обработки с получением заданных конструкторами точности и качества обработки.

Если точность обработки в большей степени зависит от точности технологической системы [2], то на качество обработки резанием влияет целый комплекс параметров. Такими параметрами можно считать режимы резания, износ режущей кромки инструмента, неоднородность обрабатываемого материала и многие другие. Все эти параметры влияют на качество обработанной поверхности через изменение сил резания, динамическую устойчивость технологической системы, распределение тепла в зоне резания и т.д. [3].

Данной проблеме в последнее время уделяется достаточно пристальное внимание со стороны исследователей, о чём свидетельствуют работы учёных [4; 5]. В работе [6] рассматриваются вопросы динамических колебаний инструмента и заготовки в определённой плоскости. В работе [7] изучен вопрос о влиянии различных технологических режимов и способов фрезерования на качество обработки по различным параметрам шероховатости ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ ,  $R_p$ ,  $R_c$ ,  $R_t$ ,  $R_v$ ,  $R_{sm}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{sk}$ ) для пространственных поверхностей.

Оценка параметров шероховатости в соответствии с ГОСТ Р ИСО 4287-2014 осуществляется в определённой плоскости поверхности  $ZOX$  (см. рис. 1) [8]. В плоскости  $ZOY$  профиль поверхности имеет совершенно другую характеристику, чем в плоскости  $ZOX$ . В этой связи для оценки качества поверхности в плоскостях  $ZOX$  и  $ZOY$  необходимо применять различные параметры шероховатости. Так, например, при продольном точении параметры шероховатости, измеренные в радиальном направлении, в большей степени зависят от динамических характеристик технологической системы, в то время как параметры шероховатости, измеренные в осевом направлении, больше зависят от скорости подачи, степени заострения вершины режущего инструмента и в меньшей степени зависят от динамических характеристик.

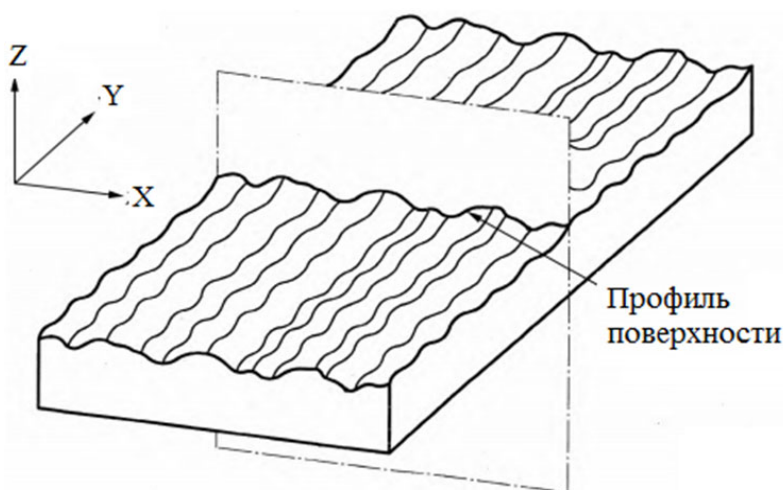


Рис. 1. Профиль поверхности по ГОСТ Р ИСО 4287-2014

В настоящее время авторами рассмотрено только влияние режимов резания на качество поверхности обработки, а также динамических процессов в одной из плоскостей  $ZOX$  или  $ZOY$ .

Однако следует отметить, что режущая кромка относительно обрабатываемой поверхности совершает динамические колебательные перемещения в пространстве.

На примере обработки цилиндрического точения (см. рис. 2) видно, что колебания в плоскости  $YOX$  приводят к перемещению вершины инструмента относительно заготовки на величину  $CC_1$  и в плоскости  $ZOX$  на величину  $BB_1$  соответственно (здесь, вопреки всем известным устоям и для простоты понимания рис. 1 и 2, мы интегрировали систему координат из ГОСТ Р ИСО 4287-2014 в схему точения). Тогда общее отклонение от теоретической точки (линии) резания составит

$$\Delta = \sqrt{BB_1^2 + CC_1^2},$$

где  $\Delta$  – суммарное (пространственное) отклонение вершины режущего инструмента;  $BB_1$  и  $CC_1$  – отклонение вершины режущего инструмента в плоскостях  $YOX$  и  $ZOX$  соответственно.

Чем больше амплитуда пространственных колебаний, тем больше высота неровностей обрабатываемой поверхности (шероховатости). Также на параметр шероховатости влияет частота колебаний вершины режущего инструмента. Если учесть тот фактор, что жёсткость технологиче-

ской системы в разных плоскостях различна, то и параметры шероховатости будут в этих плоскостях различны.

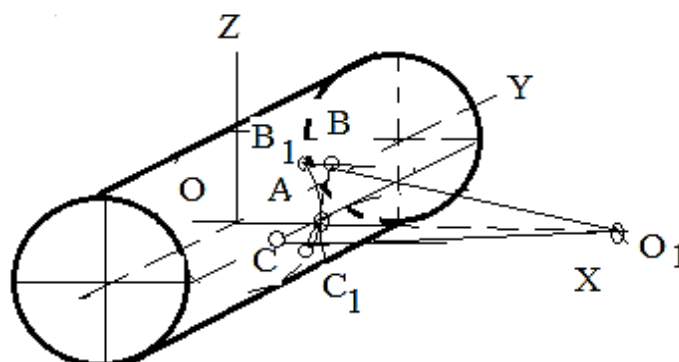


Рис. 2. Отклонение вершины режущего инструмента от теоретической точки контакта с заготовкой в плоскостях  $ZOX$  или  $ZOY$

Для получения требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности наряду с установлением параметров обработки необходимо выполнить оценку динамики пространственных колебаний инструмента относительно заготовки.

В работе [9] выполнены исследования перемещения вершины инструмента относительно детали в зависимости от частоты стружкообразования (см. рис. 3, а). На графиках видно, что перемещение вершины инструмента в данном случае уже не представляет собой правильный эллипс перемещений. Предельный цикл рассогласовывается, происходит удвоение его периода. При увеличении частоты стружкообразования до 88,5 Гц (см. рис. 3, б) разрушение предельного цикла продолжается – происходит утроение периода. Такие колебания приводят к тому, что получаемая шероховатость обработанной поверхности в разных плоскостях получается неодинаковая. Чем больше амплитуда пространственных колебаний, тем выше высота выступов шероховатости.

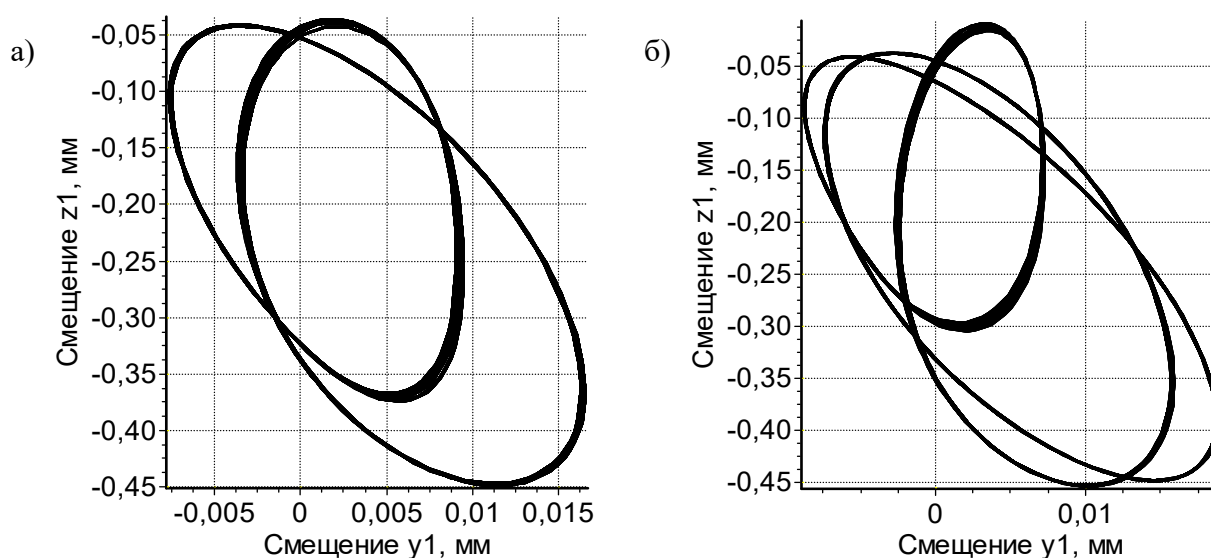


Рис. 3. Перемещение вершины инструмента относительно детали в виде предельного цикла динамической системы резания:

а – резание с образованием элементной стружки и частотой отделения элементов 58,5 Гц (удвоение периода предельного цикла); б – 88,5 Гц (утроение периода)

Как отмечено выше, величина параметров шероховатости связана с частотой стружкообразования, которая в свою очередь зависит от колебаний инструмента относительно заготовки. В работе [8] представлены исследования взаимосвязи скорости резания с силой резания и шероховатостью поверхности.

Из графиков видно, что при обработке стали (см. рис. 4) с увеличением скорости резания уменьшается амплитуда колебаний вершины в рабочем пространстве за счёт уменьшения силы резания и, как следствие, высоты микронеровностей (шероховатости) обработанной поверхности.

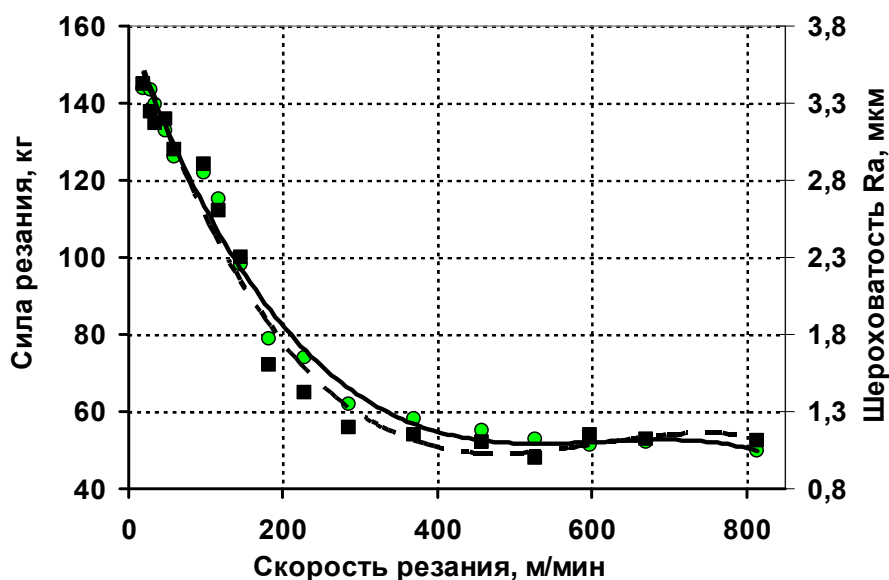


Рис. 4. Зависимость силы резания (сплошная линия) и шероховатости обработанной поверхности (пунктирная линия) от скорости резания при фрезеровании закалённой стали 40X

Из вышесказанного можно сделать заключение, что шероховатость поверхности зависит от относительных колебательных процессов обрабатываемой детали и режущей кромки инструмента в рабочем пространстве, во многом вызванных процессом стружкообразования.

В настоящее время в КнАГУ проводятся научные исследования, направленные на изучение влияния колебаний инструмента относительно заготовки на качество обработанной поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Муравьев, В. И. Особенности образования специфических дефектов при сборке крупногабаритных титановых конструкций летательных аппаратов / В. И. Муравьев, В. В. Григорьев, П. В. Бахматов // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – Т. 26. – № 4. – С. 17-27.
2. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 368 с.
3. Биленко, С. В. Использование цветовой пирометрии при изменении температуры стружки при высокоскоростной обработке / С. В. Биленко, П. А. Саблин, Н. К. Леонтьевская // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 8. – С. 37-43.
4. Заковоротный, В. Л. Влияние флуктуаций на устойчивость формообразующих траекторий при точении / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Серия: Технические науки. – 2017. – № 2 (194). – С. 52-61.
5. Кабалдин, Ю. Г. Самоорганизующиеся процессы в технологических системах обработки резанием. Диагностика, управление: моногр. / Ю. Г. Кабалдин, А. М. Шпилев. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 296 с.
6. Кабалдин, Ю. Г. Математическое моделирование динамической устойчивости процесса резания в виде нелинейного осциллятора с разрывными характеристиками / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, П. А. Саблин // Вестник машиностроения. – 2006. – № 10. – С. 35-43.



7. Гимадеев, М. Р. Повышение качества механообработки сложнопольных деталей на пятикоординатных обрабатывающих центрах: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Гимадеев Михаил Радикович; Тихоокеанский государственный университет. – Хабаровск, 2018. – 142 с.
8. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности = Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2014 г. № 2078-ст: переиздание: 2016-01-01 / подгот. Обществом с ограниченной ответственностью «ЦИТОпроект» (ООО «ЦИТО-проект») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта ISO 4287 «Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters», IDT.
9. Саблин, П. А. Повышение эффективности высокоскоростной механической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Саблин Павел Алексеевич; Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. – Комсомольск-на-Амуре, 2008. – 141 с.
10. Исследование деформационно-технологических характеристик стали 12X18H10T / О. В. Башков, В. А. Ким, С. З. Лончаков, Р. А. Физулаков, И. В. Белова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1(37). – С. 77-83.



**Ермаков М. А., Дорофеев С. Н., Войнов А. Р., Дзюба Г. С., Щекин А. В.**  
**M. A. Ermakov, S. V. Dorofeyev, A. R. Voynov, G. S. Dzyuba, A. V. Shchekin**

## **ВЛИЯНИЕ ИТТРИЯ НА СТРУКТУРУ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ФАЗ ХРОМИСТОГО БЕЛОГО ЧУГУНА**

## **YTTRIUM INFLUENCE ON THE STRUCTURE AND ELEMENT PHASE COMPOSITION OF CHROMIUM WHITE CAST IRON**

**Ермаков Михаил Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: ermakovma@yandex.ru.

**Mikhail A. Ermakov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: ermakovma@yandex.ru.

**Дорофеев Станислав Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

**Stanislav V. Dorofeyev** – PhD in Engineering, Associate Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

**Войнов Александр Робертович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

**Aleksandr R. Voynov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

**Дзюба Геннадий Саввич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

**Gennadiy S. Dzyuba** – PhD in Engineering, Associate Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

**Щекин Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

**Andrey V. Shchekin** – PhD in Engineering, Associate Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

**Аннотация.** Работа посвящена изучению влияния добавок иттрия в количестве 0...0,3 масс.% на размеры карбидов (средняя площадь карбидных включений и средняя площадь, занимаемая карбидами в структуре) и распределение элементов в различных фазах хромистого белого чугуна. Установлено, что малые добавки иттрия способствуют измельчению зерна карбидной фазы и перераспределению концентрации С и Cr в карбидной фазе и металлической основе, что способствует формированию тригонального карбида хрома  $(Fe,Cr)_7C_3$  в структуре хромистого белого чугуна.

**Summary.** The work is devoted to the study of the effect of yttrium additives in the amount of 0...0,3 wt.% on the size of carbides (the average area of carbide inclusions and the average area occupied by carbides in the structure) and the distribution of elements in various phases of white chrome cast iron. It was found that small yttrium additives contribute to the grinding of the grain of the carbide phase and the redistribution of C and Cr concentrations in the carbide phase and the metal base, which contributes to the formation of trigonal chromium carbide  $(Fe,Cr)_7C_3$  in the structure of chromium white cast iron.

**Ключевые слова:** иттрий, структура, хромистый белый чугун, средняя площадь, распределение элементов.

**Key words:** yttrium, structure, chromium white cast iron, average area, distribution of elements.

УДК 669.14.018.256

**Введение.** Белые хромистые чугуны получили большое распространение в различных отраслях промышленности. Они сочетают в себе оптимальный показатель «цена/качество» благодаря комплексу специальных свойств, к которым относят износостойкость, высокую твёрдость, жаростойкость и коррозионную стойкость [1; 2; 3]. Наряду с термообработкой одним из способов повышения свойств является интенсификация процесса образования в структуре литого хромистого белого чугуна тригонального карбида хрома  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ , имеющего микротвёрдость 1100...1800 HV и обеспечивающего высокие показатели твёрдости и износостойкости [4; 5]. Но для его образования в литом состоянии требуется выдерживать следующее соотношение [6]:

$$\% \text{Cr} \geq [4,0 - 0,6(\% \text{Si} + \% \text{V})](\% \text{C}) - 3,0$$

Процессам формирования  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  в хромистых белых чугунах посвящены работы следующих авторов [7; 8], в том числе за счёт снижения критического содержания хрома для образования  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  в структуре хромистого белого чугуна при помощи модифицирования малыми добавками РЗМ, такими как Nb [9; 10], Ce [11], La [12; 13]. Данная работа направлена на изучение влияния малых добавок иттрия на структуру хромистого белого чугуна.

**Материалы и исходные данные эксперимента.** Исходный чугун имел следующий состав, масс. %: 2,70 C; 1,16 Si; 0,33 Mn; 0,05 S; 0,23 P. Плавка производилась в тигле объёмом 54 см<sup>3</sup> (300 г чугуна) в печи с графитовым нагревателем в среде аргона. Нагревали до температуры 1550 °C и после выдержки в течение 5 мин вводили в расплав 8 масс. % хрома в виде феррохрома ФХ025 (состав, масс. %: 68,37 Cr; 0,860 Si; 0,151 C; 0,024 P; 0,020 S; остальное Fe). После тщательного перемешивания расплава последний охлаждали с постоянной скоростью 20 °C/мин до температуры 1450 °C и производили модифицирование металлическим иттрием марки «ITM-1» (состав 99,99 % масс. % Y) в количестве 0; 0,1; 0,2; 0,3 масс. %. Затем расплав охлаждали до температуры 500 °C с постоянной скоростью 20 °C/мин. При добавке хрома 8 масс. % и данном составе чугуна не происходит образования тригонального карбида хрома  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ .

Оптические изображения микроструктуры были получены на микроскопе Planar Micro 200. Электронные изображения микроструктуры, а также элементный состав [14] были получены на сканирующем электронном микроскопе Hitachi SU-70 с приставкой для энергодисперсионного микрорентгеноспектрального элементного анализа Thermo Fisher Scientific UltraDry EDS при ускоряющем напряжении 20 kV.

Объёмная доля и средний размер зёрен определялись в программном комплексе Media Cybernetics Image-Pro Plus v6.0 по оптическим изображениям структуры в разных участках слитка общей площадью 9,78 мм<sup>2</sup>.

**Результаты и обсуждение.** На рис. 1 и 2 видно, что по мере увеличения добавки иттрия происходит изменение структуры: при добавке 0,2 мас. % наряду с ледебуритом начинает образовываться тригональный карбид хрома  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  (тёмная область в центре карбидной фазы на рис. 2), при добавке 0,3 мас. % происходит измельчение карбидной фазы и увеличение доли тригонального карбида в карбидной фазе.

Из графиков на рис. 3 видно, что по мере увеличения добавки иттрия происходит уменьшение средней площади отдельных карбидных включений (со 109 до 37 мкм<sup>2</sup>) и объёмной доли карбидов в структуре слитка (с 25 до 14 %). Это может свидетельствовать о том, что иттрий измельчает карбидные зёрна и способствует перераспределению углерода и хрома в меньшем по количеству карбиде, но с образованием тригонального карбида хрома.

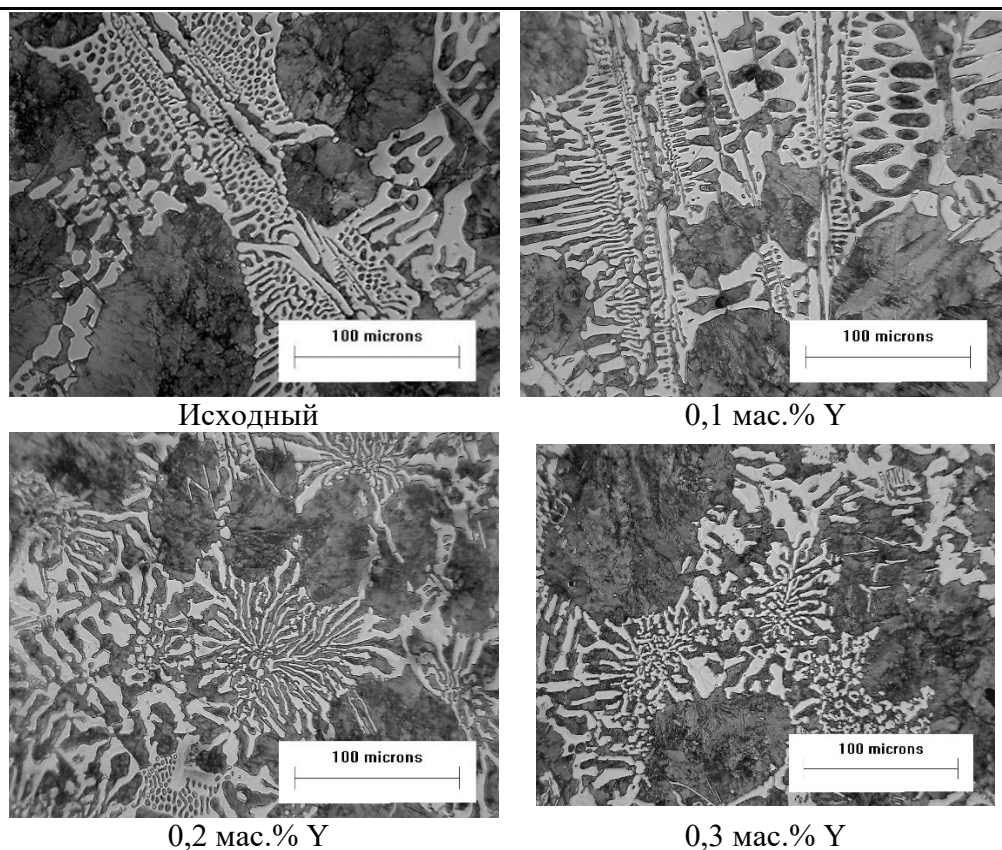


Рис. 1. Оптические изображения хромистого белого чугуна с различными добавками иттрия

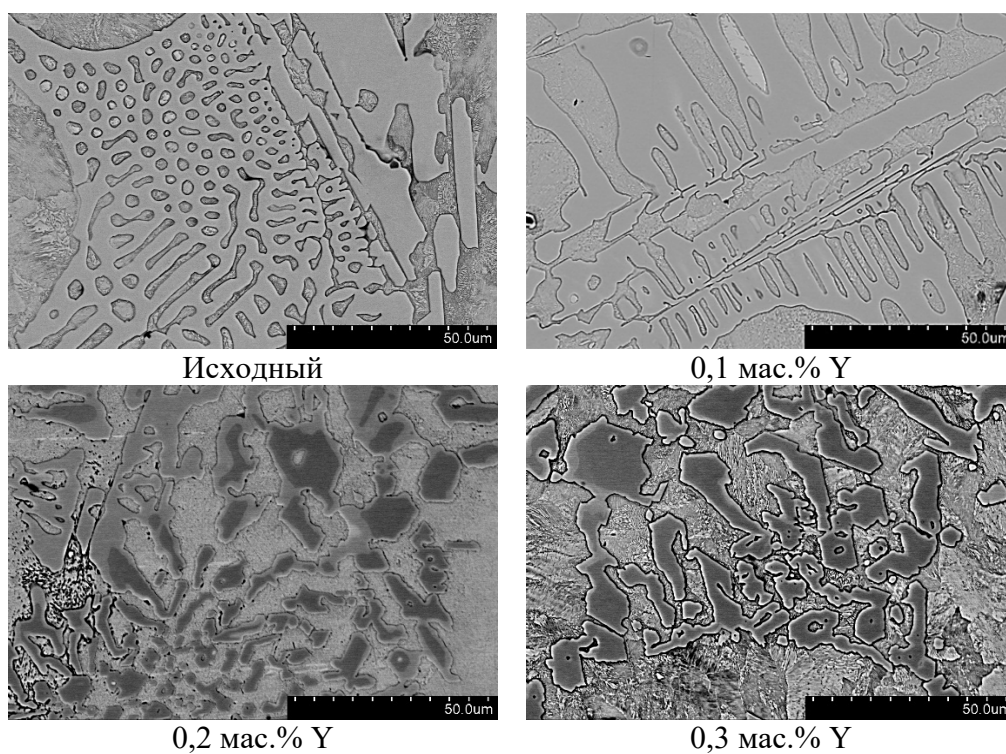


Рис. 2. Изображения хромистого белого чугуна с различными добавками иттрия, полученные в отражённых электронах



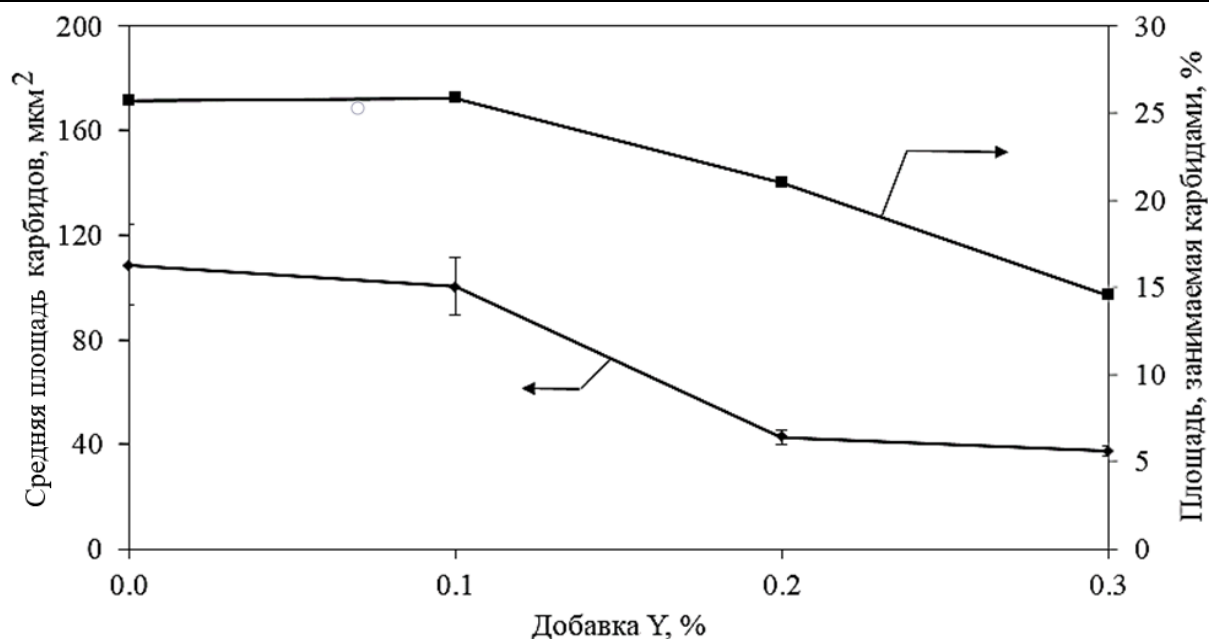


Рис. 3. Зависимость средней площади отдельных карбидов и занимаемая карбидами площадь от добавки иттрия

Из графиков на рис. 4 видно, что при увеличении добавки иттрия с 0,2 масс.% происходит рост концентрации хрома и углерода в металлической основе (с 0,86 масс.% C и 3,41 масс.% Cr до 1,15 масс.% C и 4,25 масс.% Cr). Концентрации железа и кремния в металлической основе изменяются по обратной зависимости (с 2,15 масс.% Si и 93,23 масс.% Fe до 1,84 масс.% Si и 92,85 масс.% Fe). Это может быть связано с увеличением доли цементита в перлите металлической основы и в связи с перераспределением хрома и углерода при кристаллизации. Элементный состав цементита практически не изменяется и в среднем составляет 4,4 масс.% C; 13,5 масс.% Cr и 82,1 масс.% Fe. При увеличении добавки иттрия до 0,2 масс.% происходит образование тригонального карбида хрома, имеющего средний состав 8,1 масс.% C; 27,5 масс.% Cr; 66,4 масс.% Fe.

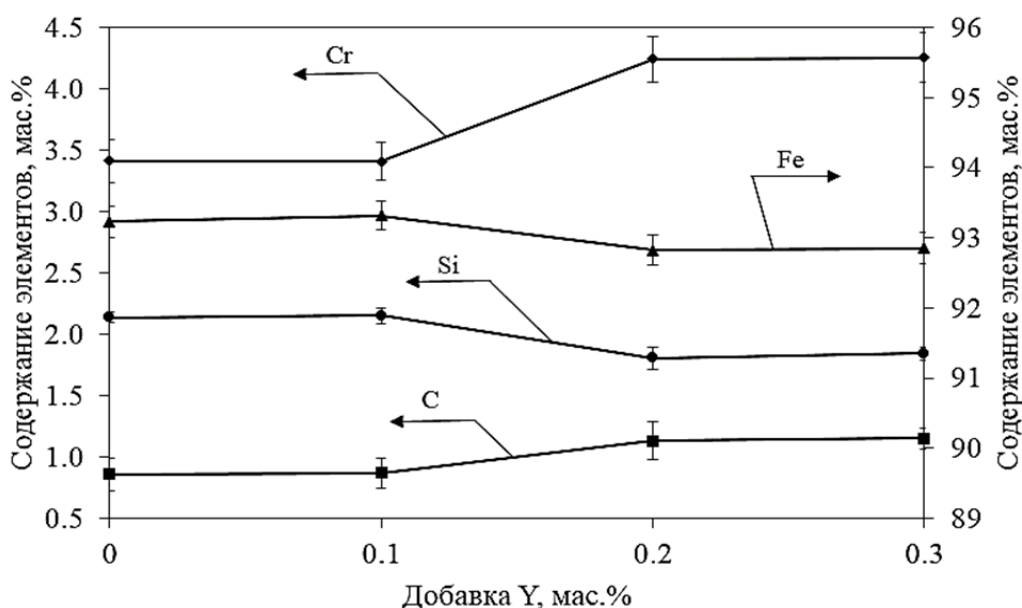


Рис. 4. Изменение элементного состава металлической основы (перлита) от добавки иттрия

**Выводы.** Иттрий в малых добавках (0,2...0,3 масс.%) приводит к уменьшению средней площади зерна карбидной фазы и образованию тригонального карбида хрома в структуре хромистого белого чугуна. Также малые добавки иттрия способствуют перераспределению концентрации С и Cr в карбидной фазе и металлической основе. За счёт уменьшения объёмной доли карбидной фазы цементитного типа происходит незначительное увеличение концентрации С и Cr в перлите металлической основы и увеличение С и Cr в карбидной фазе, что приводит к образованию  $(Cr,Fe)_7C_3$  в структуре хромистого белого чугуна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang T., Li D. Y. Modification of 27Cr cast iron with alloying yttrium for enhanced resistance to sliding wear in corrosive media // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2002. – № 7(33). – P. 1981-1989.
2. Ghasemi Banadkouki S. S., Mehranfar S. Wear Behavior of a Modified Low Alloy as Cast Hardening White Iron // ISIJ International. – 2012. – № 11(52). – P. 2096-2099.
3. Atabaki M. M., Jafari S., Abdollah-pour H. Abrasive Wear Behavior of High Chromium Cast Iron and Hadfield Steel—A Comparison // Journal of Iron and Steel Research International. – 2012. – № 4(19). – P. 43-50.
4. Ye, F., M. Hojamberdiev, Y. Xu, L. Zhong, H. Yan, and Z. Chen,  $(Fe,Cr)_7C_3/Fe$  surface gradient composite: Microstructure, microhardness, and wear resistance // Materials Chemistry and Physics. – 2014. – №3(147). – P. 823-830.
5. Niu L., Xu Y., Wu H., Wang W. Preparation of in situ  $(Fe,Cr)_7C_3/Fe$  composite coating by centrifugal casting // Null. – 2011. – № 8(27). – P. 587-590.
6. Жуков, А. А. Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов / А. А. Жуков, Г. И. Сильман, М. С. Фрольцов. – М.: Машиностроение, 1984. – 104 с.
7. Wang, J., C. Li, H. Liu, H. Yang, B. Shen, S. Gao, and S. Huang, The Precipitation and Transformation of Secondary Carbides in a High Chromium Cast Iron // Materials Characterization. – 2006. – № 1 (56). – P. 73-78.
8. Bedolla-Jacuinde, A., B. Hernández, and L. Béjar-Gómez, SEM Study on the  $M_7C_3$  Carbide Nucleation during Eutectic Solidification of High-Chromium White Irons // Materials Research and Advanced Techniques. – 2005. – № 12 (96). – P. 1380-1385.
9. Filipovic, M., Z. Kamberovic, M. Korac, and M. Gavrilovski., Microstructure and Mechanical Properties of Fe-Cr-C-Nb White Cast Irons // Materials and Design. – 2013. – № 47. – P. 41-48.
10. Zhi, X., J. Xing, H. Fu, and B. Xiao, Effect of Niobium on the as-Cast Microstructure of Hypereutectic High Chromium Cast Iron // Materials Letters. – 2008. – № 6 (62). – P. 857-860.
11. Zhao, Y. C, P. C Zhu, and F. H Sun, Influence of Rare Earth-La on Mechanical Properties of High Chromium Cast-Iron, Zhuzao // Foundry. – 2015. – № 7 (64). – P. 692-693.
12. Wang, K. K, R. F Wang, R. R Wu, and G. Yang, Effect of RE-mg on the Properties and Microstructure of High Chromium White Cast Iron // Foundry. – 2018. – № 3 (67). – P. 248-251.
13. Tehovnik, F., M. Doberšek, B. Arh, B. Koroušič, D. Kmetič, and V. Dunat, The Influence of Rare-Earth Elements on Nonmetallic Inclusions and Microstructure of High-Chromium White Cast Iron // Metalurgija. – 2005. – № 3 (44). – P. 163-168.
14. Гоулдстейн, Дж. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. В 2 кн. Кн. 1 / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эльчин; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 303 с.





Дзюба Г. С., Щекин А. В., Войнов А. Р., Дорофеев С. В., Помазков В. А.  
G. S. Dzyuba, A. V. Shchekin, A. R. Voynov, S. V. Dorofeev, V. A. Pomazkov

**ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ  
ЛЕГИРОВАННОЙ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ  
ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ**

**REDISTRIBUTION OF ELEMENTS IN THE STRUCTURAL COMPONENTS OF ALLOYED  
TIN BRONZE DEPENDING ON THE HEAT TREATMENT MODES**

**Дзюба Геннадий Саввич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

**Gennadi S. Dzyuba** – PhD, Assistant Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

**Щекин Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

**Andrei V. Shchekin** – PhD, Assistant Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

**Войнов Александр Робертович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

**Aleksandr V. Voynov** – PhD, Assistant Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

**Дорофеев Станислав Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

**Stanislav V. Dorofeev** – PhD, Assistant Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

**Помазков Виктор Александрович** – старший преподаватель кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

**Viktor A. Pomazkov** – Senior Lecturer, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

**Аннотация.** В статье приведены результаты распределения элементов в структурных составляющих легированной оловянной бронзы в зависимости от термической обработки расплава.

**Summary.** The paper presents the results of the distribution of elements of the structural components of alloyed tin bronze, depending on the heat treatment of the melt.

**Ключевые слова:** медные сплавы, бронза, легирование, перегрев, охлаждение, твёрдый раствор.

**Key words:** copper alloys, bronze, alloying, overheating, cooling, solid solution.

УДК 669.2

**Введение.** Установлено, что термическая (ТО) и термоскоростная (ТСО) обработки оказывают влияние на параметры жидкого состояния и процессы кристаллизации металлов и сплавов, а также увеличивают показатели физико-механических и эксплуатационных свойств медных сплавов на основе Cu-Sn [1-3]. В данной работе изучалось перераспределение элементов в различных структурных составляющих оловянной бронзы (6 масс.% Sn), легированной Al (1 масс.%) и Mg (1 масс.%).

**Методика исследования.** Для получения образцов синтетической оловянной бронзы была произведена серия плавок. Расплав перегревали до различных температур (1200, 1300, 1400 °С) и охлаждали с различной скоростью (6, 20, 140 °С/мин). Нагрев, расплавление, легирование, выдержка и охлаждение проводились в среде аргона. Полученные образцы бронзы исследовались с помощью методов микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе. Исследование проводилось в 3 областях: 1 – точка в  $\alpha$ -твёрдом растворе, максимально удалённая по всем направлениям от эвтектоида; 2 – точка в  $\alpha$ -твёрдом растворе, максимально приближённая к эвтектоиду; 3 – точка в центре эвтектоида. По результатам анализа были построены графики распределения элементов в различных структурных составляющих в зависимости от температуры перегрева и скорости ТСО (см. рис. 1 и 2).

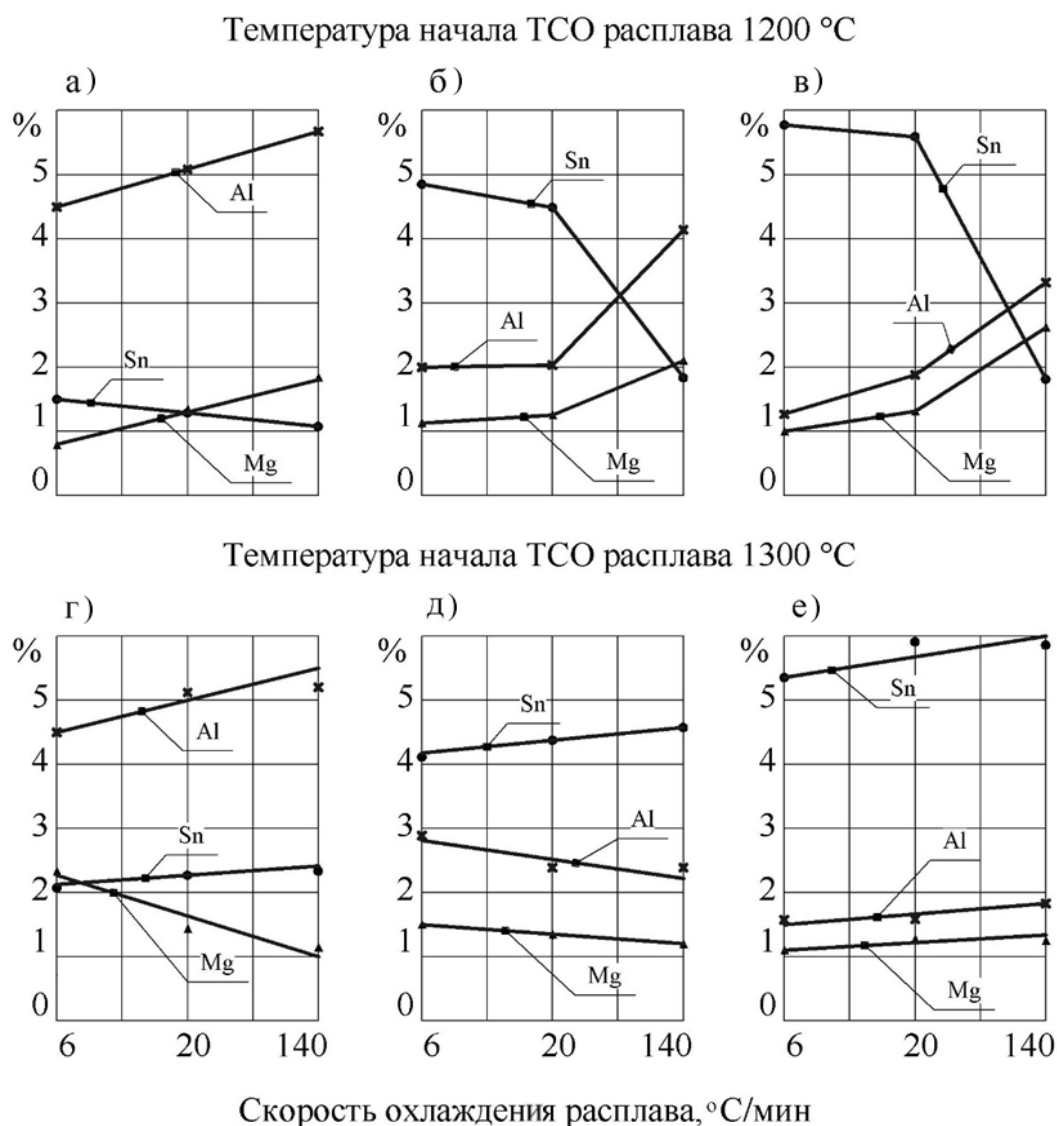


Рис. 1. Распределение компонентов в структурных составляющих бронзы в зависимости от температуры, скорости охлаждения расплава и местонахождения кристаллов  $\alpha$ -твёрдого раствора относительно электронных соединений

**Результаты исследования.** В ходе работы установлено, что растворимость компонентов (Sn, Al, Mg) в  $\alpha$ -твёрдом растворе зависит от температуры начала ТСО расплава и скорости его охлаждения изменяются следующим образом:

- при температуре начала ТСО расплава 1200 °С повышение скорости охлаждения от 6 до 140 °С/мин способствует уменьшению растворимости олова в  $\alpha$ -твёрдом растворе и увеличению растворимости алюминия и магния; причём по мере приближения к электронным соединениям растворимость олова в  $\alpha$ -твёрдом растворе уменьшается более интенсивно по мере повышения скорости охлаждения расплава;

- при более высокой температуре начала ТСО расплава (1300 °С) повышение скорости охлаждения, наоборот, увеличивает растворимость олова в  $\alpha$ -твёрдом растворе. По мере приближения к электронным соединениям растворимость олова существенно возрастает; это хорошо видно на рис. 2, а, б, в; при этом растворимость алюминия в  $\alpha$ -твёрдом растворе резко снижается, а растворимость магния в  $\alpha$ -твёрдом растворе изменяется более сложным образом: по мере приближения к электронным соединениям она возрастает при скоростях охлаждения 20 и 140 °С/мин; при низкой скорости охлаждения (6 °С/мин) растворимость магния, наоборот, уменьшается при температуре начала ТСО расплава 1300 °С; при других температурах она практически не изменяется (см. рис. 2, ж-и).

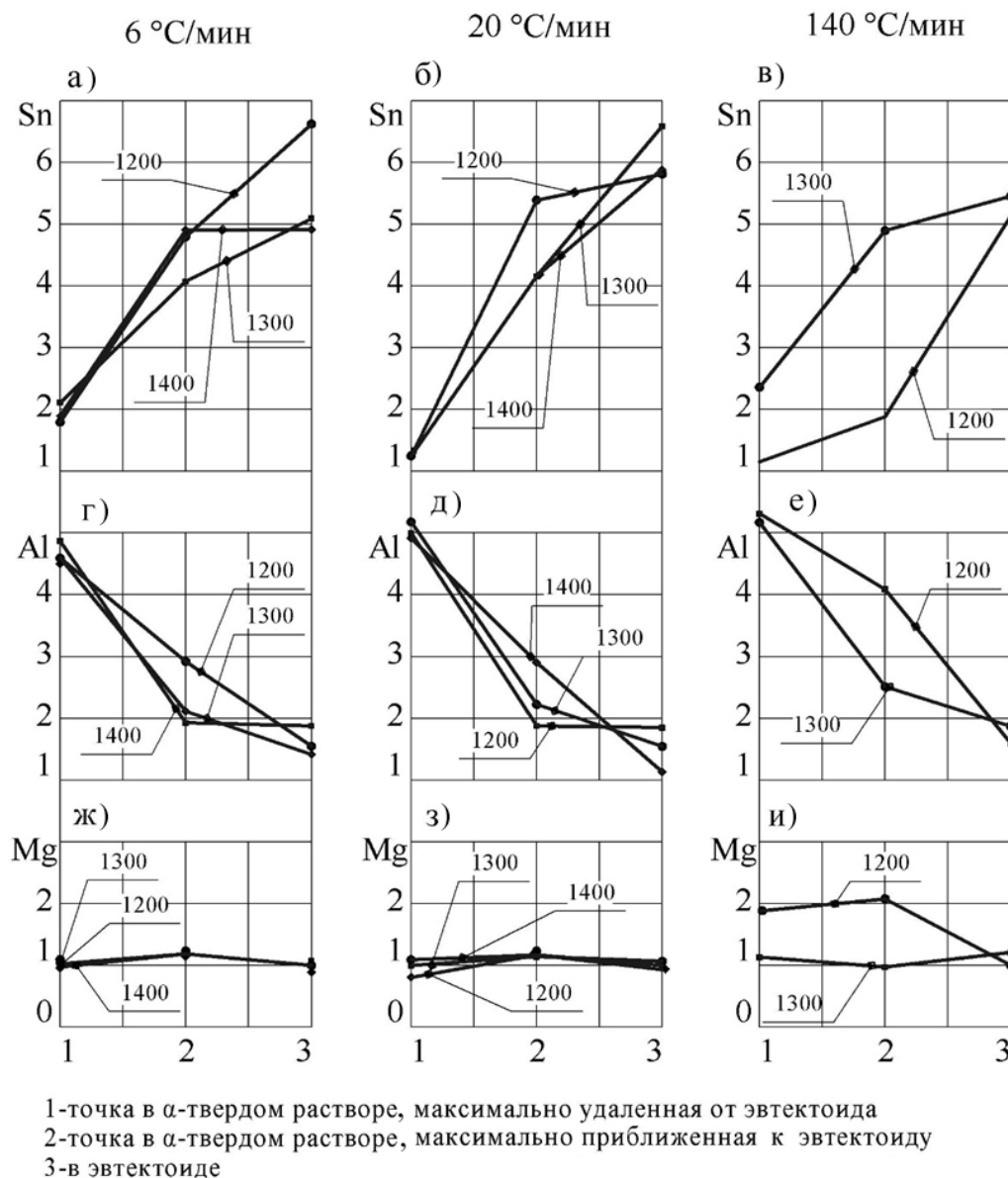


Рис. 2. Влияние температуры начала ТСО и скорости охлаждения расплава на содержание элементов (Sn, Al, Mg) в  $\alpha$ -твёрдом растворе и эвтектоиде

Анализ данных на рис. 1 и 2 показал, что чем выше скорость ТСО расплава, тем меньше растворяется олово в  $\alpha$ -твёрдом растворе (см. рис. 1, а). Существенное увеличение содержания олова по направлению продвижения к электронным соединениям напоминает восходящую диффузию атомов олова к зародышевым центрам кристаллизации  $\delta$ -фазы ( $\text{Cu}_x\text{Sn}_y\text{Mg}_z$ ). При этом чем меньше растворяется олово в  $\alpha$ -твёрдом растворе, тем больше растворяется в нём алюминий и магний (см. рис. 1, б) по принципу образования твёрдого раствора замещения. Чем выше скорость охлаждения расплава, тем больше растворяются Al и Mg в  $\alpha$ -твёрдом растворе.

Растворимость магния в  $\alpha$ -твёрдом растворе возрастает по мере приближения к электронным соединениям незначительно при скоростях охлаждения при ТСО 6 и 20 °С/мин. Вместе с тем при высокой скорости охлаждения при ТСО расплава (140 °С/мин) растворимость магния в  $\alpha$ -твёрдом растворе возрастает существенно и доходит до 2,75 ат.% Mg.

Из рис. 2, а, б, г, д, ж, з, следует, что при низких скоростях охлаждения расплава (6 и 20 °С/мин) температура начала ТСО (1200...1400 °С) практически не влияет на характер растворимости компонентов (Sn, Al, Mg) в  $\alpha$ -твёрдом растворе. Только при высокой скорости охлаждения (140 °С/мин) проявляется влияние температуры начала ТСО расплава на растворимость компонентов в  $\alpha$ -твёрдом растворе по мере приближения к электронным соединениям: чем выше температура ТСО расплава, тем больше растворяется олово в  $\alpha$ -твёрдом растворе по мере приближения к электронным соединениям (см. рис. 2, в). По обратной зависимости изменяется содержание алюминия в  $\alpha$ -твёрдом растворе. Причём чем выше температура начала ТСО, тем меньше растворяется алюминий в  $\alpha$ -твёрдом растворе по мере приближения к электронным соединениям (см. рис. 2, е). Содержание магния изменяется незначительно (см. рис. 2, и).

**Выводы.** Исходя из полученных результатов, можно сказать, что изменение режимов термической и термоскоростной обработок приводит к существенному перераспределению элементов в составе структурных составляющих ( $\alpha$ -твёрдый раствор и эвтектоид), что, вероятнее всего, приводит к изменению физико-механических и эксплуатационных свойств легированной оловянной бронзы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Термическая и термоскоростная обработка меди и оловянной бронзы в жидком состоянии / Х. Ри, Э. Х. Ри, А. С. Живетьев, С. Н. Химухин, А. И. Булачок // *Металлургия машиностроения*. – 2011. – № 4. – С. 6-12.
2. Исследование влияния термоскоростной обработки расплава на механические свойства алюминиевых сплавов, изготовленных методом ЛГМ / В. Б. Деев, И. Ф. Селянин, К. В. Пономарева, А. С. Юдин, Р. В. Романов // *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. – 2014. – № 32. – С. 90-94.
3. Дорошенко, Е. М. Термическая и термоскоростная обработка расплава бронзы как способ повышения механических и эксплуатационных свойств / Е. М. Дорошенко, Н. А. Славинская, А. С. Живетьев // *Современные материалы, техника и технология: сборник научных статей 9-й Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Т. 1* / отв. ред. А. А. Горохов. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 174-176.
4. Дорошенко, Е. М. Влияние термоскоростной обработки расплава на распределение элементов в структурных составляющих оловянной бронзы / Е. М. Дорошенко, Н. А. Славинская, А. С. Живетьев // *Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сборник научных статей 5-й Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием / редколлегия: А. А. Горохов [и др.]*. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 89-91.



**Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одинокое В. И., Иванкова Е. П., Усанов Г. И., Петров В. В.**  
**A. I. Evstigneev, E. A. Dmitriev, V. I. Odinokov, E. P. Ivankova, G. I. Usanov, V. V. Petrov**

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ СТРУКТУР МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ  
ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ**

**DEVELOPMENT OF NEW STRUCTURES OF MULTILAYER SHELL FORMS BASED  
ON SMELTED MODELS**

**Евстигнеев Алексей Иванович** – доктор технических наук, профессор-консультант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: diss@knastu.ru.

**Mr. Alexey I. Evstigneev** – Doctor of Engineering, Professor, Consulting Professor of Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: diss@knastu.ru.

**Дмитриев Эдуард Анатольевич** – доктор технических наук, доцент, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rector@knastu.ru.

**Mr. Eduard A. Dmitriyev** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Rector of Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rector@knastu.ru.

**Одинокое Валерий Иванович** – доктор технических наук, профессор, профессор-консультант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: 89122718858@yandex.ru.

**Mr. Valery I. Odinokov** – Doctor of Engineering, Professor, Consulting Professor of Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: 89122718858@yandex.ru.

**Иванкова Евгения Павловна** – старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jenyvany@mail.ru.

**Ms. Evgenia P. Ivankova** – Senior Lecturer, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jenyvany@mail.ru.

**Усанов Геннадий Иванович** – доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры «Менеджмент, маркетинг и государственное управление» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: USANOV\_G@mail.ru.

**Mr. Gennady I. Usanov** – Doctor of Econ. Sciences, Cand. Tech. Sciences, Professor, Department of Management, Marketing and Public Administration, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: USANOV\_G@mail.ru.

**Петров Виктор Викторович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Petrovpng@mail.ru.

**Mr. Victor V. Petrov** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Chemistry and Chemical Technology, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Petrovpng@mail.ru.

**Аннотация.** Предложены новые виды структур по толщине многослойных литейных оболочковых форм с целью повышения их трещиностойкости и заливки жидким металлом без опорного наполнителя.

**Summary.** New types of structures are proposed for the thickness of multilayer foundry shell molds in order to increase their crack resistance and pour liquid metal without a supporting filler.

**Ключевые слова:** оболочковая форма, напряжённое состояние, трещиностойкость, структура.

**Key words:** shell shape, stress state, crack resistance, structure.



УДК 621.74.045

**Введение.** Трещиностойкость оболочковых форм (ОФ) по выплавляемым моделям зависит, главным образом, от их напряжённо-деформированного состояния (НДС) на различных этапах формообразования. Снижение НДС значительно повышает их трещиностойкость и сокращает брак в отливках по засорам и поверхностным дефектам. Кроме того, известные методы снижения НДС оболочковых форм остаются малоизученными, так как нет чётких сведений о параметрах различных структур ОФ и эффективности их влияния на изменение свойств последних. Таким образом, актуальными направлениями исследования до сих пор являются определение НДС на каждом этапе формообразования ОФ и разработка путей его снижения [1] за счёт управления внутренней структурой ОФ. Аналогичные проблемы рассмотрены при формировании структуры покрытий металлорежущих пластин в работе профессора Мокрицкого [2].

В настоящей работе предлагаются новые виды внутренней структуры многослойных оболочковых форм по выплавляемым моделям.

Авторы разработали такую структуру многослойной оболочковой формы, когда наружный слой выполнен толстостенным из малотеплопроводного материала с меньшим коэффициентом линейного расширения, чем у остальных слоёв оболочки.

В качестве ближайшего аналога такой разработки может рассматриваться многослойная оболочковая форма для изготовления металлических отливок литьём по выплавляемым моделям, наружный слой которой выполнен толстостенным из малотеплопроводного материала [1]. Разработка авторов отличается от аналога тем, что наружный слой литейной многослойной оболочковой формы выполнен из малотеплопроводного материала с меньшим коэффициентом линейного расширения, чем у остальных слоёв оболочки, что и является новизной.

Такая разработка авторов хорошо согласуется с данными ранней работы [3], согласно которой наружный слой также выполнен из малотеплопроводного материала с меньшим коэффициентом линейного расширения, чем у остальных слоёв. Такая структура ОФ повышает трещиностойкость ОФ и позволяет заливать их без опорного наполнителя. Таким образом, разработка авторов практически подтвердила результаты ранее проведённых исследований зарубежных авторов, что говорит о перспективности и правильности выбора направления проводимых исследований.

Другим вариантом структуры оболочковой формы, предложенной авторами, является структура, когда все промежуточные внутренние слои формы, кроме облицовочного и наружного слоёв оболочки, выполняются из смеси фарфоровой и фаянсовой керамик [4].

Известно использование в литейном производстве отдельно фарфоровой [5] и фаянсовой керамик [6]. Фарфоровая керамика несколько отличается от фаянсовой как по составу, так и по структуре, но весьма незначительно. Сравнения свойств фарфора и фаянса свидетельствуют о следующем.

Коэффициент линейного расширения  $\alpha$  у фаянса несколько выше, чем у фарфора, но незначительно ( $\alpha_{\text{фаянса}} = (4,7...5,8) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , а  $\alpha_{\text{фарфора}} = (3,6...4,5) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ). Теплопроводность фаянса уже несколько ниже, чем у фарфора, но тоже незначительно ( $\lambda_{\text{фаянса}} = (0,93...1,3) \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ ), а  $\lambda_{\text{фарфора}} = (0,96...1,35) \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ ). Стоимость фаянсовых изделий ниже стоимости аналогичных изделий из фарфора.

Всё это свидетельствует о возможном их совместном сочетании и применении в виде единой механической смеси в качестве обсыпного материала промежуточных слоёв формы.

Литейная многослойная оболочковая форма, изготовленная с использованием такой смеси фарфоро-фаянсовой керамик, обладает повышенной термостойкостью и позволяет гарантировано заливать её жидким металлом без опорного наполнителя.

Авторы работ [7–9] предлагают целый ряд своих новых разработок по совершенствованию внутреннего строения по толщине многослойной ОФ. Согласно первой разработке [7], один или несколько слоёв формы, примыкающих к облицовочному, а также один или несколько слоёв, примыкающих к внешнему наружному, имеют пористую структуру с меньшей плотностью по отношению к плотности остальных слоёв оболочки.



Появление больших растягивающих напряжений в наружных слоях оболочки – следствие того, что при заливке металла в форму слои, примыкающие к внутренней поверхности формы, нагреваясь, стремятся увеличиться в объёме, но этому препятствуют холодные наружные слои, поэтому в них возникают значительные растягивающие нормальные напряжения, а в слоях, примыкающих к внутренней поверхности формы, возникают сжимающие нормальные напряжения.

В предлагаемой новой ОФ первый облицовочный слой при заливке также будет стремиться увеличиться в объёме, как и в традиционной форме, но ему будет препятствовать второй пористый слой, так как у него коэффициент линейного расширения (КЛР) значительно ниже, следовательно, и растягивающие напряжения в наружных слоях формы будут меньше. Кроме того, в пористом слое при нагревании возникает воздушный зазор толщиной в сотые или десятые доли миллиметра, препятствующий развитию трещин, которые могут появиться от действия растягивающих напряжений на наружном и облицовочном слоях.

Работа такой литейной многослойной формы состоит в следующем. При заливке первый слой, разогреваясь, начинает увеличиваться в объёме. Второй слой (пористый) также разогревается, но с меньшей интенсивностью, чем первый, вследствие более низкого КЛР, т.е. сдерживает увеличение объёма первого слоя, тем самым уменьшая растягивающие напряжения на наружных слоях формы, которые в начальный момент времени имеют температуру значительно ниже, чем первые внутренние слои. В случае если трещины, возникающие от значительных нормальных напряжений, всё же появятся, сжимающие внутренние слои формы и растягивающие наружные слои будут препятствовать распространению трещин по сечению формы, а следовательно, препятствовать её (формы) полному разрушению.

Другая разработка [8] рекомендует, чтобы внешний и примыкающие к нему внутренние слои многослойной ОФ имели керамометаллическую основу, остальные – керамическую. При заливке жидкого металла в такую форму её наружные слои подвергаются значительным растягивающим напряжениям. При этом их изготовление на керамометаллической основе значительно увеличивает прочностные характеристики оболочки.

Кроме того, керамометаллическая основа внешних наружных слоёв имеет КЛР значительно выше, чем у чисто керамических и, следовательно, даже при более низкой температуре внутренние слои будут увеличиваться в объёме при нагревании больше, чем если бы эти слои были чисто керамические. Значит, растягивающее напряжение в них будет также меньше, а следовательно, и сжимающее напряжение слоёв формы, контактирующих с металлом, будет уменьшаться.

Такую структуру ОФ можно сравнить с облицовочным кокилем, когда внешняя оболочка (кокиль) – прочная, а внутренняя (облицовка) – мягкая и податливая.

Всё это в совокупности делает многослойную ОФ устойчивой к тепловому удару от заливаемого в неё металла, а значит, позволяет проводить её заливку без использования опорного наполнителя.

Третий вариант структуры [9] – структура ОФ, когда наружный слой и внутренний, примыкающий к облицовочному, выполнены из кварцевого стекла, а остальные слои керамические. Наружные слои такой многослойной ОФ при заливке испытывают значительные растягивающие напряжения, а слой, соприкасающийся с жидким металлом, – значительные сжимающие напряжения. Изготовление слоёв на основе кварцевого стекла значительно увеличит прочностные характеристики оболочки. Кроме того, слои на основе кварцевого стекла имеют КЛР значительно ниже, чем чисто керамические, и, следовательно, температурные перемещения и деформации в них будут меньше, чем если бы эти слои были чисто керамические. Значит, растягивающие и сжимающие напряжения в них будут также меньше (по закону Гука), что подтверждено расчётами. Такая многослойная ОФ также позволяет проводить её заливку без использования опорного наполнителя.

Авторами также предложен новый способ прокаливания ОФ без опорного наполнителя перед их заливкой [10], в котором одновременно со стадией нагрева осуществляется процесс вспенивания материала наружного слоя оболочки. На этапе формирования наружного слоя оболочки в состав суспензии и (или) обсыпочно материала вводятся компоненты, обеспечивающие протекание процесса вспенивания при воздействии нагрева и способствующие утолщению наружного слоя.

При прокаливании ОФ без опорного наполнителя на этапе нагрева в материале наружного слоя оболочки начинается процесс вспенивания компонентов материала, который приводит к увеличению в несколько раз толщины малотеплопроводного наружного слоя с низким КЛР. Всё это ведёт к понижению сжимающих и растягивающих напряжений в ОФ при их заливке.

Один из вариантов реализации такого способа прокаливании – состав и технология нанесения малотеплопроводного слоя на пятислойные этилсиликатные оболочки, изложенные в работе [11]. Покрытие наносилось на блок в виде суспензии шихты пеностекла на сульфитно-спиртовой барде, жидком стекле разной плотности и кремнезоля. Вспенивание слоя покрытия исходной толщиной 0,8...1,2 мм (при температуре в горячей зоне 800...900 °С в автоматизированном агрегате обжига, заливки и охлаждения мод. 675А) доводилось до толщины 2,3...5,5 мм.

Лучшее вспенивание такой композиции отмечается при 860...900 °С. Установлено, что форма с малотеплопроводным покрытием охлаждается медленнее обычной и её температура перед заливкой на 150...250 °С выше, что смягчает термический удар при формовке оболочек в «кипящем» слое песка, улучшает питание отливок при затвердевании.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Method for preparing casting shell of fired mold: пат. 105414485 KHP: МПК В22С9/04 / Huang Dehai Zhang Xianjie; патентообладатель HUZHOU NANFENG MACHINERY MFG CO LTD. – № 201510851020, заявл. 30.11.2015; опублик. 23.03.2016.
2. Влияние покрытия режущего инструмента на распределение напряжений в режущем клине / В. Ю. Верещагин, Б. Я. Мокрицкий, А. С. Верещагина, Е. Г. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1(33). – С. 61-65.
3. Shell moulds for casting metals: пат. 68902981 Германия: МПК В22С9/04 / Kington Alan Douglas; патентообладатель ROLLS ROYCE PLC. – № 1989602981, заявл. 21.11.1989; опублик. 18.03.1993.
4. Патент № 2731279 С1 Российская Федерация, МПК В22С 9/04. Литейная многослойная оболочковая форма: № 2019135453; заявлено 05.11.2019; опубликовано 01.09.2020 / Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одинокоев В. И. [и др.]; Комсомольский-на-Амуре государственный университет. – 3 с.
5. Авторское свидетельство № 1770032 СССР, МПК В22С 9/04. Способ изготовления оболочковых форм по выплавляемым моделям: № 4810643; заявлено 05.04.1990; опубликовано 23.10.1992 / Евстигнеев А.И. [и др.]; Комсомольский-на-Амуре политехнический институт. – 3 с.
6. Патент № 2189884 С1 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Формовочная смесь для изготовления литейных форм: № 2001127613/02; заявлено 10.10.2001; опубликовано 27.09.2002 / Журавлев А.Ф. [и др.]; Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова. – 5 с.
7. Патент № 2696787 С1 Российская Федерация, МПК В22С 9/04. Литейная многослойная оболочковая форма: № 2018135797; заявлено 09.10.2018; опубликовано 06.08.2019 / Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одинокоев В. И., Свиридов А. В.; Комсомольский-на-Амуре государственный университет. – 4 с.
8. Патент № 2696788 С1 Российская Федерация, МПК В22С 9/04. Литейная многослойная оболочковая форма: № 2018137610; заявлено 24.10.2018; опубликовано 06.08.2019 / Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одинокоев В. И., Свиридов А. В.; Комсомольский-на-Амуре государственный университет. – 4 с.
9. Патент № 2722956 С1 Российская Федерация, МПК В22С 9/02. Литейная многослойная оболочковая форма: № 2019133515; заявлено 21.01.2019; опубликовано 05.06.2020 / Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одинокоев В. И. [и др.]; Комсомольский-на-Амуре государственный университет. – 4 с.
10. Патент № 2723282 С1 Российская Федерация, МПК В22С 9/12. Способ прокаливании оболочковых форм: № 2019135455; заявлено 05.11.2019; опубликовано 09.06.2020 / Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одинокоев В. И. [и др.]; Комсомольский-на-Амуре государственный университет. – 3 с.
11. Керамические формы с пористым малотеплопроводным слоем покрытия / Г. И. Тимофеев, В. П. Данилин, В. П. Арсеньев, Л. Р. Железняков, Б. П. Щелкунов // Литейное производство. – 1978. – № 12. – С. 32.



**Ри Хосен, Ри Э. Х., Живетьев А. С., Ким Е. Д.**  
**Hosen Ri, E. H. Ri, A. S. Zhivetev, E. D. Kim**

**СИНТЕЗ КОМПОЗИТНЫХ ПОРОШКОВ КАРБИДА И БОРИДА ВОЛЬФРАМА  
ИЗ ШЕЕЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА ДВ-РЕГИОНА**

**SYNTHESIS OF TUNGSTEN CARBIDE AND BORIDE COMPOSITE POWDERS  
FROM SCHEELITE CONCENTRATE OF FE-REGION**

**Ри Хосен** – доктор технических наук, профессор кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(914)404-88-77. E-mail: ri@mail.khstu.ru.

**Ri Hosen** – Dr. of Engineering, Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042, Khabarovsk; tel. 8(914)404-88-77. E-mail: ri@mail.khstu.ru.

**Ри Эрнст Хосенович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(914)214-09-99. E-mail: erikri999@mail.ru.

**Ernst H. Ri** – Dr. of Engineering, Professor, Head of the Department of Foundry Engineering and Metal Technology, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042, Khabarovsk; tel. 8(914)214-09-99. E-mail: erikri999@mail.ru.

**Живетьев Андрей Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

**Andrei S. Zhivetev** – PhD, Assistant Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

**Ким Евгений Давидович** – преподаватель кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(914)202-27-52.

**Eugenie D. Kim** – Lecturer, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042, Khabarovsk; tel. 8(914)202-27-52.

**Аннотация.** Рассмотрена технология получения композиционных порошковых материалов из тугоплавких карбида и борида вольфрама методом металлотермии при использовании шеелитового концентрата. Установлено, что алюмотермическое восстановление шеелитового концентрата с бор- и углеродсодержащими добавками на воздухе при ~2500 К приводит к получению спечённого материала  $W_2B_5-WC-Al_2O_3$ , тогда как в результате реакции синтеза в среде ионных расплавов при ~1200 К образуется дисперсный порошковый материал W-WB, удельная поверхность которого составляет  $8,08 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ . Полученные материалы идентифицированы методом рентгенофазового анализа.

**Summary.** The technology of obtaining composite powder materials from refractory tungsten carbide and boride by the metallurgy method using scheelite concentrate is considered. It has been established that aluminothermic reduction of scheelite concentrate with boron and carbon-containing additives in air at ~2500 K leads to the formation of a sintered material  $W_2B_5-WC-Al_2O_3$ , while as a result of the synthesis reaction in an ionic melt medium at ~1200 K, dispersed powder material W-WB is formed, the specific surface of which is  $8.08 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$ . The materials obtained were identified by X-ray phase analysis.

**Ключевые слова:** вольфрамсодержащие композиты; шеелитовый концентрат; алюмотермия; электроискровые наплавки.

**Key words:** tungstenous composites; scheelite concentrate; aluminothermy; electrospark welding.

Работа выполнена при поддержке ГЗ №FEME-2020-0010.



УДК 669.583.9

**Введение.** Возможность снижения себестоимости композитных материалов на основе тугоплавких соединений вольфрама заключается в прямом использовании рудных концентратов в качестве исходных компонентов шихты при борировании и карбидизации вольфрама.

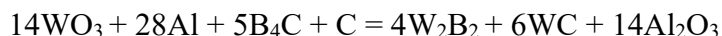
Среди известных технологий термитные методы привлекают своей универсальностью, способностью получать тугоплавкие соединения непосредственно из минеральных концентратов благодаря высокой температуре (~2000...3000 К), труднодостижимой при обычном нагреве [1; 2].

Ранее авторами получен композиционный материал на основе  $W_2B_5$  алюминотермическим восстановлением технического оксида вольфрама в смеси с оксидом или карбидом бора [3]. Показано, что в системе  $WO_3$ - $B_2O_3$ -Al образуется материал, состоящий из  $W_2B$ ,  $WB$ ,  $W_2B_5$ ,  $Al_2O_3$  с низким содержанием боридных фаз. Тогда как при использовании  $B_4C$  получен материал, состоящий преимущественно из  $W_2B_5$  (80 мас.%).

В настоящей работе изучены условия получения композитов алюминотермическим восстановлением шеелитового концентрата с бор- и углеродсодержащими добавками. Синтез материалов проводили на воздухе и в среде ионных расплавов.

**Материалы и методики эксперимента.** В работе использовали: шеелитовый концентрат (мас. %: 55  $WO_3$ ; 1,0  $MoO_3$ ; 5  $Fe_2O_3$ ; 0,23  $TiO_2$ ; 0,2  $MnO$ ; 19  $CaO$ ; 2,4  $MgO$ ; 0,8  $Al_2O_3$ ; 8  $SiO_2$ ), карбид бора, оксид бора, алюминиевый порошок, сажу техническую, натрий хлористый, натрий углекислый, натрий алюмофтористый. Рентгенофазовый анализ полученных материалов выполнен на дифрактометре ДРОН7. Гранулометрические характеристики порошков определены с использованием лазерного дифракционного микроанализатора «Анализетте-22».

**Результаты исследования.** Процесс получения композиционного материала с определённой долей приближения может быть описан алюминотермической реакцией совместного синтеза борида и карбида вольфрама:



потенциал Гиббса  $\Delta G_{2000\text{ К}} = -8676$  кДж/моль.

Не исключено восстановление оксидов примесных металлов, содержащихся в концентрате. Однако при высоких содержаниях  $WO_3$  в концентрате и большой абсолютной величине  $\Delta G$  доминирует реакция синтеза борида и карбида вольфрама, так как  $\Delta G_{2000\text{ К}} = -812$  кДж/моль для  $MoO_3$  и  $\Delta G_{2000\text{ К}} = -780$  кДж/моль для  $Fe_2O_3$ .

Синтез материала осуществляли внепечным способом на воздухе. Для приготовления шихты смешивали исходные компоненты в установленных массовых соотношениях: на 1 массовую долю (мас. д.) шеелитового концентрата приходится 0,25...0,27 мас. д. алюминиевого порошка, 0,1...0,15 мас. д. карбида бора, 0,01 мас. д. сажи технической. Реакцию инициируют электродуговым разрядом. Температура при горении смеси достигает 2200...2500 К [4]. В результате образуется спечённый материал, для получения порошка которого необходимо измельчение и отмыв растворами кислот ( $HCl$ ,  $H_2SO_4$ ) от  $CaO$  и других примесей.

Рентгенофазовый анализ продуктов синтеза показал, что получен трёхфазный материал, состоящий из  $W_2B_5$ ,  $WC$ ,  $Al_2O_3$ . Рентгенографические характеристики материала приведены в табл. 1. Из анализа рентгенограмм следует, что на долю борида и карбида вольфрама приходится ~80...85 % массы материала.

Твёрдость боридной фазы составляет 29...32 ГПа, а карбидной фазы – 9...16 ГПа. Вместе с тем при высокой твёрдости материал относительно легко измельчается. Так, измельчение в мельнице РМ400 в течение 15 мин обеспечивает получение порошка со средним размером частиц 427 мкм и удельной поверхностью  $2,01 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ . Распределение по размерам частиц измельченного материала показано на рис. 1.

Тонкодисперсные порошки вольфрама и его тугоплавких соединений можно получить в результате реакций синтеза в среде ионных расплавов [5; 6]. Процесс получения порошков непосредственно из шеелитового концентрата состоит из двух ступеней: высокотемпературного раз-



ложения концентрата в солевом расплаве и металлургического синтеза борсодержащего материала в расплаве. Разложение концентрата ведут в расплаве солевой системы  $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaCl-Na}_3\text{AlF}_6$  при 1173...1220 К в течение 1 ч. Образующийся вольфрамат натрия переходит в солевой расплав, а оксиды кремния, кальция, железа и другие примеси остаются в нижней нерастворившейся части концентрата, составляющей ~25 мас.%.

Таблица 1

Основные рентгенофизические характеристики материала  $\text{W}_2\text{B}_5\text{-WC-Al}_2\text{O}_3$

$\text{W}_2\text{B}_5$								
$d, \text{Å}$	3,45	2,54	2,22	1,89	1,72	1,48	1,36	1,31
$I/I_0$	100	92	16	26	20	25	24	19
WC								
$d, \text{Å}$	2,86	2,50	1,87	1,46	1,42	1,25		
$I/I_0$	5	71	68	25	11	5		

Примечание:  $d$  – межплоскостное расстояние;  $I/I_0$  – относительная интенсивность рефлексов

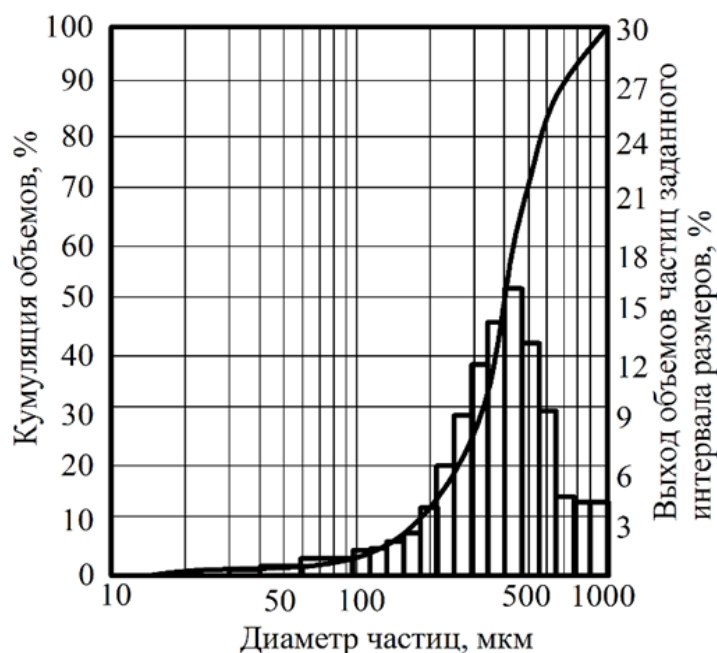


Рис. 1. Гистограмма полученного композиционного материала  $\text{W}_2\text{B}_5\text{-WC-Al}_2\text{O}_3$

Верхний солевой расплав сливают с твёрдого остатка. В расплав вводят оксид бора, сажу, алюминиевый порошок. По окончании реакции твёрдую фазу образовавшегося продукта отделяют от расплава, отмывают водой от остатка солей. Результаты получения порошка W-WB приведены в табл. 2.

Данные рентгенофазового анализа полученного продукта представлены в табл. 3, из которой следует, что материал состоит из вольфрама металлического и его боридной фазы WB (~50 мас.%). Карбид вольфрама в этих условиях не образуется. Кривая распределения по крупности частиц порошка показана на рис. 2. Удельная поверхность порошка составляет  $8,08 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ . Экспериментально установлено, что применение композита  $\text{W}_2\text{B}_5\text{-WC-Al}_2\text{O}_3$  в качестве электродного материала при электроискровом упрочнении поверхности повышает износостойкость стали 45 в 4 раза.

Таблица 2

Условия получения порошка W-WB

Состав расплава, мас. д.: NaCl – 3; Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> – 1,5; Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> – 1; концентрат – 1			
Параметры			
Температура, К		1173	1220
Извлечение вольфрама в расплав, мас. %		95	96
Содержание реагентов в расплаве, мас. д.	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	1
	C	0,01	0,01
	Al	0,3	0,3
Фазовый состав продуктов		W – (40 % WB)	W – (~50 % WB)

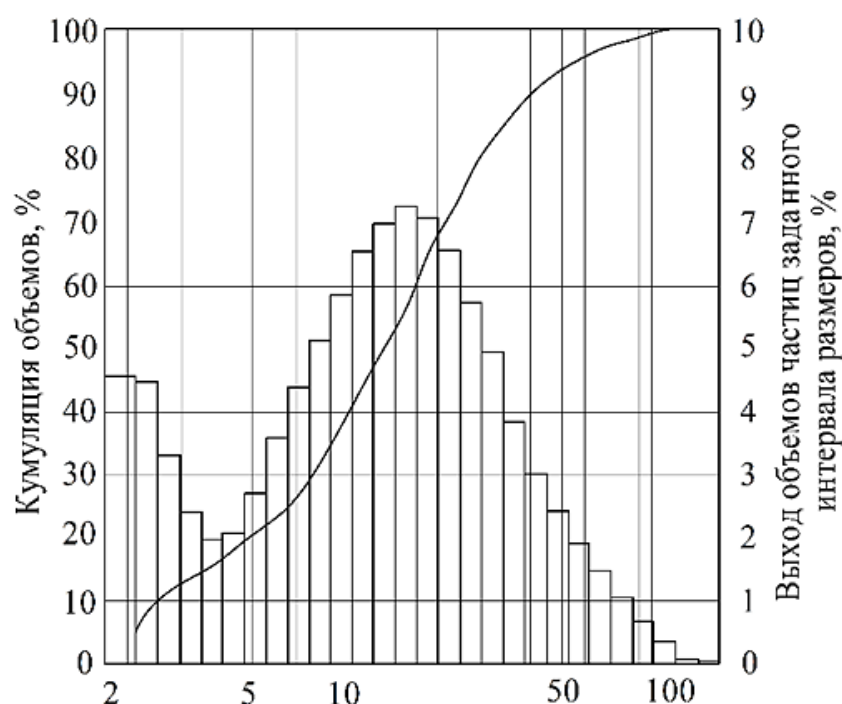


Рис. 2. Гистограмма полученного композиционного материала W-WB

Таблица 3

Рентгенографические характеристики порошка W-WB

W								
$d, \text{\AA}$	2,227		1,571		1,28			
$I/I_0$	100		30		28			
WB								
$d, \text{\AA}$	3,68	2,71	2,28	2,12	1,92	1,72	1,53	1,35
$I/I_0$	10	35	32	70	12	17	10	15
Примечание: $d$ – межплоскостное расстояние; $I/I_0$ – относительная интенсивность рефлексов								

**Выводы.** Таким образом, по результатам выполненных экспериментов можно заключить, что алюминотермический синтез на воздухе при ~2500 К приводит к образованию материала, содержащего высший борид и карбид вольфрама, в то время как в ионном расплаве при 1220 К образуется металлический вольфрам и его низший борид.



#### ЛИТЕРАТУРА

1. Толстых, О. Н. Состояние и перспективы использования металлотермии в материаловедении / О. Н. Толстых, О. И. Рипинен // *Материалы Сибири*. – Новосибирск: СО РАН, 1995. – С. 75-79.
2. Уркаев, Ф. Х. Самораспространяющиеся реакции горения термитных составов с использованием минерального сырья / Ф. Х. Уркаев, В. С. Шевченко, В. Д. Нартиков // *Вестник отделения наук о Земле РАН*. – 2002. – № 1. – С. 10-17.
3. Патент № 2098233 Российская Федерация, МПК В22F 3/23(2006/01), С22С 1/05 (2006.01). Способ получения композиционного материала из вольфрамсодержащего минерального сырья: № 95118534/02: заявлено 25.10.1995: опубликовано 10.12.1995 / Николенко С. В., Верхотуров А. Д., Гостищев В. В.; заявитель Институт материаловедения Дальневосточного отделения РАН. – 4 с.
4. Получение композиционных материалов на основе  $W_2B_5$  для электроискровой наплавки / С. В. Николенко, А. Д. Верхотуров, В. В. Гостищев, Н. В. Лебухова // *Материаловедение*. – 1999. – № 6. – С. 48-51.
5. Физико-химические аспекты получения порошка вольфрама восстановлением его соединений алюмином в ионных расплавах / В. В. Гостищев, В. Ф. Бойко, Л. А. Климова, Л. П. Метлицкая // *Теоретические основы химической технологии*. – 2006. – Т. 40. – № 5. – С. 584-587.
6. Гостищев, В. В. Магнито-термический синтез дисперсного порошка карбида молибдена в расплаве карбоната натрия / В. В. Гостищев, В. Ф. Бойко // *Химическая технология*. – 2007. – Т. 8. – № 3. – С. 126-128.

**Александров С. Ю., Хусаинов А. А.**  
**S. Y. Aleksandrov, A. A. Husainov**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ПО ПОДАЧЕ И ПЕРЕМЕШИВАНИЮ  
ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО  
РАЗЛИВА СТАЛИ**

**IMPROVEMENT OF DEVICES FOR SUPPLYING AND STIRRING LIQUID METAL  
IN UNRS CRYSTALLIZER**

**Александров Сергей Юрьевич** – старший преподаватель кафедры «Проектирование, управление и разработка информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sandrov@mail.ru.

**Sergei Y. Aleksandrov** – Senior Lecturer, Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sandrov@mail.ru.

**Хусаинов Ахмет Аксанович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры проектирования, управления и разработки информационных систем Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 8(4217)24-11-95. E-mail: kmopevm@knastu.ru.

**Mr. Ahmet A. Husainov** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Design, Management and Development of Information Systems, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(4217)24-11-95. E-mail: kmopevm@knastu.ru.

**Аннотация.** Отмечены недостатки известных конструкций устройств по заполнению кристаллизаторов и их элементов жидким металлом. Приведены новые более совершенные конструкции устройств по заполнению кристаллизаторов установки непрерывного разлива стали (УНРС) и перемешиванию жидкого металла с целью повышения качества полученных изделий, надёжности работы и простоты управления устройствами при их эксплуатации.

**Summary.** The disadvantages of known designs of devices for filling molds with liquid metal and their elements are noted. More advanced designs of devices for filling UNRS crystallizers and mixing of liquid metal are presented in order to improve the quality of the products obtained, the reliability of operation and the simplicity of device management during their operation.

**Ключевые слова:** жидкий металл, плавающий стакан, устройство, заполнение, кристаллизатор.

**Key words:** liquid metal, floating glass, device, filling, crystallizer.

Работа выполнена под руководством доктора технических наук, доцента Э. А. Дмитриева и доктора технических наук, профессора В. И. Одиноква при участии доктора технических наук, профессора А. И. Евстигнеева.

УДК 519.677

Значительное влияние на стабильность процесса заполнения кристаллизатора установки непрерывного разлива стали (УНРС) жидким металлом оказывают конструктивно-технологические схемы и конструкции применяемых устройств, режимы и параметры заливки кристаллизатора расплавом. Всё это связано с особенностями применяемых устройств и совершенствованием их конструкции. Высокие требования, предъявляемые к таким устройствам, определили необходимость создания новых конструкций устройств, предназначенных для сокращения затрат времени на подготовку к работе и обслуживание, повышение качества получаемых металлозаготовок.



В настоящее время при заполнении кристаллизатора УНРС используется устройство, подробно описанное в специальной литературе, содержащее промежуточный ковш, кристаллизатор с различными геометрическими параметрами граней и глухонный погружной разливочный стакан с двумя выходными отверстиями, расположенными внизу или вверху к горизонту, оси которых проходят через центр стакана.

Недостатком этого устройства является то, что использование такого разливочного стакана не обеспечивает необходимое равномерное перемешивание расплава в горизонтальной плоскости кристаллизатора, что приводит к получению различной в горизонтальном сечении структуры кристаллизующегося металла, что затрудняет при дальнейшем переделе (прокатке) получение однородной качественной металлопродукции. Кроме того, такая форма погружного стакана требует его частой замены (выходные окна размываются и могут вызывать отрыв дна стакана).

Известны также устройства для подачи жидкого металла в кристаллизатор УНРС, содержащие разливочный ковш с прямоточным погружным стаканом, вертикальный кристаллизатор [2] и установленную под выходом металла из погружного стакана на кронштейнах распределительную тарелку круглого поперечного сечения [3].

Недостатком устройства [2] является также невозможность обеспечения однородности получения структуры у кристаллизующегося металла в горизонтальном сечении, а у устройства, представленного в работе [3], – сложность и громоздкость в изготовлении и эксплуатации.

Авторами [1] предложено устройство, выполненное в виде отражателя круглого поперечного сечения с возможностью закрепления на стенках кристаллизатора под выходом металла из погружного прямоточного стакана, а форма отражателя корреспондирует с формой горизонтального сечения получаемой заготовки.

На рис. 1 приведён внешний вид данного устройства, которое состоит из разливочного ковша 1 с погружным прямоточным стаканом 2, отражателем 3, закреплённым на стенках кристаллизатора 4 кронштейнами 5.

При работе устройства жидкий металл из ковша 1 через погружной прямоточный стакан 2 падает на отражатель 3 круглого поперечного сечения и разливается в стороны в горизонтальном направлении под стенки кристаллизатора 4. От напора жидкого металла отражатель 3 удерживается кронштейнами 5.

Главное отличие нового устройства состоит в том, что в известном устройстве, представленном в работе [3], тарелка находится над уровнем зеркала металла в кристаллизаторе, а в предлагаемом авторами [1] – под зеркалом металла в кристаллизаторе, т.е. отражатель заглублён в металл. Именно по этой причине в описании нового решения указан погружной прямоточный стакан, что говорит о том, что через такой стакан металл подаётся на заглублённый в жидкий металл отражатель (примерно на глубину до 200 мм).

Кроме того, вся предлагаемая конструкция устройства в виде погружного стакана с отражателем на кронштейне значительно проще и дешевле в изготовлении и эксплуатации, чем известный сложный аналог в виде глухонного погружного стакана с выходными отверстиями.

В новом решении жидкий металл из погружного стакана поступает на отражатель и самоотёком сливается с его горизонтальной поверхности непосредственно к внутренним стенкам кристаллизатора. Причём металл отражается равномерно во все стороны, а значит, равномерно омывает в горизонтальной плоскости всю внутреннюю поверхность кристаллизатора круглого или иного поперечного сечения. Отмечаем, что отражатель может быть выполнен как круглого, так и квадратного или прямоугольного сечения, т.е. соответствует сечению вытягиваемой заготовки.

При этом обеспечивается равномерная по периметру в горизонтальной плоскости подача металла в кристаллизатор УНРС, что способствует получению однородной в горизонтальной плоскости структуры кристаллизовавшегося металла при получении круглой, квадратной или прямоугольной непрерывной заготовки.

Для получения мелкозернистой структуры кристаллизующегося металла используется также устройство, подробно описанное в работе [4], содержащее промежуточный ковш, глухонный



или прямоточный стакан, кристаллизатор, вокруг которого установлено устройство для электромагнитного перемешивания жидкого металла.

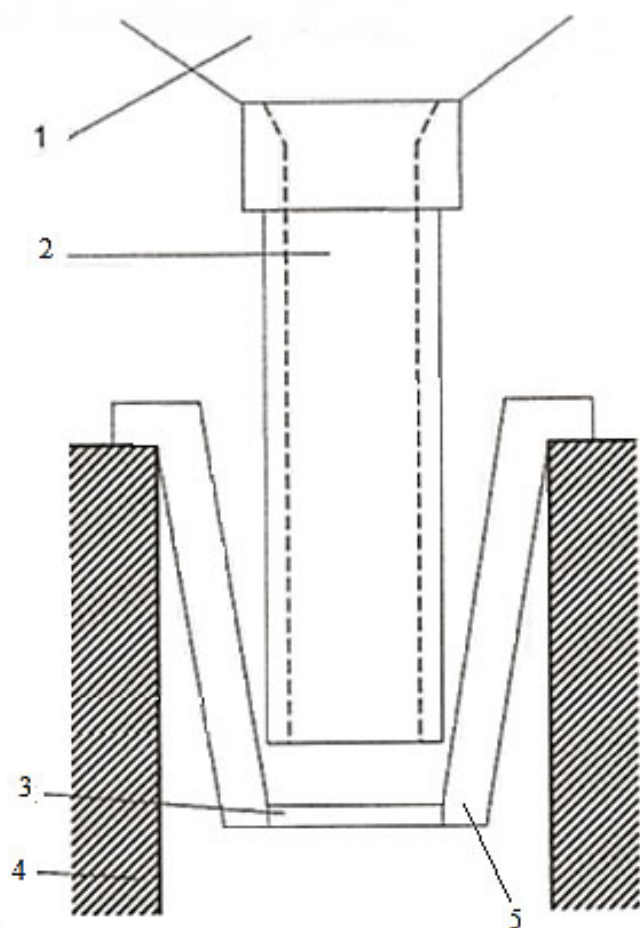


Рис. 1. Устройство для подачи жидкого металла в вертикальный кристаллизатор установки непрерывной разливки стали

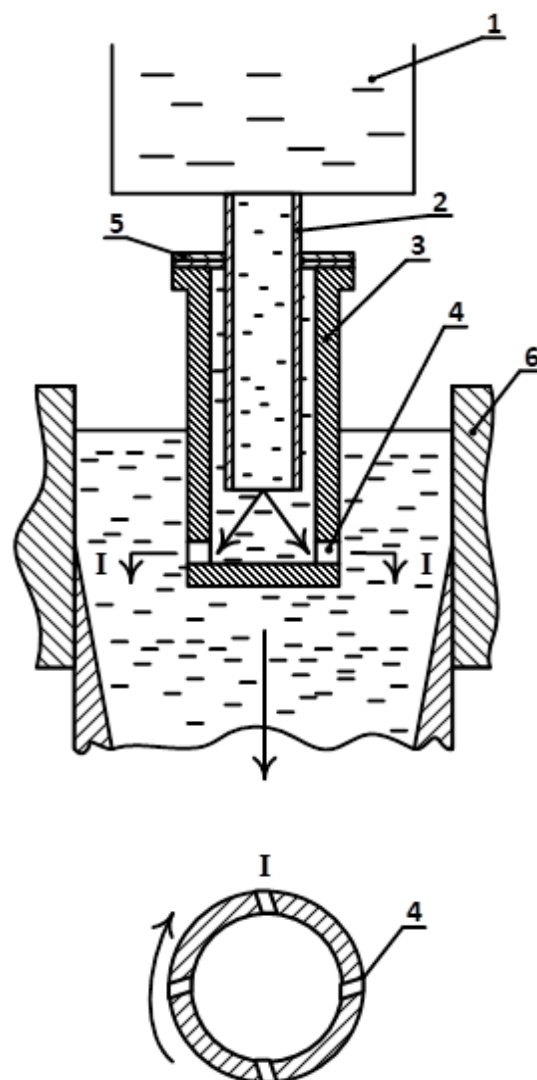


Рис. 2. Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки

Недостаток данного устройства заключается в большей стоимости электромагнитной установки и необходимой экологической защите обслуживающего персонала от электромагнитного излучения.

В целях повышения интенсивности перемешивания металла, а значит, получения однородности структуры кристаллизующегося металла и повышения условий безопасности работы обслуживающего персонала предложена совершенно новая конструкция устройства для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе [5].

На рис. 2 приведён внешний вид нового устройства, которое состоит из разливочного ковша 1 с погружным прямоточным стаканом 2, плавающего глуходонного погружного стакана 3 с



криволинейными выходными отверстиями 4, накладных разъёмных шайб 5, вертикального кристаллизатора 6.

Прямоточный погружной стакан вставлен с зазором в плавающий глухонный стакан, имеющий криволинейные окна для выхода жидкого металла в вертикальный кристаллизатор. При выходе жидкой стали из плавающего глухонного стакана в вертикальный кристаллизатор создаётся реактивная сила, вращающая плавающий глухонный стакан вокруг прямоточного погружного стакана. При этом струи жидкой стали, выходящие из окон плавающего глухонного стакана, изменяя своё направление в горизонтальной плоскости, способствуют интенсивному перемешиванию стали в объёме вертикального кристаллизатора и равномерному омыванию в горизонтальной плоскости стенок вертикального кристаллизатора, что способствует получению однородной структуры кристаллизующейся стали при вытягивании непрерывной заготовки из вертикального кристаллизатора.

Вследствие того, что удельный вес керамики в 3 раза меньше удельного веса стали, керамический плавающий глухонный стакан будет по закону Архимеда удерживаться на плаву стали. Жидкая сталь, попадая в плавающий глухонный стакан из прямоточного погружного стакана, будет вытекать со скоростью, корреспондируемой со скоростью вытягивания непрерывного слитка из вертикального кристаллизатора через криволинейные окна, образуя реактивную силу, приводящую во вращение плавающий глухонный стакан. При вращении плавающего глухонного стакана струи жидкой стали, вытекающие из его окон, будут перемешивать металл в вертикальном кристаллизаторе и равномерно омывать его стенки в горизонтальном сечении. Такая конструкция заполнения вертикального кристаллизатора жидкой сталью, состоящая из плавающего глухонного и погружного прямоточного стаканов, значительно проще и дешевле, чем электромагнитное перемешивание.

Глубина погружения плавающего глухонного стакана в жидкую сталь определяется как самой массой плавающего глухонного стакана, так и массой накладных разъёмных шайб. Скорость выхода металла из окон плавающего глухонного стакана определяется исходя из скорости вытягивания слитка из вертикального кристаллизатора, площади сечения выходящего слитка и площади сечения окон плавающего глухонного стакана, из которых поступает сталь в вертикальный кристаллизатор.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Авторское свидетельство № 196254 RU, МПК B22D 11/10. Устройство для подачи жидкого металла в вертикальный кристаллизатор установки непрерывной разливки стали через погружной прямоточный стакан: № 2019128247; заявлено 12.03.2018; опубликовано 21.02.2020 / Одинокое В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А. – 5 с.
2. Авторское свидетельство № 1811972 СССР, МПК B22D 11/10 SU. Способ непрерывной разливки прямоугольных стальных слитков и устройство для его осуществления: № 4896933; заявлен 15.10.1990; опубликован 30.04.1993 / Стулов В.В., Гонтарев Ю.К., Николаев Г.А и др. – 3 с.
3. Герман, Э. Непрерывное литье / Э. Герман; пер. с нем. – М.: Госнаучтехиздат, 1961. – 814 с.
4. Шахов, С. И. Работа по применению электромагнитного перемешивания при непрерывной разливке стали / С. И. Шахов, А. С. Смоляков, Ю. М. Рогачиков // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2015. – № 10. – С. 79-84.
5. Заявка на изобретение № 2020108729. Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки: заявлено 27.02.2020 / Одинокое В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Кузнецов С. А., Горнаков А. И., Александров С. Ю. Положительное решение на выдачу патента РФ на изобретение 24.11.2020.

**Феоктистов С. И., Марьин С. Б.**  
**S. I. Feoktistov, S. B. Maryin**

**ПРИБЛИЖЁННОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛА МЕТОДОМ ПАРАБОЛ В КАЖДОЙ  
УЗЛОВОЙ ТОЧКЕ ПОДЫНТЕГРАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ**

**APPROXIMATE CALCULATION OF THE INTEGRAL BY THE METHOD OF PARABOLAS  
AT EACH NODAL POINT OF THE INTEGRAND**

**Феоктистов Сергей Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиационное» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: serg\_feo@mail.ru.

**Sergey I. Feoktistov** – Doctor of Engineering, Professor, Aircraft Building Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: serg\_feo@mail.ru.

**Марьин Сергей Борисович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Авиационное» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(4217)24-11-90. E-mail: as@knastu.ru.

**Maryin Sergey Borisovich** – Doctor of Engineering, Head of Department «Aircraft Industry», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(4217)24-11-90. E-mail: as@knastu.ru.

**Аннотация.** В работе рассмотрен вывод формулы, позволяющей получать приближённое значение интеграла в каждой точке изменения аргумента подынтегральной функции, что даёт возможность проводить кратное интегрирование методом парабол без увеличения шага разбиения области интегрирования.

**Summary.** In this paper, we consider the derivation of a formula that allows us to obtain an approximate value of the integral at each point of change in the argument of the integrand, which makes it possible to perform multiple integration using the parabola method without increasing the step of splitting the integration domain.

**Ключевые слова:** численное интегрирование, метод парабол, кратное интегрирование.

**Key words:** numerical integration, parabola method, multiple integration.

УДК 519.6

В вычислительной технике широко используются две формулы для приближённого вычисления интеграла: формула трапеций и формула парабол (формула Симпсона) [1].

При одинаковом шаге разбиения интервала интегрирования формула трапеций даёт большую погрешность, чем формула Симпсона. Однако формула Симпсона имеет существенный недостаток: она даёт значение интеграла не в каждой точке изменения аргумента подынтегральной функции, а через точку. Также необходимым условием является то, что количество интервалов разбиения области интегрирования должно быть чётным.

При решении многих задач механики сплошных сред необходимо знать значения интеграла в каждой точке изменения подынтегральной функции для проведения кратного интегрирования. В этом случае, как правило, вычисления проводят по формуле трапеций, но для уменьшения погрешности вычислений идут на увеличение числа интервалов разбиения, что в свою очередь увеличивает время, необходимое для расчётов.

Рассмотрим процесс интегрирования с целью получения формулы, аналогичной формуле Симпсона, но дающей значения интеграла в каждой точке изменения аргумента подынтегральной функции.

Определим значение интеграла в области  $[a, b]$  функции  $y = f(x)$ :

$$S_n = \int_a^b f(x) \cdot dx.$$

Разобьём область  $[a, b]$  на  $n$  элементарных отрезков одинаковой длины. Обозначим абсциссы точек деления через

$$a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{n-2} < x_{n-1} < x_n = b.$$

Таким образом, шаг численного интегрирования  $h$  определится выражением

$$h = \frac{b-a}{n} = x_k - x_{k-1}, \quad (1)$$

где  $k$  – номер произвольной точки разбиения области интегрирования.

Определим значения функции  $y = f(x)$  в каждой точке разбиения области интегрирования и обозначим их соответственно

$$y_0, y_1, y_2, \dots, y_{n-2}, y_{n-1}, x_n.$$

Проводя через три любые соседние точки кривой дугу квадратичной параболы, ось которой параллельна оси ординат, получим две элементарные трапеции, у которых криволинейной границей служит дуга параболы (см. рис. 1).

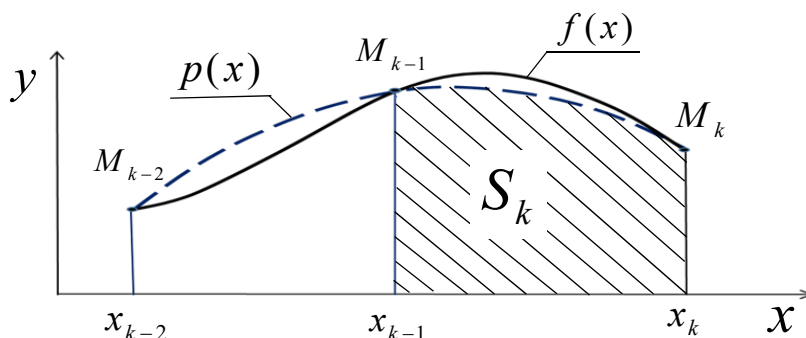


Рис. 1. Схема приближённого интегрирования

Три точки определяют единственную параболу  $y' = p(x) = a'x^2 + b'x + c'$ . Если  $M_{k-2}, M_{k-1}, M_k$  – три соседние точки кривой  $y = f(x)$ , то площадь трапеции  $S_k$ , ограниченной дугой параболы, определяется по формуле

$$S_k = \int_{x_{k-1}}^{x_k} (a'x^2 + b'x + c') dx.$$

Проводя интегрирование, получим

$$S_k = \frac{1}{6} [2a'(x_k^3 - x_{k-1}^3) + 3b'(x_k^2 - x_{k-1}^2) + 6c'(x_k - x_{k-1})],$$

или, после простых преобразований, имеем

$$S_k = \frac{(x_k - x_{k-1})}{6} [2a'(x_k^2 + x_k x_{k-1} + x_{k-1}^2) + 3b'(x_k + x_{k-1}) + 6c']. \quad (2)$$

Принимая во внимание, что  $(x_k - x_{k-1}) = h$  (см. выражение (1)), запишем полученную формулу в виде формулы Симпсона:

$$S_k = \frac{h}{6}(A y_k + B y_{k-1} + C y_{k-2}).$$

Учитывая, что  $y_k = y'_k$ , определяем значения  $y_k, y_{k-1}, y_{k-2}$  из уравнения параболы и, группируя, имеем

$$S_k = \frac{h}{6}[a'(Ax_k^2 + Bx_{k-1}^2 + Cx_{k-2}^2) + b'(Ax_k + Bx_{k-1} + Cx_{k-2}) + c'(A + B + C)]. \quad (3)$$

Сравнивая уравнения (2) и (3), можно сделать вывод, что они тождественны в том случае, если выражения, стоящие при  $a', b', c'$ , равны, то есть

$$\begin{cases} Ax_k^2 + Bx_{k-1}^2 + Cx_{k-2}^2 = 2x_k^2 + 2x_kx_{k-1} + 2x_{k-1}^2; \\ Ax_k + Bx_{k-1} + Cx_{k-2} = 3x_k + 3x_{k-1}; \\ A + B + C = 6. \end{cases} \quad (4)$$

Учитывая, что мы делим область интегрирования  $[a, b]$  на  $n$  равных частей, имеем

$$x_{k-1} = \frac{x_k + x_{k-2}}{2}$$

или

$$x_{k-2} = 2x_{k-1} - x_k. \quad (5)$$

Подставляя выражение (5) в первое уравнение системы (4) и проведя группирование, получим

$$(A + C)x_k^2 - 4Cx_kx_{k-1} + (B + 4C)x_{k-1}^2 = 2x_k^2 + 2x_kx_{k-1} + 2x_{k-1}^2. \quad (6)$$

Из условия равенства правой и левой части выражения (6) получим систему трёх уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} A + C = 2; \\ 4C = -2; \\ B + 4C = 2. \end{cases} \quad (7)$$

Решая систему уравнений (7), определяем коэффициенты  $A, B$  и  $C$ :

$$A = 2,5; B = 4; C = -0,5.$$

Таким образом, получили формулу парабол для приближённого численного вычисления интеграла в интервале  $[x_{k-1}, x_k]$ , равном шагу интегрирования  $h$ :

$$S_k = \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx = \frac{h}{6}(2,5 y_k + 4 y_{k-1} - 0,5 y_{k-2}).$$

В интервале  $[x_0, x_1]$  этой формулой пользоваться нельзя, но можно показать, что в начале области интегрирования  $[a, b]$  площадь первого элемента определяется выражением

$$S_1 = \frac{h}{6}(2,5 y_0 + 4 y_1 - 0,5 y_2).$$

Окончательно составная формула парабол для приближённого вычисления интеграла в области интегрирования  $[a, b]$  будет иметь вид





$$S_n = \int_a^b f(x) dx = \frac{h}{6} \left[ (2,5 y_0 + 4 y_1 - 0,5 y_2) + \sum_{k=2}^n (2,5 y_k + 4 y_{k-1} - 0,5 y_{k-2}) \right]. \quad (8)$$

Если интервал  $[a, b]$  разбить на два равных отрезка и проинтегрировать, применяя формулу (8), то получим формулу Симпсона:

$$S_{1,2} = \int_a^b f(x) dx = \frac{h}{3} (y_0 + 4 y_1 + y_2),$$

что подтверждает правильность сделанных выводов.

Формула (8) позволяет численно определить приближённое значение интеграла в каждой точке изменения аргумента подынтегральной функции в области  $[a, b]$  с шагом  $h$ , что даёт возможность использовать полученные результаты для кратного численного интегрирования с тем же шагом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мак-Кракен, Д. Численные методы и программирование на ФОРТРАНе / Д. Мак-Кракен, У. Дорн. – М.: Мир, 1977. – 584 с.

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ



Ректорат и коллектив Комсомольского-на-Амуре государственного университета, редакция журнала «Учёные записки КНАГТУ» глубоко скорбят по поводу кончины доктора технических наук, профессора Тихоокеанского государственного университета

**КЛЕПИКОВА СЕРГЕЯ  
ИВАНОВИЧА**  
(18.02.1948 – 23.11.2020)

В своей научно-педагогической деятельности профессор С. И. Клепиков тесными узами был связан и с нашим университетом. Он первым защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора технических наук в диссертационном совете университета. Оказывал организационно-методическую и консультационную помощь в постановке и становлении специальности «Метрология и стандартизация». Был постоянным и активным автором в работе журнала «Учёные записки КНАГТУ».

Мы потеряли известного учёного, прекрасного педагога, талантливого организатора, преданного коллегу и товарища.

Светлая память о нём надолго останется в нашей памяти.

*Коллектив университета  
Ректорат  
Редакция журнала*

УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ:  
НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ 2020

**ЭНЕРГЕТИКА**

**Шаломов В. И.**

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОВЫШЕННЫХ ДОКРИТИЧЕСКИХ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА ДЛЯ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ЭНЕРГОБЛОКА МОЩНОСТЬЮ 200-250 МВт

**Лысов Н. А., Янченко А. В.**

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ В НЕБОЛЬШИХ ОБЪЁМАХ

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

**Жарикова Е. П., Трещев И. А., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л.**

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Стельмашук С. В.**

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ  
С УЧЁТОМ ВОЗМУЩАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

**Челухин В. А., Кружаев М. А., Пьей Зон Аунг, Абрамсон Е. В.**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР ДЕНЬ-НОЧЬ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ  
И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

**Ким К. И., Ким К. К., Вешкин В. В.**

ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ

**Иванов С. Н., Ким К. К., Приходченко О. В., Просолович А. А.**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
МОЩНОСТИ В СОВМЕЩЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

**Зайченко И. В., Гордин С. А., Егорова Ю. Г.**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ  
ОЦЕНКИ ЭРГОНОМИЧНОСТИ

**Дерюжкова Н. Е., Купова А. В., Соловьёв В. А.**

НЕЧЁТКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИМ ТИРИСТОРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ  
В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

**Дмитриева Т. Л., Уламбаяр Х.**

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ  
УСЛОВНО ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

**Черный С. П., Бузикаева А. В., Тимофеев А. К., Енин Э. Д., Шестаков М. И.**

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
С КОМБИНИРОВАННЫМ ВНУТРЕННИМ КАСКАДОМ

**Афанасьева Ю. И., Рыбаков А. В., Шурпо А. Н.**

ОРГАНИЗАЦИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ  
В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

**Болдырев В. В., Горькавый М. А.**

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМОЙ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ



**Бузикаева А. В., Черный С. П., Суздорф В. И.**

СИНТЕЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Власьевский С. В., Лыткина Е. М., Федоренко А. И.**

УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРАМИ МОСТОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ  
СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ИХ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

**Егоров В. А., Егорова Ю. Г., Плотников Е. В.**

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ  
С УПРОЩЁННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

**Горелик В. А., Золотова Т. В.**

ВСТРОЕННЫЙ МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ В РЕГРЕССИОННОМ АНАЛИЗЕ  
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К ПОСТРОЕНИЮ ТРЕНДОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

**Ким К. И., Ким К. К., Вешкин В. В.**

МЕТОД РАСЧЁТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ АСИНХРОННОЙ МАШИНОЙ

**Левицкий Е. Е., Власьевский С. В.**

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ  
В АППАРАТЕ ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА

**Ким К. К., Просолович А. А., Иванов С. Н.**

АЛГОРИТМ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА  
В СОВМЕЩЁННОМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ УСТРОЙСТВЕ

**Стедьмашук С. В., Аминов К. С.**

ЭЛЕКТРОПРИВОД С КОМПЕНСАЦИЕЙ СТАТИЧЕСКОГО МОМЕНТА

**Челухин В. А., Кружаев М. А., Пьей Зон Аунг, Абрамсон Е. В.**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ОТКЛОНЕНИЯ РАЗНОСТИ МЕЖДУ МИНИМАЛЬНЫМ  
И МАКСИМАЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

**Андрианов И. К.**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ШТАМПОВ  
В УСЛОВИЯХ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ ШТАМПОВКИ

**Гордин С. А., Гринкруг М. С., Зайченко И. В.**

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДУТЬЁМ  
ТВЁРДОТОПЛИВНЫХ КОТЛОВ

**Каблуков А. В.**

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЛИНЕЙНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ.  
ОБЗОР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ ПО ВОПРОСУ

**Ким К. И., Ким К. К.**

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМЕ НАБРОСА НАГРУЗКИ

**Марченко Н. М.**

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В MATLAB

**Подшивалова К. А.**

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИЙ  
НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ В ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ



**Власьевский С. В., Скорик В. Г., Супрун Д. А., Буняева Е. В., Блажнов А. И.**

СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СИЛОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЭЛЕКТРОВОЗА  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ТЯГИ

**Столяров В. Я.**

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПОДГОТОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ИДЕНТИФИКАТОРОВ ПЕРЕД РАСПОЗНАВАНИЕМ

**Афанасьева Ю. И., Рыбаков А. В., Шурпо А. Н.**

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
«УМНЫХ СИСТЕМ»

**Ким К. К., Панычев А. Ю., Иванов С. Н.**

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННОЙ МАШИНЕ МАЛОИНЕРЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**Соловьев В. А., Урасов Д. В.**

АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЗАДАЮЩЕГО СИГНАЛА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ВОДЫ  
ЗОНЫ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

**Колесник М. Б., Колошенко Ю. Б., Просолович А. А.**

АНАЛИЗ СОВМЕСТИМОСТИ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗРЕДУКТОРНЫМ  
ПРИВОДОМ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА

**Муллер Н. В., Младова Т. А.**

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ПОМОЩЬЮ ФРАКТАЛЬНОГО  
И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

**Сухоруков С. И., Черный С. П., Мешков А. С., Киба Д. А.**

КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО  
КОМПЛЕКСА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

**Беляев А. С., Тырышкин А. В., Филипас А. А.**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПОРНОГО АКТИВНОГО ОБЕЗВЕШИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ MATLAB SIMULINK

**Гринкруг М. С., Новгородов Н. А.**

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ  
С УЧЁТОМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЕЁ НАГРУЗКИ

**Стельмашук С. В., Челухин В. А.**

СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОДНОТИПНЫМИ ОБЪЕКТАМИ БЕЗ УЧЁТА ПЕРЕКРЁСТНЫХ СВЯЗЕЙ  
МЕЖДУ СЕПАРАТНЫМИ КАНАЛАМИ

**Бормотин К. С., Герасимов К. Е., Романютин М. И.**

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
ПАНЕЛЕЙ ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ

**Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.**

ЭКСПЕРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
НА НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЕЛЕЯ-ТЕЙЛОРА

**Бузикаева А. В., Черный С. П.**

АНАЛИЗ МНОГОКАСКАДНЫХ НЕЧЁТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ СУГЕНО И МАМДАНИ  
ВО ВНЕШНЕМ КАСКАДЕ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА





## **МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА**

**Феоктистов С. И., Марьин С. Б.**

ПРИБЛИЖЁННОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛА МЕТОДОМ ПАРАБОЛ В КАЖДОЙ УЗЛОВОЙ ТОЧКЕ ПОДЫНТЕГРАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ

## **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

**Сарилов М. Ю., Палкин Д. А., Минаков М. В.**

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБОЯ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

**Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Буравицын Д. А.**

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КОМПОНОВОК МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ РЕКОНФИГУРИРОВАНИЯ

**Самар Е. В.**

ВЛИЯНИЕ СМАЗКИ НА КОНТАКТНО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

**Космынин А. В., Хвостиков А. С., Щетинин В. С., Смирнов А. В.**

О ТЕОРИИ ГАЗОВОЙ СМАЗКИ И ОДНОЙ ЕЁ ЗАДАЧЕ

**Максимов Е. А.**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДИСКА КОЛЕСА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

**Отряскина Т. А., Хортик М. В.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРЕНИИ

**Сарилов М. Ю., Копылов А. И.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Иванов С. Н., Колесник М. Б., Макаренко В. А., Фискова Т. К.**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В ПЕРЕДАТОЧНЫХ МЕХАНИЗМАХ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

**Космынин А. В., Щетинин В. С., Саблин П. А.**

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ ПОСРЕДСТВОМ ВНЕДРЕНИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ЗВЕНЬЕВ В СИСТЕМУ СТАНОЧНЫХ СИСТЕМ

**Отряскина Т. А., Кравченко Е. Г.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИИ

**Саблин П. А., Щетинин В. С.**

ВЫСОТА МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ И ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ – КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Ермаков М. А., Дорофеев С. Н., Войнов А. Р., Дзюба Г. С., Щекин А. В.**

ВЛИЯНИЕ ИТТРИЯ НА СТРУКТУРУ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ФАЗ ХРОМИСТОГО БЕЛОГО ЧУГУНА

**Дзюба Г. С., Щекин А. В., Войнов А. Р., Дорофеев С. В., Помазков В. А.**

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЛЕГИРОВАННОЙ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ



**Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одинокое В. И., Иванкова Е. П., Усанов Г. И., Петров В. В.**  
РАЗРАБОТКА НОВЫХ СТРУКТУР МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ  
ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

**Ри Хосен, Ри Э. Х., Живетьев А. С., Ким Е. Д.**  
СИНТЕЗ КОМПОЗИТНЫХ ПОРОШКОВ КАРБИДА И БОРИДА ВОЛЬФРАМА  
ИЗ ШЕЕЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА ДВ-РЕГИОНА

**Александров С. Ю., Хусаинов А. А.**  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ПО ПОДАЧЕ И ПЕРЕМЕШИВАНИЮ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА  
В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО РАЗЛИВА СТАЛИ

#### **МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ**

**Башков О. В., Кхун Хан Хту Аунг**  
ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ  
И ВНУТРИ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ

**Шакирова О. Г.**  
НОВЫЕ КООРДИНАЦИОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ЖЕЛЕЗА(II) С ТРИС(ПИРАЗОЛ-1-ИЛ)МЕТАНОМ  
И КАЛИКС[4]АРЕНАМИ/ РЕЗОРЦИНАРЕНАМИ: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ  
СПИН-КРОССОВЕР И ТЕРМОХРОМИЗМ

**Ри Хосен, Ри Э. Х., Живетьев А. С., Дзюба Г. С., Щекин А. В.**  
ЗАВИСИМОСТЬ ТВЁРДОСТИ И МИКРОТВЁРДОСТИ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ОЛОВЯННОЙ  
БРОНЗЫ ОТ ВЕЛИЧИНЫ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК (CU-CA, CD, ZR, AL-TI-B)

# Содержание

## УПРАВЛЕНИЕ, ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Соловьев В. А., Урасов Д. В.

АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЗАДАЮЩЕГО СИГНАЛА СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ВОДЫ ЗОНЫ ВТОРИЧНОГО  
ОХЛАЖДЕНИЯ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ..... 4

Колесник М. Б., Колошенко Ю. Б., Просолович А. А.

АНАЛИЗ СОВМЕСТИМОСТИ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ  
БЕЗРЕДУКТОРНЫМ ПРИВОДОМ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА ..... 14

Муллер Н. В., Младова Т. А.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ПОМОЩЬЮ  
ФРАКТАЛЬНОГО И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ..... 20

Сухоруков С. И., Черный С. П., Мешков А. С., Кибя Д. А.

КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ  
ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ..... 26

Беляев А. С., Тырышкин А. В., Филипас А. А.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПОРНОГО АКТИВНОГО  
ОБЕЗВЕШИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ MATLAB SIMULINK ..... 34

Гринкруг М. С., Новгородов Н. А.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬНЫМИ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ С УЧЁТОМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЕЁ НАГРУЗКИ ..... 42

Степьмащук С. В., Челухин В. А.

СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОДНОТИПНЫМИ ОБЪЕКТАМИ  
БЕЗ УЧЁТА ПЕРЕКРЁСТНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ СЕПАРАТНЫМИ КАНАЛАМИ ..... 48

Бормотин К. С., Герасимов К. Е., Романютин М. И.

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПАНЕЛЕЙ ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ ..... 59

Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.

ЭКСПЕРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
НА НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЕЛЕЯ-ТЕЙЛОРА ..... 70

Бузикаева А. В., Черный С. П.

АНАЛИЗ МНОГОКАСКАДНЫХ НЕЧЁТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ СУГЕНО  
И МАМДАНИ ВО ВНЕШНЕМ КАСКАДЕ ДЛЯ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ..... 76

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Отряскина Т. А., Кравченко Е. Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИИ ..... 85

Саблин П. А., Щетинин В. С.

ВЫСОТА МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ И ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ –  
КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ..... 90

Ермаков М. А., Дорофеев С. Н., Войнов А. Р., Дзюба Г. С., Щекин А. В.

ВЛИЯНИЕ ИТТРИЯ НА СТРУКТУРУ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ  
ФАЗ ХРОМИСТОГО БЕЛОГО ЧУГУНА ..... 95

Дзюба Г. С., Щекин А. В., Войнов А. Р., Дорофеев С. В., Помазков В. А.

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ  
ЛЕГИРОВАННОЙ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ..... 100

Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одинокое В. И., Иванкова Е. П.,

Усанов Г. И., Петров В. В.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ СТРУКТУР МНОГОСЛОЙНЫХ  
ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ ..... 104

Ри Хосен, Ри Э. Х., Живетьев А. С., Ким Е. Д.

СИНТЕЗ КОМПОЗИТНЫХ ПОРОШКОВ КАРБИДА И БОРИДА ВОЛЬФРАМА  
ИЗ ШЕЕЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА ДВ-РЕГИОНА ..... 108

Александров С. Ю., Хусаинов А. А.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ПО ПОДАЧЕ И ПЕРЕМЕШИВАНИЮ ЖИДКОГО  
МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО РАЗЛИВА СТАЛИ ..... 113

## МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Феокистов С. И., Марьин С. Б.

ПРИБЛИЖЁННОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛА МЕТОДОМ ПАРАБОЛ  
В КАЖДОЙ УЗЛОВОЙ ТОЧКЕ ПОДЫНТЕГРАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ..... 117

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ ..... 121

УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ: НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ 2020 ..... 122

Научное издание

Учёные записки КНАГТУ  
2020 № VII-1(47)  
Науки о природе и технике

Выпускающий редактор  
С. Н. Иванов

Подписано в печать 25.12.2020  
Дата выхода в свет 28.12.2020

Формат А4.  
Бумага офисная 80 г/м<sup>2</sup>.  
Усл. печ. л. 13,63.  
Уч.-изд. л. 17,18.  
Тираж 200. Заказ 30188.

Отпечатано в типографии  
КНАГУ  
681013,  
г. Комсомольск-на-Амуре,  
пр. Ленина, д. 27.



