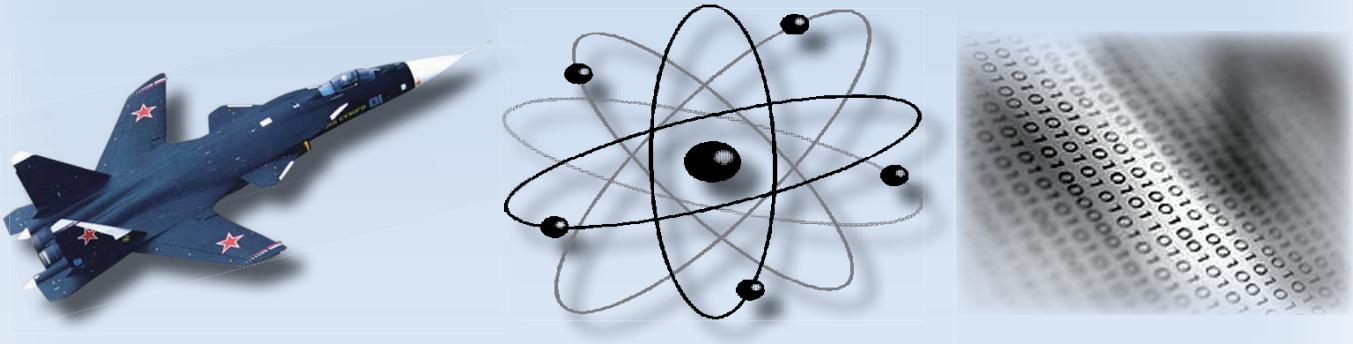


ISSN 2076-4359
Учёные записки № III-1 (39)
2019

Учёные записки

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Учёные записки КнАГТУ 2019 № III-1 (39)

Рукописи проходят обязательное рецензирование.
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

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

ISSN 2076-4359 = Ученые записки Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, прсылайте свои материалы по адресу электронной почты:
journal@knastu.ru

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

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

Адрес учредителя и редакции:
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
ул. Комсомольская, д. 50, ауд. 508

Телефон для справок: (4217) 201082

Подписаться на журнал можно в любом отделении Почты России; индекс журнала в каталоге Роспечати: 66090.

Цена свободная.

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

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

Журнал основан в 2010 году

Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала: **Алексей Иванович Евстигнеев**, доктор технических наук, профессор
Заместитель главного редактора журнала, главный редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре» **Илья Игоревич Докучаев**, доктор философских наук, профессор
Ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре» **Татьяна Анатольевна Яковleva**, кандидат экономических наук, доцент
Ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике» **Владислав Викторович Куриный**, кандидат технических наук, доцент
Литературный редактор: **Александр Альфредович Шунайко**, доктор филологических наук, доцент
Корректор: **Оксана Геннадьевна Реброва**
Технический редактор: **Анатолий Андреевич Раку**
Администратор сайта: **Анатолий Андреевич Раку**
Перевод на английский язык: **Галина Алексеевна Шушарина**

Серия: «Науки о природе и технике»

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (**Сергей Иванович Феоктистов**, доктор технических наук, профессор)
2. Энергетика (**Сергей Николаевич Иванов**, доктор технических наук, профессор)
3. Управление, вычислительная техника и информатика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, доктор технических наук, профессор, **Сергей Иванович Феоктистов**, доктор технических наук, профессор, **Сергей Николаевич Иванов**, доктор технических наук, доцент, **Николай Алексеевич Тарануха**, доктор технических наук, профессор, **Анатолий Александрович Буренин**, доктор технических наук, профессор)
4. Математика и механика (**Анатолий Александрович Буренин**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН)
5. Машиностроение (**Михаил Юрьевич Сарилов**, доктор технических наук, доцент, **Борис Николаевич Марьин**, доктор технических наук, профессор, **Анатолий Михайлович Шпилев**, доктор технических наук, профессор, **Сергей Иванович Феоктистов**, доктор технических наук, профессор, **Анатолий Александрович Буренин**, доктор технических наук, профессор)
6. Металлургия и металловедение (**Борис Николаевич Марьин**, доктор технических наук, профессор)
7. Флот и кораблестроение (**Николай Алексеевич Тарануха**, доктор технических наук, профессор)
8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (**Ирина Павловна Степанова**, доктор технических наук, профессор)
9. Строительство и архитектура (**Николай Петрович Крадин**, доктор архитектуры, профессор, член-корреспондент РААСН)

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:

1. Философия, социология и культурология (**Татьяна Алексеевна Чабанюк**, доктор культурологии, профессор, **Виктория Юрьевна Прокофьева**, доктор филологических наук, профессор, **Вера Ивановна Юдина**, доктор культурологии, доцент, **Надежда Юрьевна Костюрина**, доктор культурологии, доцент, **Илья Игоревич Докучаев**, доктор философских наук, профессор)
2. Филология и искусствознание (**Олег Александрович Бузуев**, доктор филологических наук, профессор)
3. Психология и педагогика (**Татьяна Евгеньевна Наливайко**, доктор педагогических наук, профессор)
4. Политология и право (**Владимир Александрович Смоляков**, доктор политических наук, доцент)
5. История (**Жанна Валерьевна Петрунина**, доктор исторических наук, профессор)
6. Экономика (**Виктор Владимирович Литовченко**, доктор экономических наук, профессор)

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

Содержание

Энергетика

- Громов А. А., Колякин В. Л., Толочкин А. С.
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ АВТОНОМНЫХ УСТАНОВОК.....4
Мирошниченко А. А., Кулганатов А. З., Гордиевский Е. М., Ковалев А. А., Соломин Е. В.
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ РОССИИ.....10

Управление, вычислительная техника и информатика

- Александров И. А.
ВЗАИМОСВЯЗЬ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ С ПОЗИЦИИ КОНЦЕПЦИИ ДОСТИЖЕНИЯ ИЗДЕЛИЕМ ЦЕЛЕВЫХ СВОЙСТВ ПУТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ19
Сочелев А. Ф.

- МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМ КАНАЛОМ**27
Бердоносов В. Д., Журавлев Д. О., Зау Хтет Наинг
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ БПЛА38

- Гусеница Я. Н., Шерстобитов С. А.
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ФОРМАЛИЗАЦИИ АДЕКВАТНОСТИ ИНФОРМАЦИИ48
Жарикова Е. П., Трешев И. А., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л.

- ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ**58
Олещук В. А., Раджабов Д. У.
ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА64
Рыбаков А. В., Евдокимов С. А., Краснов А. А., Шептунов С. А., Шурпо А. Н.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ В КОМПЬЮТЕРНОЙ СРЕДЕ

- 68
Машиностроение
Иванов С. Н., Ким К. К., Сарилов М. Ю.
РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ ПРИВОДА ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ75

Металлургия и материаловедение

- Бахматов П. В., Москаева А. В., Старцев Е. А., Усанов Г. И.
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ФЛЮСА OK FLUX 10.71 И ПРОВОЛОКИ 12-22 ДЛЯ СВАРКИ ДВУХСТОРОННИХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ81
Полянская И. Л., Белова Л. В., Землянова О. В.
ПРЕВРАЩЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СТАЛИ 95Х18Ш96
Сарилов М. Ю., Решетник У. Е.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ101
Ситамов Э. С., Мокрицкий Б. Я., Шакирова О. Г.
ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТВЁРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ109

Научное издание

Учёные записки КнАГТУ
2019 № III-1(39)
Науки о природе и технике

Выпускающий редактор
Н.Ю. Костюрина

Подписано в печать 30.09.2019
Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 13,63.
Уч.-изд. л. 17,18.
Тираж 200. Заказ 29835.

Отпечатано в типографии
КнАГУ
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27.

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

СЕРИЯ: «НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ»

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦҮЙ СЮЙ, профессор Шенъянского аэрокосмического университета (КНР)

ЭНЕРГЕТИКА

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

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

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

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

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

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

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

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

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

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

МАШИНОСТРОЕНИЕ

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

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

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

МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

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

КОНСТАНТИН ВСЕВОЛОДОВИЧ ГРИГОРОВИЧ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией диагностики материалов Института 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 ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

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

СЕРИЯ: «НАУКИ О ЧЕЛОВЕКЕ, ОБЩЕСТВЕ И КУЛЬТУРЕ»

ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ

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

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

ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОЗНАНИЕ

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

ЭНЕРГЕТИКА ENERGETICS

Громов А. А., Колякин В. Л., Толочкин А. С.
A. A. Gromov, V. L. Kolyakin, A. S. Tolochkin

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ АВТОНОМНЫХ УСТАНОВОК

POWER SUPPLY SYSTEMS ON THE BASIS OF STAND-ALONE INSTALLATIONS

Громов Александр Александрович – магистрант кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: +7 (914) 165-96-69. E-mail: gromoff_87@mail.ru.

Mr. Alexander A. Gromov – Master's degree student, Electrical engineering department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: +7 (914) 165-96-69. E-mail: gromoff_87@mail.ru.

Колякин Виктор Леонидович – магистрант кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: +7 (914) 779-43-36. E-mail: Kolyakin-82@mail.ru.

Mr. Viktor L. Kolyakin – Master's degree student, Electrical engineering department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: +7 (914) 779-43-36. E-mail: Kolyakin-82@mail.ru.

Толочкин Антон Сергеевич – магистрант кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: +7 (914) 160-80-09; +7 (999) 083-01-53. E-mail: anton_tolochkin@mail.ru.

Mr. Anton S. Tolochkin – undergraduate Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: +7 (914) 160-80-09; +7 (999) 083-01-53. E-mail: anton_tolochkin@mail.ru.

Аннотация. Разработка автономных систем электроснабжения на базе современных аппаратно-программных позволяет существенно повысить показатели качества электроэнергии. Проведено исследование возможностей теоретической базы, обеспечивающей создание и исследование структурированных моделей систем электроснабжения. В статье рассмотрены примеры формирования элементной базы системы электроснабжения на основе различных источников первичной электроэнергии. Показано, что эффективность систем электроснабжения в большинстве случаев может быть рассчитана на основе частных показателей качества процессов генерации, транспортирования и потребления электроэнергии. Сформулированы требования обеспечения системных параметров электроснабжения с учётом реальных параметров основных нагрузок. Показана целесообразность использования комбинированных установок с использованием современных информационно-коммуникационных технологий для контроля, мониторинга и оценки определяющих параметров и режимов работы систем электроснабжения при эксплуатации.

Summary. Development of Autonomous power supply systems based on modern hardware and software can significantly improve the quality of electricity. The study of the possibilities of the theoretical basis for the creation and study of structured models of power supply systems. The article considers examples of the formation of the element base of the power supply system based on various sources of primary electricity. It is shown that the efficiency of power supply systems in most cases can be calculated on the basis of specific indicators of the quality of the processes of generation, transportation and consumption of electricity. Requirements of providing system parameters of power supply taking into account real parameters of the main loadings are formulated. The expediency of use of combined installations with use of modern information and communication technologies for control, monitoring and an assessment of defining parameters and modes of operation of power supply systems at operation is shown.

Ключевые слова: фотоэлектрическая установка, микроГЭС, совмещённые энергетические системы.

Key words: photovoltaic plant, micro hydro power station, combined energy systems.

УДК 621.311.22:697.34

В последние десятилетия в мировой энергетике произошли существенные структурные изменения за счёт развития возобновляемых источников электроэнергии. Это связано не только с общими тенденциями развития электроэнергетики, но и проблемой обеспечения энергией потребителей, удалённых от централизованной энергосистемы. Подключение таких потребителей к централизованной энергосистеме во многих случаях нецелесообразно. Это связано со значительной удалённостью, рассредоточенностью и труднодоступностью объектов, нуждающихся в обеспечении энергией. Особенно остро эта проблема проявляется в северных регионах, для которых целесообразно применение автономных систем энергообеспечения. Использование автономных источников в распределённых системах позволяет значительно ослабить зависимость потребителей от централизованного электроснабжения, снизить нагрузку на окружающую среду в процессе строительства и на этапе эксплуатации.

В настоящее время данные системы обладают большим разнообразием, и их исследованию посвящено большое количество работ [5; 6; 9]. Подобные системы обладают рядом очевидных недостатков, главным из которых является их дороговизна и необходимость постоянных поставок топлива к труднодоступным объектам, что делает экономически целесообразным применение фотоэлектрических установок, ветро- и микроГЭС и их комбинаций.

По данным, содержащимся в работе [7], в настоящее время доля использования фотоэлектрических панелей (см. рис. 1) в мировой энергетике составляет 1,1 %.

Прирост мощности в 2015 году составил около 50 ГВт, в 2016-м – примерно 77 ГВт, в 2017-м – 99 ГВт, а в 2018-м – 109 ГВт. На данный момент суммарная мощность солнечных фотоэлектроустановок составляет примерно 500 ГВт (см. рис. 2).

Мониторинг развития альтернативной энергетики по отдельным странам [10] показывает, что наша страна занимает слабую позицию на фоне мировых разработчиков и потребителей автономных установок для генерации электроэнергии, в которых развитию возобновляемых источников энергии уделяется значительная часть внимания (см. рис. 3).

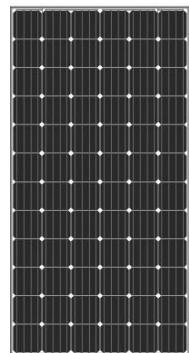


Рис. 1. Фотоэлектрическая панель

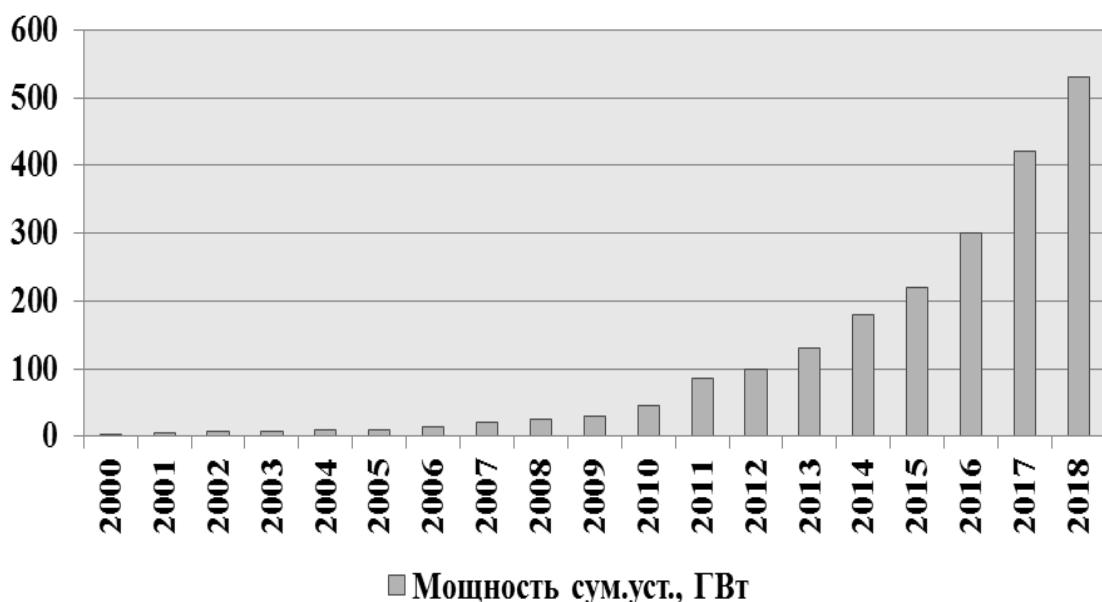


Рис. 2. Динамика суммарной мощности солнечных фотоэлектроустановок

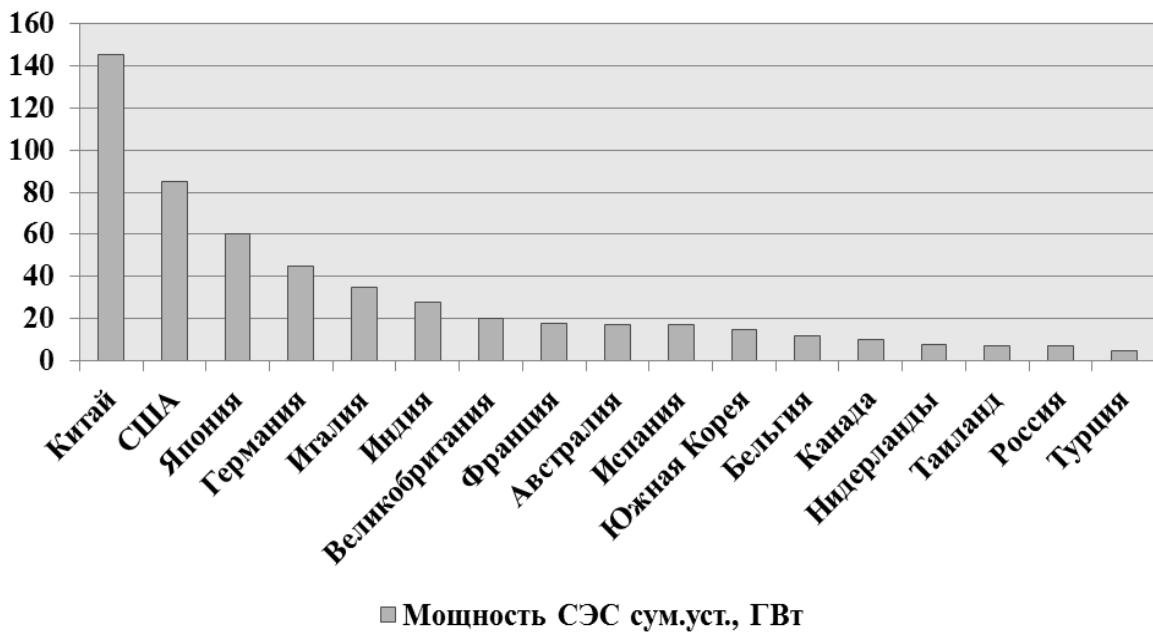


Рис. 3. Суммарная мощность солнечных электростанций по странам мира

Одним из наиболее перспективных объектов реализации является внедрение солнечных фотоэлектрических панелей в качестве систем электроснабжения жилых зданий и помещений. Данная система должна обладать такими свойствами, как аккумулирование электрической энергии, синхронизация с основной бытовой однофазной сетью. Таким образом, перед разработчиками стоит первостепенная задача создания распределённой системы электроснабжения.

Решением данной задачи является обеспечение требований технических параметров и характеристик, заложенных в действующем базовом стандарте ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [3; 4]. При этом важным фактором является расчётное соотношение между потреблённой электроэнергией, общей генерацией и автономным источником.

Такой фактор иногда называется коэффициентом «самопотребления» и определяется по формуле

$$K_{cn} = \frac{E_{du} + E_{bc}}{E_{pv}},$$

где E_{du} – количество произведённой энергии, затраченной на потребителя; E_{bc} – количество произведённой энергии, затраченной на накопление заряда; E_{pv} – количество общей сгенерированной энергии.

Ещё одним критерием эффективности является коэффициент «самодостаточности», который определяется по формуле

$$K_{cd} = \frac{E_{du} + E_{bd}}{E_l},$$

где E_{du} – количество произведённой энергии, использованной напрямую через нагрузку или заряд и последующий разряд накопителя E_{bd} ; E_l – суммарная годовая нагрузка.

Проектирование и реализация фотоэлектрических установок включает несколько этапов: мониторинг современного опыта эксплуатации фотоэлектрических модулей и определение перспективных направлений их дальнейшей разработки; повышение эффективности процессов энергетического обмена между общей генерацией и автономной системой, например, с использованием автоматизированной системы управления на базе программируемых логических контроллеров семейства ABB; имитационное моделирование совмещённой системы электроснабжения и определение основных показателей качества электроэнергии.

Использование в децентрализованных системах электроснабжения на основе микроГЭС требует повышения эффективности, особенно в условиях мало- и мелководных низконапорных потоков, характерных для равнинных рек.

Микрогидрогенераторы (микроГЭС) могут обеспечивать электроэнергией удалённых от основных энергоресурсов потребителей, если качество электроэнергии соответствует существующим нормам [3; 4]. Возможность использования альтернативных источников электроэнергии в первую очередь требует учёта географических особенностей региона применения. Например, применение микроГЭС предполагает наличие водного ресурса, обеспечивающего требуемую разность высоты на озёрных сбросах воды, систем водоочисток, водоподготовки и различных трубопроводов. При наличии требуемой инфраструктуры задача повышения эффективности генерации сводится к выбору типа и конструкции источника, схемы управления и режимов работы установки.

В Российской Федерации большое применение наряду с малыми гидроэлектростанциями находят микроГЭС. Если малые имеют общую мощность до 30 МВт, то к микроГЭС относятся станциям мощностью до 100 кВт, при этом мощность единичного гидроагрегата достигает 10 МВт, а диаметр рабочего колеса гидротурбины – до 3 м. К категории микроГЭС относятся все гидроэлектростанции, которые строятся на равнинных реках и имеют энергетический потенциал, достигающий 2,0 МВт, и горных, где потенциал достигает 1,7 МВт.

Очевидные достоинства микроГЭС: генерация электроэнергии происходит от возобновляемого источника, более стабильного, чем солнечная и ветровая; минимум или полное отсутствие энергетических потерь на транспортировку; низкая стоимость электроэнергии; минимальное воздействие на атмосферу и водные бассейны; выход на проектную мощность у малых гидроэлектростанций занимает меньше времени, чем у генераторов на жидким или газовом топливе.

Наряду с этим существует ряд недостатков: сезонная зависимость – русла небольших водотоков часто пересыхают летом и промерзают зимой; производительность микроГЭС связана с напором и расходом жидкости.

Особенностью таких установок является большое количество конструктивных исполнений, то есть могут строиться с использованием плотины плюс деривационного типа, предусматривающих создание напорных трубопроводов.

Достоинством бесплотинных малых гидроэлектростанций является относительно низкая стоимость и простота в монтаже и установке, не требующей согласования с государственными органами.

Общими недостатками всех малых гидроэлектростанций являются низкая удельная энергоизводительность (не более 5 кВт, чаще до 2 кВт), необходимость достаточного расстояния между берегами реки и глубины более полуметра, повреждения при столкновении с плавающими объектами, невозможность использования зимой при обледенении водоёма.

Наиболее интересными вариантами малых гидроэлектростанций являются гирляндные, рукавные, гравитационные (водоворотные) мини- и микроГЭС.

Гирляндные мини-ГЭС используют полуметровые крыльчатки пропеллеров, которые изготавливаются из оцинкованного металла толщиной 0,5...0,7 мм, нанизанных и закреплённых на приводном вале генератора – стальном тросе диаметром 10...15 мм. Трос закрепляется подшипниковым соединением на металлической стойке на одном берегу, а на другом крепится к валу ротора генератора. По расчётам разработчиков, при скорости течения порядка 2,5 м/с каждый гидроагрегат с гирляндной микроГЭС произведёт в среднем 1,5...2 кВт.

Недостатками гирляндных гидроэлектростанций являются высокая материалоёмкость, невысокий КПД, создание препятствий для движения по водной магистрали.

Рукавные микроГЭС разрабатываются с 70-х гг. XX века одновременно с гирляндными гидроэлектростанциями. Их преимущество заключается в возможности использования малых водоёмов – для выработки электроэнергии достаточным является водный поток с расходом, составляющим не менее 50 л/с и имеющим перепад высот более 5 м. Водозабор производится с помощью сужающегося трубопровода, широкий верх которого подведен к наиболее быстрой части течения, а в её нижней части расположена гидротурбина.

В 2003 году австрийский инженер Франц Цотлтерер запатентовал гравитационную (водоворотную) микроГЭС. Водоворотная микроГЭС базируется на проектах вихревых гидроэлектростанций, над которыми работали Кенард Браун и Пол Коурус. По сравнению с их разработками, имеющими КПД 35...40 %, Цотлтерер добился КПД, равного 76...80 %.

Водоворотная микроГЭС при перепаде высоты в 1,3 м и расходе воды 0,9 м³/с генерирует максимальную мощность 9,5 кВт, суммарная выработка электроэнергии за год порядка 35 МВт·ч. Благодаря постоянному вращению воды, гравитационно-вихревая гидроэлектростанция исправно работает в зимнее время – в центре воронки поток воды наиболее плотный, и его температура составляет примерно 4 °C, а формирующийся по периферии бетонного цилиндра лёд препятствует охлаждению воды в центре, экранируя тепло обратно в воду.

Недостатками водоворотной микроГЭС Цотлтерера является высокая стоимость, связанная с бетонными работами, и ограниченная единичная мощность, не превышающая 150 кВт.

Наряду с рассмотренными видами возобновляемых источников энергии отдельно следует выделить комбинированные установки обеспечения бесперебойного электроснабжения автономных объектов, уменьшения ёмкости аккумуляторных батарей. Для гибридных установок, в частности ветровых (ВЭУ) и солнечных, необходимо учитывать среднегодовую скорость ветра и солнечную активность [8]. Предварительно такое соотношение составляет 70...30 % (в процентном соотношении), при этом основной вклад приходится на ФЭС, так как среднегодовая ветровая нагрузка на территории расположения предварительно не превышает 3 м/с. Использование составных систем электроснабжения целесообразно, например, в качестве резервных для высококатегорийных потребителей (автономное электроснабжение объектов охраны и надзора [11]).

Необходимое количество солнечных панелей зависит от многочисленных факторов (климатических условий, времени года, технологических особенностей места установки, затенения и др.). Солнечная электрическая система должна вырабатывать такое количество электроэнергии, чтобы можно было круглосуточно покрывать потребности электроснабжения. При этом ВЭУ повышает надёжность системы автономного электроснабжения.

Ветроустановки с вертикальным ротором обладают рядом преимуществ для местностей с низкими скоростями ветра [1]. В частности, для начала движения ротора ветрогенератора достаточно малые начальные значения скорости ветра. Для отдельных моделей эти показатели начинаются уже с 0,3 м/с (следует учитывать, что для номинальной работы ветрогенератора необходимо движение воздушного потока со скоростью не менее 3...5 м/с).

Ветрогенератор с вертикальной осью, в отличие от горизонтальных конструкций, обладает низким уровнем шума, редко превышающего 18...20 дБ; работает независимо от направления движения воздушного потока. Конструкция вертикального ветряка способна улавливать ветер под любыми углами его атаки. Более подробная информация о ветрогенераторах приведена в работе [2].

Выходы

Рассмотренные системы электроснабжения на базе автономных установок позволяют повысить эффективность генерации, передачи и использования электроэнергии с заданными показателями качества. Выбор системы электроснабжения и её элементов, определяющих качество основных процессов, характеризующих эффективность систем электроснабжения, определяется технической базой, обеспечивающей возможность выбора, обоснования и использования автономных источников электроэнергии, средств контроля информационных потоков в объектах энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветрогенератор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vetrogenerator.ru/index.html> (дата обращения: 22.05.2019).
2. Ветрогенераторы с вертикальной осью вращения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ekopower.ru/vetrogeneratoryi-s-vertikalnoy-osyu-vrashheniya-rossiyskogo-proizvodstva/> (дата обращения: 22.05.2019).
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.
4. ГОСТ IEC 61000-4-30-2017. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-30. Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии. – Введ. 2018-12-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 55 с.
5. Лукутин, Б. В. Возобновляемые источники электроэнергии: учеб. пособие / Б. В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.
6. Обухов, С. Г. Микрогидроэлектростанции: курс лекций к магистерской программе «Возобновляемые источники энергии» / С. Г. Обухов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 63 с.
7. План мероприятий по стимулированию развития генерирующих объектов на основе возобновляемых источников энергии с установленной мощностью до 15 кВт (далее – микрогенерация ВИЭ) от 19.07.2017.
8. Энергия солнца и ветра [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mig-energo.ru/diod/> (дата обращения: 22.05.2019).
9. Ясинский, В. А. Современное состояние и перспективы развития малой гидроэнергетики / В. А. Ясинский. – М.: Алматы: Евразийский банк развития, 2011. – 36 с.
10. A Snapshot of global PV (1992–2017). Report IEA PVPS T1-33:2018 (ISBN 978-3-906042-72-5) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ieapvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS> (дата обращения: 15.06.2019).
11. Ivanov, S. Gearless Electromechanical Drive for Complex Security System of an Organization / S. Ivanov, S. Htike, A. V. Ulyanov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon – 2018, 4 January 2019.

Мирошниченко А. А., Кулганатов А. З., Гордиевский Е. М., Ковалёв А. А., Соломин Е. В.
A. A. Miroshnichenko, A. Z. Kulganatov, E. M. Gordievsky, A. A. Kovalyov, E. V. Solomin

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ РОССИИ

PROSPECTS FOR THE USE OF HYBRID WIND-SOLAR INSTALLATIONS FOR THE POWER SUPPLY OF AUTONOMOUS CONSUMERS IN RUSSIA

Мирошниченко Алексей Александрович – магистрант кафедры электрических станций сети и систем электроснабжения Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (Россия, Челябинск); 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. E-mail: alex.miroshnichenko@mail.ru.

Mr. Alexey A. Miroshnichenko – a master's degree student, Electric Power Generation and Supply department, South Ural State University (Russia, Chelyabinsk); 454080, Chelyabinsk, 76 Lenin str. E-mail: alex.miroshnichenko@mail.ru.

Кулганатов Аскар Зайдакбаевич – студент кафедры теоретических основ электротехники Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (Россия, Челябинск); 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. E-mail: kulganatov97@gmail.com.

Mr. Askar Z. Kulganatov – student, Theoretical Basics of Electrical Engineering department, South Ural State University (Russia, Chelyabinsk); 454080, Chelyabinsk, 76 Lenin str. E-mail: kulganatov97@gmail.com.

Гордиевский Евгений Михайлович – магистрант кафедры электрических станций сети и систем электроснабжения Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (Россия, Челябинск); 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. E-mail: gordievskiy@gmail.com.

Mr. Evgeny M. Gordievsky – a master's degree student, Electric Power Generation and Supply department, South Ural State University (Russia, Chelyabinsk); 454080, Chelyabinsk, 76 Lenin str. E-mail: gordievskiy@gmail.com.

Ковалёв Антон Александрович – магистрант кафедры электрических станций сети и систем электроснабжения Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (Россия, Челябинск); 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. E-mail: alpenglow305@yandex.ru.

Mr. Anton A. Kovalyov – a master's degree student, Electric Power Generation and Supply department, South Ural State University (Russia, Chelyabinsk); 454080, Chelyabinsk, 76 Lenin str. E-mail: alpenglow305@yandex.ru.

Соломин Евгений Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры электрических станций сети и систем электроснабжения Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (Россия, Челябинск); 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. E-mail: nii-uralmet@mail.ru.

Mr. Evgeny V. Solomin – doctor of Technical Sciences, professor, Electric Power Generation and Supply department, South Ural State University (Russia, Chelyabinsk); 454080, Chelyabinsk, 76 Lenin str. E-mail: nii-uralmet@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены перспективы использования комбинированных установок, работа которых основана на преобразовании энергии ветра и солнца. Приведена классификация, охватывающая три группы данных установок: автономные ветро-солнечные электростанции, установки для резервного энергообеспечения, сетевые ветро-солнечные электростанции. Авторы статьи детально проанализировали возможность использования комбинированных установок в таких важных отраслях национального хозяйства, как нефтегазовый сектор и сельское хозяйство. Результаты анализа применения комбинированных установок в нефтегазовом секторе показали, что сегодня их применение возможно только с целью энергоснабжения маломощных потребителей, которые являются вспомогательными для основного добывающего оборудования. В сельском хозяйстве возможность применения гибридных ветро-солнечных установок считается перспективной задачей, так как электроприёмники, находящиеся в сельской местности, как правило, являются маломощными и использование ветро-солнечной энергии для их электроснабжения, по сравнению с применением традиционной энергетики, является более целесообразным вариантом. Описана возможность применения мобильных гибридных установок.

Summary. In article the prospects of use of the combined installations which work is based on transformation of wind power and the sun are considered. Classification of these installations on three groups is given: autonomous vetro-solar power stations, installations for reserve power supply, network vetro-solar power stations. Authors of article in details analysed a possibility of use of the combined installations in such important industries of national economy as oil and gas the sector and agriculture. Results of the analysis of application of the combined installations in the oil and gas sector, showed that today application is possible only for power supply of low-power consumers who are auxiliary for the capital extracting equipment. In agriculture application hybrid the vetrosolnechnykh of installations, is considered a perspective task since the electroreceivers which are in rural areas as a rule are low-power, and use of vetrosonechny energy for their power supply, in comparison with application of traditional power is more expedient option. Also in article the possibility of application of mobile hybrid installations is described.

Ключевые слова: ветроэнергетика, солнечная энергетика, гибридные установки, автономные потребители.

Key words: wind power, solar power, hybrid installations, independent consumers.

УДК: 62

Введение

Стабильное и качественное энергообеспечение является одним из основных факторов социального и экономического развития. Глобальный спрос на ископаемые ресурсы постоянно растёт, что обусловлено, в первую очередь, высокими темпами экономического роста ряда развивающихся стран, к тому же запасы традиционных источников энергии истощаются, существующие ресурсы нередко расположены в немногочисленных, часто политически нестабильных регионах. Зачастую это сводится к возникновению политических конфликтов, учащению вооружённых столкновений, влекущих за собой значительный экономический риск для стран, зависящих от данных ресурсов. К тому же цены на такие ресурсы постоянно увеличиваются. Например, около 70 % мировых запасов нефти и газа находится на Ближнем и Среднем Востоке, а также в районе Каспийского моря [2].

Применение возобновляемых источников энергии позволит решить проблему, связанную с ухудшением общемировой климатической ситуации. Энергию солнца, ветра, подземного тепла, течения рек можно считать неисчерпаемой, и, несомненно, человечество будет более активно использовать её в будущем [8].

Ещё одной проблемой, особенно острой в России, является проблема энергоснабжения удалённых и децентрализованных потребителей. Располагая огромной территорией, централизованное электроснабжение задействовано только на 30 % площади страны. Территории Дальнего Востока, Сибири являются малонаселёнными, с рассредоточенными населёнными пунктами и неблагоприятными погодными условиями. В течение последних 25 лет продолжается отток населения из таких регионов. Неблагоприятным фактором стало упразднение более 10 тыс. поселений в России за последние 10 лет. Одни из основных причин такого положения – отсутствие надёжного энергоснабжения, удорожание органического топлива и его транспортировки к потребителю.

В условиях Российской Федерации в ближайшие 20–25 лет из-за особых климатических и географических особенностей (низкие температуры и протяжённые территории) и наличия больших запасов углеводородного топлива будет нецелесообразно строить крупные энергетические комплексы на возобновляемых источниках энергии. Но это не значит, что нашей стране нужно полностью отказываться от зелёной энергетики. Напротив, стратегически важным является внедрение ВИЭ там, где необходимо сохранить и приумножить сельское население, повысить привлекательность удалённых регионов наличием надёжной и своевременной энергии [14].

Установки, использующие только один источник чистой энергии, например ветер или солнце, целесообразно применять только в местах, где в значительной мере преобладает тот или иной источник. Но отсутствие солнца или ветра в первом или во втором случае может привести к перебоям в энергообеспечении. Решить данную проблему можно с помощью гибридных (комбинированных) систем.

В настоящее время эксплуатируются ветро-дизельные, ветро-солнечные, дизель-ветро-солнечные установки, в которых применяются два или три возобновляемых источника (иногда их называют дуплекс- и трио-системами). Теоретически возможно использование и большего числа источников исходя из условий местных возможностей (квадро (четырёх), пента (пяти), секстет (шести)) [1]. Авторами статьи рассмотрены ветро-солнечные установки ввиду сравнительно простого анализа относительно более сложных систем.

При разработке гибридной установки ключевой задачей является выбор соотношения мощностей ветряной и солнечной установок. В зависимости от месячной генерации электрической энергии в определённых условиях от того или иного источника можно определить, какой источник в комбинированной установке будет использоваться в качестве основного, а какой – в качестве вспомогательного; какое соотношение установленной мощности будет приходиться на тот или иной источник. Заметим, что при работе нескольких источников с одним блоком управления и преобразования энергии относительная стоимость электростанции в целом может быть снижена и, как следствие, снизится удельная стоимость одного кВт·ч электрической энергии.

Стоит обратить внимание на три основные величины, являющиеся ключевыми при выборе генерирующих компонентов комбинированной установки:

1. Выходная мощность определяется только мощностью преобразователя (инвертора) и не зависит от скорости ветра и освещённости солнечных и аккумуляторных батарей.

2. Время непрерывной работы при отсутствии энергии ветра или солнца определяется только ёмкостью батарей аккумуляторов и зависит от характера и величины нагрузки, режимов работы. Например, при использовании четырёх полностью заряженных батарей ёмкостью 200 А·ч каждая возможно запасти 7...8 кВт·ч электрической энергии, что при постоянной нагрузке в 1 кВт обеспечивает непрерывную работу на время 7...8 ч.

3. Выработка электрической энергии определяется реальным ветровым потенциалом, рельефом местности, высотой мачты ветрогенератора, солнечной обеспеченностью, расположением солнечных батарей и обычно указывается за усреднённый временной промежуток, к примеру месяц, так как дневная или особенно часовая выработка будет носить случайный характер.

Основной недостаток ветро-солнечной генерации – непостоянство в выработке в течение суток одним из источников. На сегодняшний день известны методики для достаточно точного расчёта повторяемости ветра и солнца в течение дня, месяца, года и нескольких лет. Например, для расчёта вероятности появления ветра можно пользоваться методиками Вейбулла и Рэлея [15]. Существуют также базовые принципы в определении активности солнца или ветра. В ясную и солнечную погоду, особенно летом, когда ветер стихает, происходит усиление выработки электроэнергии от солнечных батарей. В пасмурную погоду, вечером или ночью, в период отсутствия солнца или в холодные месяцы, воздух имеет более высокую плотность и основным источником в выработке энергии будет являться ветрогенератор, то есть солнечная и ветровая энергия находится в противофазе [3]. Следовательно, энергия, вырабатываемая комбинированными системами, представляет собой более равномерные потоки по сравнению с чистыми ветровыми или солнечными.

На рис. 1 изображён график совместного получения энергии от ветра и солнца.

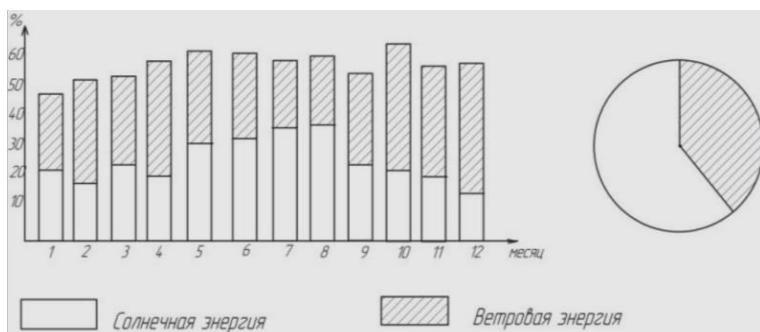


Рис. 1. График совместного получения энергии от ветра и солнца

В то время когда отсутствуют благоприятные условия для выработки энергии от ВИЭ (пасмурная безветренная погода, безветренная ночь), питание потребителей можно осуществить от аккумуляторных батарей либо от дизельного генератора. Когда одновременно имеются в избытке и солнце, и ветер, вырабатываемая излишняя (непотреблённая нагрузкой) электроэнергия будет запасаться в аккумуляторных батареях для дальнейшего использования при дефиците мощности при неблагоприятных погодных условиях [12].

Одна из основных составляющих затрат – стоимость удельной мощности оборудования возобновляемых источников энергии, которая влияет на цену оборудования в целом.

Состояние и потенциальное изменение установленной мощности, текущей и ожидаемой цены энергии от ВИЭ по данным на конец 2017 года отражены в табл. 1.

Таблица 1

Состояние и потенциальное изменение установленной мощности,
текущей и ожидаемой цены энергии от ВИЭ

Вид ВЭУ	Уровень мощности и её рост за 5 лет (% в год)	Удельная стоимость установленной мощности (\$/кВт)	Текущая стоимость энергии новых систем (ц/кВт·ч)	Ожидаемая стоимость в будущем (ц/кВт·ч)
Ветроэнергетические установки	539 ГВт/48 %	1100...1700	5...13	3...10
Солнечные электростанции	402 ГВт/75 %	5000...10 000	25...125	5...25
Солнечные тепловые установки	4,9 ГВт/49 %	3000...4000	12...18	4...10

Классификация комбинированных установок

Комбинированные системы электроснабжения обычно подразделяют на три типа:

1. Автономные ветро-солнечные электростанции (ВСЭ). Данные установки работают при отсутствии подключения к единой сети, содержат в себе солнечную фотоэлектрическую установку (СФЭУ), ветроэнергетическую установку (ВЭУ) и батареи аккумуляторов (АБ). Такие автономные электростанции могут дополнительно содержать бензиновые или дизельные генераторы для работы на объектах с высокой надёжностью электроснабжения [5].

Такие установки могут использоваться на дачах с круглогодичным проживанием, в автономных домах, изолированных торговых точках, удалённых объектах организаций, фермерских хозяйствах, теплицах, складах, производственных участках, пунктах охраны, объектах телекоммуникаций и т. д. В данном случае подключение объекта к единой сети является дорогостоящим или мероприятием, невозможным в принципе.

Схема такой установки представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема комбинированной установки
для использования в домах с круглогодичным проживанием

2. Сетевая ветро-солнечная электростанция. Данные комбинированные установки работают параллельно с внешней энергосистемой. В основном режиме работы потребители получают электроэнергию от возобновляемых источников, а при её недостатке – от внешней сети; при излишках энергия подаётся в сеть. При таком режиме работы аккумуляторные батареи и генераторы на жидкокомпьютерном топливе обычно не используются. Такую систему удобно использовать, когда у потребителя имеются пики потребления энергии. В таком случае нет необходимости производить расчёты мощности ветроустановки и солнечных батарей на пиковые нагрузки, ведь её можно будет покрыть из сети. В данном случае возможно снижение платежей за электрическую энергию.

3. Установки для резервного энергообеспечения. В данном случае в основном режиме работы внешняя электросеть служит основным источником питания для потребителей. При отсутствии энергии от единой сети, например в случае аварии или при недостатке выделенных мощностей, источником питания могут служить аккумуляторные батареи, питаемые от ветро-солнечных установок либо генераторов на жидкокомпьютерном топливе.

Рассмотрим использование гибридных установок для электроснабжения ответственных потребителей (на примере объектов нефтегазовой инфраструктуры) и менее ответственных (на примере объектов сельского хозяйства).

Комбинированные установки для нефтегазового сектора

Одним из самых распространённых объектов автономной инфраструктуры является нефтегазовый сектор. Месторождения чаще всего расположены в значительном удалении от существующих сетей.

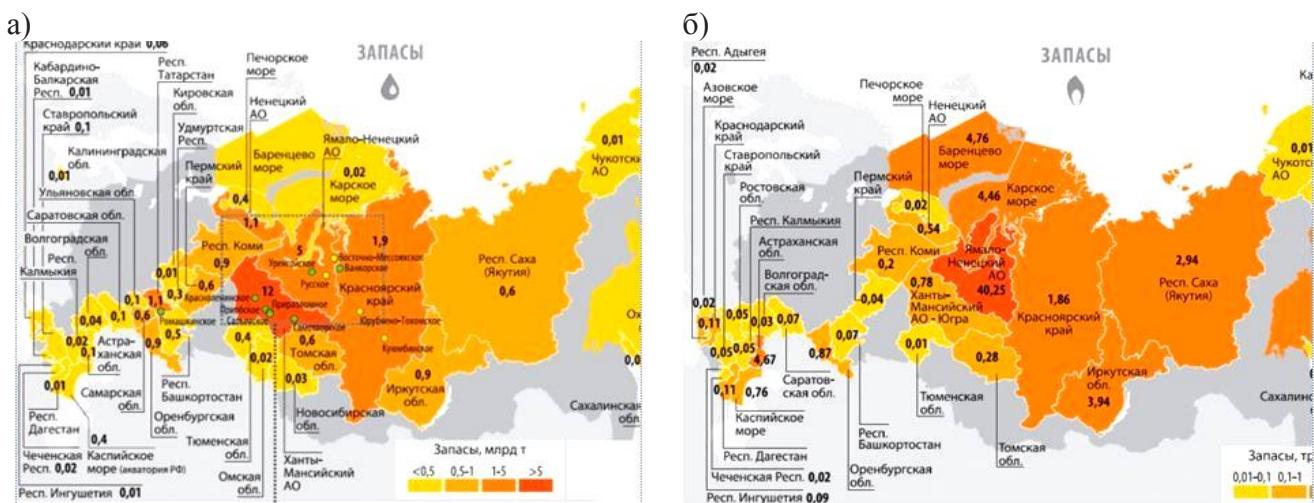


Рис. 3. Карта потенциальных запасов на территории РФ: а – нефти; б – газа

Если наложить эти карты на карту единого и децентрализованного энергообеспечения, то получится, что большинство таких месторождений находится именно в зонах, удалённых от единой сети. Вариантов энергоснабжения таких объектов немного: транспортируемые генераторы на жидкокомпьютерном топливе либо использование возобновляемых источников энергии. Но в нашей стране такие установки пока не получили широкого распространения.

Один из лидеров по добыче нефти и газа в России компания «Газпром-нефть» начала рассматривать возможности применения возобновляемой энергетики [16]. Здесь потребители электрической энергии являются специфическими, например: электродвигатели насосных установок для подготовки и транспорта сырья, двигатели для поддержания пластового давления, двигатели погружных насосов в нефтяных скважинах, системы обогрева трубопроводов, промышленные и ремонтные объекты, вахтовые посёлки и т. д., то есть предъявляются высокие требования к качеству и надёжности объектов электроснабжения: при остановке оборудования нарушится технологический процесс, что повлечёт за собой большие финансовые убытки. На восстановление работо-

способности объектов потребуются большие временные затраты, а также вполне возможно возникновение экологических катастроф, угрозы жизни и здоровью рабочего персонала.

Из вышеизложенного следует, что к внедрению возобновляемой энергетики для нефтегазовой отрасли необходимо подходить с особой осторожностью, учитывать множество факторов. На сегодняшний день к наиболее очевидным недостаткам, ставящим под сомнение использование ветро-солнечных установок в качестве основных источников питания, можно отнести:

- нерегулируемость выработки электроэнергии (прямая зависимость от солнечного излучения и силы ветра, которые характеризуются большим непостоянством в регионах добычи);

- невозможность абсолютно точного прогнозирования выработки электрической энергии и изменения мощности электростанций;

- необходимость использования огромных земельных участков, которые могут в десятки раз превышать площади территорий электростанций на базе традиционных источников энергии. К примеру, удельная площадь для газопоршневых и газотурбинных установок, работающих на природном газе, составляет 0,06...0,06 га/МВт. Для ветро-солнечных установок этот показатель может достигать 1 га/МВт мощности. Этот недостаток может привести к увеличению занимаемых площадей, объемов инженерной подготовки в удаленных регионах;

- возможность установленной мощности гибридной установки превышать в несколько раз требуемую нагрузкой мощность в сравнении с установленной мощностью источников, работающих на углеводородном топливе. В комбинированной установке требуется предусмотреть значительное количество ветроэнергетических установок и солнечных батарей, суммарная мощность которых ввиду непостоянства ветро-солнечной активности должна будет обеспечить объекты электрической энергией в рабочем режиме и параллельно с этим накапливать её в аккумуляторах для обеспечения энергии в неблагоприятные погодные условия;

- значительное отставание гибридных установок на возобновляемых источниках энергии большой мощности от традиционных источников по экономическим показателям. На сегодняшний день стоимость строительства объектов энергообеспечения на базе ВИЭ в нашей стране может достигать 120 млн р./МВт, что в крупной компании может быть сравнимо с удельной стоимостью строительства газотурбинной или газопоршневой электростанции, стоимость которой составляет около 90...110 млн/МВт. Однако даже при небольшой разнице в удельной стоимости значительное увеличение общей стоимости строительства объектов на базе ВИЭ может возникнуть из-за того, что число единиц генерирующего оборудования и их установленная мощность могут значительно превышать показатели традиционных источников;

- необходимость в передаче куда-либо нефтяного газа, который нужен для использования в ГТЭС в случае замены оборудования на объекты ВИЭ. Это может повлечь за собой проблемы, в том числе финансовые, на его утилизацию или транспортировку.

Таким образом, гибридные ветро-солнечные установки в настоящее время не удовлетворяют установленным нагрузкам требованиям, по технико-экономическим показателям они уступают электростанциям, работающим на традиционном топливе, и их эксплуатация нецелесообразна. Однако альтернативную энергетику можно использовать на объектах малой (вспомогательной) инфраструктуры общей мощностью до 10 кВт, которые удалены от основного источника питания на значительное расстояние. Это в некоторых случаях может стать даже более целесообразным решением, нежели получение энергии от источников на жидким топливе [10]. В нефтегазовой отрасли к таким объектам можно отнести площадки электрифицированных узлов запорной арматуры транспортных трубопроводов, станции электрохимической защиты от коррозии, системы обнаружения утечек нефти и газа, объекты телемеханики и связи.

Существует потенциал в экономии затрат на возведение систем электроснабжения объектов на ВИЭ по сравнению с использованием ЛЭП или генераторов на жидком топливе, обусловленный вышеупомянутыми факторами. Самым ярким примером такой экономии стало снижение затрат на электроснабжение системы транспорта нефти от месторождений Чона и «Сахалина-3», которая составила более 1 млрд р.

Таким образом, комбинированные ветро-солнечные установки можно и нужно использовать для энергообеспечения объектов нефтегазовой инфраструктуры. Но на сегодняшний день этими объектами являются только маломощные и неответственные потребители электрической энергии. Требуется улучшение технических характеристик вновь создаваемых электростанций на базе возобновляемой энергетики [7].

Комбинированные установки для сельского хозяйства

Большинство объектов сельского хозяйства, согласно ПУЭ, относят к 3-й категории по степени надёжности электроснабжения [11]. Но значительное количество таких объектов территориально находится в неблагоприятных с точки зрения энергообеспечения местах (земельные наделы (выкупленные единичные паи), отдалённые деревни, заброшенные объекты колхозов и совхозов, «неликвидные» с точки зрения землепользования неблагоустроенные объекты).

Самый яркий пример – участки, выделенные государством по программе «Дальневосточный гектар», вблизи которых нет населённых пунктов, дорог, ЛЭП единой сети. В связи с этими доводами использование альтернативной энергетики является очень приоритетным вариантом. Солнечные батареи и ветроэнергетические установки, способные обеспечивать стабильной и дешёвой электроэнергией сельскохозяйственные объекты для ведения устойчивого сельскохозяйственного производства, также позволят избежать больших затрат на возведение кабельных и воздушных линий электропередач, особенно в отдалённых регионах.

Например, для обеспечения энергией отдельно стоящего коттеджа необходимо около 0,2…1 кВт установленной мощности, а для крупной фермерской постройки – 5…10 кВт. Однако нет необходимости устанавливать генерирующее оборудование исходя из значения пиковой нагрузки, потому что пиковое потребление может быть сглажено аккумуляторными батареями (или генератором на жидкокомплексном топливе). Неверным является расчёт мощности исходя из суммы всех используемых электроприборов, так как они никогда не работают одновременно. Таким образом, с учётом того, что среднее потребление электроэнергии семьёй из трёх человек составляет 500 кВт·ч в месяц (около 0,7 кВт·ч среднечасового потребления), энергообеспечение таких объектов может осуществляться от ветроустановки и солнечных батарей суммарной мощностью 5 кВт. Использование систем общей мощностью 10 кВт будет нецелесообразным, потому что около 70 % вырабатываемой мощности окажется невостребованной.

Для зон с низким ветровым потенциалом экономически целесообразно не получать электрическую энергию от ветрогенератора с последующим её преобразованием до энергии промышленного качества, а использовать ток переменной частоты напрямую для нагрева ТЭНов [13]. Таким образом, можно обеспечить обогрев помещений и горячее водоснабжение дома, а также использовать ветроэнергетическую установку для электроснабжения водяных насосов и вращения насосов вентиляторов систем охлаждения. Следовательно, применение комбинированных установок на базе возобновляемой энергетики является достаточно перспективным решением проблемы электроснабжения децентрализованных объектов сельского хозяйства небольшой установленной мощности. В связи с большим количеством внедряемых долгосрочных программ развития сельского хозяйства, сооружением новых животноводческих ферм гибридные установки целесообразно рассматривать в качестве замены централизованному энергоснабжению.

К вышеизложенному можно добавить следующее: параллельно с солнечными панелями солнечную энергию можно использовать для преобразования в тепловую энергию путём применения солнечных коллекторов. Благодаря этому, можно использовать ТЭНЫ для горячего водоснабжения в летние месяцы гораздо реже.

Мобильные гибридные установки

На сегодняшний день мобильные комбинированные энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии не распространены. В связи с тем, что зелёная энергетика ещё не получила широкого применения в нашей стране, по сравнению со странами Европы, США, Китая и др., первостепенной задачей является массовое внедрение статичных элементов. Однако зарегистрированы частные случаи, в которых требуется временное электроснабжение, например: питание аварийных служб, полевых госпиталей, геологических партий, служб МЧС, строительных органи-

заций, дорожных служб или в целом потребитель периодически меняет местоположение, например объекты, обеспечивающие безопасность нашей страны. Безусловно, количество таких объектов незначительно по сравнению с количеством статичных децентрализованных объектов. Но полностью отказаться от энергообеспечения временных или передвижных объектов нельзя.

Основным объектом энергоснабжения в таких случаях стали генераторы на жидкокомпьютерном топливе. Но их использование в большинстве случаев – вынужденная мера. Потребителям приходится игнорировать множество недостатков таких генераторов ввиду неимения достойных аналогов.

Отечественной разработкой является мобильная ветро-солнечная электростанция от компании «СНАБ СУРС» (см. рис. 4) [4]. Такие станции предназначены для энергоснабжения нагрузки на напряжении 220 В частотой 50 Гц переменного тока и 12...25 В на постоянном токе. При полностью заряженных аккумуляторных батареях и отсутствии генерации от возобновляемых источников возможна работа в течение нескольких часов только АКБ.

Наиболее интересным вариантом является разработка ветро-солнечной установки на базе автомобильного фургона (кунга). В таком случае предусматривается использование складного ротора ветрогенератора на телескопической мачте; также внутри фургона можно разместить складные (выдвижные) солнечные панели и дизельный генератор в качестве резервного источника питания. В целом такая установка является уникальной. К разработке такого комплекса приступили учёные Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск) [9].

К достоинствам гибридных мобильных электростанций относят:

- мобильность и оперативность развёртывания;
- бесперебойное и качественное энергоснабжение потребителей за счёт дублирования генерирующих установок;
- высокий КПД за счёт оптимизации режимов работы различных источников энергии;
- длительный срок службы (15...20 лет);
- незначительные затраты на обслуживание.

Выводы

Таким образом, одним из приоритетных направлений в развитии энергетики является разработка новых, высокоэффективных автономных энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии. Причём особое внимание стоит уделить комбинированным установкам, предполагающим использование ряда ВИЭ и гарантирующим энергообеспечение за счёт дублирования источников энергии. Одним из наиболее доступных вариантов могут стать комбинированные ветро-солнечные установки, в которых ветроэнергетическая установка и солнечные батареи являются взаимодополняющими элементами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Велькин, В. И. Оптимизация выбора энергообеспечения на основе кластерного подхода в использовании возобновляемых источников энергии / В. И. Велькин // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 2. – С. 61–66.
2. Гиниятуллина, Э. И. Автономные гибридные установки с использованием возобновляемых источников энергии / Э. И. Гиниятуллина // Поволжский научный вестник. – 2018. – № 1. – С. 39–44.
3. Гиркин, А. С. Перспективы гибридных ветро-солнечных станций / А. С. Гиркин // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сб. статей по материалам X Всероссийской конференции молодых учёных, посвящённой 120-летию И. С. Косенко; отв. за вып. А. Г. Кошаев. – 2017. – С. 500-501.



Рис. 4. Мобильная гибридная система энергоснабжения

4. Мобильные ветро-солнечные гибридные электростанции мощностью от 3 до 12 кВт с резервным ДГУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cs3.a5.ru/media/45/7a/25/457a25dde268a7b2bd02395659a3386f.pdf> (дата обращения: 25.04.2019).
5. Мобильная гибридная система электроснабжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://alternenergy.ru/shop/avtonomnoe-yenergosnabzhenie/mobilnaja-gibridnaja-sistema-yenergosnabzhenija>.
6. Новокрещенов, О. В. Комбинированные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии / О. В. Новокрещенов, Г. С. Отмахов, М. Ю. Худе // Политеатический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2017. – № 132. – С. 786–797.
7. Новокрещенов, О. В. Комбинированные системы электроснабжения / О. В. Новокрещенов // Итоги научно-исследовательской работы за 2017 год: сб. статей по материалам 73-й Научно-практической конференции преподавателей. – 2018. – С. 619-620.
8. Обзор мировой ветроиндустрии за 2016 год / В. В. Долгошев, Д. В. Коробатов, А. С. Мартынов, А. А. Мирошниченко, Я. Р. Мужагитов, Д. А. Хвостов, М. С. Чиненов // Альтернативная энергетика и экология. – 2018. – № 7–9(255–257). – С. 105–113.
9. Обзор идеи по разработке мобильного масштабируемого энергокомплекса на основе возобновляемых источников энергии / А. А. Мирошниченко, Е. М. Гордиевский, А. З. Кулганатов, Е. А. Сироткин // Академический журнал Западной Сибири. – 2018. – Т. 14. – № 4(75). – С. 61–66.
10. О недостатке использования дизельных генераторов при электроснабжении автономных потребителей / А. А. Мирошниченко, Е. М. Гордиевский, А. З. Кулганатов, Е. А. Сироткин, А. А. Ковалёв // Интеграция наук. – 2018. – № 8(23). – С. 599–600.
11. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 6-е изд. – М.: Госэнергонадзор, 2000. – 513 с.
12. Соломин, Е. В. Масштабируемые гибридные ветро-солнечные установки малой мощности / Е. В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 2(106). – С. 49–60.
13. Соломин, Е. В. Экономические аспекты гибридных ветро-солнечных установок малой мощности / Е. В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 2(106). – С. 71–77.
14. Состояние малой ветроэнергетики в мире / А. А. Мирошниченко, Д. В. Коробатов, А. С. Мартынов, Е. Е. Соломин, А. З. Кулганатов, Е. М. Гордиевский // Альтернативная энергетика и экология. – 2019. – № 1–3(285–287). – С. 136–143.
15. Твайдел, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайдел, А. Уэйр; пер. с англ. под ред. В. А. Коробкова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 195–242.
16. Туровин, О. А. Применимость ветро-солнечной энергетики в качестве альтернативного источника электроснабжения нефтяных объектов компаний / О. А. Туровин, Е. Н. Огнев, А. Е. Кочнев // PROНефть. Профессионально о нефти. – 2017. – № 2(4). – С. 69–74.

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

Александров И. А.
I. A. Alexandrov

**ВЗАИМОСВЯЗЬ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
С ПОЗИЦИИ КОНЦЕПЦИИ ДОСТИЖЕНИЯ ИЗДЕЛИЕМ ЦЕЛЕВЫХ
СВОЙСТВ ПУТЁМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

**CORRELATION OF AUTOMATED SYSTEM KEY ELEMENTS FROM THE POSITION
OF THE CONCEPT OF THE PRODUCT TARGET PROPERTIES ACHIEVEMENT
BY THE MANUFACTURE OPTIMAL TECHNOLOGICAL MODES IDENTIFICATION**

Александров Ислам Александрович – младший научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (Россия, г. Москва); 127055, г. Москва, пер. Вадковский, 18, стр. 1а; тел.: +7 (499) 978-98-27. E-mail: alexandrov@ikti.ru.

Mr. Islam A. Alexandrov – Junior Researcher, Institute of design and technological Informatics of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow); 127055, Moscow, Vadkovsky lane, 18 p. 1a; tel.: +7 (499) 978-98-27. E-mail: alexandrov@ikti.ru.

Аннотация. В работе сформулирована актуальность построения автоматизированных систем, основанных на принципе управления производственными процессами с целью обеспечения соответствия целевых свойств заданным функциональным характеристикам. Разработаны подходы к формализации и обобщению ключевых факторов концепции автоматизированной системы управления производственными процессами, основанной на принципе обеспечения достижения целевых свойств конечного изделия. Формализованы характеристики и граничные условия, определяющие целевые свойства изделия. Предложены условия адекватности изделия с позиции предъявляемых к нему требований. Сформулирована взаимосвязь ключевых элементов автоматизированной системы. Сформулированы граничные условия процесса достижения целевого свойства.

Summary. The paper formulates the topicality of building automated systems based on the principle of managing production processes in order to ensure that the target properties match the specified functional characteristics. Approaches to the formalization and generalization of the key factors of the automated manufacture processes control system concept based on the principle of ensuring the final product target properties achievement, are developed. Characteristics and boundary conditions that determine the product target properties, are formalized. The product adequacy conditions from the position of the requirements placed on it, are proposed. The correlation of the automated system key elements is formulated. The boundary conditions of the target property achievement process are formulated.

Ключевые слова: автоматизированная система, производственный процесс, автоматизация, целевые свойства, функциональные характеристики.

Key words: automated system, production process, automation, target properties, functional characteristics.

УДК 681.5:658.5

Введение

В условиях жёсткой конкуренции современное машиностроение развивается в направлении существенного повышения качества продукции и интеллектуальной оснащённости, сокращения времени на выполнение операций. Стратегия развития машиностроительного производства в мире предлагает создание принципиально новых материалов, существенное повышение уровня автоматизации производственного процесса и управления с целью обеспечения выпуска продукции требуемого качества в заданный срок при минимальных затратах [1–3]. Производственная стратегия должна обеспечивать решение проблем от эксплуатационного до тактического и стратегического

уровней, включая принятие решений на разных уровнях вертикальной интеграции и организационной структуры. Для достижения целей развития производственных систем необходим комплекс мероприятий по направлениям совершенствования принципов организации и методов планирования производства, внедрения новых и совершенствования существующих технологических процессов, повышения уровня автоматизации проектирования и изготовления. При этом необходимо продвижение по всем указанным стратегическим направлениям, так как ни одно из них само по себе не является достаточным. Современное предприятие должно поддерживать доминирующую линейку продукции, в которой возрастающие улучшения должны быть совместимы с существующими производственными возможностями.

С позиции теории систем [4] производственную систему следует отнести к сложным динамическим объектам, в которой принятие технологических решений при функционировании осуществляется в условиях, связанных со стохастической неопределенностью выходных параметров и недостаточной информацией о возмущающих факторах, влияющих на стабильность и точность функционирования производственной системы. Определяющим фактором повышения эффективности процесса функционирования производственной системы является наличие мобильной и оптимальной по структуре системы управления реальным временем, адекватно отображающей протекающие процессы. Следовательно, при разработке современных технологических, производственных, информационных и других систем возникают проблемы, менее связанные с рассмотрением свойств и законов функционирования элементов, а более – с выбором наилучшей структуры, оптимальной организацией взаимодействия элементов системы, определением оптимальных режимов функционирования, учётом влияния внешней среды и т. д [5; 6]. Успешное осуществление программы автоматизации предъявляет новые требования к исследованию проблем развития производственных систем: повышение уровней системного мышления и строгости описания с использованием новых методов исследования [7]. Основной проблемой является формирование целостной концепции производственной системы нового типа, охватывающей все основные аспекты: организацию, технологию, проектирование и изготовление. На базе подобной концепции можно корректно ставить и решать задачу комплексной автоматизации производственного процесса.

Принципиально значимыми показателями качества изделий являются адекватность технологических процессов их производства и соответствие требованиям условий конечного применения. Концепция автоматизированной системы должна иметь барьеры, определяющие границы адекватных значений целевых характеристик и технологических параметров производства. Под целевыми свойствами в данном случае понимаются конструкционные требования, заложенные на этапе проектирования и определяемые условиями и средой эксплуатации конечного изделия. К ним можно отнести высокую удельную прочность, работоспособность в большом интервале температур, технологичность и т. д. Достижение целевых свойств изделием обеспечивается как правильным выбором исходных компонентов, так и рациональной технологией производства с обеспечением экономической эффективности технологических процессов. Для целевых свойств граничные параметры определяются физико-химическими свойствами веществ и естественно-научными ограничениями возможности их превышения. В свою очередь технологические параметры ограничены производственными и функциональными возможностями оборудования и персонала. Природа технологических ограничений может носить и естественнонаучный характер, однако с позиции конечного барьера природа происхождения ограничения возможностей производства не имеет значения. Достижение целевых свойств конструкций может быть обеспечено различными способами исходя из технологических возможностей производства, специфики исходных компонентов, квалификации исполнителей, требований к конструктивному либо функциональному исполнению изделий и т. д. Тем не менее задача обобщения и формализации связи между требованиями к изделию, заложенными на этапе проектирования, технологическими возможностями по его переработке и конечными целевыми характеристиками, определяемыми функционалом изделия и условиями его эксплуатации, не имеет решения, позволяющего использовать его универсально для разного рода изделий, особенно анизотропных. Кроме того, отсутствуют требования к содержанию подобных способов на основании существующих методик, методологий и

концепций, позволяющих объяснить и обобщить причины возникновения неоднородности влияния различных технологических факторов. Целью настоящей работы является исследование взаимосвязей ключевых элементов автоматизированной системы с позиции концепции достижения изделием целевых свойств и идентификации оптимальных технологических режимов его изготовления.

Появление любого изделия мотивировано. Из совокупности причин, приводящих к формированию изделия, доминирующей и обобщающей является потребность в удовлетворении требований конечного пользователя (потребителя). Обеспечение соответствия изделия требованиям потребителя можно сформулировать как достижение соответствия целевых свойств (Z – от нем. zielmerkmal) заданным функциональным характеристикам (F – от нем. funktionsmerkmal). Формализовано состояние изделия, удовлетворяющего требованиям потребителя, которое можно сформулировать в виде $\sum_{i=1}^n Z_i \geq \sum_{i=1}^n F_i$.

Целевые свойства можно определить как совокупность целевых характеристик (z):

$$Z_i = z_{i,1}, z_{i,2}, \dots, z_{i,m}$$

В общем виде это формализует состояние изделия, обладающего целевым свойством Z , и, как следствие, совокупностью целевых характеристик Z_n .

Исходное состояние (Z^0), в котором находится изделие до достижения целевого свойства, можно формализовать в виде $Z_i^0 = z_{i,1}^0, z_{i,2}^0, \dots, z_{i,m}^0$.

При этом исходное состояние должно быть представлено совокупностью целевых характеристик z_i^0 , аналогичных целевым характеристикам z_i .

При переходе изделия из исходного состояния в состояние, в котором изделие обладает целевым свойством, происходит комплекс качественных изменений. Эти действия можно охарактеризовать как процесс достижения целевого свойства изделия. Формализовать суть процесса можно в виде выражения $Z_i^0 \rightarrow Z_i$.

Процесс определяет пути и направление, а также содержание действий перехода изделия из одного состояния в другое.

Следующим шагом в формировании концепции являются выявление возможности и реализация процесса достижения целевого свойства (см. рис. 1).

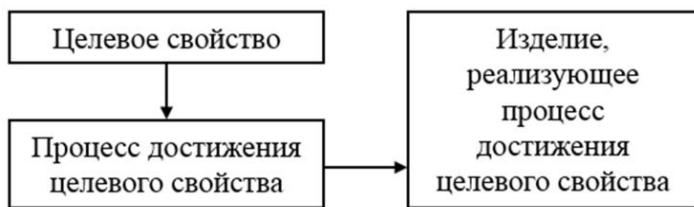


Рис. 1. Последовательность, обусловливающая возникновение изделия с позиции достижения целевого свойства

Непосредственное воздействие на изделие при достижении целевого свойства характеризуется некоторым количеством функций (A_i), которые определяются количеством реализуемых действий (a_i), необходимых для достижения целевых характеристик: $A_i = a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,m}$.

Целевое свойство формируется и остаётся актуальным в определённых временных границах. Следовательно, процесс достижения целевого свойства будет эффективным, если произойдёт

в определённых временных рамках (T_i), которые определяются временными интервалами, необходимыми для достижения целевых характеристик: $T_i = t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,m}$.

Не менее важным показателем, определяющим эффективность достижения изделием целевого свойства, является интегральный показатель качества (Q_i), который определяется показателями качества достижения целевых характеристик: $Q_i = q_{i,1}, q_{i,2}, \dots, q_{i,m}$.

Изделие, наделённое необходимым целевым свойством, может быть востребовано только в том случае, когда затраты на его достижение не будут превышать пороговые значения. Пороговые значения могут быть определены анализом экономической эффективности реализации разрабатываемого изделия исходя из области его конечного применения и конъюнктуры рынка.

Стоимость ресурса, затраченного на достижение целевого свойства, может быть определена как совокупная стоимость реализуемых действий, необходимых для достижения целевых характеристик: $S_i = s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,m}$.

Вышеизложенное позволяет сформулировать основные тезисные положения. Достижение целевого свойства обеспечивается только в результате динамически протекающего процесса. Процесс достижения целевого свойства, характеризующийся показателем (W), может быть определён как совокупность равнозначных характеристик: $W_i = A_i, T_i, Q_i, S_i$.

В результате достижения целевого свойства изделия должны быть обеспечены все приведённые показатели.

Из характеристик, определяющих достижение целевого свойства, функции A_i являются процессообразующими. Это связано с тем, что воздействие, возникающее при выполнении действий a_i , приводит к достижению целевого свойства. От адекватности выбора функций воздействия во многом зависит эффективность достижения целевых свойств и возможность обеспечения требуемых характеристик. В связи с этим принципиально важным является выявление закономерностей и свойств функций воздействия.

Независимо от адекватности определения функций требуется дополнительные показатели, необходимые для достижения целевых свойств. Действие функций направлено на объект воздействия. Под объектом в данном случае понимается совокупность свойств, объединённых определённым образом в рамках выбранных ограничений. Ограничения, в свою очередь, могут формировать систему ограничений. Для реализации процесса должны быть сформированы средства, обладающие способностью воздействия на свойства объекта.

Алгоритм воздействия определён функцией A_i . Одна и та же функция может быть реализована различными средствами для разных объектов. Обеспечение средствами, обладающими способностью воздействовать на объект по предписанному функцией алгоритму, – основное условие реализации процесса достижения целевого свойства изделия.

Принципиальным шагом в формировании концепции существования изделия является формулирование положения о выявлении средств, соответствующих условиям реализации процесса достижения целевых свойств.

Достижение целевого свойства характеризуется некоторым набором функций A_i . Соответственно, должна существовать некая совокупность элементов R_i , позволяющая реализовать A_i . При этом существует соответствие между каждым элементом r_i и реализуемым им действием a_i . Таким образом, средство реализации процесса достижения целевого свойства можно представить в виде $R_i = r_{i,1}, r_{i,2}, \dots, r_{i,m}$.

Объект, удовлетворяющий полному набору характеристик, формирующих показатель достижения целевого свойства W , и способный обеспечить реализацию достижения целевого свойства, – изделие, назначенное для достижения целевого свойства (см. рис. 2).



Рис. 2. Процесс формирования изделия с позиции объекта, удовлетворяющего комплексному набору характеристик

На основании изложенного сформулируем следующие положения:

1. Реализовать процесс достижения целевого свойства возможно только при помощи изделия.
2. Изделие, обеспечивающее реализацию процесса, должно обладать характеристиками, соответствующими W .

Сформулированные положения подразумевают многообразие вариантов при определении возможных процессов, позволяющих обеспечить достижение целевых свойств и при определении возможных изделий. Важно отметить, что предложенный подход позволяет установить причины, а, следовательно, на начальном этапе обеспечить возможность создания большего количества возможных изделий и соответствующих им процессов, тем самым повышая вероятность нахождения адекватного и эффективного решения.

Традиционные методы описания процесса достижения изделием целевого свойства используют различные системы ограничений. Они довольно разнообразны и возникали по мере изучения материалов, их свойств и факторов, определяющих условия их переработки. Для определения основных факторов, определяющих реализацию концепции автоматизированной системы, рассмотрим интегральную систему требований к изделию, предназначенному для достижения целевого свойства с позиции основных положений функционирования автоматизированной системы.

В интегральном виде можно установить взаимосвязь характеристик, определяющих процесс достижения целевого свойства W_i (см. рис. 3).



Рис. 3. Взаимосвязь характеристик, определяющих процесс достижения целевого свойства

Выявленные связи обязательны, и они отображаются при любом комплексном описании процесса достижения целевого свойства изделия. Поскольку процесс удовлетворения потребности имеет тот же набор равнозначных характеристик, геометрическая интерпретация взаимосвязи, определяющая процесс достижения целевого свойства W_i , может быть представлена в виде пирамиды (см. рис. 4, а).

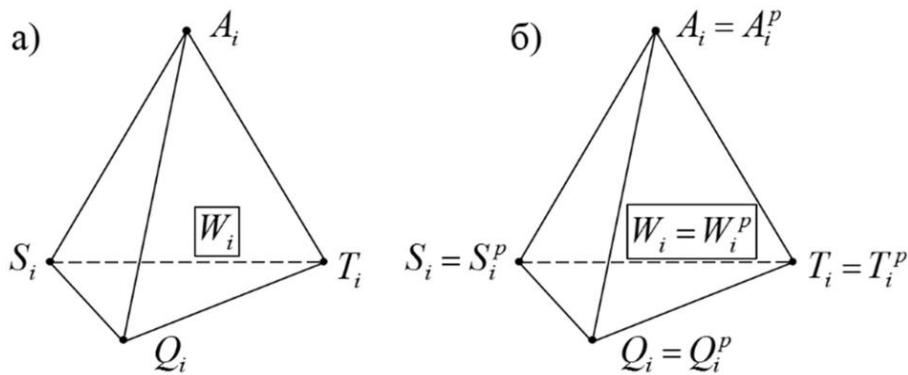


Рис. 4. Геометрическая модель взаимосвязи характеристик целевого свойства:
а – процесс достижения целевого свойства; б – условие адекватности изделия процессу
достижения целевого свойства

Следовательно, условие адекватности изделия процессу достижения целевого свойства будет соответствовать случаю, когда геометрическая модель взаимосвязи характеристик изделия совпадает с пирамидой характеристик процесса (см. рис. 4, б), что можно выразить соотношением $W_i = W_i^0$.

Развитие автоматизации процессов проектирования и производства сложных многокомпонентных изделий требует формализации ключевых факторов, определяющих концепцию производства изделия. Предложенная в работе концепция построения автоматизированных систем, основанных на принципе управления производственными процессами, может быть использована при формировании автоматизированных систем, направленных на обеспечение соответствия целевых свойств заданным функциональным характеристикам. Сформулированные подходы к формализации и обобщению ключевых факторов концепции автоматизированной системы управления производственными процессами, а также концепция адекватности изделия с позиций предъявляемых к нему требований носят обобщающий характер и могут быть применены для построения структуры автоматизированных систем, основанных на принципе обеспечения достижения целевых свойств конечного изделия.

Отличие между изделием, соответствующим и не соответствующим процессу достижения целевого свойства, заключается в несоответствии отдельных характеристик (либо комплекса характеристик). Изделие, обладающее набором характеристик, отличных от формируемых целевым свойством, можно обозначить как «заготовка». Технологические особенности производства композитных конструкций ограничивают употребление термина «заготовка» с полной смысловой нагрузкой, соответствующей изотропным изделиям, процесс переработки которых не требует сохранения целостности внутренней структуры компонентов. В связи с этим смысловое содержание обозначения «заготовка» ограничено исключительно критериальным соответствием характеристик изделия целевым.

Значения целевых характеристик заготовок могут принимать различные значения, отличные от требуемых. Рассматривая целевые характеристики, определённые установленными целевыми свойствами, в качестве размерной величины с установленным полем допуска можно формализовать возможные случаи оценки характеристик изделия следующими состояниями:

1. Характеристика изделия находится выше поля допуска.

2. Характеристика изделия находится ниже поля допуска.
 3. Характеристика изделия находится в поле допуска.
- Эти состояния отражены на рис. 5.

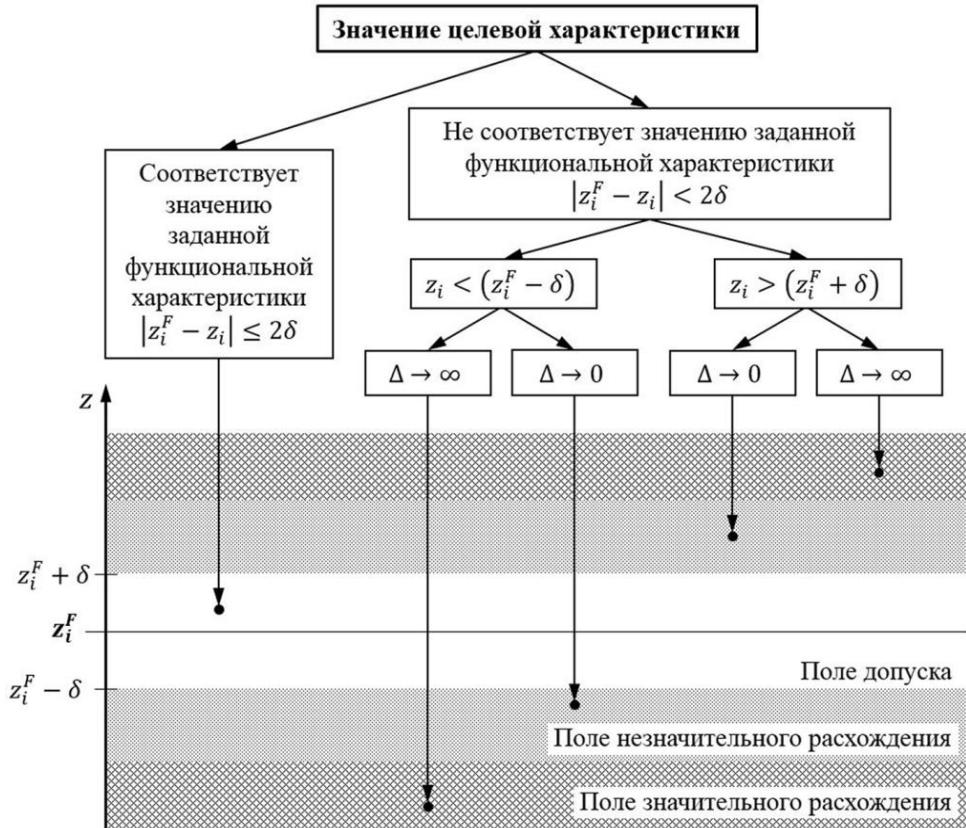


Рис. 5. Целевые характеристики с позиции величин с установленным полем допуска

При нахождении за пределами поля допуска значение целевой характеристики может быть фиксированным либо произвольным и принимать любое значение, ограниченное диапазоном. На графической интерпретации целевых характеристик с позиции размерной величины с установленным полем допуска условно введено поле значительных и незначительных расхождений между значениями характеристик. Нахождение целевой характеристики в зоне значительного расхождения говорит о принципиальном противоречии при реализации целевого свойства изделия в технологическом процессе. Подобный результат требует пересмотра, либо технологического решения о выборе рассматриваемого пути достижения целевого свойства, либо требований к функциональным (либо эксплуатационным) характеристикам изделия, заложенным на этапе проектирования. Для характеристик, находящихся в зоне незначительного расхождения исходя из характера отклонения, достижение требуемого значения осуществляется либо снижением, либо увеличением значения характеристики. Таким образом, первостепенной задачей идентификации технологических параметров переработки изделия является исследование возможности обеспечения перемещения в поле допуска требуемого значения целевой характеристики из выявленных первоначальных положений.

Заключение

Предложена концепция взаимосвязей ключевых элементов автоматизированной системы достижения изделием целевых свойств при идентификации оптимальных технологических режимов его изготовления. Условие адекватности изделия процессу достижения целевого свойства как величины размерной представлено в рамках геометрической модели взаимосвязи характеристик с установленными полями допуска.



ЛИТЕРАТУРА

1. Акулович, Л. М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие / Л. М. Акулович, В. К. Шелег. – Минск: Новое знание, 2012. – 488 с.
2. Рыбаков, А. В. Создание системы автоматизированной поддержки информационных решений при проектировании технологической оснастки / А. В. Рыбаков, С. А. Евдокимов, А. А. Краснов. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2013. – 162 с.
3. Соломенцев, Ю. М. Теория автоматического управления / Ю. М. Соломенцев. – 3-е изд., стереотипное. – М.: Высшая школа, 2000. – 270 с.
4. Соломенцев, Ю. М. Технологические основы гибких производственных систем: учебник для машиностроительных специальностей вузов / Ю. М. Соломенцев. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2000. – 255 с.
5. Шевцов, С. Н. Применение нейронных сетей в прогнозировании качества механической обработки особо нагруженных композитных конструкций / С. Н. Шевцов, В. В. Сибирский, Е. Г. Чигринец // Труды МАИ. – 2016. – №. 91. – 24 с.
6. Benhabib, B. Manufacturing: Design, Production, Automation, and Integration / B. Benhabib. – 1st ed. CRC Press, 2003. – 448 p.
7. The Architecture of Onboard Intellectual Control System for Autonomous Researching Devices. 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC) / I. S. Kabak, S. A. Sheptunov, Ju. M. Solomentsev [and other]. – 2018.

Сочелев А. Ф.

A. F. Sochelev

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМ КАНАЛОМ

MATHEMATICAL MODEL OF THE VARIABLE VOLTAGE REGULATOR WITH THE FILLING CHANNEL

Сочелев Анатолий Фёдорович – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: +7 (914) 210-56-77. E-mail: a.sochelev@mail.ru.

Mr. Anatoly F. Sochelev – Cand. tech. Sci., the senior lecturer of faculty electrical engineering Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: +7 (914) 210-56-77. E-mail: a.sochelev@mail.ru.

Аннотация. Рассматриваются различные динамические режимы работы регулятора переменного напряжения с вольтодобавочным каналом на основе математической модели. Особое внимание уделяется пусковым режимам, а также режимам регулирования без намагничивания вольтодобавочного трансформатора. Предложена процедура формирования углов регулирования ключевых элементов, позволяющая обеспечить регулирование напряжения нагрузки без намагничивания трансформатора.

Summary. Discusses the various dynamic modes of AC voltage regulator with voltodobavochnym channel based on mathematical models. Special attention is paid to trigger modes as well as regulatory regimes without magnetization voltodobavochnogo transformer. Proposed procedure of forming the corners of key elements of the management to ensure the load voltage regulation without transformer magnetizing.

Ключевые слова: вольтодобавочный канал, математическая модель, процедура формирования угла регулирования без намагничивания, гладкий пусковой режим, способ управления регулятором.

Key words: voltodobavochnyj channel, mathematical model, procedure of formation angle regulation without magnetization, sleek launch mode, way to control regulator.

УДК 621.316.722

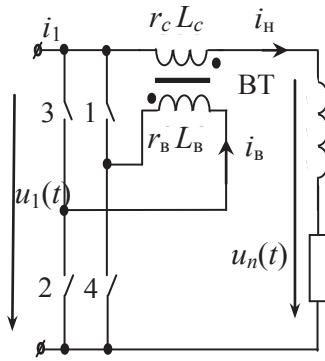
Известны регуляторы переменного напряжения с вольтодобавочным каналом [1; 2], а также способы их управления [1; 3].

Построение узкодиапазонных регуляторов переменного напряжения связано с использованием вольтодобавочных трансформаторов (ВТ). В процессе управления такими регуляторами с помощью ключевых элементов (тиристоров или транзисторов) возникают изменения углов регулирования, которые в свою очередь изменяют временные интервалы режимов работы «вольтодобавка» (ВД), «вольтоотбавка» (ВО) и «закоротка» (РЗ). Это приводит к несимметрии магнитного потока или к намагничиванию (одностороннему насыщению) стали ВТ, что является недопустимым, приводящим к аварийным ситуациям.

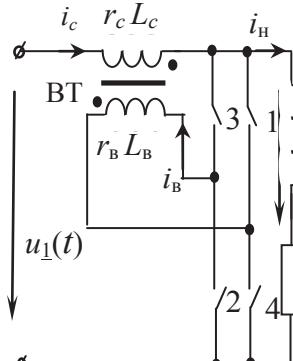
Работа посвящена решению этих проблем с помощью моделирования динамических режимов на основе дифференциальных уравнений, составленных по уравнениям Кирхгофа, намагничивающих сил и характеристики намагничивания.

Варианты рассматриваемых электрических схем приведены на рис. 1.

a)



b)



c)

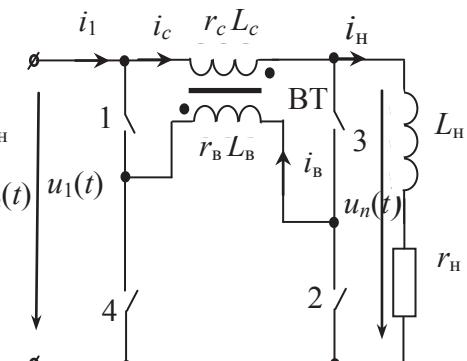


Рис. 1. Варианты электрических схем: а – ключевой коммутатор подключен к сети; б – ключевой коммутатор подключен к нагрузке; в – ключевой коммутатор одной диагональю подключен к сети, а другой – к нагрузке

Система уравнений универсальна для всех исследуемых вариантов и представлена уравнениями, записанными в относительных величинах, как это принято в [4]:

$$\begin{aligned}
 \bar{u}_1(\bar{t}) &= \bar{L}_c \frac{d\bar{i}_c}{dt} + \bar{r}_c \bar{i}_c + \bar{k}_{bt} \frac{d\bar{\Phi}}{dt} + \bar{L}_n \frac{d\bar{i}_n}{dt} + \bar{r}_n \bar{i}_n, \\
 F\bar{u}_1(\bar{t}) &= F1 \left(\bar{L}_c \frac{d\bar{i}_c}{dt} + \bar{r}_c \bar{i}_c + \bar{k}_{bt} \frac{d\bar{\Phi}}{dt} \right) - \bar{L}_b \frac{d\bar{i}_b}{dt} - \bar{r}_b \bar{i}_b - \frac{d\bar{\Phi}}{dt}, \\
 \bar{i}_c &= F2 \bar{i}_b + \bar{i}_n, \\
 \bar{i}_0 &= \bar{i}_b + \bar{k}_{bt} \bar{i}_c, \\
 \bar{\Phi} &= \bar{\Phi}(\bar{i}_0).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Решим систему уравнений (1) относительно первых производных. Для этого слагаемые с производными разместим в левых частях уравнений, а остальные – в правых. Третье и четвёртое уравнения системы (1) запишем для производных. Характеристику намагничивания представим в виде $\bar{i}_0 = \alpha \operatorname{sh}(\beta \bar{\Phi})$, тогда система уравнений (1) примет вид

$$\begin{aligned}
 0 + \bar{L}_c \frac{d\bar{i}_c}{dt} + \bar{L}_n \frac{d\bar{i}_n}{dt} + \bar{k}_{bt} \frac{d\bar{\Phi}}{dt} &= \bar{u}_1(\bar{t}) - (\bar{r}_n \bar{i}_n + \bar{r}_c \bar{i}_c), \\
 -\bar{L}_b \frac{d\bar{i}_b}{dt} + F1 \bar{L}_c \frac{d\bar{i}_c}{dt} + 0 + (\bar{k}_{bt} F1 - 1) \frac{d\bar{\Phi}}{dt} &= F\bar{u}_1(\bar{t}) + \bar{r}_b \bar{i}_b - F1 \bar{r}_c \bar{i}_c, \\
 F2 \frac{d\bar{i}_b}{dt} - \frac{d\bar{i}_c}{dt} + \frac{d\bar{i}_n}{dt} + 0 &= 0, \\
 \frac{d\bar{i}_b}{dt} + \bar{k}_{bt} \frac{d\bar{i}_c}{dt} + 0 - \alpha \beta \operatorname{ch}(\beta \bar{\Phi}) \frac{d\bar{\Phi}}{dt} &= 0.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Систему уравнений (2) решим методом Крамера. Главный определитель примет вид

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & \bar{L}_c & \bar{L}_n & \bar{k}_{bt} \\ -\bar{L}_b F1 \bar{L}_c & 0 & ((-1 + \bar{k}_{bt}) F1) \\ F2 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & \bar{k}_{bt} & 0 & -\alpha \beta ch(\beta \bar{\Phi}) \end{vmatrix},$$

тогда алгебраические дополнения можно записать в виде

$$\Delta \bar{i}_b = \begin{vmatrix} \bar{u}_1(\bar{t}) - (\bar{r}_n \bar{i}_n + \bar{r}_c \bar{i}_c) & \bar{L}_c & \bar{L}_n & \bar{k}_{bt} \\ F \bar{u}_1(\bar{t}) + \bar{r}_b \bar{i}_b - F1 \bar{r}_c \bar{i} & F1 \bar{L}_c & 0 & ((-1 + \bar{k}_{bt}) F1) \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & \bar{k}_{bt} & 0 & -\alpha \beta ch(\beta \bar{\Phi}) \end{vmatrix};$$

$$\Delta \bar{i}_c = \begin{vmatrix} 0 & \bar{u}_1(\bar{t}) - (\bar{r}_n \bar{i}_n + \bar{r}_c \bar{i}_c) & \bar{L}_n & \bar{k}_{bt} \\ -\bar{L}_b F \bar{u}_1(\bar{t}) + \bar{r}_b \bar{i}_b - F1 \bar{r}_c \bar{i}_c & 0 & (-1 + \bar{k}_{bt}) F1 \\ F2 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -\alpha \beta ch(\beta \bar{\Phi}) \end{vmatrix};$$

$$\Delta \bar{i}_n = \begin{vmatrix} 0 & \bar{L}_c & \bar{u}_1(\bar{t}) - (\bar{r}_n \bar{i}_n + \bar{r}_c \bar{i}_c) & \bar{k}_{bt} \\ -\bar{L}_b F1 \bar{L}_c F \bar{u}_1(\bar{t}) + \bar{r}_b \bar{i}_b - F1 \bar{r}_c \bar{i}_c & 0 & ((-1 + \bar{k}_{bt}) F1) \\ F2 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & \bar{k}_{bt} & 0 & -\alpha \beta ch(\beta \bar{\Phi}) \end{vmatrix};$$

$$\Delta \bar{\Phi} = \begin{vmatrix} 0 & \bar{L}_c & \bar{L}_n & \bar{u}_1(\bar{t}) - (\bar{r}_n \bar{i}_n + \bar{r}_c \bar{i}_c) \\ -\bar{L}_b F1 \bar{L}_c & 0 & F \bar{u}_1(\bar{t}) + \bar{r}_b \bar{i}_b - F1 \bar{r}_c \bar{i}_c & \\ F2 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & \bar{k}_{bt} & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Решения для производных получим в форме Коши:

$$\frac{d \bar{i}_b}{dt} = \frac{\Delta \bar{i}_b}{\Delta}; \quad \frac{d \bar{i}_c}{dt} = \frac{\Delta \bar{i}_c}{\Delta}; \quad \frac{d \bar{i}_n}{dt} = \frac{\Delta \bar{i}_n}{\Delta}; \quad \frac{d \bar{\Phi}}{dt} = \frac{\Delta \bar{\Phi}}{\Delta}.$$

Выходное напряжение примет вид

$$\bar{u}_n(\bar{t}) = \bar{L}_n \frac{d \bar{i}_n}{dt} + \bar{r}_n \bar{i}_n.$$

Если $F = 1, F1 = 0, F2 = 0$, реализуется режим ВД, замкнуты ключи 1 и 2 (см. рис. 1, a и c).

Если $F = 1, F1 = 1, F2 = -1$, реализуется режим ВД, замкнуты ключи 1 и 2 (см. рис. 1, b).

Если $F = -1, F1 = -1, F2 = 1$, создаётся режим ВО, замкнуты ключи 3 и 4 (см. рис. 1, b и c).

Если $F = -1, F1 = 0, F2 = 0$, создаётся режим ВО, замкнуты ключи 3 и 4 (см. рис. 1, a).

Если $F = 0, F1 = 0, F2 = 0$ – РЗ, замкнуты ключи 2 и 4. (см. рис. 1, a, b и c).

Если $F = 0$, $F1 = -1$, $F2 = 1$ – Р3, замкнуты ключи 1 и 3 (см. рис. 1, с).

Если $F = 0$, $F1 = 0$, $F2 = 0$ – Р3, замкнуты ключи 1 и 3 (см. рис. 1, а и б).

Исследования проведём в программе Mathcad. Сначала рассмотрим подключение регулятора к сети. Представляет интерес процесс включения к сети в момент перехода напряжения $\bar{U}_1(\bar{t})$ через нуль, когда регулятор находится в режимах ВД (см. рис. 2) и ВО (см. рис. 3) ($\alpha = 0,03$ и $\beta = 4,5$).

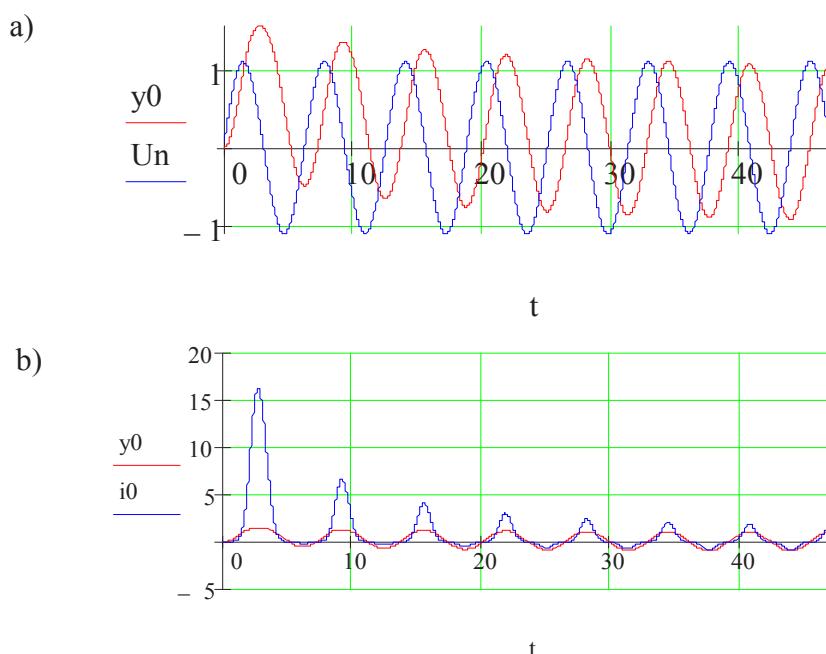


Рис. 2. Подключение регулятора к сети в режиме ВД с углом 0° : а – зависимости напряжения нагрузки (U_n – кривая с неизменной амплитудой) и магнитного потока (y_0); б – зависимости магнитного потока (y_0) и тока намагничивания (i_0)

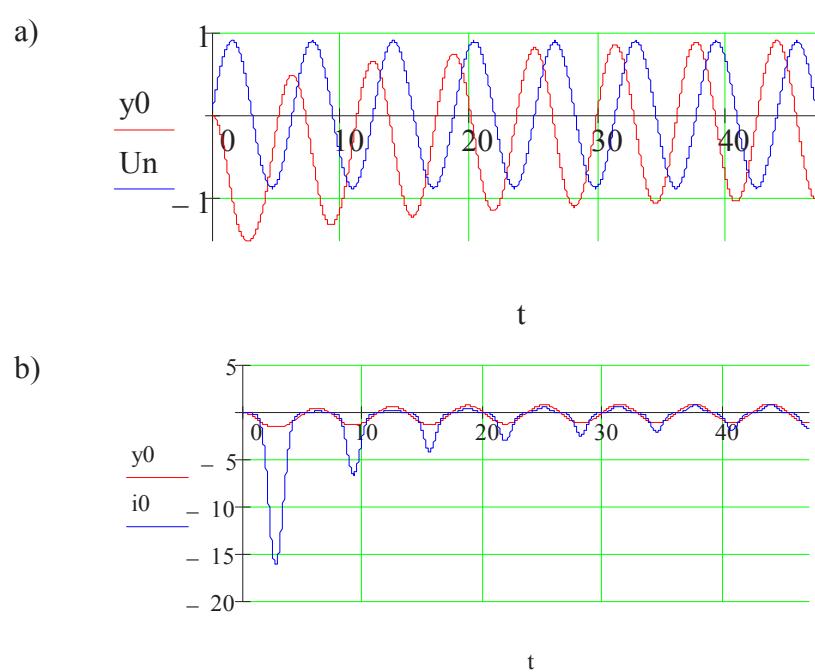


Рис. 3. Подключение регулятора к сети в режиме ВО: а – зависимости напряжения нагрузки (U_n) и магнитного потока (y_0); б – зависимости магнитного потока (y_0) и тока намагничивания (i_0)

Как видно из рисунков, это самый тяжёлый пусковой режим. В первый период наблюдается увеличение тока намагничивания \bar{i}_0 до 15 относительных единиц, и только с пятого периода этот ток начинает входить в установившийся режим. Для сравнения: на рис. 4 приведены те же процессы, как на рис. 2, но при включении с углом 90° . Здесь уже сразу наблюдается установившийся режим. Это самый лёгкий пусковой режим.

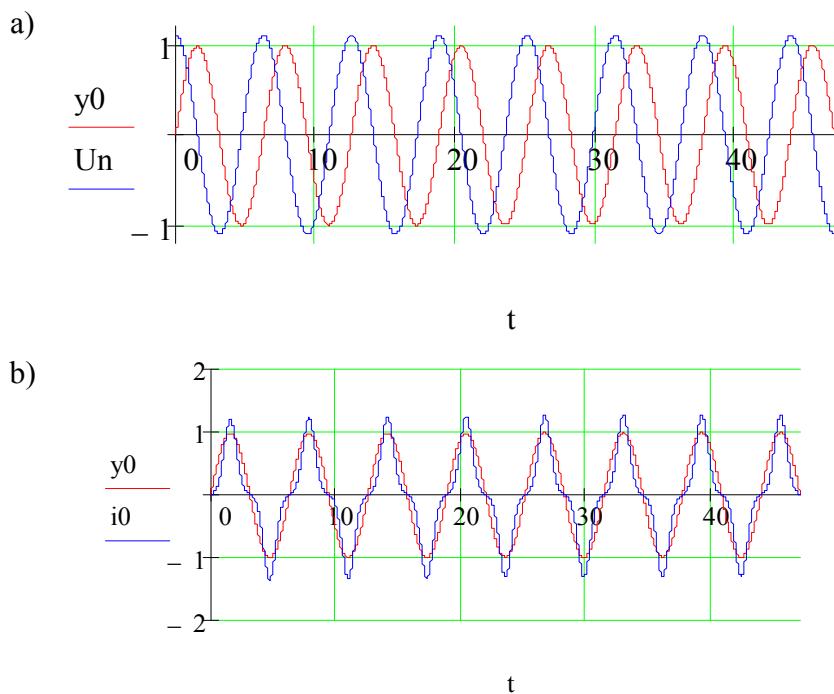


Рис. 4. Подключение регулятора к сети в режиме ВД с углом 90° : а – зависимости напряжения нагрузки (U_n) магнитного потока (y_0); б – зависимости магнитного потока (y_0) и тока намагничивания (i_0)

Кривая намагничивания ВТ значительно влияет на процессы регулятора, в частности и на режим включения. Так, если $\alpha = 0,003$ и $\beta = 4,5$, то режим включения в момент перехода напряжения через ноль для потока \bar{y}_0 и намагничающего тока \bar{i}_0 примет такой вид, который представлен на рис. 5.

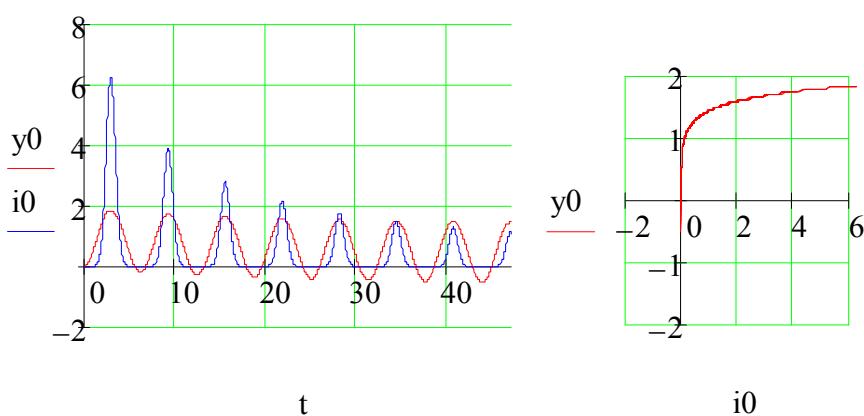


Рис. 5. Подключение регулятора к сети в режиме ВД с углом 0° ($\alpha = 0,003$ и $\beta = 4,5$)

Если $\alpha = 0,03$ и $\beta = 2,5$, то те же величины примут вид, какий показан на рис. 6. В первом случае (см. рис. 5) намагничивающий ток увеличивается до 6 относительных единиц, а во втором (см. рис. 6) – только до 2 единиц, но затухание в первом случае произойдёт быстрее, чем во втором.

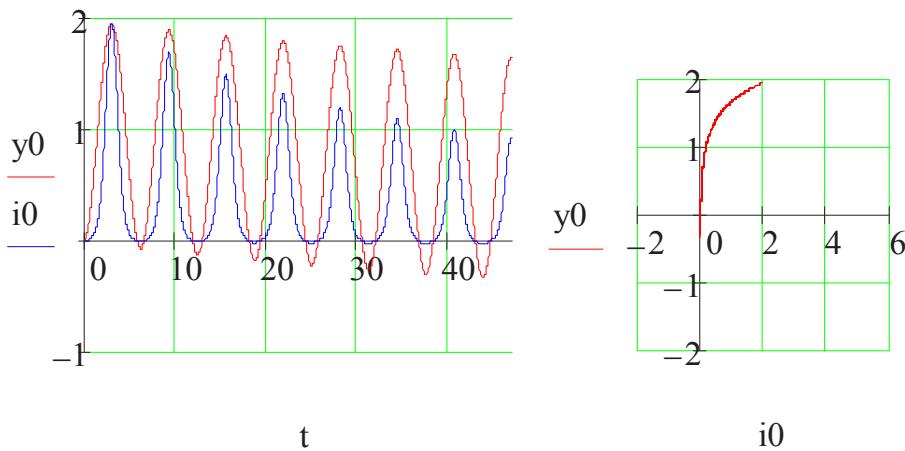


Рис. 6. Подключение регулятора к сети в режиме ВД с углом 0° ($\alpha = 0,03$ и $\beta = 2,5$)

Подключение коммутатора со стороны нагрузки (см. рис. 1, b) имеет свои особенности в работе, в частности, в режиме стабилизации напряжения нагрузки. Величины добавляемого и отбавляемого напряжения становятся одинаковыми. Вариант подключения коммутатора одной диагональю к сети, а другой – к нагрузке (см. рис. 1, c) имеет свои особенности, главным образом в режиме РЗ, когда замкнуты ключи 1 и 3.

Исследование рабочих режимов вольтодобавочного канала, управляемого способом, описанным в авторском свидетельстве [3], показывает, что включение регулятора с режима РЗ позволяет в первый период выйти на установившийся режим с углом регулирования (см. рис. 7, a и 9, a), где показаны напряжение нагрузки (Un) и магнитный поток (у3-кривая без скачков). Рис. 7, b и 9, b иллюстрируют следующий период этого угла регулирования.

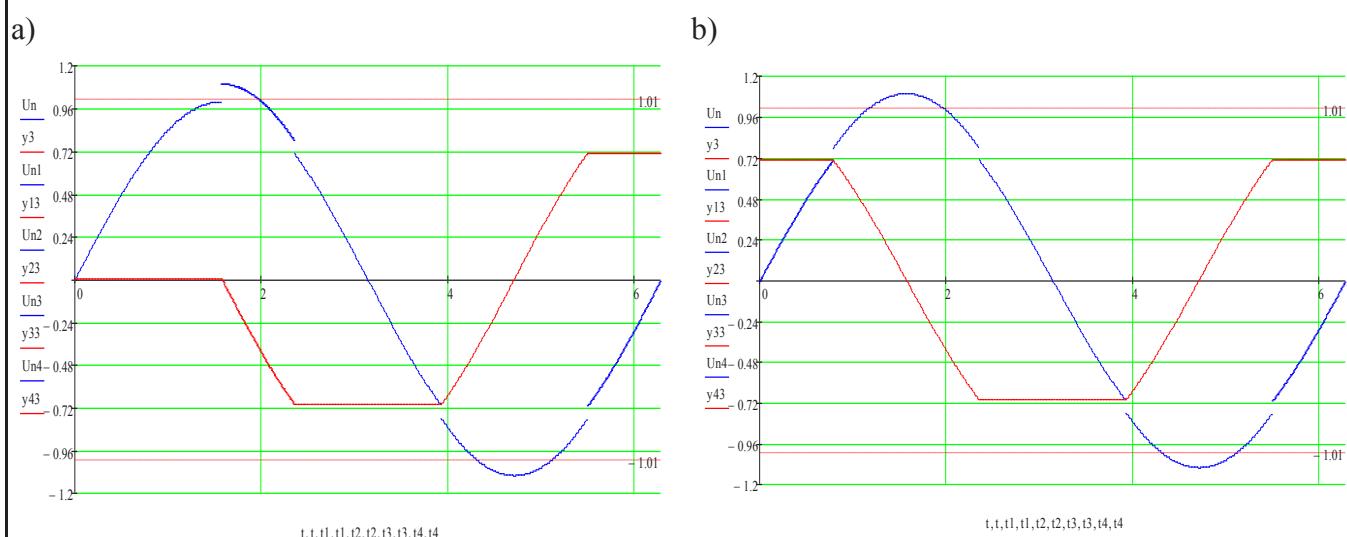


Рис. 7. Рабочие режимы регулятора включения с РЗ в зоне РЗ – ВД:
а – режим начинается с угла 90° ; б – второй период заданного угла коммутации

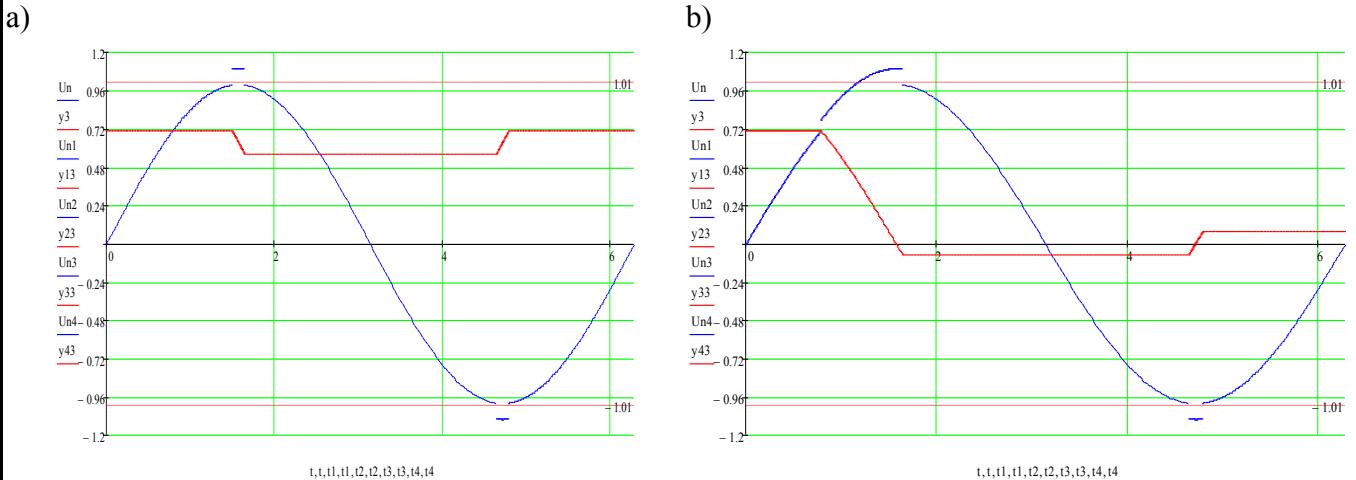


Рис. 8. Рабочие режимы регулятора включения с РЗ в зоне РЗ – ВД: а – изменение угла коммутации; б – изменение угла коммутации с четвертьпериодным запаздыванием

Изменение углов коммутации приводит к одностороннему намагничиванию (см. рис. 8, а и 10, а). Если же при изменении угла регулирования осуществлять четвертьпериодное запаздывание (см. рис. 8, б и 10, б), намагничивания не происходит. Это же явление можно проследить на регуляторе, управляемом способом, описанным в авторском свидетельстве [1] (см. рис. 7, 8, 11 и 12). Таким образом, если при регулировании осуществлять четвертьпериодное запаздывание изменения угла регулирования, то работа регулятора будет осуществляться без намагничивания.

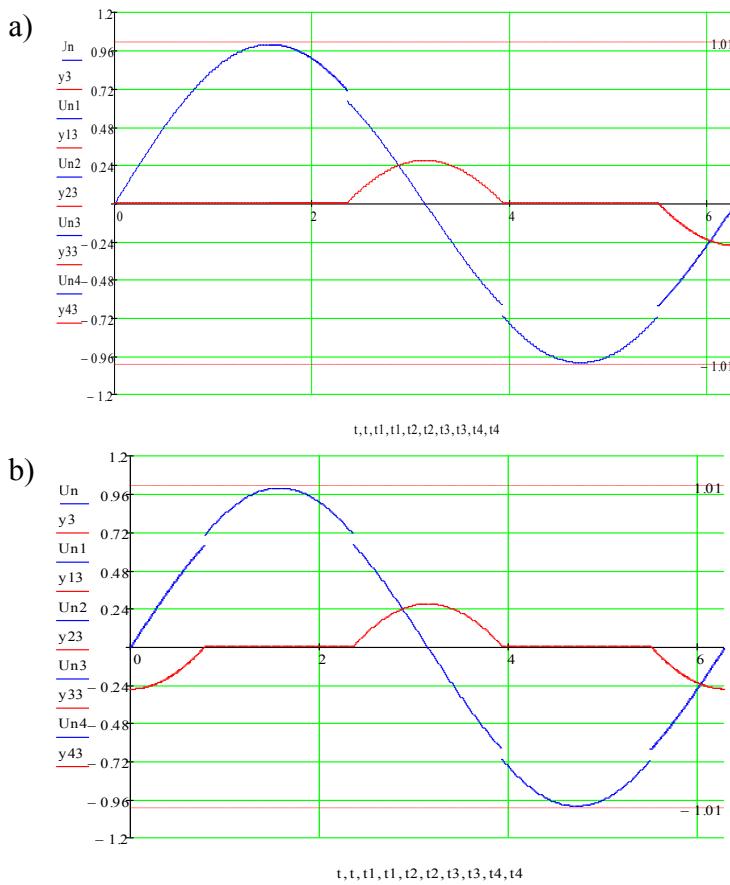


Рис. 9. Рабочие режимы регулятора включения с РЗ в зоне ВО – РЗ:
а – режим начинается с угла 90° ; б – второй период заданного угла коммутации

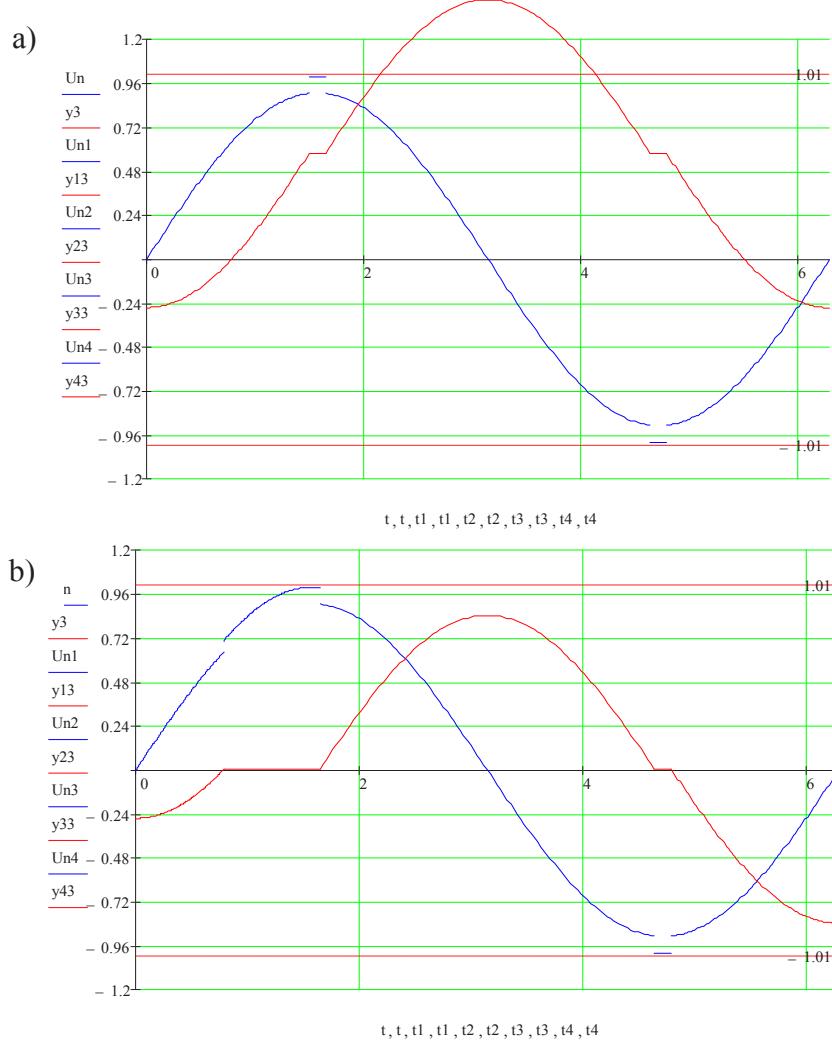


Рис. 10. Рабочие режимы регулятора включения с РЗ в зоне ВО – РЗ: а – изменение угла коммутации; б – изменение угла коммутации с четвертьпериодным запаздыванием

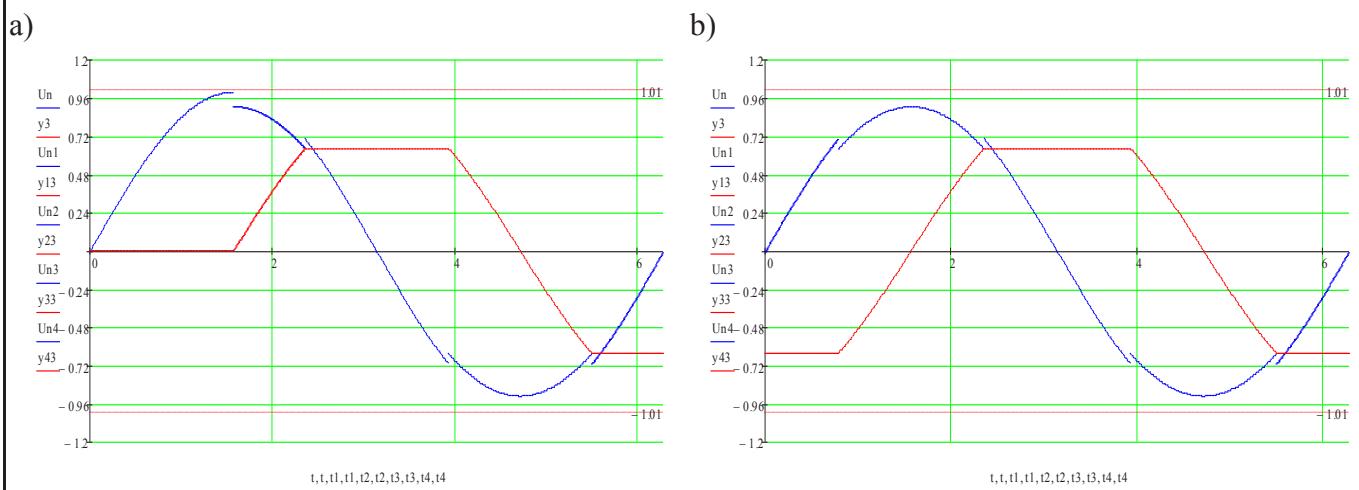


Рис. 11. Рабочие режимы регулятора включения с РЗ в зоне РЗ – ВО:
а – режим начинается с угла 90° ; б – второй период заданного угла коммутации

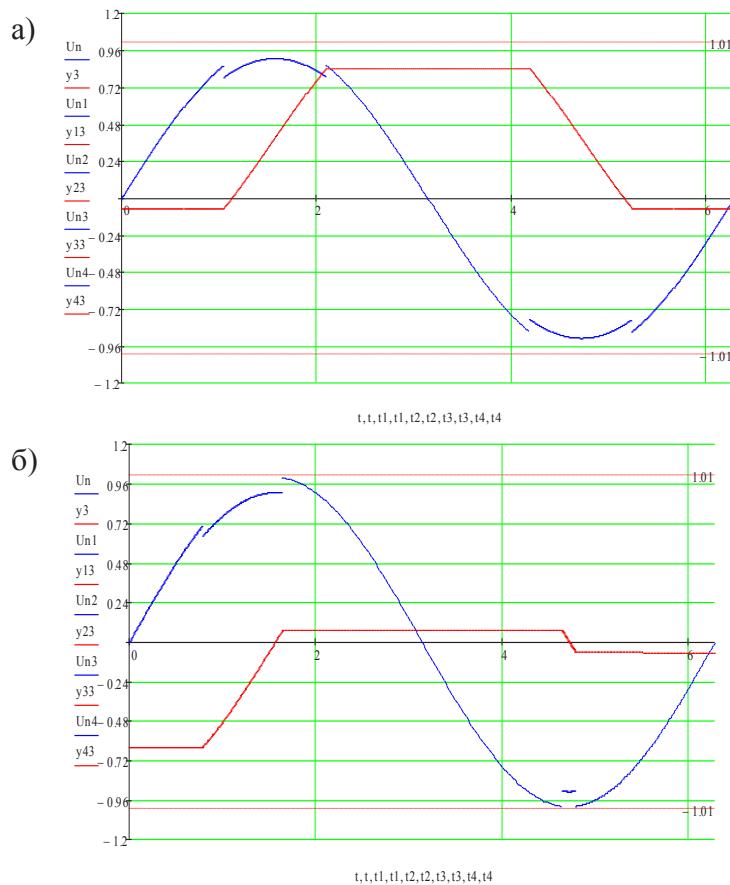


Рис. 12. Рабочие режимы регулятора включения с РЗ в зоне РЗ – ВО: а – изменение угла коммутации; б – изменение угла коммутации с четвертьпериодным запаздыванием

Этого же эффекта можно добиться, если углы регулирования α_1 и β_1 формировать симметрично магнитному потоку (см. рис. 13), а не входному напряжению, как в рассматриваемых способах управления. Изменяя величину и направление отклонения Δu измеренного напряжения нагрузки по отношению к опорному напряжению от нуля до половины размаха пилообразного напряжения, углы регулирования будут соответственно изменяться для α_1 от 90° до 270° , для β_1 – от 270° до 90° .

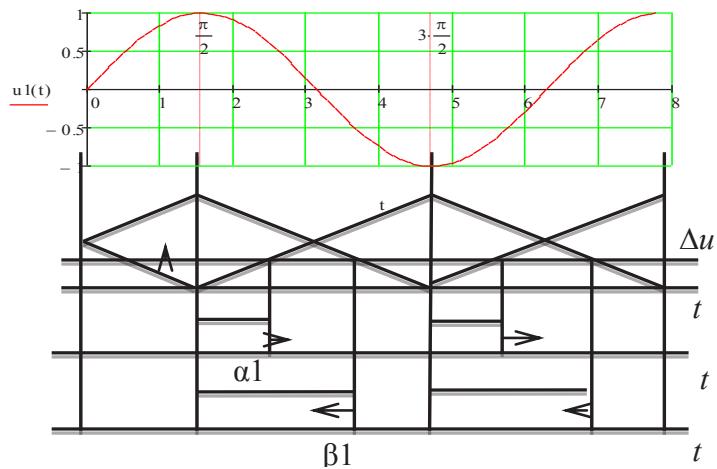


Рис. 13. Формирование углов регулирования симметрично магнитному потоку

На рис. 14 показана работа регулятора в зоне ВО – РЗ для трёх углов способа, упомянутого в авторском свидетельстве [3]; на рис. 15 – в зоне РЗ – ВД и на рис. 16 – в зоне РЗ – ВО способа, описанного в авторском свидетельстве [1].

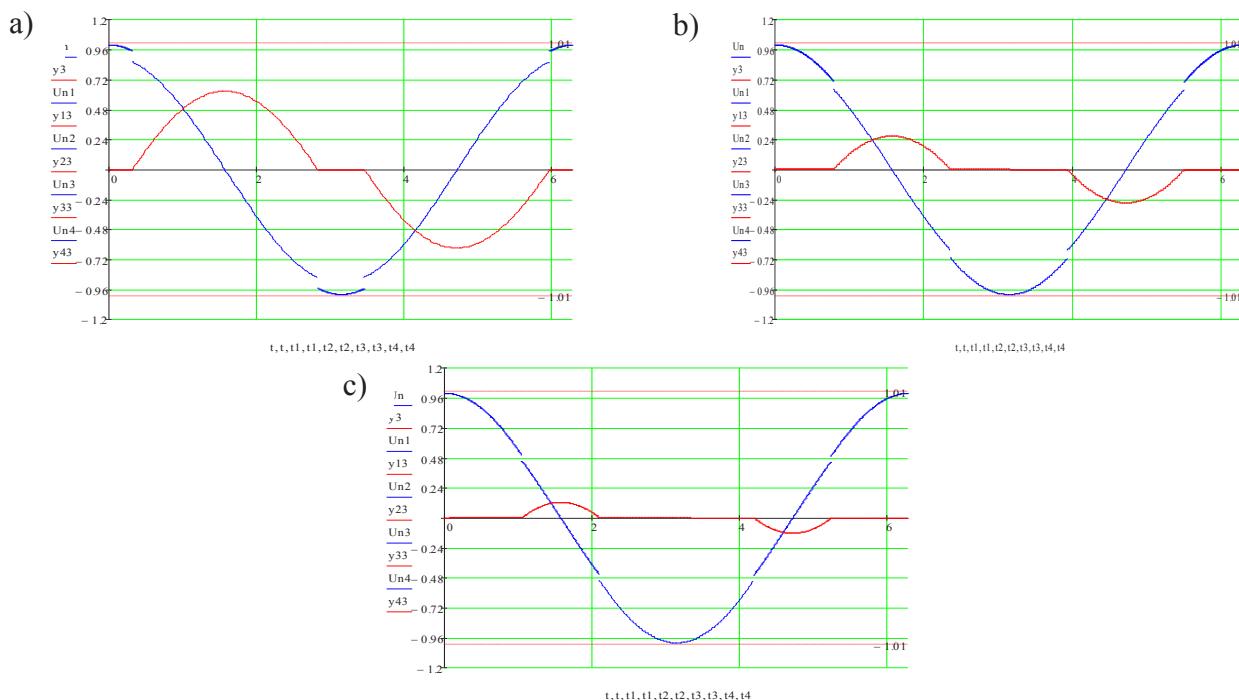


Рис. 14. Иллюстрация работы регулятора в зоне ВО – РЗ с управлением симметрично магнитному потоку: а – работа с начальным углом; б – иллюстрация изменений при уменьшении угла регулирования; с – работа с малым углом регулирования

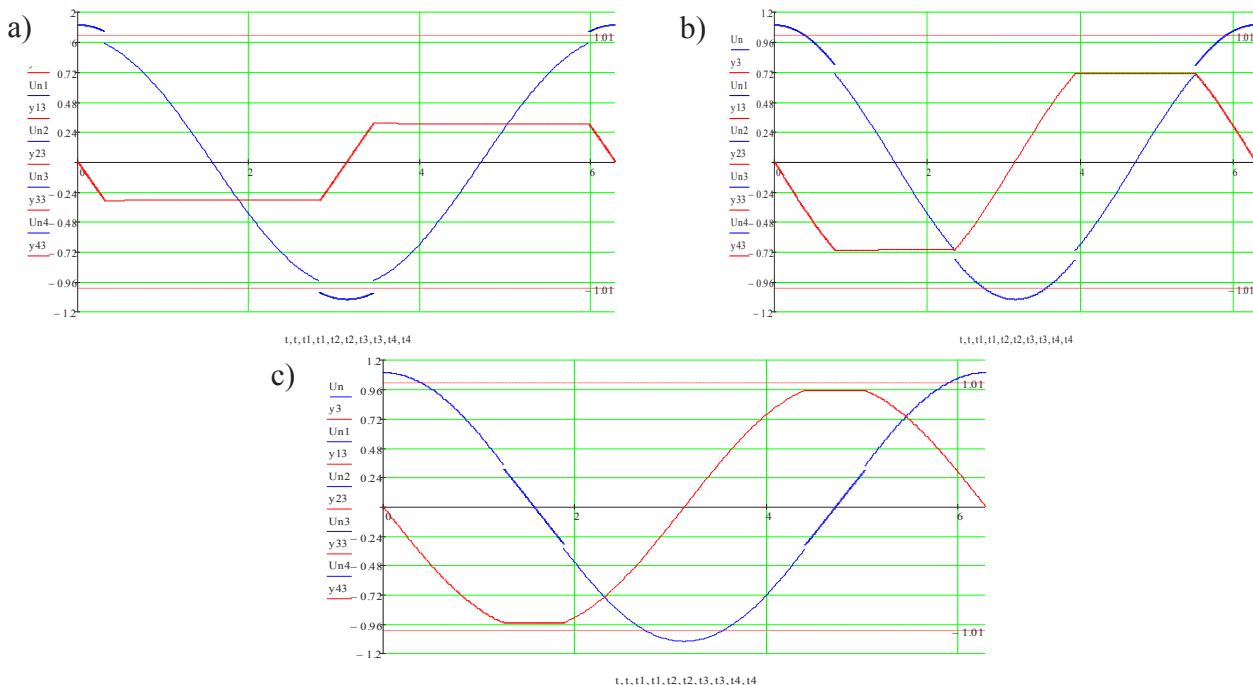


Рис. 15. Иллюстрация работы регулятора в зоне РЗ – ВД с управлением симметрично магнитному потоку: а – работа с начальным углом; б – иллюстрация изменений при уменьшении угла регулирования; с – работа с малым углом регулирования

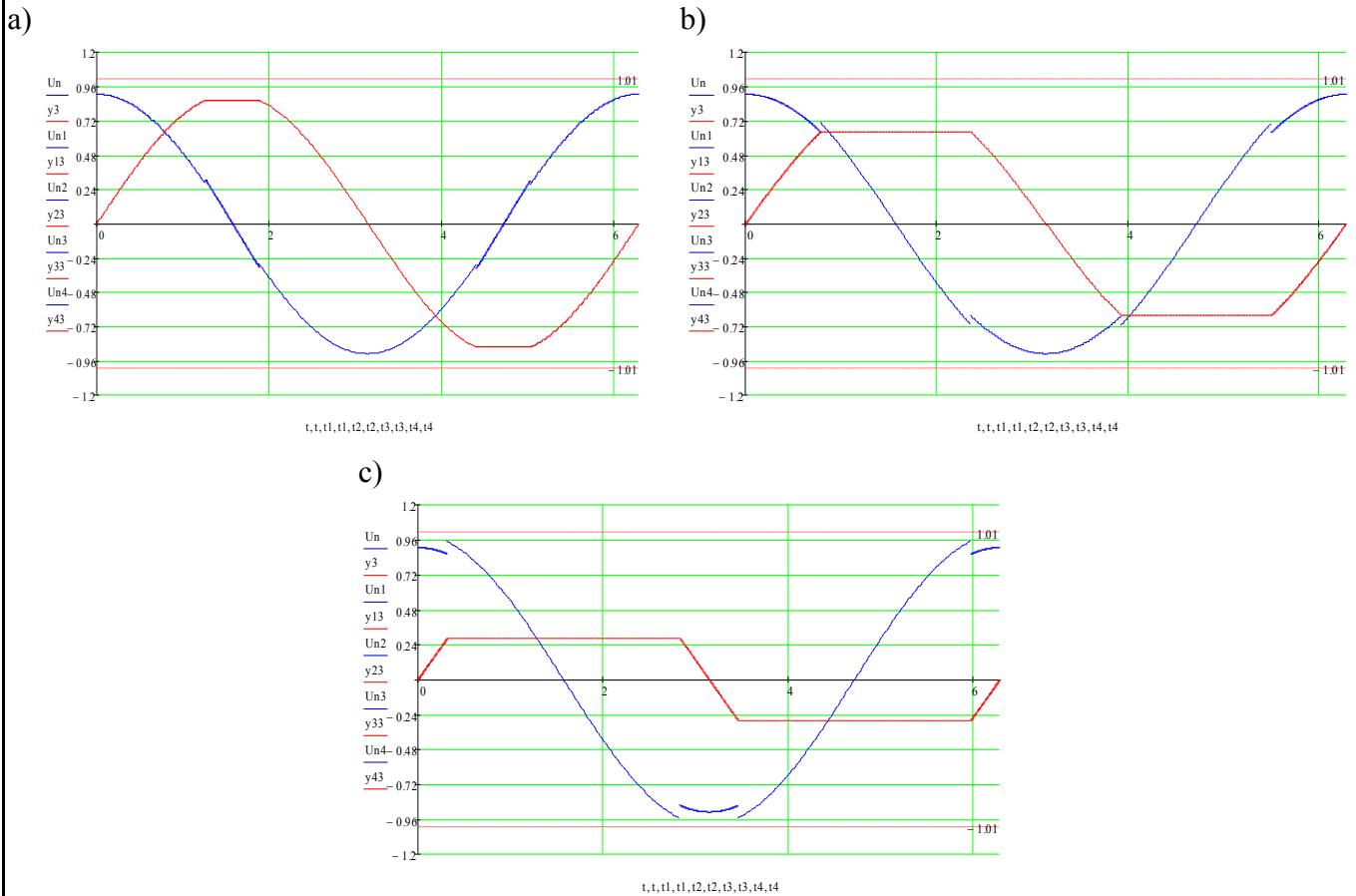


Рис. 16. Иллюстрация работы регулятора в зоне РЗ – ВО с управлением симметрично магнитному потоку: а – работа с малым углом; б – иллюстрация изменений при увеличении угла регулирования; в – работа с большим углом регулирования

На представленных рисунках видно, что при изменении углов регулирования магнитный поток (кривая без скачков) симметричен относительно оси времени и намагничивания не происходит.

Таким образом, математическое моделирование динамических режимов регуляторов переменного напряжения с вольтодобавочным каналом на основе дифференциальных уравнений, решаемых методом Рунге – Кутты, позволило решить проблемы намагничивания ВТ, исключить насыщение стали, включения регуляторов к сети, а также позволило проанализировать влияние характеристики намагничивания, углов включения и характеристики нагрузок на процессы включения и регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 589683 СССР. Способ управления регулятором переменного напряжения с вольтодобавочным каналом / А. В. Кобзев, А. Ф. Сочелев, Г. Я. Михальченко; заявл. 01.04.1976; опубл. 25.01.1978. Бюл. № 3. – 2 с.
2. А. с. 930529 СССР МПК. Регулятор переменного напряжения и способ его управления / А. В. Кобзев, А. Ф. Сочелев, Г. А. Шадрин; заявл. 06.08.1978; опубл. 23.05.1982. Бюл. № 19. – 6 с.
3. А. с. 1121768 СССР МПК Н 02 Р 13/16. Способ управления регулятором переменного напряжения с вольтодобавочным каналом / А. Ф. Сочелев; заявл. 03.11.1982; опубл. 30.10.1984. Бюл. № 40. – 3 с.
4. Сочелев, А. Ф. Разработка и исследование регулирующих органов стабилизаторов напряжения распределительных сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Анатолий Фёдорович Сочелев. – Горький, 1981. – 16 с.



Бердоносов В. Д., Журавлёв Д. О., Зая Хтет Наинг
V. D. Berdonosov, D. O. Zhuravlev, H. N. Zaw

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ БПЛА

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM AND THE SOFTWARE OF THE INTELLECTUAL SUBSYSTEM OF UAV COLLISION AVOIDANCE

Бердоносов Виктор Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: berd1946@gmail.com.

Mr. Victor D. Berdonosov – PhD in Engineering, Professor, Software and Computer Application Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komso-molsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: berd1946@gmail.com.

Журавлёв Дмитрий Олегович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: d.o.zhuravlev@mail.ru.

Mr. Dmitriy O. Zhuravlev – postgraduate student, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komso-molsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: d.o.zhuravlev@mail.ru.

Зая Хтет Наинг – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: zawhtetna-ing.531991@gmail.com.

Mr. Htet N. Zaw – postgraduate student, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: zawhtetna-ing.531991@gmail.com.

Аннотация. В работе рассмотрено понятие зоны взаимодействия БПЛА и её границ. Представлены выражения, позволяющие рассчитать границы этой зоны. Предложен интеллектуальный алгоритм ранжирования «угроз» по степени опасности. Показано в виде блок-схемы программное обеспечение, реализующее этот алгоритм и обеспечивающее реализацию скоростного манёвра. Программное обеспечение апробировано прямым моделированием.

Summary. The paper presents the concept of the zone of interaction of the UAV and its boundaries. Expressions are presented that allow to calculate the boundaries of this zone. An intelligent algorithm for ranking threats by degree of danger is proposed. Software is presented in the form of a block diagram that implements this algorithm, as well as provides the implementation of high-speed maneuver. The software has been tested by direct modeling.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), предотвращение столкновения, скоростной подход, система управления, зона взаимодействия, манёвр уклонения, уровень угрозы, моделирование.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV), crash prevention, speed approach, control system, interaction zone, evasion maneuver, threat level, simulation.

УДК 004.9

Введение

В настоящее время наблюдается большой интерес к производству и использованию БПЛА. Сфера применения БПЛА постоянно расширяется. Увеличение интенсивности использования БПЛА неизбежно приводит к увеличению их плотности в воздушном пространстве и, следова-

тельно, к увеличению вероятности столкновений со статическими и динамическими объектами. Решением задач предотвращения столкновений занимается большой круг исследователей [6; 7; 10; 11; 12; 13; 14; 15]. Интеллектуальная вычислительная система, предотвращающая столкновения БПЛА, должна решать следующие задачи [10]:

1) обнаружение потенциально опасных динамически движущихся объектов;

2) оценка вероятности столкновения по особенностям и характеристикам поведения этих объектов;

3) выбор и реализация алгоритмов уклонения от столкновений.

Всё разнообразие подходов к решению этих задач можно сконцентрировать в виде морфологической табл. 1.

Таблица 1

Морфотаблица оценки траекторий и реализации манёвров

Элементы	Вариант 01	Вариант 02	Вариант 03	Вариант 04	Вариант 05	Вариант 06	Вариант 07
Размерность пространства траекторий	Двухмерное (2D)	Двухмерное плюс Z (2D+Z)	Трёхмерное 3D	–	–	–	–
Траектории «своего»	Прямая	Дуга	Кусочно-ломаная	Кусочно-дуговая	Кусочно-прямодуговая	–	–
Траектории «чужих» БПЛА	Прямая	Дуга	Кусочно-ломаная	Кусочно-дуговая	Кусочно-прямодуговая	–	–
Манёвры	В плоскости	Скоростной	Высотный	В плоскости и скоростной	Высотно-скоростной	В плоскости и высотный	–
Учёт траекторий «чужих»	Только ближайшего	N ближайших	N ближайших (с вариацией N)	S в R – радиусе от «своего»	M наихудших по расстоянию	K наихудших по скорости	L наихудших по расстоянию и скорости
Реакция «чужого» на «своего» (манёвры)	Отсутствует	Манёвр в плоскости	Скоростной манёвр	Высотный манёвр	Скоростной и в плоскости	Высотно-скоростной	Высотный и в плоскости
Учёт ограничений «своего» по манёвренности	Без ограничений	По R_{min} в плоскости	По ускорению в плоскости	По скороподъёмности	По ускорению в 3D-пространстве	По манёвру в 3D-пространстве	–
Учёт ограничений «чужого» по манёвренности	Не маневрирует	По R_{min} в плоскости	По ускорению в плоскости	По скороподъёмности	По ускорению в 3D-пространстве	По манёвру в 3D-пространстве	–

Наиболее широко [6] используется 2D+Z пространство траекторий как наиболее экономичное с точки зрения вычислительных затрат, по тем же причинам используется линейная аппроксимация [1] для траекторий «своего» и «чужих», что связано с достаточно частым получением информации о движении «своего» и «чужого». Эффективность манёвров в первую очередь определяется ресурсами (в основном энергетическими), необходимыми для их реализации. Манёвры, по мере ухудшения эффективности, можно расположить в следующей последовательности: в плоско-

сти [6; 7; 13], скоростной [7; 13], в плоскости и скоростной [7], высотный [13], в плоскости и высотный, высотно-скоростной. В настоящее время исследователи только в редких случаях учитывают реакцию «угрозы» на перемещение «своего», но появляются работы, в которых прямо или косвенно производится такой учёт [10; 14]. Особый интерес вызывает учёт ограниченных ресурсов БПЛА [6] по манёвренности, скорости, ускорению, скороподъёмности и т. д. Эти ограничения напрямую выводят на границы зоны пространства, ближе которых манёвром не удастся избежать столкновения.

Постановка задачи предотвращения столкновений большого количества БПЛА

Задача предотвращения столкновений двух БПЛА решена [6], однако масштабирование этих решений на большое количество (несколько десятков) взаимодействующих БПЛА не представляется возможным по ряду причин. Во-первых, система предотвращения столкновений должна ранжировать «чужих», так как крайне неэффективно реагировать на всех «чужих» одновременно. Во-вторых, использование в качестве систем обнаружения «чужих» корпоративных систем (АЗН-В и им подобные) [11] сразу в несколько раз увеличивает количество «угроз», которые следует учитывать. В-третьих, некорпоративные системы обнаружения «чужих» (радары, лидары, видеокамера и т. д.) не позволяют осуществлять эффективное обнаружение в городских условиях с большим количеством высотных зданий. В-четвёртых, обработка всего количества обнаруженных «чужих» по полным алгоритмам неизбежно приводит к перегрузке бортовых вычислителей, что особенно актуально для мини- и микроБПЛА, наиболее широко используемых в городах.

В соответствии с морфологической таблицей определим область решаемой задачи: размерность пространства траекторий – двухмерное плюс высота (2D+Z); траектории движения «своего» и «чужого» – линейные; основной манёвр – скоростной; учёт траектории «чужого» – N ближайших (с вариацией $N < 50$); реакция «чужого» на «своего» отсутствует; учёт ограничений «своего» – ограничения по ускорению в плоскости.

Итак, в соответствии с принятой областью решаемой задачи необходимо разработать алгоритм и программное обеспечение, реализующее этот алгоритм. Алгоритм должен минимизировать вычислительные затраты предотвращения столкновений при значительном количестве потенциальных «угроз».

Решение задачи предотвращения столкновений большого количества БПЛА

Решение данной задачи состоит из двух этапов:

- селекция малоопасных потенциальных «угроз» («чужих»), для которых может быть применён упрощённый алгоритм;
- ранжирование опасных «угроз» («чужих») с выявлением наиболее опасной, для которой должен быть реализован манёвр предотвращения столкновения.

Этап 1. Определение критерия классификации «угроз» («чужих») как малоопасных

Наиболее простым критерием будет являться расстояние от «своего» до потенциальной «угрозы». Соответственно можно выделить такое место точек, которое назовём зоной взаимодействия; «угрозы» будем считать малоопасными.

Большинство исследований, связанных с предотвращением столкновений, не затрагивают вопросы зон взаимодействия. Среди авторов, затрагивающих эти вопросы, большинство определяют зону взаимодействия как некоторую сферу вокруг летательного аппарата, проникновение в границы которой другого аппарата означает их столкновение [14]. В скоростном подходе [2; 3; 5] такое понятие аналогично понятию радиуса безопасности, в котором заранее определены габариты летательного аппарата и минимальное необходимое безопасное пространство.

Авторы Бин Фанг и Тефанг Чен определяют зоны взаимодействия как участок пространства между аппаратом и границей безопасного круга [10]. Участок пространства похож на радиус летательного аппарата в скоростном подходе, только значение этого радиуса несколько больше. При обнаружении «угрозы» сравниваются дистанции между обоими аппаратами с радиусом безопасного круга, а также сравниваются расстояние до траектории угрозы и радиус безопасного круга. В зависимости от сравнения расставляются уровни угрозы, выбирается манёвр уклонения. Авторами представлена программа моделирования для двух аппаратов.

Скоростной подход, предложенный в работах [2; 3; 5], позволяет оценивать вероятность столкновения и рассчитывать необходимое ускорение или замедление для успешного предотвращения столкновения. Результативность этого подхода была продемонстрирована в специально разработанной программе моделирования для двух БПЛА [8; 9]. С увеличением количества «чужих» потребовались введение механизма определения уровня угрозы столкновения, выявление наиболее опасного БПЛА (с наибольшим уровнем угрозы) и выбор необходимого манёвра уклонения [4].

Для решения этой задачи было введено понятие зоны взаимодействия. Зона взаимодействия – зона вокруг БПЛА, находящаяся между ближней и дальней границами. Ближней границей ($R_{ne}(\beta)$) считается такое минимальное расстояние в зависимости от угла между траекторией «своего» и положением угрозы (β), на котором аппарат сможет совершить скоростной манёвр уклонения. Дальняя граница ($R_{fu}(\beta)$) – это максимальное расстояние, на котором начинает появляться необходимость применения скоростного манёвра.

Прямое математическое моделирование по методу Монте-Карло показало, что зона взаимодействия имеет каплеобразную форму с острой частью, совпадающей с курсом движения «своего»; по курсу движения и сзади наблюдаются мёртвые зоны (см. рис. 1).

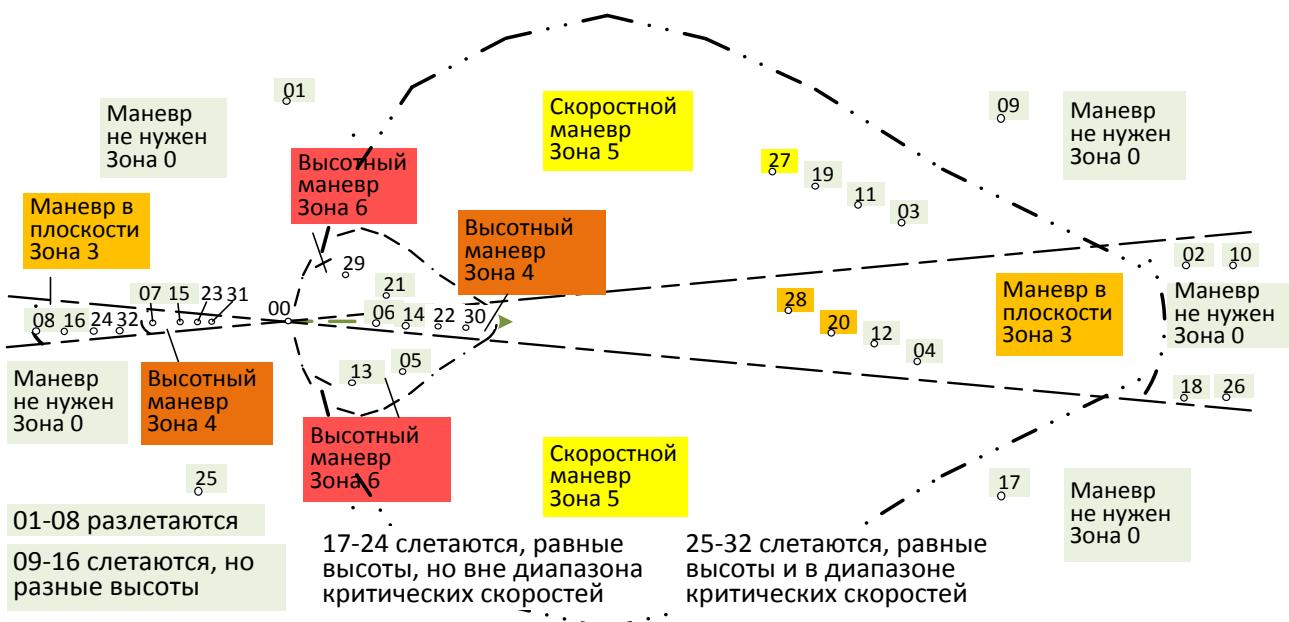


Рис. 1. Распределение зон в воздушном пространстве «своего» и распределение «чужих» на имитаторе воздушного пространства. Цифрами указаны «чужие»; «свой» движется слева направо

Мёртвые зоны – зоны, в которых отсутствует возможность расчёта параметров скоростного манёвра, вызванная особенностью вычислений. Границы зоны взаимодействия зависят от многих параметров, таких как скорость движения «своего», скорость «угрозы», радиусы аппаратов, расстояния обоих аппаратов до точки столкновения, максимально возможное ускорение (замедление), угол схождения траекторий обоих аппаратов, угол между траекторией «своего» и отрезком между центрами обоих аппаратов. Апроксимирующая функция для ближней границы выглядит следующим образом:

$$R_{ne}(\beta) = u_0 + u_1 \cdot (u_2 - \beta) + u_3 \cdot (u_4 - \beta)^2 + u_5 \cdot (u_6 - \beta)^6,$$

где β – угол между траекторией «своего» и положением «угрозы»; u_i – коэффициенты аппроксимирующей функции: $u_0 = -1,065 \cdot 10^7$; $u_1 = -299,251 8$; $u_2 = -3,295 6 \cdot 10^4$; $u_3 = 0,030 2$; $u_4 = 5,107 2 \cdot 10^3$; $u_5 = 1,187 3 \cdot 10^{-9}$; $u_6 = 96,238 5$.

Полученные выражения для границ зоны взаимодействия позволяют перейти к следующей задаче – ранжирование угроз.

Этап 2. Ранжирование угроз в зоне взаимодействия

Для ранжирования угроз необходимо ввести их классификацию, которую удобнее всего отобразить на полигоне, имитаторе воздушного пространства (см. рис. 1).

В результате распределения зон по уровням получаем: 0 – угрозы нет (по крайней мере, в текущий момент времени); 3 – «чужой» в мёртвой зоне между дальней и ближней границами; 4 – «чужой» в мёртвой зоне внутри ближней границы; 5 – «чужой» в зоне взаимодействия, и скорость «своего» находится в опасном диапазоне; 6 – «чужой» внутри ближней границы зоны взаимодействия, и скорость «своего» находится в опасном диапазоне.

В табл. 2 представлено описание характеристик всех возможных вариантов «угроз» («чужих»).

Таблица 2

Распределение номеров «угроз» по характеристикам

Положение «угроз» относительно зоны взаимодействия	Разлетаются	Слетаются, на другой высоте	Слетаются, на той же высоте, скорость вне критического диапазона	Слетаются, на той же высоте, скорость в критическом диапазоне
За внешней границей зоны взаимодействия	01	09	17	25
За внешней встречной границей мёртвой зоны	02	10	18	26
В зоне взаимодействия	03	11	19	27
Во встречной мёртвой зоне	04	12	20	28
Внутри ближней границы зоны взаимодействия	05	13	21	29
Внутри ближней границы встречной мёртвой зоны	06	14	22	30
Внутри ближней границы попутной мёртвой зоны	07	15	23	31
Внутри попутной мёртвой зоны	08	16	24	32

Текстовое описание алгоритма ранжирования «угроз» выглядит следующим образом:

0. Всем «чужим» БПЛА установить уровень угрозы, равный 0.

1. Определить движение БПЛА относительно точки пересечения траекторий: а) оба БПЛА движутся к точке пересечения траекторий, уровень угрозы установить равным 1; б) только один БПЛА движется в точку пересечения траекторий или ни одного БПЛА (БПЛА разлетаются), уровень угрозы не менять.

2. Для всех «чужих», уровень угрозы которых равен больше 0, сравнить высоты, на которых движутся аппараты: если БПЛА движутся на одинаковой высоте, то рассчитать относительные расстояния обоих БПЛА от точки столкновения и уровень угрозы установить равным 1, иначе – уровень угрозы установить равным 0.

3. Для всех «чужих», уровень угрозы которых больше 0, сравнить углы схождения с углами мёртвых зон для скоростного манёвра: если «чужой» находится во встречной или попутной мёртвой зоне, то уровень угрозы установить равным 2, иначе – уровень угрозы не менять.

4. Для всех «чужих», уровень угрозы которых больше 1, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с дальней границей мёртвой зоны: если за границей, то уровень угрозы установить равным 0, иначе – уровень угрозы установить равным 3.

5. Для всех «чужих», уровень угрозы которых больше 2, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с ближней границей мёртвой зоны: если внутри границы, то уровень угрозы установить равным 4, иначе – уровень угрозы не менять.

6. Для всех «чужих», уровень «угрозы» которых равен 1, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с дальней границей «угрозы» взаимодействия: если за границей, то уровень «угрозы» установить равным 0, иначе – уровень «угрозы» установить равным 5.

7. Для всех «чужих», уровень угрозы которых равен 5, сравнить расстояние между «своим» и «чужим» с ближней границей зоны взаимодействия: если внутри границы, то уровень угрозы установить равным 6, иначе – уровень угрозы не менять.

8. Для всех «чужих», уровень угрозы которых равен 5, по относительным расстояниям, значениям скоростей и координатам точки столкновения определяются критические скорости, и если скорость «своего» лежит в границах опасного диапазона, то уровень угрозы установить равным 7, иначе – установить равным 0.

9. Для всех «чужих», уровень угрозы которых равен 6, по относительным расстояниям, значениям скоростей и координатам точки столкновения определить критические скорости, и если скорость «своего» лежит в границах опасного диапазона, то уровень угрозы установить равным 8, иначе – установить равным 0.

10. Для всех «чужих» с уровнями угрозы, равными 3, 4, 7, 8, рассчитать время до столкновения и определить «чужой», имеющий минимальное время; к уровню этого «чужого» добавить 10.

11. Если хотя бы у одного «чужого» уровень угрозы больше 10, то отдать команду на иницирование скоростного манёвра.

Динамика уровней угроз для представленных в табл. 2 «чужих» в соответствии с алгоритмом приведена в табл. 3.

Таблица 3

Динамика уровня угроз

Пункты алгоритма	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер «чужого»	Запуск	Расчёт точек пересечения	Проверка на совпадение высоты	Проверка нахождения в мёртвых зонах	Проверка нахождения за дальней границей мёртвой зоны	Проверка нахождения внутри ближней границы мёртвой зоны	Проверка нахождения за дальней границей зоны взаимодействия	Проверка нахождения внутри ближней границы зоны взаимодействия	Проверка по критическим скоростям в зоне взаимодействия	Проверка по критическим скоростям внутри ближней границы
01-08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09-16	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
18	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0
19	0	1	1	1	1	1	5	5	0	0
20	0	1	1	2	3	3	3	3	3	3
21	0	1	1	1	1	1	5	6	6	0
22	0	1	1	2	3	4	4	4	4	4
23	0	1	1	2	3	4	4	4	4	4
24	0	1	1	2	3	3	3	3	3	3
25	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
26	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0

Пункты алгоритма	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер «чужого»	Запуск	Расчёт точек пересечения	Проверка на совпадение высоты	Проверка нахождения в мёртвых зонах	Проверка нахождения за дальней границей мёртвой зоны	Проверка нахождения внутри близней границы мёртвой зоны	Проверка нахождения за дальней границей зоны взаимодействия	Проверка нахождения внутри близней границы зоны взаимодействия	Проверка по критическим скоростям в зоне взаимодействия	Проверка по критическим скоростям внутри близней границы
27	0	1	1	1	1	1	5	5	7	7
28	0	1	1	2	3	3	3	3	3	3
29	0	1	1	1	1	1	5	6	6	8
30	0	1	1	2	3	4	4	4	4	4
31	0	1	1	2	3	4	4	4	4	4
32	0	1	1	2	3	3	3	3	3	3

Для проверки эффективности алгоритма была разработана программа моделирования. Реализация выполнена на языке программирования C#. Программа позволяет моделировать поведение от 2 до 50 летательных аппаратов и реализовывать описанный алгоритм поведения «своего». Блок-схема программы представлена на рис. 2 и состоит из девяти модулей.

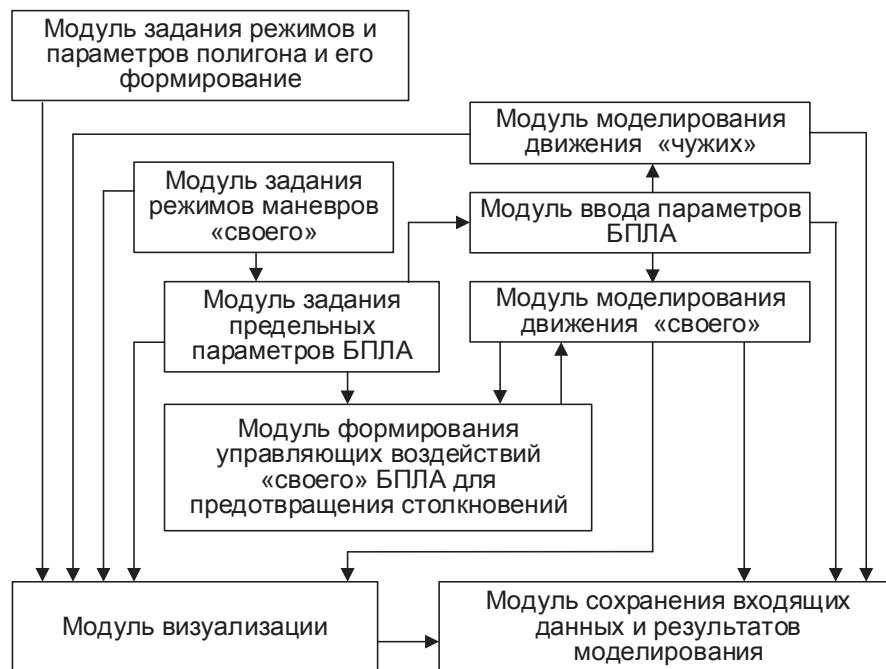


Рис. 2. Блок-схема программы моделирования

Первый БПЛА определяется как «свой», в процессе моделирования производится расчёт вероятности столкновения с остальными БПЛА, которые позиционируются как «угрозы». С учётом зоны взаимодействия опасным БПЛА присваиваются уровни угроз, в соответствии с которыми определяется необходимый манёвр уклонения. Такие расчёты повторяются при каждой итерации моделирования.

Моделирование и его результаты

Моделирование для «своего» и 11 «чужих» БПЛА. Параметры «своего» при моделировании: радиус – 10, начальная скорость – 30, ускорение – 0. Параметры «чужих» при моделировании: радиус – 10, начальная скорость – 39,999, ускорение – 0. БПЛА-угрозы были разделены на пять групп: «угрозы» за дальней границей и в диапазоне критических скоростей (БПЛА с номерами 1 и 2), «угрозы» за дальней границей и вне диапазона критических скоростей (БПЛА 3 и 4), «угрозы» в зоне взаимодействия и в диапазоне критических скоростей (БПЛА 5, 6 и 7), «угрозы» в зоне взаимодействия и вне диапазона критических скоростей (БПЛА 8), «угрозы» на дальней границе (БПЛА 9, 10 и 11).

Результаты моделирования без использования манёвра (см. рис. 3) и с применением скоростного маневра представлены ниже (см. рис. 4). «Свой» БПЛА отмечен номером 0. На рисунках показаны начало и конец моделирования, а также графики изменения расстояний между «своим» и «чужими» аппаратами с течением времени. Красная пунктирная линия показывает расстояние, равное сумме радиусов «своего» и одного из «чужих» аппаратов. Если расстояние между двумя аппаратами станет меньшим либо равным сумме их радиусов, то происходит столкновение. Так как в эксперименте у всех аппаратов одинаковые радиусы (равны 10), то эта граница равна 20 и одинакова для всех «чужих».

На рис. 3, б видно, что 7 аппаратов пересекают красную пунктирную линию. Столкновение происходит с БПЛА под номерами 1, 5, 6, 7, 9, 10, 11. На рис. 3, в с результатом моделирования также можно видеть столкновения, показанные красными крестиками. Так как столкновения с аппаратами 5, 6, 10 и 11 происходят практически в одинаковых местах, на графике они были отмечены одним крестиком.

Результат моделирования той же ситуации, что и на рис. 3, но с применением скоростного маневра уклонения показывает, что «свой» прошёл по траектории мимо других одиннадцати аппаратов без столкновений.

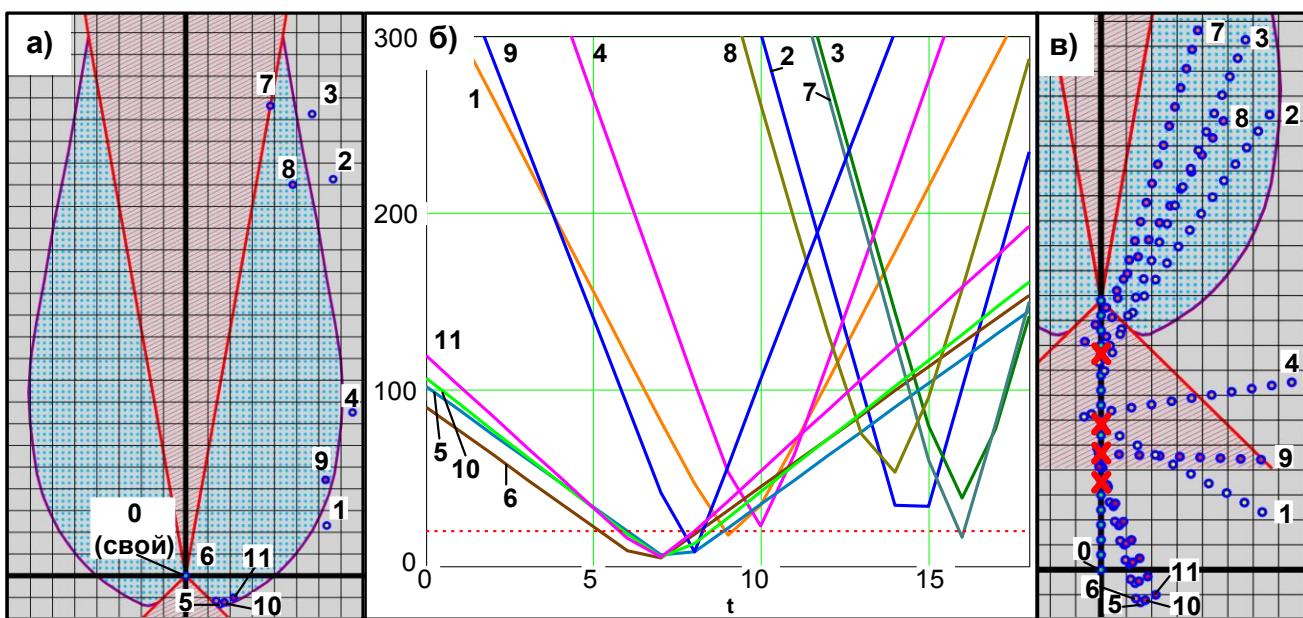


Рис. 3. Результаты моделирования без использования манёвра: а – исходное положение всех аппаратов (красным выделены мёртвые зоны, синим выделена зона взаимодействия); б – графики изменения расстояния между «своим» и каждым БПЛА-угрозой; в – завершение моделирования (места столкновений отмечены красными крестиками)

Рисунок 4, б подтверждает отсутствие столкновений: ни одно расстояние между «своим» и остальными БПЛА не стало меньше суммы их радиусов.

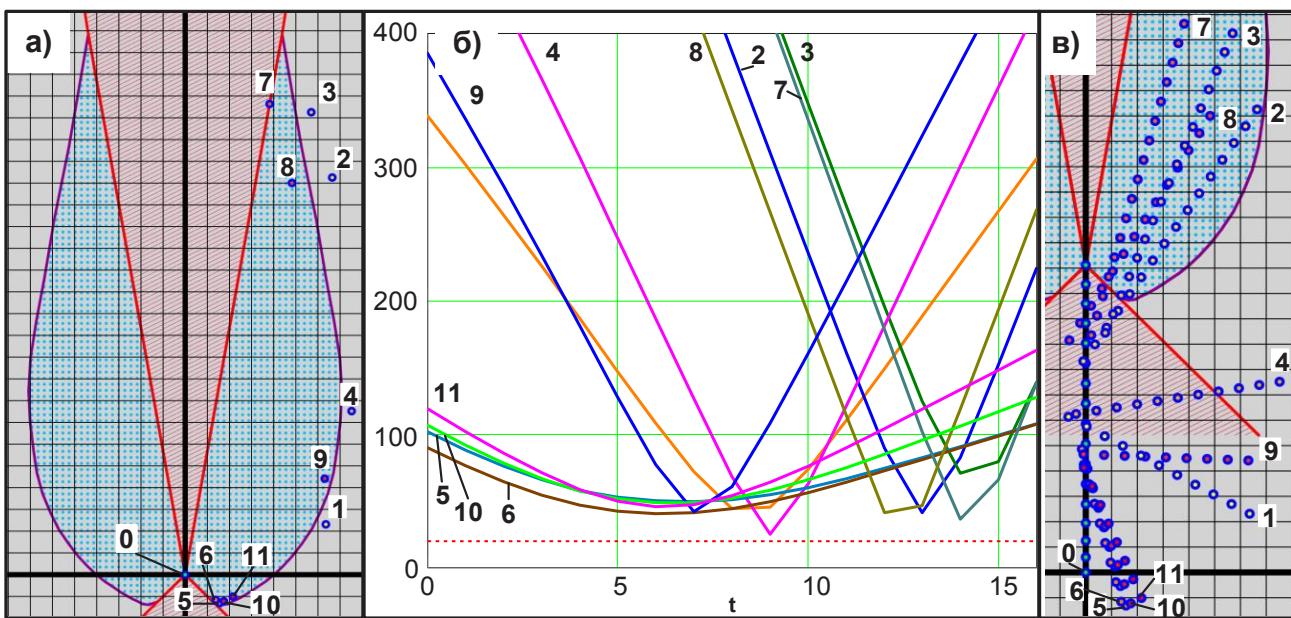


Рис. 4. Результаты моделирования с использованием манёвра: а – исходное положение всех аппаратов (красным выделены мёртвые зоны, синим выделена зона взаимодействия); б – графики изменения расстояния между «своим» и каждым БПЛА-угрозой; в – завершение моделирования, «свой» прошёл весь путь без столкновений

Это доказывает эффективность применения скоростного подхода для предотвращения столкновений большого числа беспилотных летательных аппаратов между собой.

Заключение

В ситуациях, когда несколько беспилотных летательных аппаратов находится в одном воздушном пространстве и несёт угрозу столкновения друг с другом, необходим механизм распределения уровней угрозы для дальнейших определений манёвров выполнения. Таким механизмом может выступать зона взаимодействия, рассчитанная в зависимости от скорости движения «своего» аппарата; относительной скорости «чужого» аппарата; радиусов аппаратов; расстояния обоих аппаратов до точки столкновения; максимально возможного ускорения (замедления) «своего»; угла схождения траекторий обоих аппаратов; угла между траекторией «своего» и прямой между центрами обоих аппаратов. Эффективность такого способа показана успешным моделированием ситуации с одиннадцатью аппаратами-угрозами.

ЛИТЕРАТУРА

- Метод планирования траектории движения точки в пространстве с препятствием на основе итеративной кусочно-линейной аппроксимации [Электронный ресурс] / В. О. Антонов, М. М. Гурчинский, В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева // Системы управления, связи и безопасности, 2018. – Режим доступа: <http://sccts.intelgr.com/archive/2018-01/09-Antonov.pdf> (дата обращения: 22.08.2019).
- Бердоносов, В. Д. К расчёту критических скоростей, ведущих к коллизии двух БПЛА / В. Д. Бердоносов, Х. Н. Зау, Д. О. Журавлёв // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 2017. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 29-30 сентября 2017. – С. 9–14.
- К расчёту точек столкновения двух БПЛА / В. Д. Бердоносов, Д. О. Журавлёв, Т. Г. Барышева, С. Д. Крылова // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 29-30 сентября 2017 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2017. – С. 22–26.

4. Бердоносов, В. Д. К реализации алгоритма предотвращения столкновений массива БПЛА гражданского назначения / В. Д. Бердоносов, Д. О. Журавлёв, М. Д. Ливень // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 05-06 сентября 2018 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – С. 33-37.
5. Бердоносов, В. Д. Об алгоритме оценивания возможности коллизии двух БПЛА / В. Д. Бердоносов, Д. О. Журавлёв, Х. Н. Зay // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 29-30 сентября 2017 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2017. – С. 15–21.
6. Obstacle Detection and Avoidance System Based on Monocular Camera and Size Expansion Algorithm for UAVs / Abdulla Al-Kaff, Fernando García, David Martín [etc] // Sensors 2017. – 2017. – № 17(5).
7. Collision Prediction based Genetic Network Programming-Reinforcement Learning for Mobile Robot Navigation in Unknown Dynamic Environments / Ahmed H. M. Findi, Mohammad H. Marhaban, Raja, Kamiland Mohd Khair Hassan // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2017. – Volume 12(2). – P. 890–903.
8. Speed Approach for UAV Collision Avoidance / V. D. Berdonosov, A. A. Zhivotova, H. N. Zaw, D. O. Zhuravlev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – 22 May. – Vol. 1015. – P. 2–7.
9. Implementation of the Speed Approach for UAV Collision Avoidance in Dynamic Environment / V. Berdonosov, A. Zivotova, D. Zhuravlev, H. N. Zaw // IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2019. – January. – P. 1–6.
10. Bin Fang. Research on UAV Collision Avoidance Strategy Considering Threat Levels / Bin Fang, Tefang Chen // Practical Applications of Intelligent Systems, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2014. – Berlin, Germany, 2014. – P. 887–897.
11. Chin, E. Lin. Quasi-ADS-B Based UAV Conflict Detection and Resolution to Manned Aircraft / Chin E. Lin, Ya-Hsien Lai // Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2015. – Vol. 2015(3). – P. 1–12.
12. An Efficient Method for Multi-UAV Conflict Detection and Resolution Under Uncertainties / David Alejo, José Antonio Cobano, G. Heredia, A. Ollero // Advances in Intelligent Systems and Computing, Robot-2015: Second Iberian Robotics Conference. – 2015. – P. 635–647.
13. Three-dimensional path planning for unmanned aerial vehicle based on interfered fluid dynamical system / Wang Honglun, Lyu Wentao, Yao Peng, Liang Xiao, Liu Chang // Chinese Journal of Aeronautics. – 2015. – Vol. 28(1). – P. 229–239.
14. Xiao Ou Song. Dynamic MAC Protocol Designed for UAV Collision Avoidance System / Xiao Ou Song // Advances in Intelligent Systems and Computing: materials of Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS-2017), 10-13 July 2017. – Turin, Italy, 2017. – P. 489–498.
15. Yazdi Ibrahim Jenie. Cooperative Autonomous Collision Avoidance System for Unmanned Aerial Vehicle / Yazdi Ibrahim Jenie, Erik-Jan van Kampen, Bart Remes // In materials: 2nd CEAS Specialist Conference on Guidance, Navigation & Control, Delft, Netherlands. – 10-12 April. – 2013.

Гусеница Я. Н., Шерстобитов С. А.
Y. N. Gusenitsa, S. A. Sherstobitov

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ФОРМАЛИЗАЦИИ АДЕКВАТНОСТИ ИНФОРМАЦИИ

RESEARCH AND SYSTEMATIC APPROACH TO THE ADEQUACY OF INFORMATION FORMALIZATION

Гусеница Ярослав Николаевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории испытательной (информатики и вычислительной техники) Военного инновационного технополиса «ЭРА» (Россия, Анапа). E-mail: yaromir226@mail.ru.

Mr. Yaroslav N. Gusenitsa – PhD, Head of Testing Laboratory (computer science and computing) Military Innovation Technopolis «ERA» (Russia, Anapa). E-mail: yaromir226@mail.ru.

Шерстобитов Сергей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Главного научного метрологического центра Минобороны России (Россия, Мытищи). E-mail: radosti_yad@mail.ru.

Mr. Sergey A. Sherstobitov – PhD, Major Researcher of Main Scientific Metrology Center (Russia, Mytischi). E-mail: radosti_yad@mail.ru.

Аннотация. В работе представлен научно-методический подход, который позволяет формализовать адекватность информации с позиции её синтаксических, семантических и прагматических свойств. В основе предложенного подхода лежит идея представления тезауруса с использованием семантических сетей и фреймов, а также определения его информационной энтропии. Установлены базовые закономерности прагматической адекватности информации. На конкретных примерах показаны зависимости, влияющие на её изменение. Даны рекомендации формирования тезауруса, имеющего наилучшую адекватность информации. Указана практическая значимость разработанного научно-методического подхода. Определены дальнейшие направления его развития, связанные с разработкой методов объединения тезаурусов нескольких систем, использованием теории нечётких множеств при определении семантической и прагматической адекватности, а также исследованием вопросов оценивания адекватности неоднородных моделей систем, которые построены на основе различных методов моделирования.

Summary. This paper presents a scientific and methodical approach that allows to formalize the adequacy of information from the perspective of its syntactic, semantic and pragmatic properties. At the core of this approach is the idea of submission of the thesaurus with semantic networks and frames, as well as determining its information entropy. Established the basic laws of pragmatic adequacy of the information. Specific examples are shown depending on, to roll on its change. The recommendations form a thesaurus having the best adequacy of the information. It contains the practical importance of the developed scientific and methodological approach. The further directions of its development related to the development of methods for combining multiple thesauri systems using fuzzy set theory in determining the semantic and pragmatic adequacy and research issues of evaluation of the adequacy of inhomogeneous models of systems that are based on various modeling techniques.

Ключевые слова: тезаурус, синтаксическая адекватность информации, семантическая адекватность информации, прагматическая адекватность информации, исчисление предикатов, семантическая сеть, фрейм, предикат, ориентированный граф, зона, матрица смежности, информационная энтропия.

Key words: thesaurus, syntax adequacy of information, semantic information the adequacy, adequacy of information pragmatic, predicate calculus, semantic network, frame, predicate, directed graph, area, adjacency matrix, information entropy.

УДК 519.172: 519.722

Введение

Современный этап развития общества характеризуется активным использованием робототехники и интеллектуальных процессов, созданием и интеграцией информационных и телекоммуникационных систем различного назначения в единое информационное пространство. И уже сейчас не существует такой области науки и техники, такой сферы практической деятельности людей, таких систем, где одним из решающих факторов прогресса не были бы информационные технологии. Они составляют неотъемлемую часть любой человеческой деятельности, в том числе и в сфере обороны и безопасности.

Основу информационных технологий составляет информация, циркулирующая в системах. С позиции материалистической философии информация представляет собой отражение объективной реальности. Информация не материальна, но она является свойством материи. Поэтому, как и любой материальный объект, информация обладает определённым качеством, причём от этого качества зависит эффективность функционирования систем в целом.

В настоящее время по вопросам определения качества информации отечественными и зарубежными теоретиками написано значительное количество трудов.

Фундаментальной работой в формализованном описании свойств информации считается статья К. Шеннона [13]. В ней приводится формула информационной энтропии для определения количества информации. Эта работа является основой теории информации, теории передачи информации, теории алгоритмов и т. д.

Другое направление по формализованному описанию свойств информации связано с определением точности и достоверности. Данное направление основано на теории вероятностей и математической статистике и широко используется на практике при обработке измерительной информации и других экспериментальных данных.

На сегодняшний день существуют работы, посвящённые описанию таких свойств информации, как репрезентативность, содержательность, полнота, доступность, актуальность, своевременность и др. [1; 7]. Однако, как это было отмечено в статье [3], указанные свойства характеризуют не столько информацию, сколько её потребителя. Поэтому для них сложно подобрать количественные показатели, которые могли бы быть использованы для формулирования объективных требований к качеству информации.

Особое внимание заслуживают работы, посвящённые количественному описанию адекватности информации. С точки зрения адекватности у информации выделяют три свойства: синтаксис, семантику, прагматику. Синтаксические свойства адекватности отражают структурный аспект информации. Семантические свойства адекватности выражают смысловой аспект информации. Прагматические свойства адекватности отражают потребительский аспект информации. Таким образом, перечисленные свойства информации соответствуют трём ступеням познания истины: от живого созерцания к абстрактному мышлению и от него – к практике, – таков диалектический путь познания истины, объективной реальности. В настоящее время по данному направлению активно ведутся исследования, основной акцент в которых сделан на формализации семантических [8] и прагматических [4; 9; 10] особенностей информации. Меньше работ посвящено комплексному определению синтаксических, семантических и прагматических особенностей информации [3]. В то же время в существующих работах недостаточное внимание удалено аналитической взаимоувязке перечисленных свойств информации.

Целью данной статьи является формализация адекватности информации с позиции её синтаксических, семантических и прагматических свойств на основе теории графов и теории информации.

Содержание научно-методического подхода

Пусть имеется система A , лингвистическое обеспечение которой построено на языке, содержащем априорную информацию о некоторой исследуемой системе B .

Элементами языка, как это описано в работе [11], являются конечное множество V существительных («индивидуалов») и конечное множество E прилагательных («предикатов»), на основе которых можно построить простые предложения. Так, если $v \in V$ есть существительное,

а $e \in E$ – прилагательное, то предложение ev читается как « v имеет свойство e » или, проще сказать, « v есть e », при этом каждое простое предложение описывает определённое состояние системы B .

Для построения более сложных предложений могут использоваться логические связки:

- ¬ – отрицание (логическое *не*);
- ∨ – дизъюнкция (логическое сложение);
- ∧ – конъюнкция (логическое умножение);
- ⇒ – импликация (логическое следствие).

С позиции ассоционистской теории, представленной в работе [5], восприятие системой A системы B происходит через понятия, которые определены существительными. Понятия являются частью информации о системе B . Они же связаны с другими понятиями. При этом связи представляют собой свойства системы B . Совокупность понятий и связей между ними образуют семантическую сеть, представляющую собой ориентированный граф, вершины которого соответствуют понятиям, а дуги – ассоциациям между этими понятиями. Следовательно, совокупность всех простых предложений, описывающих состояния системы B , графически может быть представлена в виде ориентированного графа $G(V, E)$, который состоит из множества вершин V и множества дуг E . Данный ориентированный граф является тезаурусом системы A , то есть словарём, содержащим понятия и определения о системе B .

Пример простейшего тезауруса, состоящего из четырёх существительных и трёх предикатов, представлен на рис. 1.

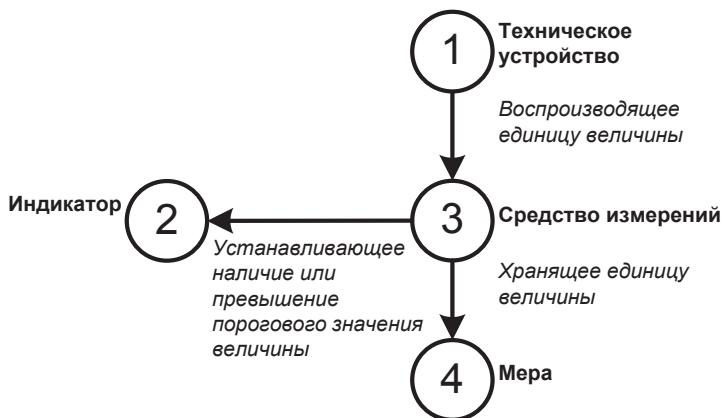


Рис.1. Графический пример простейшего тезауруса

Одной из важных особенностей представления тезауруса с использованием ориентированного графа G является то, что направления дуг между двумя смежными вершинами зависят от языка, на котором построено лингвистическое обеспечение.

Другой важной особенностью представления тезауруса с использованием ориентированного графа G является возможность графического изображения принципа иерархического наследования свойств понятий [12]. Например, в приведённом на рис. 1 тезаурусе понятия «мера» и «индикатор» обладают всеми свойствами понятия «средство измерений».

Для графического представления сложного предложения, состоящего из двух простых, необходимо осуществить отождествление смежных вершин v и u ориентированного графа G , которые для некоторой дуги e являются начальной и конечной вершинами соответственно. Дуга e , инцидентная обеим вершинам, должна соответствовать предикату, который составляет первую часть сложного предложения. Эта же дуга удаляется из ориентированного графа G . Вторую часть сложного предложения составляет дуга e' , для которой инцидентная вершина u является начальной. Аналогично осуществляется графическое представление сложных предложений, состоящих

из большего количества простых предложений. Результатом применения описанной операции является новый ориентированный граф G' с меньшим количеством вершин и дуг. Для приведённого выше примера тезаурус, содержащий сложные предложения, представлен на рис. 2.

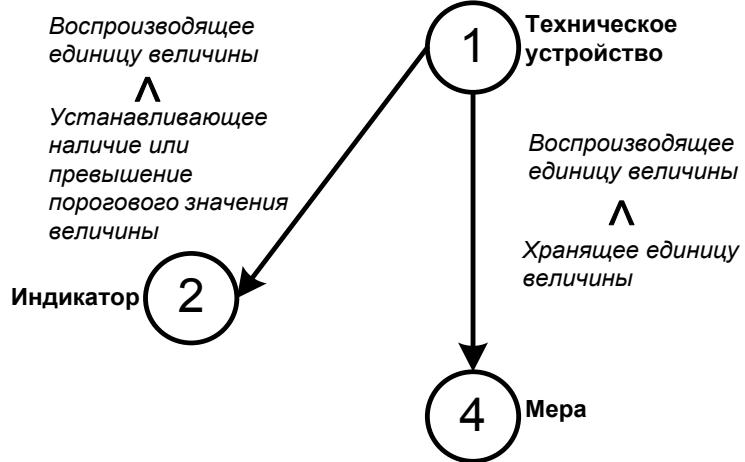


Рис. 2. Графический пример простейшего тезауруса со сложными предложениями

Если система A получает сведения о системе B , то её тезаурус может расширяться, и в ориентированном графе G могут появляться новые вершины v и новые дуги e . Пример тезауруса, расширенного одним существительным и одним предикатом, показан на рис. 3.



Рис. 3. Графический пример простейшего тезауруса, дополненного одним существительным и одним предикатом

Для ориентированного графа G показателем структуры является матрица смежности R , под которой понимается квадратная матрица с элементами a_{ij} , принимающими значение 1, если вершины v_i и v_j смежные, и 0 – в противном случае. При этом порядок матрицы R определяется количеством вершин. Следовательно, если тезаурус системы A содержит n существительных и

если не перекрывающихся по смыслу предикатов, то в качестве показателя синтаксической адекватности информации о системе B может быть использована матрица смежности R порядка n .

Матрица смежности ориентированного графа G , представленного на рис. 1, имеет следующие значения:

$$R(G) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Описание семантической адекватности информации предполагает использование дополнительных исходных данных.

Прежде всего необходимо знать для каждого i -го существительного вероятность r_i его использования системой A . С позиции математической статистики r_i представляет собой частоту использования i -го существительного из n возможных. Поэтому $\sum_{i=1}^n r_i = 1$.

Кроме того, для всех предикатов, по аналогии с существительными, необходимо определить вероятности p_{ij} , которые характеризуют достоверность наличия свойств у системы B .

При этом если из вершины v_i выходит несколько дуг, то $\sum_{\forall j: e_{ij} = (v_i, u_j)} p_{ij} = 1$. Все вероятности p_{ij} являются элементами матрицы вероятностей переходов $M(G)$. Данная матрица получается из матрицы $R(G)$ путём замены элементов a_{ij} на вероятности p_{ij} . При получении системой A новых сведений о системе B вероятности могут изменяться.

Чтобы определить вероятности состояний системы B на основе информации, которая имеется у системы A , необходимо преобразовать $R(G)$ в матрицу $S(G)$ следующим образом:

$$S(G) = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{2n} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix},$$

где $s_{ij} = r_i \cdot p_{ij}$.

В связи с тем, что каждый элемент матрицы $S(G)$ является вероятностью определённого состояния системы B , то в качестве показателя семантической адекватности информации может использоваться информационная энтропия

$$H = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij} \log_2 s_{ij}. \quad (1)$$

Значение показателя семантической адекватности информации зависит от значения показателя синтаксической адекватности информации. Если изменить структуру информации о системе B , то изменится её восприятие системой A . В частности, если в тезаурусе системы A будет недоставать понятий и определений, требуемых для восприятия сведений о системе B , то информационная энтропия будет достаточно высока. Это объясняется тем, что в ориентированном графе G будут отсутствовать определённые вершины и дуги, а следовательно, будет иметь другое значение матрица $S(G)$.

Описание прагматической адекватности информации основано на изменении информационной энтропии H . Если информационная энтропия H уменьшается, то для системы A полученные сведения о системе B являются полезными. Если информационная энтропия H не изменяется, то для системы A полученные сведения о системе B являются бесполезными. Наконец, если информационная энтропия H увеличивается, то для системы A полученные сведения о системе B являются дезинформацией.

С учётом этого факта для количественного определения показателя прагматической адекватности информации необходимо найти разность значений информационной энтропии системы A после и до получения сведений о системе B :

$$I = H_{\tau} - H_{\tau-1}, \quad (2)$$

где $H_{\tau-1}$ – информационная энтропия системы A до получения сведений о системе B ; H_{τ} – информационная энтропия системы A после получения сведений о системе B .

Как видно из формулы (2), показатель прагматической адекватности информации зависит от показателя семантической адекватности информации. Если система A не воспринимает сведения о системе B , то такая информация ей не нужна.

Кроме того, показатель прагматической адекватности информации обладает следующими свойствами:

1. Если $I = 0$, то полученные сведения о системе B являются бесполезными.
2. Если $I > 0$, то полученные сведения о системе B являются полезными.
3. Если $I < 0$, то полученные сведения о системе B являются дезинфекцией.

Следует отметить, что перечисленные особенности показателя прагматической адекватности информации схожи со свойствами ценности информации, предложенными в работе [9].

Другие способы представления информации

В многочисленных работах в области искусственного интеллекта помимо семантических сетей используют другие способы представления информации. Основными из них являются: исчисление предикатов, продукция, фреймы.

В работе [5] отмечается, что семантические сети мало чем отличаются от исчисления предикатов и продукции. Использование ориентированных графов в семантических сетях позволяет лишь наглядно продемонстрировать отношения между понятиями. Значительным преимуществом семантических сетей, по сравнению с исчислениями предикатов и продукцией, является возможность первых графически изображать принцип иерархического наследования свойств понятий. Этаже особенность определяет их сходство с фреймами, которые впервые описаны в работе [6].

Вместе с тем считается, что фреймы обладают преимуществом перед семантическими сетями, так как не только имеют возможность изображения иерархического принципа наследования свойств понятий, но и позволяют описывать табличное представление информации. Однако, на наш взгляд, семантические сети являются более общим способом представления информации и пригодными для табличного представления информации.

Продемонстрируем наше утверждение на следующем примере (см. табл. 1). В табл. 1 имеется информация о количестве сотрудников метрологического воинского подразделения, включённых в распределение календарного фонда рабочего времени.

Таблица 1
Количество сотрудников

Категория	На год, чел.	Фактически выполняло работы (участвовало в мероприятиях) в течение года, чел.
Военнослужащие	2	1
Гражданский персонал Вооружённых сил РФ	6	5

Для представления таблицы в виде ориентированного графа необходимо осуществить следующие действия. В качестве начальной вершины ориентированного графа выбрать имя таблицы. Из начальной вершины построить дугу в вершину, соответствующую заголовку первого столбца таблицы. Из неё построить дугу к вершине, которая соответствует заголовку второго столбца таблицы. Аналогично необходимо построить дуги для вершин, соответствующих заголовкам остальных столбцов таблицы. Каждая запись в таблице представляет собой путь с вершинами, соответствующими значениям полей. Эти же вершины являются конечными для дуг, исходящих из вершин, соответствующих заголовкам столбцов таблицы.

В результате описанных действий будет получен ориентированный граф, представленный на рис. 4.

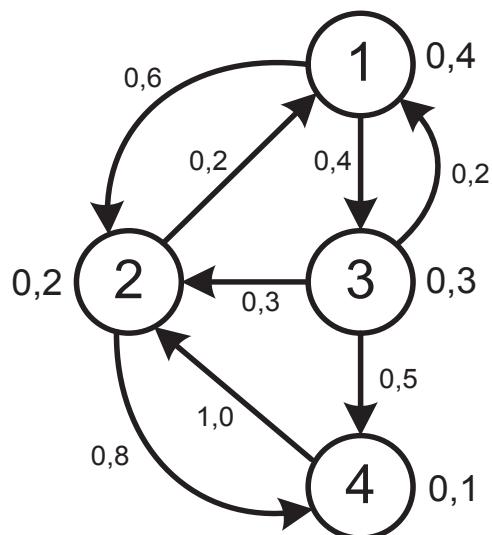
Если таблица имеет достаточно много строк, то семантическая сеть получается довольно сложной. Поэтому отдельные фрагменты семантической сети целесообразно заменять таблицами.

Таким образом, графическое изображение тезауруса системы A о системе B является комбинацией семантических сетей и фреймов, объединяющей достоинства обоих способов представления информации.

Расчётные примеры

Пример 1. Рассмотрим расчётный пример для тезауруса системы A , представленного в виде ориентированного графа G_{t-1} , содержащего априорную информацию (см. рис. 5, а), и ориентированного графа G_t , содержащего апостериорную информацию (см. рис. 5, б) о системе B , при этом ориентированный граф G_{t-1} отличается дополнительным существительным со связующими предикатами.

а)



б)

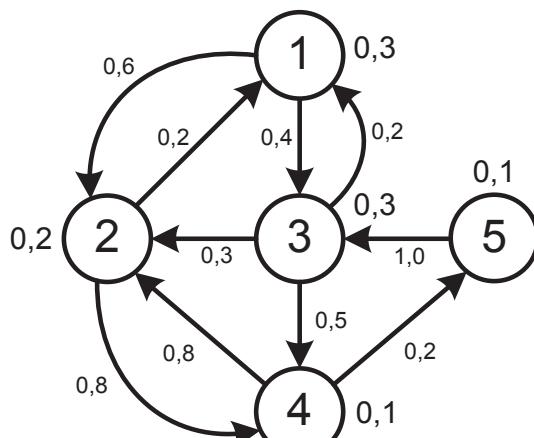


Рис. 5. Графический пример простейшего тезауруса системы A :

а – с априорной информацией о системе B ; б – с апостериорной информацией о системе B

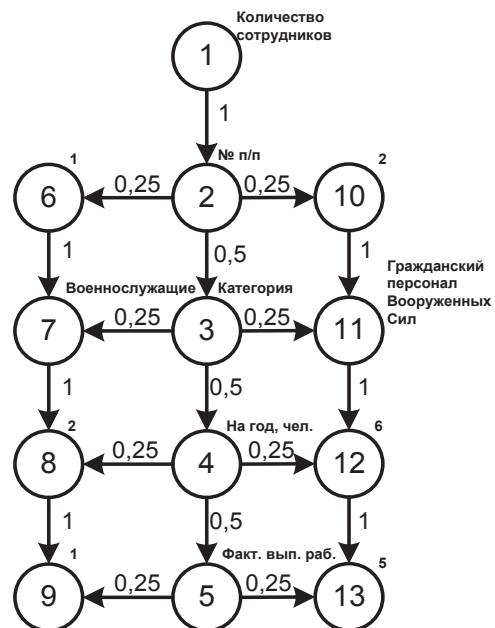


Рис. 4. Ориентированный граф, соответствующий табл. 1

Показатели синтаксической адекватности информации с априорной и апостериорной информацией равны соответственно:

$$R_{\tau-1}(G) = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \text{ и } R_\tau(G) = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

На основе $R_{\tau-1}(G)$ и $R_\tau(G)$ получим матрицу $S_{\tau-1}(G)$ тезауруса системы A с априорной информацией о системе B и матрицу $S_\tau(G)$ тезауруса системы A с апостериорной информацией о системе B :

$$S_{\tau-1}(G) = \begin{vmatrix} 0 & 0,24 & 0,16 & 0 \\ 0,04 & 0 & 0 & 0,16 \\ 0,06 & 0,09 & 0 & 0,15 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \text{ и } S_\tau(G) = \begin{vmatrix} 0 & 0,18 & 0,12 & 0 & 0 \\ 0,04 & 0 & 0 & 0,16 & 0 \\ 0,06 & 0,09 & 0 & 0,15 & 0 \\ 0 & 0,08 & 0 & 0 & 0,02 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

С использованием формулы (1) рассчитаем показатели семантической адекватности информации для тезауруса системы A с априорной и апостериорной информацией о системе B :

$$H_{\tau-1} = 0,372 \text{ [бит]} \text{ и } H_\tau = 0,332 \text{ [бит]}.$$

Теперь определим показатель прагматической адекватности информации. На основе формулы (2) получим $I = 0,372 - 0,332 = 0,04$ [бит].

Таким образом, в рассмотренном примере добавление в тезаурус системы A сведений о системе B снижает общую энтропию, а сведения, полученные о системе B , являются полезными.

Пример 2. Воспользуемся исходными данными для ориентированного графа G_τ из примера 1 (см. рис. 3, б). Добавим предикат, связывающий существительное 5 с существительным 1. Пере распределив вероятности, получим новый тезаурус системы A с информацией о системе B , представленный на рис. 6 в виде ориентированного графа $G_{\tau+1}$.

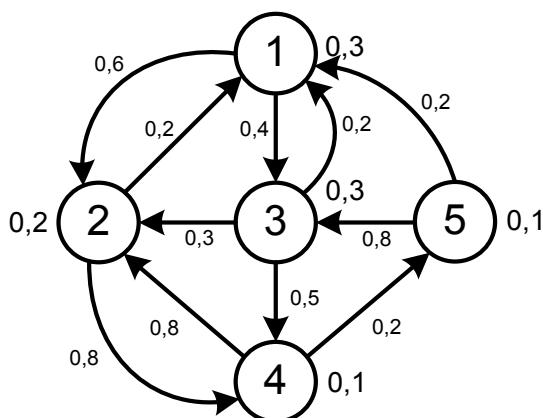


Рис. 6. Графический пример простейшего тезауруса системы A с дополнительным предикатом

Аналогичным образом рассчитаем для него информационную энтропию, получим $H_{t+1} = 0,328$ [бит]. Определим показатель прагматической адекватности информации $I = H_{t+1} - H = 0,004$ [бит]. Следовательно, добавление в тезаурус системы A сведений о системе B также снижает общую энтропию, а сведения, полученные о системе B , являются полезными.

Пример 3. Рассмотрим несколько ориентированных графов, представляющих изменение тезауруса системы A в зависимости от поступления информации о системе B (см. рис. 7).

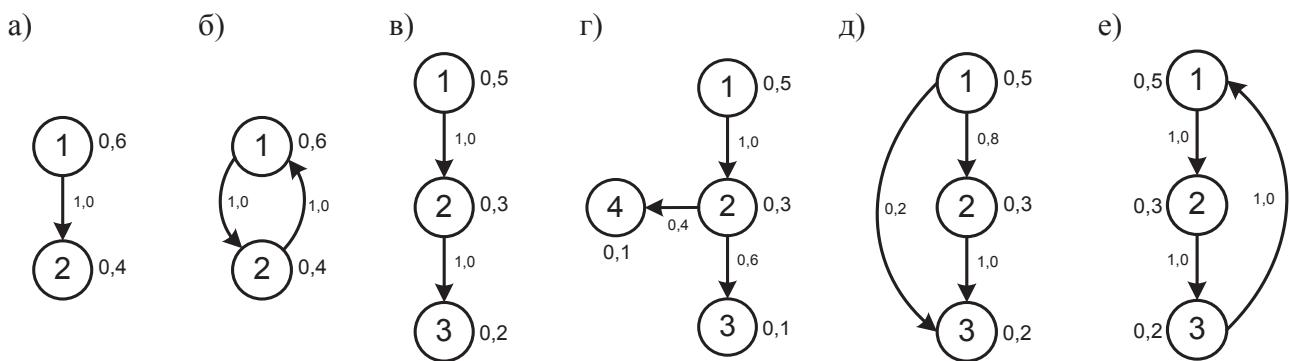


Рис. 7. Графический пример изменения тезауруса системы A в зависимости от получения сведений о системе B

С помощью формулы (1) рассчитаем показатели семантической адекватности информации. Результаты расчётов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчётов (*пример 3*)

Обозначение тезауруса в соответствии с рис. 6	а)	б)	в)	г)	д)	е)
Значение показателя семантической адекватности	0,814	1,117	0,673	0,612	0,505	0,759

Из полученных расчётов видно, как изменяется значение показателя семантической адекватности информации при добавлении новых вершин и новых дуг. Так, например, добавление новых вершин и новых дуг приводит к снижению энтропии. Это объясняет используемые на практике методы проектирования информационных систем, в том числе нормализацию баз данных, когда одна таблица разбивается на несколько связанных между собой таблиц. Кроме того, значение показателя семантической адекватности информации возрастает при появлении замкнутых структур, которые нежелательны при формировании тезауруса. В теории графов подобные структуры называются зонами. Каждая зона представляет собой подграф $C_k = (X_k, U_k)$ ориентированного графа G , в котором для любой пары вершин найдётся путь из одной в другую. Для отыскания зон в управляющем графе может быть использован алгоритм, представленный в работе [2].

Заключение

Таким образом, представленный научно-методический подход позволяет формализовать адекватность информации с позиции её синтаксических, семантических и прагматических свойств. В основе предложенного подхода лежит идея представления тезауруса с использованием семантических сетей и фреймов, а также определения его информационной энтропии. Установлены базовые закономерности прагматической адекватности информации. На конкретных примерах показаны зависимости, влияющие на её изменение. Даны рекомендации формирования тезауруса, имеющего наилучшую адекватность информации.

Представленный научно-методический подход может быть использован при проектировании баз данных, хранилищ данных и баз знаний, а также для исследования систем различного назначения.

Дальнейшее направление развития предлагаемого научно-методического подхода авторы связывают с разработкой методов объединения тезаурусов нескольких систем, использованием теории нечётких множеств при определении семантической и прагматической адекватности, а также исследованием вопросов оценивания адекватности неоднородных моделей систем, которые построены на основе различных методов моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горяев, Ю. А. Информатика: учеб. пособие / Ю. А. Горяев. – М.: МИЭМП, 2005. – 116 с.
2. Гусеница, Я. Н. Алгоритм поиска зон в управляющих графах / Я. Н. Гусеница // Информатика и системы управления. – 2017. – № 3(53). – С. 119–124.
3. Князев, В. В. Качество информации в прикладных информационных системах сферы сервиса / В. В. Князев // Вестник Ассоциации вузов туризма и сервиса. – 2008. – № 1. – С. 11–19.
4. Корогодин, В. И. Информация как основа жизни / В. И. Корогодин, В. Л. Корогодина. – Дубна: Изд. центр «Феникс», 2000. – 205 с.
5. Люгер, Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Дж. Ф. Люгер. – 4-е изд. – М.: Вильямс, 2003. – 864 с.
6. Минский, М. Фреймы для представления знаний / М. Минский. – М.: Мир, 1979. – 152 с.
7. Основы современных компьютерных технологий: учебник / Г. А. Брякалов, С. В. Войцеховский, Е. Г. Воробьев [и др.]; под ред. А. Д. Хомоненко. – СПб.: КОРОНА-принт, 2005. – 672 с.
8. Парамонов, И. Ю. Мера информационной мощности тезауруса и её применение / И. Ю. Парамонов, В. А. Смагин // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2016. – Вып. 8. – С. 5–9.
9. Харкевич, А. А. О ценности информации / А. А. Харкевич // Проблемы кибернетики. – 1960. – Вып. 4. – С. 53–72.
10. Шанкин, Г. П. Ценность информации. Вопросы теории и приложений / Г. П. Шанкин. – М.: Филоматис, 2004. – 128 с.
11. Carnap, R. An Outline of a Theory of Semantic Information / R. Carnap, Y. Bar-Hillel // The Journal of Symbolic Logic. – 1954. – Vol. 19(3). – P. 230–232.
12. Collins, A. M. Retrieval time from semantic memory / A. M. Collins, M. R. Quillian // Journal of verbal learning and verbal behavior. – 1969. – Vol. 8. – № 2. – P. 240–247.
13. Shannon, C. E. A Mathematical Theory of Communication / C. E. Shannon // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27. – P. 379–423.



Жарикова Е. П., Трещев И. А., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л.
E. P. Zharikova, A. I. Treschev, Ya. Yu. Grigoriev, A. L. Grigorieva

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

DETECTION OF SURFACE CONDITION

Жарикова Евгения Павловна – ассистент кафедры прикладной математики и информатики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: evgenia131094@mail.ru.

Mrs. Evgenia P. Zharikova – Teaching Assistant, Applied Mathematics and Computer Science Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: evgenia131094@mail.ru.

Трещев Иван Андреевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой информационной безопасности автоматизированных систем Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ibas@knastu.ru.

Mr. Ivan A. Treschev – PhD in technical Sciences, head of the Department of information security of automated systems, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ibas@knastu.ru.

Григорьев Ян Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, декан факультета компьютерных технологий Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fct@knastu.ru.

Mr. Yan Yu. Grigoriev – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Dean of the Faculty of Computer Technologies, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: fct@knastu.ru.

Григорьева Анна Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой высшей математики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: naj198282@mail.ru.

Ms. Anna L. Grigorieva – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: naj198282@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), способы оценки лесофона: выявление пожаров, угнетённой растительности, вырубок. Исследуется применимость вегетационных индексов (ВИ) для задач ДЗЗ с возможностью их адаптации для объектов неживой природы. Показывается зависимость оптических спектров (видимого и инфракрасного). Осуществляется выбор оптимальных индексов в зависимости от параметров сканирования и расстояния до исследуемой поверхности. Предлагаются алгоритмы реализации программы, определяющей критические области различной природы. Разрабатывается средство автоматизации анализа карты состояний исследуемой поверхности.

Summary. The paper deals with the methods of remote sensing of the earth (ERS). Discusses the methods of assessing timber resources: the identification of fires, oppression of vegetation, deforestation. The applicability of vegetation indices (VI) for remote sensing problems with the possibility of their adaptation to objects of inanimate nature is investigated. The dependence of the optical spectra (visible and infrared) is shown. The optimal indices are selected depending on the scanning parameters and the distance to the surface under study. The algorithms of realization of the program defining critical areas of different nature are offered. Developed a tool to automate the analysis of the map of the States of the sample surface.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, управление летательным аппаратом, оптический спектр, карта расстояний.

Key words: remote sensing, management imately apparatus, optical spectrum, the map of distances.

УДК 004.021:004.93'11

В статье рассматриваются методы дистанционного зондирования Земли с оценкой состояния объектов живой и неживой природы. Большой объём информации о состоянии поверхности Земли несёт в себе отражение от неё солнечного света в различных спектральных диапазонах. Одну из ведущих ролей в дистанционном зондировании играют вегетационные индексы, являющиеся функциями от значений красного (RED, 0,6...0,7 мкм) и инфракрасного (NIR, 0,7...1,0 мкм) диапазонов. Вегетационные индексы позволяют классифицировать объекты живой природы. Рассматриваемые в работе ВИ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Вегетационные индексы и их свойства

Вегетационные индексы	Диапазон	Интенсивность биомассы для корректной работы ВИ	Устойчивость к атмосферным явлениям	Устойчивость к влиянию почвы
RVI	$[0, \infty]$	от 30 %	Высокая	Низкая
NDVI	$[-1, 1]$	от 30 %	Высокая	Низкая
EVI	$[-1, 1]$	от 15 %	Высокая	Высокая
IPVI	$[0, 1]$	от 30 %	Низкая	Высокая
GNDVI	$[-1, 1]$	от 30 %	Высокая	Низкая
PVI	$[-1, 1]$	от 15 %	Низкая	Высокая

Для проведения сравнения ВИ, представленных в табл. 1, проводятся вычисления каждого индекса для одинаковых областей. Результаты измерений представлены на рис. 1, 2.

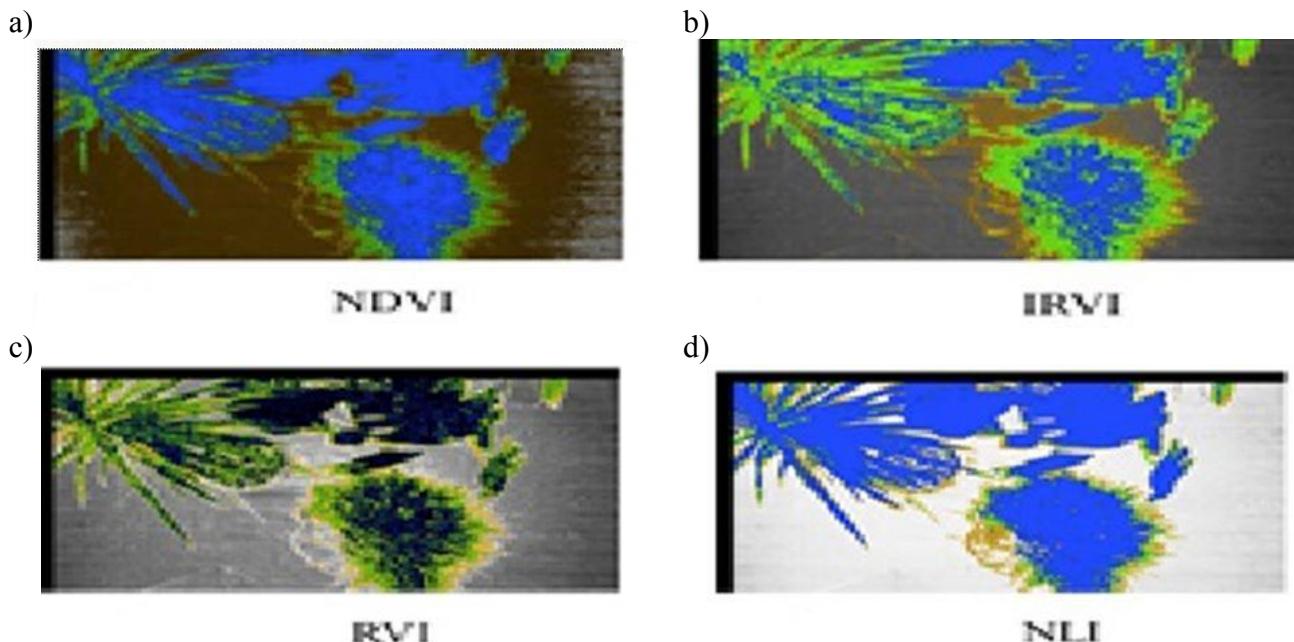


Рис. 1. Карты, построенные на основе различных вегетационных индексов
(лабораторные снимки)

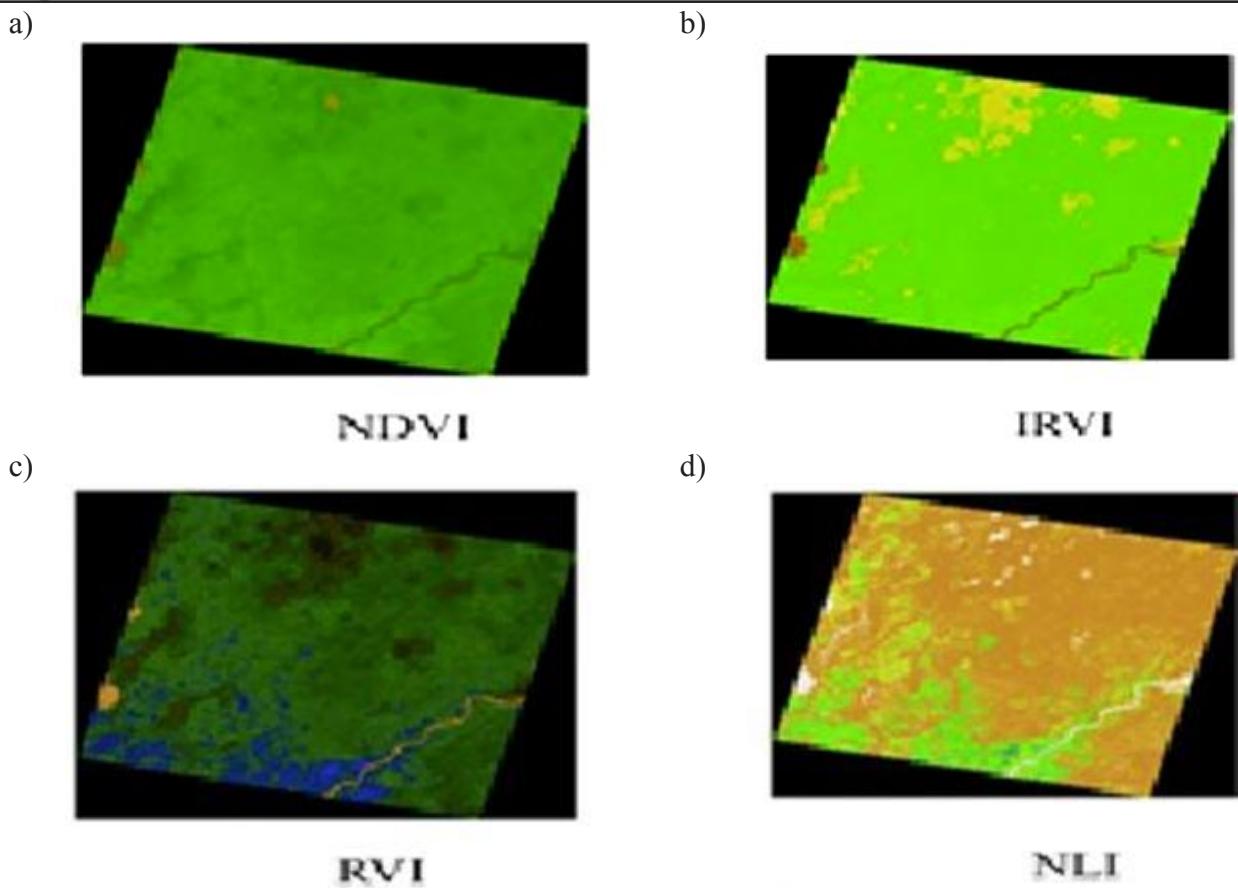


Рис. 2. Карты, построенные на основе различных вегетационных индексов (космические снимки)

Исследования показывают, что для космических снимков (расстояние более 100 км от поверхности Земли) NDVI является наиболее эффективным, что подтверждает его популярность в задачах ДЗЗ, однако при небольших расстояниях (не более 500 м) корректнее использование NLI и IRVI, что видно из рис. 2.

На основе полученных данных отражения растений в RED- и NIR-диапазонах, представленных на графиках (см. рис. 3, а, б, в), определяются зависимости, анализ которых позволяет в автоматическом режиме, путём регрессивного моделирования, выявить почвенную линию, а также линии резкого изменения состояния растительности и объектов неживой природы.

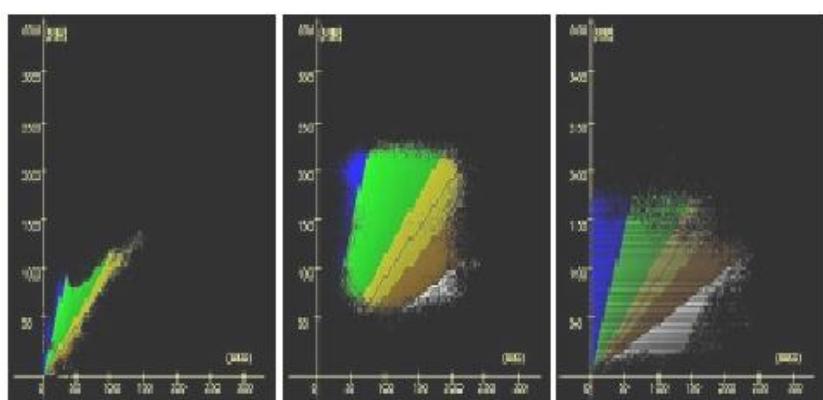


Рис. 3 – Графики зависимости отражения поверхности в RED- и NIR-диапазонах (снимок, сделанный при помощи БПЛА) (спутник, БПЛА, лабораторные условия)

На графиках значения представлены в виде яркости пикселя изображений в RED- и NIR-диапазонах, то есть они могут изменяться от 0 до 255. Цвета на графиках имеют следующие значения:

- серым цветом выделены искусственные материалы (бетон, асфальт), вода, снег, лёд;
- коричневым – открытая почва;
- жёлтым – угнетённая растительность;
- зелёным и синим – здоровая растительность.

Обработка экспериментальных данных позволяет определить почвенную линию, разграничающую области живой и неживой природы.

К сожалению, ВИ не может дать точную характеристику биомассы (лес, поле), необходимо произвести анализ высот. В работе разрабатывается модель анализа насаждений. Согласно данной модели, строится карта глубины, определяемая двумерной матрицей A размером $M \times N$, где $\alpha_{i,j}$ – расстояние от точки наблюдения до объекта.

На рис. 4 представлен алгоритм построения матрицы, определяющей карту местности, отражающей наличие или отсутствие насаждений.

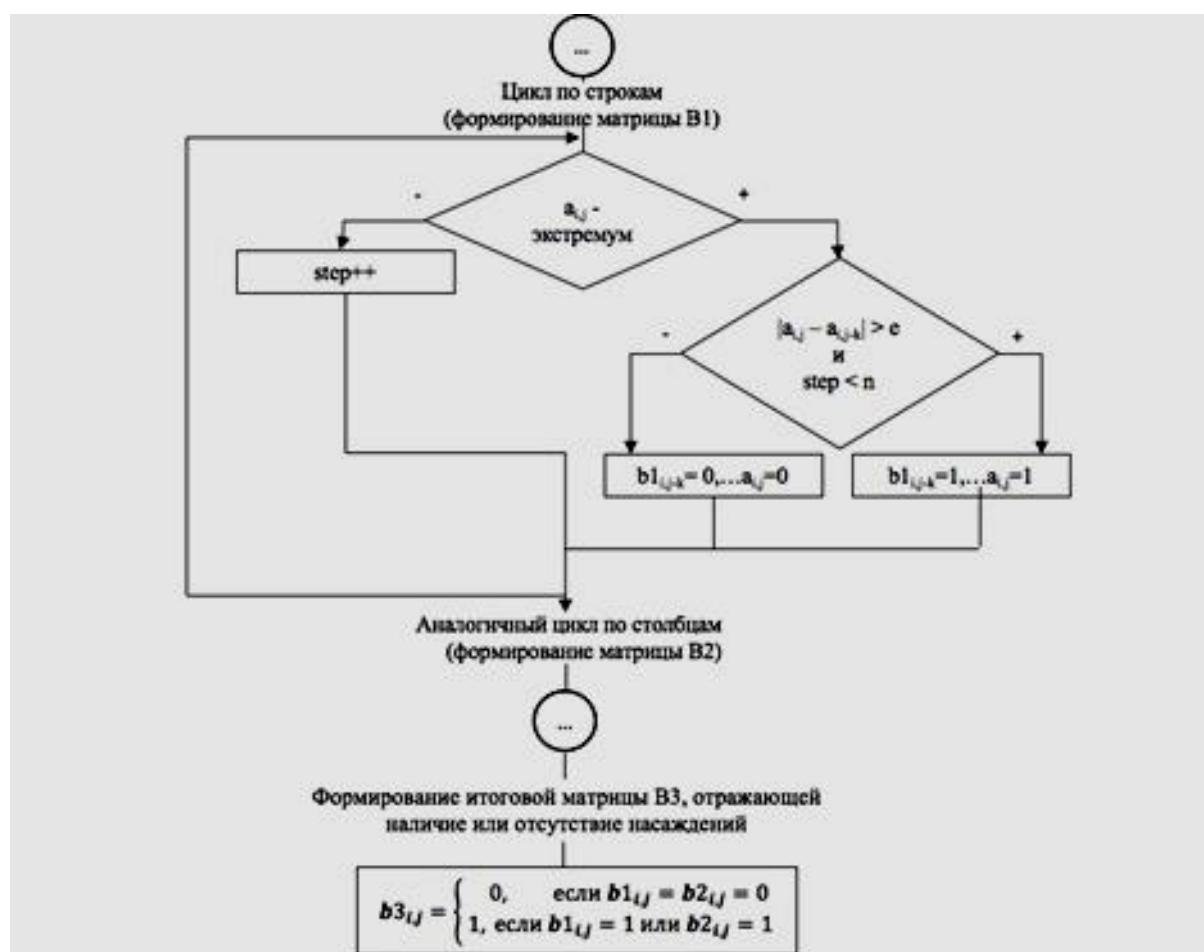


Рисунок 4 – Алгоритм построения матрицы , отражающей
наличие и отсутствие насаждений

Рис. 4. Алгоритм построения матрицы, отражающей наличие и отсутствие насаждений

Помимо детектирования объектов живой природы, модель позволяет определять области горения.

Алгоритм детектирования пожара основан на определении динамических областей в потоке информации с RGB-камеры.

1. Матрица D_i определяется путём вычитания из матрицы A_i , описывающей текущий кадр, матрицы A_{i-1} , которая описывает предыдущий кадр. Матрица D_i описана следующим соотношением:

$$D_i = A_i - A_{i-1}.$$

2. Матрица D_i преобразуется в бинарную путём поэлементного сравнения с пороговым значением $0 < \text{MOTION_THRESHOLD} < 255$, которое показывает максимальное изменение яркости пикселя для статичной сцены:

$$d_i^{j,k} = \begin{cases} 0, & d_i^{j,k} \leq \text{MOTION_THRESHOLD} \\ 1, & d_i^{j,k} > \text{MOTION_THRESHOLD}, \end{cases}$$

где $d_i^{j,k}$ – элемент матрицы D_i с номерами j, k .

3. Обрабатываются пиксели матрицы A_i в соответствии с правилом

$$Arez_i^{j,k} = \begin{cases} 1, & A_i^{j,k,1} > \min \text{ и } A_i^{j,k,1} > A_i^{j,k,2} > A_i^{j,k,3}, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где $\min = \frac{1}{N+M} \sum_j^N \sum_k^M (A_i^{j,k,1})$, $A_i^{j,k,R=1}$ – значение матрицы в одном из трёх цветовых каналов ($R = 1, G = 2, B = 3$), изменяется от 0 до 255.

4. Строится итоговая карта пожара по правилу

$$\text{fire}_i^{j,k} = \begin{cases} 0, & d_i^{j,k} = 0 \text{ или } Arez_i^{j,k} = 0 \\ 1, & d_i^{j,k} = 1 \text{ и } Arez_i^{j,k} = 1. \end{cases}$$

Следующим этапом является вычисление итогового состояния местности путём комбинирования рассмотренных ранее характеристик в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Комбинации характеристик

Насаждения	Здоровая биомасса (ВИ)	Больная биомасса (ВИ)	Почва (ВИ)	Антропогенный объект (ВИ)	Горение есть
Насаждения есть	Здоровый лес	Больной лес	Выгоревший/мёртвый лес	Дома	Горит лес
Насаждений нет	Здоровое поле / здоровая степь	Больное поле / больная степь	Вырубка	Дорога	Неизвестное возгорание

Если отсутствует карта высот, то разделение леса и поля не указывается.

Итогом работы является универсальная модель, которая с учётом различных критериев и свойств определяет состояние поверхности. Разработанное на её основе средство автоматизации многофакторного анализа описывает карту состояний исследуемой поверхности.

Разработанная система может быть применена на беспилотных летательных аппаратах, оснащённых RGB-камерой, IR-камерой и дальномером, для мониторинга состояния лесов или сельскохозяйственных угодий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жарикова, Е. П. Модели расчёта и фильтрации вегетационных индексов / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев // Сборник материалов 48-й Научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов». – 2018. – С. 162–164.
2. Жарикова, Е. П. Сравнение вегетационных индексов в задачах оценки поверхностей / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев // Сборник материалов 48-й Научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов». – 2018. – С. 165–167.
3. Жарикова, Е. П. Модели компьютерного зрения в задачах дистанционного зондирования / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Постулат. Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема. – Биробиджан, 2018. – № 4(30).
4. Аппаратная реализация алгоритма шифрования по ГОСТ 28147-89 [Электронный ресурс] / М. Г. Котегов, И. Л. Трунов, Д. И. Серогодский [и др.] // Современные научёмкие технологии. – 2008. – № 3. – С. 51-52. – Режим доступа: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=23320> (дата обращения: 03.12.2018).
5. Курдюмова, Т. И. Математическая модель связи лазерного дальномера с типом лазерного излучателя / Т. И. Курдюмова, А. Л. Григорьева // Постулат. – 2018. – № 4-1(30). – С. 46.
6. Атиков, Н. В. Математическое моделирование образа объекта с помощью лазерного дальномера / Н. В. Атиков, А. Л. Григорьева // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. В 2 ч. Ч. 1. – 2018. – С. 129–131.
7. Шишов, Р. И. Модели взаимодействия БПЛА со статическими объектами в трёхмерном пространстве / Р. И. Шишов, Я. Ю. Григорьев // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. В 2 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре, 2018. – С. 257–259.



Олещук В. А., Раджабов Д. У.
V. A. Oleschuk, D. U. Radzhabov

ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

INFLUENCE OF INFORMATION SUPPORT OF PRODUCTION ROTOKA ON EFFICIENCY OF THE SYSTEM PREGNANTED PRODUCTION

Олещук Валентина Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: tm@knastu.ru.

Ms. Valentina A. Oleschuk – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: tm@knastu.ru.

Раджабов Додарджон Умаралиевич – магистр направления 27.04.01 – «Стандартизация и метрология» кафедры технологии машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Mr. Dodardzhon U. Radzhabov – master's degree student major in Standardization and metrology, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.

Аннотация. Внедрение системы бережливого производства на авиастроительных предприятиях компании «Сухой» вызвано необходимостью повышения эффективности производства и его планирования на базе использования современных методик. Целями внедрения концепции бережливого производства являются повышение производительности производственного процесса, сокращение сроков запуска машины в серию, удовлетворение требований заказчика. Особое значение имеет информационное обеспечение производственного процесса на всех его этапах, которое принимает характер универсального средства, обеспечивающего реализацию основных принципов бережливого производства, мотивацию всех участников производственного потока. Объективная и своевременная информация непосредственно от исполнителя позволяет своевременно выявлять причины появления потерь в производственном процессе и оперативно их устранять. В статье описывается подход к организации производственного процесса, основанный на делении всего объема работ на восьмичасовые (сменные) задания.

Summary. The introduction of a lean manufacturing system at Sukhoi aircraft building enterprises is caused by the need to improve the efficiency of production and its planning based on the use of modern techniques. The goal of introducing the concept of lean manufacturing is to increase the efficiency of the production process, to shorten the start-up times of the machine to the series, and to meet the customer's requirements. Of particular importance is the information assurance of the production process at all its stages, which becomes a universal means of ensuring the implementation of the basic principles of lean production, motivation of all participants in the production flow. Objective and timely information directly from the producer allows to promptly identify the causes of the emergence of losses in the production process and promptly eliminate them. An approach to the organization of the production process is described, based on the deletion of the whole volume of work on eight-hour (interchangeable) tasks.

Ключевые слова: эффективность производства, информационное обеспечение предприятия, мотивация персонала, объективная и своевременная информация, производственный поток, сменное задание, палета, время подготовки операции, потери.

Key words: production efficiency, information support of the enterprise, staff motivation, objective and timely information, production flow, replacement task, pallet, time of operation preparation, losses.

УДК 658.001

Введение

Внедрение концепции бережливого производства становится всё более актуальной задачей. Необходимость в повышении производительности производственного процесса, сокращение сроков запуска машины в серию, удовлетворение требований заказчика, заинтересованность в характеристиках изделия потенциальных потребителей требуют внедрения современных технологий организации производства. В условиях рыночной экономики в области разработки и производства новых конкурентоспособных на мировом рынке видов авиационной техники внедрение системы бережливого производства на авиастроительных предприятиях компании «Сухой» вызвано необходимостью повышения эффективности производства и его планирования на базе использования современных методик.

В данной работе рассматривается зависимость эффективности системы бережливого производства, внедряемой на предприятии, от информационного обеспечения производственного процесса на всех его этапах и от непрерывности производственного потока.

Информационное обеспечение предприятия

В концепции бережливого производства особое значение имеет информационное обеспечение, которое принимает характер универсального средства управления персоналом. Самой трудной составляющей на пути к внедрению концепции бережливого предприятия являются стимулирование персонала и поддержание его самодисциплины. Сама концепция должна быть понятна и привлекательна для всего коллектива на всех этапах производственного процесса. Недооценка предприятиями человеческого фактора не позволит им даже приблизиться к тому уровню эффективности, который гарантирует полное внедрение концепции бережливого производства. Поэтому обязательно наличие в системе чёткого управлеченческого учёта только полной информации, которая всегда достоверна, своевременна и объективна. Кроме того, информация должна быть представлена в форме, понятной её потребителю, в таком виде, который позволял бы принять правильное решение для достижения поставленной цели довольно быстро. Для работающих очень важно соблюдение принципа визуальной информированности о состоянии дел в ближайших точках производственного процесса. Информация должна отображаться в виде, доступном для наблюдения практически всех работающих в пределах данной актуальной части производственного процесса, непосредственных исполнителей производственного потока.

Для принятия любого управлеченческого решения руководителю любого ранга необходима объективная и своевременная информация непосредственно от исполнителя. Особо жёсткие требования должны предъявляться к оперативности и достоверности учёта хода производства, с помощью которого формируются исходные данные о текущем состоянии производственного потока, к обеспечению заказов, состоянию оборудования и т. п. Применительно к задачам производства краткосрочное планирование, выражющееся в разработке смennого задания, должно вестись с высокой степенью детализации не только по каждой номенклатурной единице, но и по временным параметрам. Контур оперативного управления должен охватывать не только станки, сборочные стенды, но и службы подготовки и обеспечения производства. В противном случае неизбежны ситуации, в которых краткосрочные планы не будут своевременно обеспечены необходимыми ресурсами и, следовательно, окажутся невыполнеными. Информационное взаимодействие всех структурных подразделений предприятия позволяет своевременно принимать управлеченческие решения на всех уровнях производственного потока.

В свою очередь непосредственный исполнитель на любом этапе производственного процесса должен иметь необходимый объём информации о характере выполняемой работы. Он должен понимать значение и влияние его операции на непрерывность производственного потока, иметь чётко поставленную цель выполнения необходимого объёма работ. Однако требования, правильно написанные руководителями в виде документированных процедур (например, разработанный технологический процесс), вовсе не гарантируют их правильной интерпретации и тщательного исполнения. Информация, содержащаяся в разработанном технологическом процессе, должна быть понятна и доступна исполнителю вплоть до её визуализации.

В ЗАО «Гражданские самолёты Сухого» внедряется подход, основанный на делении всего объёма работ на восьмичасовые (сменные) задания и позволяющий равномерно загрузить произ-

водственный участок. Это обеспечивает более гибкое взаимодействие с исполнителями и возможность видеть отклонение от плана на более ранних стадиях, что способствует обеспечению необходимого ритма производства, сохранению непрерывности производственного потока.

Каждому работнику выдаётся чек-лист сменного задания с указанием времени выполнения операции, снабжённый специальным штрихкодом. Кроме этого, рабочему выдаётся палета с комплектом инструментов, оснастки и материалов, необходимых для выполнения операции. Комплект материалов снабжается комплектовочной ведомостью. Рабочий обязан проверить наличие и исправность всех инструментов, оснастки, наличие технологической документации и сделать соответствующую отметку в бланке сменного задания. Рабочий, получив сменное задание, перед тем как приступить к его выполнению, с помощью специального терминала делает отметку о времени начала выполнения этого сменного задания. По окончании рабочего дня процедура повторяется в обратном порядке – фиксируется время завершения операции.

Такая процедура выполнения сменного задания с точки зрения концепции бережливого производства обеспечивает следующие преимущества:

1. Рабочий не теряет времени на подготовку к операции – он обеспечен всем необходимым: инструментом, оснасткой, материалом, технической документацией и т. д. Этим занимается специальное подразделение. Сотрудник этого подразделения несёт ответственность за укомплектованность палеты в полном объёме. Потери времени на техническую подготовку операции устранены.

2. В том случае, если палета не укомплектована полностью, не хватает, например, позиции N или какой-нибудь инструмент находится в нерабочем состоянии, рабочий делает соответствующую отметку в чек-листе. Информация о проблеме сразу поступает в соответствующие службы. Выясняется причина нарушения комплексности палеты. Впоследствии такие нарушения не допускаются. Потери времени на устранение потерь минимизированы.

3. Визуализация технологического процесса позволяет выполнить работу без необходимости объяснения со стороны технолога или мастера и обеспечивает выполнение сменного задания. Информация, необходимая рабочему для выполнения операции, представлена в полном объёме, за качество разработанного технологического процесса ответственность несёт технолог. Потери времени на изучение технологической документации минимизированы.

5. Нормы времени, необходимые для выполнения операции, рассчитаны с учётом перерывов на естественные потребности. На этапе запуска машины в серию производится мониторинг затрат времени на всех этапах операции. В случае если нормы времени завышены, или, наоборот, занижены, производится корректировка. Информация о времени выполнения операции доступна рабочему, и он может сам контролировать степень её выполнения в течение смены, поддерживая необходимый ритм производственного потока.

6. Руководитель производственного подразделения получает своевременную и объективную информацию о текущем состоянии производственного потока, обо всех отклонениях и причинах нарушения непрерывности производственного потока. Это позволяет руководителю выяснить, какой вид потерь оказывается на выполнении сменного задания, выработать мероприятия по их устранению.

7. Рабочий, выполнивший в течение месяца сменное задание без отклонений, качественно и в полном объёме, получает премию.

Выводы

В статье рассмотрена процедура организации производственного потока в рамках концепции бережливого производства. Описан подход, основанный на делении всего объёма работ на восьмичасовые (сменные) задания, благодаря которому повышается мотивация исполнителя, усиливается его заинтересованность в качественном, своевременном выполнении требуемого объёма работ. Описаны достоинства такой организации производственного процесса. И, самое главное, каждый участник производственного потока видит, где возникают потери, понимает причину их возникновения, стремится к постоянному улучшению, совершенствованию производственного процесса в соответствии с идеологией бережливого производства, концепцией Кайдзен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попеско, И. Производство без потерь для рабочих / И. Попеско. – М.: Институт стратегических исследований, 2008. – 160 с.
2. Вумек, Дж. П. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Дж. П. Вумек, Д. Т. Джонс. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. – 192 с.
3. Левинсон, У. Бережливое производство: синергетический подход к сокращению потерь / У. Левинсон, Р. Рерик. – М.: Изд-во «Стандарты и качество», 2007. – 219 с.
4. Вейдер, М. Инструменты бережливого производства: мини-руководство по внедрению методик бережливого производства / М. Вейдер. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. – 274 с.
5. Шехватов, Д. Бережливое производство. Кайдзен и информационные системы управления / Д. Шехватов. – М.: Экономика, 2007. – 215 с.



Рыбаков А. В., Евдокимов С. А., Краснов А. А., Шептунов С. А., Шурпо А. Н.
A. V. Rybakov, S. A. Evdokimov, A. A. Krasnov, S. A. Sheptunov, A. N. Shurpo

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ В КОМПЬЮТЕРНОЙ СРЕДЕ

USING SIMULATION TO SOLVE PROBLEMS IN THE DESIGN OF TOOLING IN A COMPUTER ENVIRONMENT

Рыбаков Анатолий Викторович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Россия, Москва); 127055, г. Москва, пер. Вадковский, 18, стр. 1а; тел.: +7 (499) 973-34-42. E-mail: avr48@rambler.ru.

Mr. Anatoly V. Rybakov – candidate of technical Sciences, associate Professor, senior researcher, Institute for design-technological Informatics of the RAS, Professor of Department of automated systems of information processing and management, Moscow State Technological University «STANKIN» (Russia, Moscow); 127055, Moscow, Vadkovsky str., 18, struct. 1a; tel.: +7 (499) 973-34-42. E-mail: avr48@rambler.ru.

Евдокимов Сергей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Россия, Москва); 127055, г. Москва, пер. Вадковский, 18, стр. 1а.; тел.: +7 (499) 973-34-42. E-mail: usaf@rambler.ru.

Mr. Sergey A. Evdokimov – candidate of technical Sciences, senior researcher, Institute for design-technological Informatics of the RAS, Professor of Department of automated systems of information processing and management, Moscow State Technological University «STANKIN» (Russia, Moscow); 127055, Moscow, Vadkovsky str., 18, struct. 1a; tel.: +7 (499) 973-34-42. E-mail: usaf@rambler.ru.

Краснов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Россия, Москва); 127055, г. Москва, пер. Вадковский, 18, стр. 1а.; тел.: +7 (499) 973-34-42. E-mail: akrasnov63@rambler.ru.

Mr. Andrey A. Krasnov – candidate of technical Sciences, associate Professor, Department of automated information processing and management systems, Moscow state technological University «STANKIN» (Russia, Moscow); 127055, Moscow, Vadkovsky str., 18, struct. 1a; tel.: +7 (499) 973-34-42. E-mail: akrasnov63@rambler.ru.

Шептунов Сергей Александрович – доктор технических наук, директор Института конструкторско-технологической информатики РАН (Россия, Москва); 127055, г. Москва, пер. Вадковский, 18, стр. 1а.; тел.: +7 (499) 978-57-15. E-mail: ship@ikti.ru.

Mr. Sergey A. Sheptunov – doctor of technical Sciences, Director Of the Institute of design and technological Informatics RAS (Russia, Moscow); 127055, Moscow, Vadkovsky str., 18, struct. 1a; tel.: +7 (499) 978-57-15. E-mail: ship@ikti.ru.

Шурпо Александр Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 1 Института конструкторско-технологической информатики РАН (Россия, Москва); 127055, г. Москва, пер. Вадковский, 18, стр. 1а.; тел.: +7 (499) 978-26-02. E-mail: a-shurpo@yandex.ru.

Mr. Alexander N. Shurpo – candidate of technical Sciences, senior researcher, laboratory No. 1, Institute of design and technological Informatics, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia); 127055, Moscow, Vadkovsky str., 18, struct. 1a; tel.: +7 (499) 978-26-02. E-mail: a-shurpo@yandex.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены возможности проектирования технологической оснастки в машиностроении при переходе от чертежей к системе компьютерных моделей. Для конструкторской деятельности при проектировании технологической оснастки в условиях многодисциплинарности и слабой

структуризации предметной области удалось применить программную платформу, позволяющую при минимальном программировании создавать системы автоматизированной поддержки информационных решений.

Summary. The possibilities for the design of tooling in engineering in the transition from the drawings to the system of computer models are considered. For design activities in the design of tooling in the context of multidisciplinarity and weak structuring of the subject area, it was possible to apply a software platform that allows, with minimal programming, to create systems for automated support of information solutions.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, представление деятельности и проектирование технологической оснастки, программная платформа.

Key words: computer modeling, activity presentation and tooling design, software platform.

УДК 621.06-5.0342.09

Введение

С появлением ЭВМ компьютерное моделирование приобрело масштабное признание в инженерных дисциплинах, так как теперь появилась возможность изучения свойств реального объекта на основе экспериментирования с другим (материальным или идеальным) объектом.

Компьютерное моделирование внесло в сферу традиционного проектирования в машиностроении три новых понятия: *модель, визуализация результатов моделирования и концептуальный эксперимент* [1; 2]. Практически на наших глазах в машиностроении происходит массовый переход от организации деятельности на основе чертежей к двухмерному (2D) и трёхмерному (3D) компьютерному моделированию (см. рис. 1).

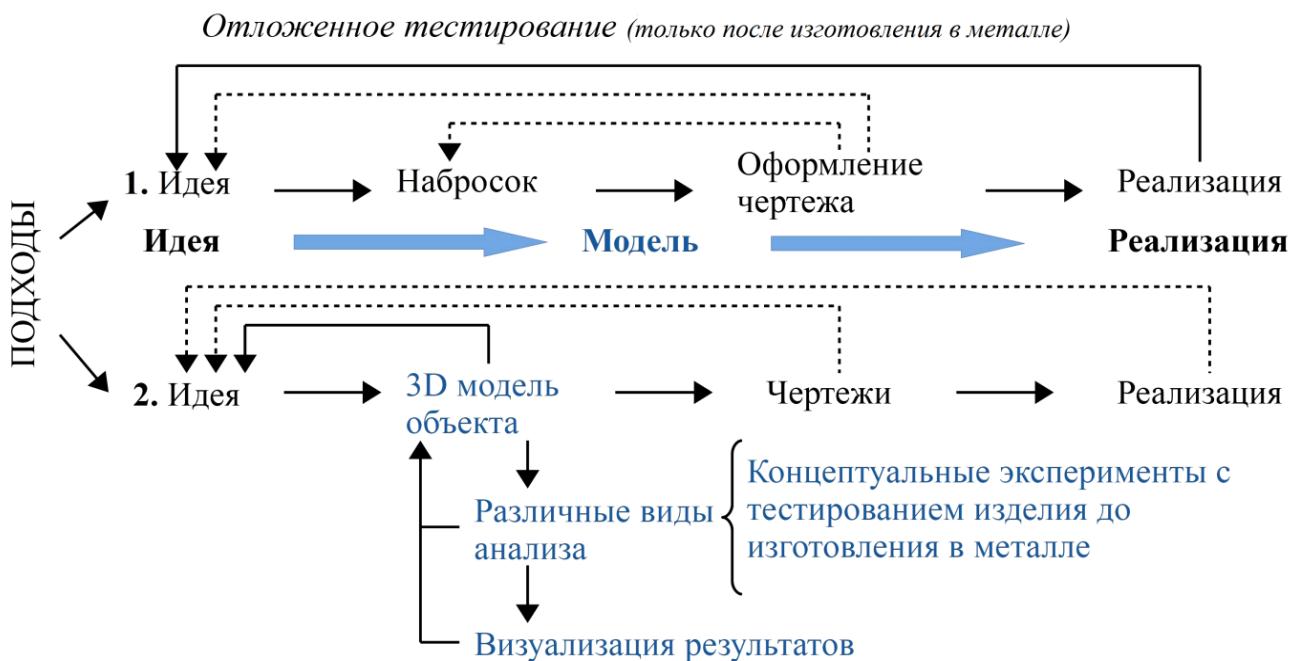


Рис. 1. Два подхода к организации деятельности, изменяющие возможности по решению задач в машиностроении: 1 – на основе использования чертежа;
2 – на основе компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование с учётом использования принципов иерархической структуры, декомпозиции и абстракции позволяет на ранних этапах разработки контролировать свойства будущей технологической оснастки (ТО) на основе концептуального экспериментирования. Такой подход допускает планирование и проведение эксперимента на компьютерной модели, позволяя на начальных стадиях проектирования согласовать важнейшие функциональные данные ТО. После компьютерного эксперимента разработчик подбирает для натурного решения оптимальный вариант конструкции ТО. Таким образом, компьютерное моделирование позволяет специалистам за короткое время получить оптимальный вариант конструкции с наименьшими затратами ресурсов.

Характеристики деятельности по решению задач в машиностроении

Деятельность по автоматизированному проектированию и изготовлению ТО предполагает учёт требований и условий заказчика, которые, как правило, бывают противоречивыми [3; 4].

В настоящее время следует учитывать нюанс: при проектировании ТО используется множество самостоятельных компьютерных моделей, которые, как правило, создают специалисты различных дисциплин. При использовании компьютерных моделей можно обнаружить слабые стороны в проектных работах, а также возможные следствия технических решений в итоговой конструкции. На основе полученных результатов моделирования делают необходимые доработки в конструкциях ТО.

Например, в состав предоставляемого специального программного обеспечения для компьютерного моделирования в ходе проектирования пресс-форм (ПФ) обычно включают:

- средства трёхмерного моделирования собственно пластмассовой детали;
- средства моделирования технологического процесса литья;
- средства моделирования ПФ;
- средства моделирования процесса обработки деталей самой ПФ – прежде всего её формообразующих элементов – на оборудовании с ЧПУ;
- средства визуализации результатов работы координатно-измерительной машины.

Проектирование конструкции ПФ производится совмещением моделирования пластмассовой детали и ПФ для её изготовления при наличии итерационного характера [5]. При этом после того как модель пластмассовой детали была сформирована, она отрабатывается на технологичность, при этом учитываются:

- достаточность толщины стенки детали для её получения в ПФ;
- выполнение уклонов, необходимых для извлечения этой детали из ПФ;
- определение линии разъёма;
- выяснение формообразующих поверхностей пuhanсона, матрицы и т. п.

После формирования модели пластмассового изделия выполняют моделирование самого процесса литья, для которого выбирают материал; рассчитывают время и полноту заполнения, учитывая скорость потока пластмассы, а также прогнозируют качество и т. д.

Для создания конструкции ПФ необходимо обращаться к библиотекам параметрических моделей изготовителей типовых деталей.

Пользователь вправе как дополнить, так и модифицировать эти библиотеки, применив стандарты, нормали или другие технические требования, используемые на его предприятии [6, 7]. Моделирование процесса обработки формообразующих поверхностей ПФ на станках с ЧПУ является наиболее трудоёмким делом.

В последнее время результаты обработки достаточно часто проходят контроль на координатно-измерительной машине.

Традиционная схема организации деятельности на основе набора моделей

На практике из-за использования множества разрозненных компьютерных моделей сложилась следующая схема организации деятельности при компьютерном моделировании (см. рис. 2).

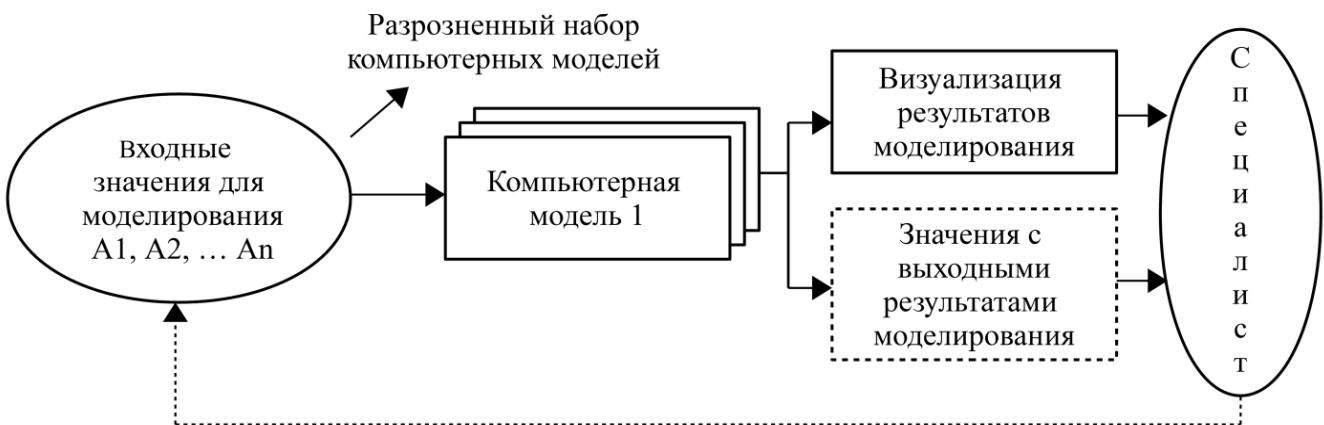


Рис. 2. Существующая схема
использования компьютерного моделирования на основе набора моделей

Для данной схемы организации деятельности характерны следующие ограничения:

- не имеется интегрированной информационной модели предметной области, а следовательно, и устойчивых взаимосвязей на понятийном уровне между набором различных компьютерных моделей;
- не имеется связи по данным между разными моделями, поэтому связь происходит «через голову» специалиста (на рис. 2 эти связи показаны пунктирными линиями);
- не прогнозируется развитие ситуации в ходе проектирования и изготовления при внесении изменений в процесс;
- нет информационной поддержки деятельности специалиста при проектировании и разработке управляющих программ для обработки деталей ПФ;
- не имеется пошаговой аккумуляции лучших решений для их повторного применения;
- программное обеспечение выполнено в виде жёсткой законченной системы под ключ, поэтому за любым расширением возможностей системы нужно обращаться непосредственно к разработчику программного обеспечения и дополнительно оплачивать его работу.

Программная платформа создания систем автоматизированной поддержки информационных решений по проектированию технологической оснастки

Исключить эти ограничения можно, внедрив новую информационно-технологическую среду, используя отечественную программную платформу ИНИС [1; 2; 8], которая поддерживает весь жизненный цикл совмещённого проектирования основного изделия и ТО для её изготовления в условиях структуры взаимозависимых компьютерных моделей.

Для гарантированного объединения всех применяемых компьютерных моделей и формируемых ими данных необходима их увязка в общей компьютерной базе знаний.

На рис. 3 представлены взаимосвязи компьютерных моделей, используемых при проектировании ПФ.



Рис. 3. Значение и место структуры взаимозависимых компьютерных моделей при проектировании и выпуске ПФ в условиях информационно-технологической среды

Использование структуры взаимозависимых компьютерных моделей открывает возможность нахождения и избавления от множества конфликтов с помощью нужных программных продуктов. Это позволяет значительно сократить сроки их проектирования и выпуска ТО. Сфера задач, решаемых путём компьютерного моделирования при проектировании и выпуске ТО, в значительной степени расширена [1; 2; 9], если сравнивать её с традиционным подходом [3].

При решении задач по проектированию и выпуску ТО, с переводом их к компьютерному варианту с применением структуры моделей, необходимо выполнять следующие положения [1; 2]:

1. В большинстве случаев конструкции оснастки для технологической подготовки производства состоят из стандартных, типовых и уникальных объектов, имеющих набор свойств.

2. Значимые для применения свойства объектов именуются и хранятся на ЭВМ в виде элементов словаря понятий (A1...An).

3. Свойства объекта получают своё значение только в итоге выполнения следующих действий: инженерного расчёта, выбора из таблиц с нормативно-справочной информацией или задания пользователя в диалоге (частный случай, после измерения в 3D-системе).

4. Взаимосвязи свойств в конструкции задаются в виде следующих отношений: формул, таблиц, параметрических графических объектов (чертежи и 3D-модели). Компьютерная форма записи отношений в рамках конструкции ТО выполняется только с применением элементов словаря понятий.

5. По существу, ТО – это результат согласования проектной работы большого количества специалистов (заказчиков, расчётов, конструкторов, технологов, производственников и т. п.).

6. Деятельность всех специалистов, разрабатывающих ТО в машиностроении, допускается отображать через ограниченное множество видов работ (ввод и редактура данных, получение значений из таблиц, выполнение инженерных расчётов, графическая выверка, графическая визуализация решений и т. д.). В качестве примера приведена карта с описанием деятельности по проектированию ПФ (см. рис. 4).

7. Регулирование всего потока работ (извещение об осуществлении события, координация работы специалиста по принятию решений (утверждение решения или отказ от него), сохранение и передача результатов в ходе проектирования в компьютерной среде выполняются при использовании системы автоматизированной поддержки информационных решений (САПИР).

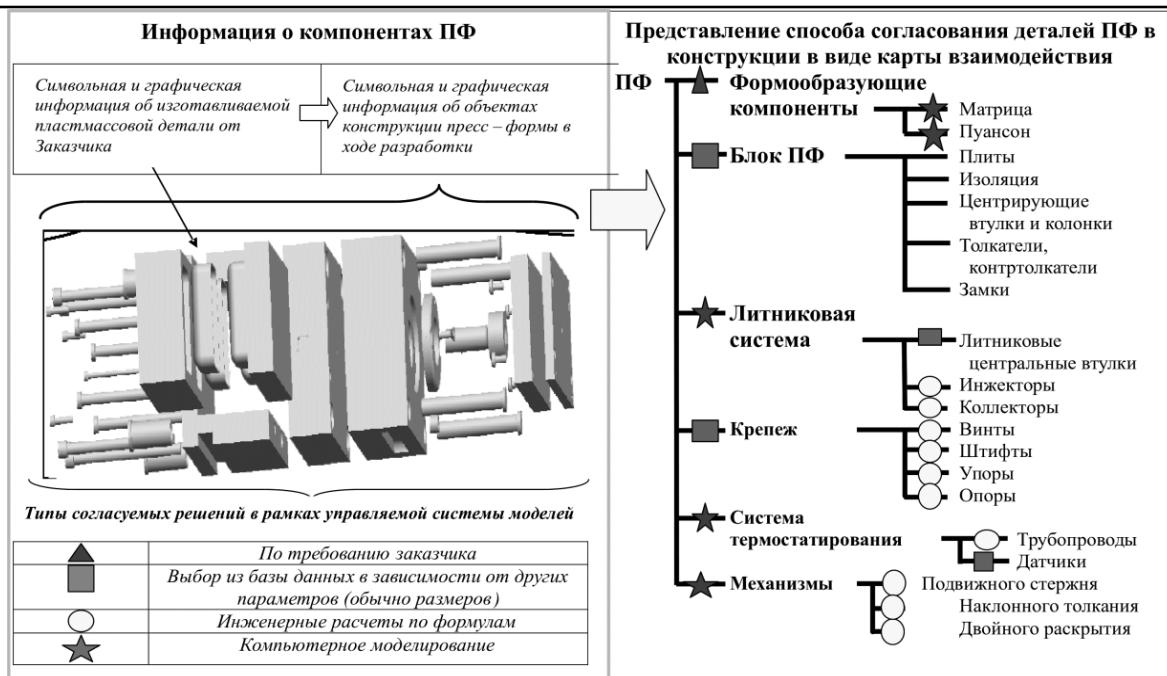


Рис. 4. Карта взаимосвязей при принятии решений в ходе создания ПФ в компьютерной среде с учётом применяемых видов деятельности

Новые возможности проектирования ТО в машиностроении с использованием компьютерного моделирования и САПИР приведены на рис. 5.



Рис. 5. Новые возможности проектирования технологической оснастки в машиностроении с использованием компьютерного моделирования



Заключение

1. Программная платформа для решения слабоструктурированных и многодисциплинарных задач конструкторско-технологической информатики в машиностроении с минимальным программированием позволяет сократить сроки и обеспечить качество при создании специализированных систем автоматизированной поддержки информационных решений.

2. Переход от традиционного проектирования ТО к компьютерному варианту проектирования с применением САПИР более чем в 2...4 раза сокращает время на решение задач технологической подготовки производства научоёмких изделий в машиностроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснов, А. А. Создание САПР технологической оснастки (на примере учебно-проектной САПР калибров-мерителей): учеб. пособие / А. А. Краснов, А. В. Рыбаков, С. А. Евдокимов. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 161 с.
2. Рыбаков, А. В. Создание системы автоматизированной поддержки информационных решений при проектировании технологической оснастки / А. В. Рыбаков, С. А. Евдокимов, А. А. Краснов. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2013. – 162 с.
3. Корчак, С. Н. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов / С. Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1988. – 352с.
4. Информационно-вычислительные системы в машиностроении (CALS-технологии) / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, В. В. Павлов [и др.]. – М.: Наука, 2003. – 292 с.
5. Автоматизация процесса проектирования и изготовления оснастки на основе управляемой системы взаимосвязанных компьютерных моделей (на примере пресс-форм для литья пластмасс под давлением) / А. В. Рыбаков, А. А. Краснов, П. И. Разинков, А. Н. Шурпо // CAD/CAM/CAE Observer. – 2012. – № 5. – С. 56–62.
6. Краснов, А. А. Создание компьютерной базы знаний с нормативно-справочной информацией / А. А. Краснов, М. В. Кожин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 6. – С. 3–15.
7. Создание компьютерной базы знаний для работы с нормативно-справочной информацией в машиностроении (Начало. Окончание см. в № 2/2010. – С. 52–55.) / С. А. Евдокимов, И. В. Григорьев, А. А. Краснов, А. В. Рыбаков, А. Н. Шурпо // CAD/CAM/CAE Observer. – 2010. – № 1. – С.54–59.
8. Организация проектирования специальной технологической оснастки / А. В. Рыбаков, С. А. Евдокимов, А. А. Краснов, А. Н. Шурпо // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2017. – № 1. – С. 84–89.
9. Балашова, Ю. С. Совершенствование технологической подготовки опытного производства научоёмких деталей на основе компьютерного управления используемыми ограниченными ресурсами / Ю. С. Балашов, А. В. Рыбаков // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2014. – № 2. – С. 96–101.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Иванов С. Н., Ким К. К., Сарилов М. Ю.
S. N. Ivanov, K. K. Kim, M. Yu. Sarilov

**РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ ПРИВОДА ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**CALCULATION OF THE RELIABILITY OF A LINEAR ACTUATOR
THE MACHINE-BUILDING EQUIPMENT**

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.

Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Technical Sciences, professor, Electrical engineering department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 9; тел.: +7 (903) 096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Mr. Konstantin K. Kim – Doctor of Technical Sciences, professor, Head of Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering St. Petersburg State Transport University (Russia, St. Petersburg); 190031, St. Petersburg, 9 Moskovsky str.; tel.: +7 (903) 096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Сарилов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – Doctor of Technical Sciences, Professor; head of the Department Machines and apparatus of chemical production, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sarilov@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены подходы к расчёту надёжности привода линейного перемещения машиностроительного оборудования, широко используемого в различных областях промышленного производства. Приведены основные аналитические выражения, позволяющие провести предварительную оценку механических характеристик элементов высокоэффективного машиностроительного оборудования. Обоснованы критерии безотказности применительно к объекту исследования. Показано, что предварительный анализ надёжности привода может быть проведён на основе известных в машиностроении современных расчётов валов с учётом циклических напряжений, называемых расчётами по сопротивлению усталости или на выносливость. Такой подход позволяет учитывать характер изменения напряжений, характеристики усталостной прочности материала, концентрацию напряжений, влияние абсолютных размеров переходных участков вала, шероховатости поверхности и поверхностного упрочнения. Повышение эффективности и надёжности привода обеспечивает улучшение технико-экономических параметров оборудования в целом. Приведён пример расчёта вала – базового элемента привода с использованием адаптированной машиностроительной методики оценки надёжности вала привода линейного перемещения механизированного оборудования.

Summary. The article discusses approaches to calculating the reliability of the drive linear movement of engineering equipment, widely used in various fields of industrial production. The basic analytical expressions allowing to carry out a preliminary assessment of mechanical characteristics of elements of the highly effective machine-building equipment are resulted. The criteria of reliability in relation to the object of study are substantiated. It is shown that the preliminary analysis of the reliability of the drive can be carried out on the basis of known in mechanical engineering on the basis of modern calculations of shafts, taking into account cyclic stresses, called fatigue resistance or endurance calculations. This approach allows to take into account the nature of stress changes, the characteristics of the fatigue strength of the material, the stress concentration, the influence of the absolute size of the transition sections of the shaft, surface roughness and surface hardening. Improving the efficiency and reliability of the

drive provides improved technical and economic parameters of the equipment as a whole. An example of the calculation of the shaft - the basic element of the drive using an adapted engineering technique to assess the reliability of the drive shaft linear movements of mechanized equipment.

Ключевые слова: машиностроительное оборудование, привод линейного перемещения, вал, расчёт, надёжность.

Key words: the machine-building equipment, a linear actuator, shaft, calculate, reliability.

УДК 621.3.019

Введение

Привода линейного перемещения очень широко применяются в качестве силовых элементов машиностроительного оборудования, запорной арматуры систем транспортирования сжиженных газов и жидкостей по трубопроводам, гидросооружений и целого ряда других устройств. Поэтому задача обеспечения надёжной работы оборудования актуальна не только при разработке новых машин и механизмов, но и при модернизации существующих установок, поскольку позволяет улучшить их технико-экономические показатели без существенных капиталовложений. Одно из возможных решений задачи – внедрение в качестве привода линейного перемещения совмещённого электромеханического преобразователя [1]. На практике такие устройства реализованы на основе типовых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и описаны в работе [9].

Результаты анализа структурной надёжности устройства в целом подтверждают целесообразность его разработки и использования в качестве силового привода с гарантированными показателями надёжности. В то же время становится очевидным, что привод линейного перемещения, теоретически способный развивать высокие тяговые усилия, требует определения наиболее нагруженного элемента и расчёта его надёжностных характеристик. В качестве такого элемента на начальном этапе выбран вал, поскольку к нему приложены воспринимаемые приводом силовые нагрузки.

Оценка надёжности привода линейного перемещения при недетерминированном графике нагрузки представляет чрезвычайно сложную многофакторную научную задачу, требующую использования современных методов анализа напряжённого деформированного состояния, с привлечением интегрированных CAD-, CAE-систем [2]. Однако разработка твердотельной геометрической, а на её основе и сборочной модели привода требует предварительного обоснования структурной схемы, компоновки, расчётной модели для реализации CAE-методов. Поэтому на начальном этапе используется апробированная машиностроительная методика оценки надёжности выбранного структурного элемента – вала привода.

Исследование надёжности вала привода

Надёжность вала привода по сопротивлению усталости (расчёт прочности вала на выносливость) может быть рассчитана двумя методами: детерминированным и вероятностным [3].

В основе детерминированного метода лежит информация о заданной величине результирующего коэффициента запаса. В расчёте учитывается, что вал работает в условиях циклически изменяющихся изгибающих и крутящих моментов. Основными воздействующими факторами являются: характер изменения напряжений, характеристики усталостной прочности материала, концентрация напряжений, влияние абсолютных размеров вала, шероховатости поверхности и поверхностного упрочнения.

Как отмечено выше, детерминированный метод расчёта основан на проверке коэффициента запаса прочности по усталости

$$k_{\text{зап}} \geq [k_{\text{зап}}],$$

где $k_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса прочности; $[k_{\text{зап}}]$ – требуемый коэффициент запаса (1,5...2,5 в обычных условиях).

Общий коэффициент запаса прочности определяют по соотношению

$$k_{\text{зап}} = \frac{k_{\text{зап}\sigma} \cdot k_{\text{зап}\tau}}{\sqrt{k_{\text{зап}\sigma}^2 + k_{\text{зап}\tau}^2}},$$

где $k_{\text{зап}\sigma}$ – коэффициент запаса по нормальным напряжениям (при отсутствии кручения); $k_{\text{зап}\tau}$ – коэффициент запаса по касательным напряжениям (при отсутствии изгиба), которые определяют по формулам

$$k_{\text{зап}\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{k_{\sigma D} \cdot \sigma_a + \psi_\sigma \cdot \sigma_m}; \quad k_{\text{зап}\tau} = \frac{\tau_{-1}}{k_{\tau D} \cdot \tau_a + \psi_\tau \cdot \tau_m}.$$

Здесь σ_{-1}, τ_{-1} – пределы выносливости гладких образцов при симметричном цикле изгиба и кручения соответственно; $K_{\sigma D}, K_{\tau D}$ – суммарные коэффициенты, учитывающие влияние всех факторов на сопротивление усталости при изгибе и кручении соответственно; $\sigma_a, \tau_a, \sigma_m, \tau_m$ – амплитуды напряжений и средние напряжения цикла соответственно для изгиба и кручения; ψ_σ, ψ_τ – коэффициенты, характеризующие чувствительность материала к асимметрии цикла напряжений.

Характеристики предела усталости материала получают по результатам испытаний гладких образцов в условиях симметричного изгиба или растяжения-сжатия. Значение предела выносливости для детали σ_{-1D} в несколько раз меньше значения для образца. Это снижение характеризуется суммарным коэффициентом $K_{\sigma D}$, учитывающим влияние всех факторов на сопротивление усталости:

$$K_{\sigma D} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1D}}.$$

При изгибе или растяжении-сжатии коэффициент $K_{\sigma D}$ определяется соотношением

$$K_{\sigma D} = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v}.$$

При кручении коэффициент $K_{\tau D}$ определяется аналогично по формуле

$$K_{\tau D} = \left(\frac{K_\tau}{K_{d\tau}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v}.$$

Здесь K_σ, K_τ – коэффициенты концентрации напряжений; $K_{d\sigma}, K_{d\tau}$ – коэффициенты, учитывающие влияние абсолютных размеров детали (масштабный фактор); $K_{F\sigma}, K_{F\tau}$ – коэффициенты, учитывающие качество обработки (шероховатость) поверхности; K_v – коэффициент, учитывающий влияние поверхностного упрочнения деталей.

Численные значения коэффициентов приведены в справочной литературе, различных учебных пособиях, учебниках, например в работах [4–7].

В расчётах валов на выносливость часто принимают, что нормальные напряжения меняются по симметричному циклу с амплитудой, равной изгибающим напряжениям σ_u в расчётном сечении:

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W_u} = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W_u},$$
 а среднее напряжение $\sigma_m = 0.$ Здесь M_u – изгибающий момент;

W_u – момент сопротивления сечению на изгиб. Касательные напряжения меняются по отнулевому (пульсационному) циклу со средним значением и амплитудой:

$$\tau_m = \tau_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{W_{kp}},$$

где T – крутящий момент; W_{kp} – момент сопротивления сечения кручению.

Второй метод – метод вероятностной оценки надёжности вала, позволяющий найти количественные оценки показателей надёжности с заданным уровнем вероятности их достижения.

Усталостное разрушение вала имеет случайный характер, что связано со случайным распределением амплитуды напряжений σ_a -цикла и предела выносливости детали σ_{-1D} . Если принять нормальными законы распределения предела выносливости σ_{-1D} и амплитуды напряжений σ_a с соответствующими средними значениями $\bar{\sigma}_{-1D}, \bar{\sigma}_a$ и средними квадратичными отклонениями S_{-1D}, S_a , то условие разрушения вала с вероятностью 50 % запишется следующим образом:

$$\bar{\sigma}_{-1D} - \bar{\sigma}_a = 0.$$

Условие неразрушения с вероятностью P будет характеризоваться квантилем нормированного нормального распределения U_p :

$$U_p = -\frac{\bar{\sigma}_{-1D} - \bar{\sigma}_a}{\sqrt{S_{-1D}^2 + S_a^2}} = -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{\bar{n}^2 \cdot v_{-1D}^2 + v_a^2}},$$

где $\bar{n} = \bar{\sigma}_{-1D} / \bar{\sigma}_a$ – коэффициент запаса предела выносливости по средним значениям; v_{-1D}, v_a – коэффициенты вариации предела выносливости и нагрузки соответственно. Вероятность безотказной работы устройства определяется по таблицам [8] или из соотношения $P = 0,5 - \Phi(U_p)$.

При совместном действии изгиба и кручения определяют общий коэффициент запаса прочности через средние значения коэффициентов запаса $\bar{k}_\sigma, \bar{k}_\tau$ по нормальным σ и касательным τ напряжениям. Коэффициент вариации предела выносливости детали принимают равным коэффициенту вариации предела выносливости по нормальным напряжениям, так как пределы выносливости по нормальным и касательным напряжениям взаимосвязаны. Также общим принимается коэффициент вариации по нагрузкам (определяется по нормальным напряжениям).

Коэффициент вариации предела выносливости детали по нормальным напряжениям определяется по зависимости $v_{-1D}^2 = v_1^2 + v_2^2 + v_3^2$, где v_1 – коэффициент вариации предела выносливости деталей из материала одной плавки при отсутствии рассеяния её размеров (обычно $v_1 = 0,04, \dots, 0,1$); v_2 – коэффициент вариации, характеризующий рассеяния пределов выносливости образцов, выполненных из материала разных плавок (принимают равным коэффициенту вариации пределов прочности: $v_2 \approx 0,08$); v_3 – коэффициент вариации теоретического коэффициента концентрации напряжений, приближённо вычисляемый как $v_3 = (0,3 \div 0,45)v_p$, где v_p – коэффициент вариации радиусов галтелей: $v_p = 0,03 \div 0,1$.

Коэффициент вариации нагрузки v_a может достигать значения 0,3 и доминировать над v_{-1D} . Оценить значение v_a при переменных нагрузках можно по соотношению $v_a = \frac{\Omega}{6 \cdot \bar{\sigma}_a}$, где $\Omega = 6 \cdot S_a$ – полоса разброса амплитуды напряжений.

Надёжность вала оценивают по наиболее опасной зоне. Если существует несколько зон, близких друг другу по напряжённому состоянию, то сначала оценивают вероятность неразрушения в наиболее опасной зоне, а вероятность неразрушения в других зонах оценивают аналогично, но считая нагрузку детерминированной, то есть $v_a = 0$. Принимая предложение о том, что отказы в различных сечениях вала взаимно независимы, вероятность безотказной работы вала вычисляется как произведения вероятностей неразрушения во всех опасных сечениях.

При использовании приведённой выше методики расчёта надёжности вала привода линейного перемещения определяемыми параметрами являются коэффициент запаса и вероятность безотказной работы вала, к которому приложен крутящий момент; из механического расчёта определены окружная, радиальная и осевая силы; материал вала задан.

На рис. 1 показана расчётная схема вала, эпюры изгибающих и крутящих моментов аналогично тому, как это сделано в работе [3], на основе которой рассчитывается коэффициент запаса.

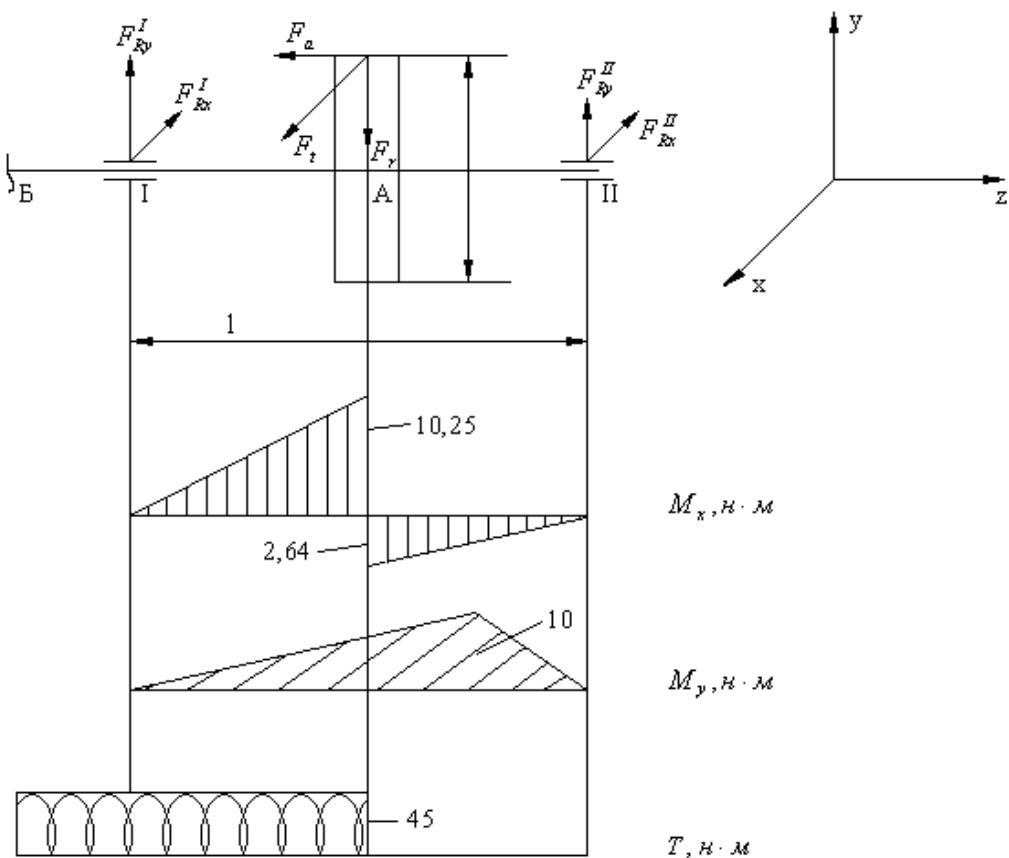


Рис. 1. Расчётная схема и эпюры изгибающих/крутящих моментов

Анализ результатов, полученных по машиностроительной методике, показывает, что вероятность безотказной работы для критических сечений вала практически равна 1.

Полученный результат подтверждает целесообразность определения минимального диаметра вала, при котором вероятность безотказной работы соответствует экономически обоснованной величине, например 0,999, для которого значение квантиля нормированного нормального распределения составляет $u_p = -3,10$ [8]. Определение коэффициента запаса для заданной вероятности с учётом того, что коэффициенты снижения предела выносливости изменяются незначительно (хотя они зависят от размера вала), даёт гарантированное значение диаметра вала для заданной вероятности безотказной работы.

Заключение

Расчёт показателей надёжности привода линейного перемещения на основе модели «слабейшего звена», в качестве которого на начальном этапе принимается вал привода, позволяет произвести оценку основных показателей надёжности и долговечности привода. Полученные результаты являются основой дальнейшего комплексного параметрического анализа в CAD-, CAE-, CAM-системах и могут быть использованы при создании эффективных силовых механизмов линейного перемещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2651531 С1 Российской Федерации, МПК7 B61L 29/04. Автоматизированная пропускная система / С. Н. Иванов [и др.]; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – № 2017113804; заявл. 20.04.2017; опубл. 19.04.2018. Бюл. № 11. – 2 с.
2. Иванов, С. Н. Моделирование механизма подачи совмещённого электропривода для станков с числовым программным управлением / С. Н. Иванов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – № I-1(33). – С. 8090.
3. Р 50-83-88. Рекомендации. Расчёты и испытания на прочность. Расчёты на прочность валов и осей. – Введ. 1089-07-01. – М.: Госстандарт, 1989. – 73 с.
4. Иванов, М. Н. Детали машин / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – М.: Высшая школа, 2008. – 408 с.
5. Ануьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя / В. И. Ануьев. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 1–3.
6. ГОСТ 25.502-79. Расчёты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – Введ. 1981-01-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 50 с.
7. ГОСТ 25.504-82. Расчёты и испытания на прочность. Методы расчёта характеристик сопротивления. – Введ. 1983-07-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 55 с.
8. Иванов, С. Н. Надёжность электроснабжения: учеб. пособие / С. Н. Иванов, А. А. Скрипилев. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнаГУ», 2018. – 156 с.
9. Ivanov, S. Gearless Electromechanical Drive for Complex Security System of an Organization / S. N. Ivanov, S. Htike, A. V. Ulyanov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018 4 January 2019, Article number 8602670 DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602670.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
METALLURGY AND MATERIALS

Бахматов П. В., Москаева А. В., Старцев Е. А., Усанов Г. И.
P. V. Bakhmatov, A. V. Moscaeva, E. A. Startsev, G. I. Usanov

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ФЛЮСА OK FLUX 10.71 И ПРОВОЛОКИ 12-22 ДЛЯ СВАРКИ
ДВУХСТОРОННИХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ**

**EXPERIENCE OF APPLICATION OF FLUX OK FLUX 10.71 AND WIRES 12-22
FOR WELDING BILATERAL BUTT JOINTS OF LOW CARBON STEEL**

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроения и металлургии Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: mim@knastu.ru.
Mr. Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of department of Mechanical engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mim@knastu.ru.

Москаева Александра Витальевна – студентка Института компьютерного проектирования машиностроительных технологий и оборудования Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Cat-clan.rever@mail.ru.

Ms. Alexandra V. Moscaeva – student, Institute of Computer Designing Engineering Technologies and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Cat-clan.rever@mail.ru.

Старцев Егор Андреевич – магистр, ассистент кафедры машиностроения и металлургии Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Mr. Egor A. Startsev – Master, Lecturer assistant, Mechanical Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Усанов Геннадий Иванович – доктор экономических наук, профессор кафедры менеджмента, маркетинга и государственного управления Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: USANOV_G@mail.ruMr.

Mr. Genadii I. Usanov – doctor of Economics, Professor of the Department of management, marketing and public administration of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: USANOV_G@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрена процедура подбора режимов сварки под слоем флюса двухсторонних сварных стыковых соединений, выполненных с применением импортных материалов для обеспечения эксплуатационных свойств, регламентированных СТО-СА-03-002-2009 «Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов», ГОСТ 31385-2016 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия» и ПБ 03-584-03 «Правила проектирования, изготовления и приёмки сосудов и аппаратов стальных сварных». Исследована микроструктура, получены удовлетворительные результаты испытаний на статическое растяжение и ударную вязкость сварных соединений при комнатной и отрицательной температурах. Рассмотрен процесс деформирования и распределения микротвёрдости по сечению сварного соединения. Установлена нелинейная зависимость между силой сварочного тока и геометрическими параметрами шва.

Summary. The paper describes the selection of welding modes under a flux layer of bilateral welded butt joints made using imported materials to ensure the performance properties regulated by STO SA 03-002-2009 «Rules for the design, manufacture and installation of vertical cylindrical steel tanks for oil and oil products»,



GOST 31385-2016 «Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil products. General specifications» and PB 03-584-03 «Rules for the design, manufacture and acceptance of vessels and apparatuses welded steel». The microstructure was studied, satisfactory test results were obtained for static tensile and toughness of welded joints at room and negative temperatures. The process of deformation and distribution of microhardness over the cross section of the welded joint is considered. A nonlinear relationship between the strength of the welding current and the geometric parameters of the weld is established.

Ключевые слова: сварка под слоем флюса, сварочная проволока и флюс,стыковые двухсторонние сварные соединения, механические свойства и микроструктура, режимы сварки, обеспечение взаимного перекрытия валиков.

Key words: welding under a flux layer, welding wire and flux, butt two-sided welded joints, mechanical properties and microstructure, welding modes, ensuring mutual overlap of the rollers.

УДК 621.791

Введение

При высокой температуре сварки флюс расплывается и выделяет защитный газ. При этом поверх зоны сваривания образуется прочная пленка, защищающая её от негативного воздействия окружающего воздуха. Сгоревший порошок превращается в шлак, который легко снимается со сваренного шва. Остатки флюса можно собрать и использовать в другом месте.

Правильно подобранный флюс позволяет решить следующие задачи:

- защита расплавленного металла в сварочной ванне;
- обеспечение флюсом устойчивости горения сварочной дуги;
- снижение энергетических затрат на сварку и предотвращение разбрызгивания металла;
- улучшение условий формирования шва;
- возможность изменения химического состава сварного шва для получения необходимых качеств соединения.

Кроме того, сварка под флюсом имеет и другие преимущества: она позволяет достичь высокого уровня механизации, появляется возможность комплексной автоматизации сварочных процессов. При этом такая автоматическая линия обеспечивает стабильные показатели качества сварных швов.

Ради справедливости стоит отметить и недостатки, присущие сварке под флюсом. Например, данный вид сварки может выполняться исключительно в нижнем положении шва. Детали, подвергаемые сварке, должны быть тщательно подогнаны при сборке, и подготовка кромок должна быть качественной.

Сварить изделия под флюсом на весу не получится – необходима предварительная проварка корня шва или наличие жесткой опорной поверхности.

Значительная стоимость материалов делает процесс существенно дороже, поэтому сварка флюсом в основном применяется при изготовлении ответственных конструкций.

В настоящее время вертикальные стальные резервуары используются в обширных отраслях производства, в том числе и для хранения нефтепродуктов. Они занимают меньше места в отличие от горизонтальных резервуаров, причём их вместимость не меньшая, а возводить их проще, да и легче обслуживать. Именно поэтому они считаются самым простым, практичным и относительно недорогим вариантом хранения наливных продуктов.

В Комсомольске-на-Амуре существует компания ООО «Энергоремонт», которая изготавливает методом рулонирования вертикальные резервуары. Это предприятие поставило задачу отработки режимов автоматической сварки под слоем флюса с использованием импортных материалов фирмы ESAB, которые они собираются применить в дальнейшем при производстве элементов вертикальных резервуаров.

Важными задачами являлись подбор подходящих режимов автоматической сварки для стали 09Г2С толщиной 5 мм, использование в работе проволоки 12-22, флюса 10-71 и стыкового соединения С7.

Сварка проводилась сварочным трактором АДФ-1250, который снабжается источником питания ВДУ 1250. Представленное оборудование имеется на кафедре машиностроения и металлургии КнАГУ.

Энергия дуги приводит к плавлению электродной проволоки, основного металла и части флюса, при этом в точке сварки формируется полость, которая наполняется газами и парами флюса и металла. Оболочкой данной полости в верхней части служит нерасплавившийся флюс, благодаря чему в ней создаётся некоторое избыточное давление. Именно благодаря этому факту сварка флюсом позволяет защитить дугу и слой расплавленного металла от негативного влияния атмосферного воздуха.

По мере перемещения сварочной дуги флюс и расплавленный металл кристаллизуются и остывают; шлак, образовавшийся на поверхности шва, достаточно легко удаляется. Повысить производительность сварки флюсом позволяет автоматическая линия, все процессы на которой осуществляются без участия человека.

Сварка флюсом по автоматической технологии осуществляется следующим образом. Оборудование, применяемое для сварки под флюсом, устроено так, что оператору необходимо всего лишь выбрать и правильно настроить режимы работы. Флюс автоматически подаётся на соединяемые детали из предварительно заполненного бункера, при этом высота слоя зависит от толщины металла.

Электродная проволока, применяемая для сварки, сматывается в бухты или на кассеты, её подачу в рабочую зону осуществляет специальный механизм.

Электрод, создающий дугу, перемещается вдоль шва со скоростью, зависящей от того, какие режимы сварки применяются. Образующий флюсовый свод защищает сварочную ванну и не даёт металлу разбрьзгиваться.

Расплавленный флюс, имеющий более низкую плотность, всплывает на поверхность расплавленного металла, поэтому не ухудшает структуру и качества шва. По мере остывания образовавшаяся корка шлака удаляется с поверхности изделия. Флюс, который не был израсходован, собирается в ёмкость и может использоваться повторно.

Подобная технология, применяемая для сварки под флюсом, благодаря высокой механизации и автоматизации процесса, обеспечивает высокую скорость сварки при стабильном качестве. Поэтому она применяется в различных сферах промышленности. Например, автоматическая сварка широко применяется при изготовлении резервуаров для нефтехранилищ, а высокое качество соединений обеспечивает высокую устойчивость к агрессивным жидкостям.

Цель работы: отработка режимов и технологических рекомендаций по автоматической сварке двухсторонних соединений без разделки кромок с применением импортных материалов для обеспечения эксплуатационных свойств, устанавливаемых нормативной документацией для сварных соединений стенок вертикальных резервуаров из низкоуглеродистой стали, изготавляемых методом рулонирования.

Методика экспериментальных исследований

Для отработки режимов были использованы образцы, вырезанные из одного листа стали 09Г2С. Размер образцов составлял 200×300×5 мм. Кромки на расстоянии 40 мм от торцов с обеих сторон очищены от краски и ржавчины на всю длину сварного стыка при помощи шлифовальной машинки, после чего заготовки собирались без зазора, тип соединения С7 по ГОСТ 8713-79 «Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» (см. табл. 1). Чтобы не допускать смещения кромок, приваривались технологические планки 09Г2С (размер планок составлял 100×40×5 мм) с проставлением двух коротких прихваток размером 10...15 мм.

Таблица 1

Конструктивные элементы сварного соединения С7 по ГОСТ 8713-79 «Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры»

Условное обозначение	Конструктивные элементы		$S=S_1$, мм	b , мм	g , мм	e , мм
	Подготовка кромок	Сварной шов				
C7			4-5	0^{+1}	$2,0^{+1,0}_{-1,5}$	14

Примечание. S – толщина сварных образцов; b – зазор; g – высота наплавленного металла; e – ширина наплавленного металла

Сварка образцов выполнялась омеднённой проволокой 12-22 (ESAB) диаметром 3 мм (см. табл. 2), предназначеннной для сварки углеродистых и низколегированных сталей в сочетании с флюсом OK Flux 10.71 (см. табл. 3), предназначенным для выполнения одно- и многопроходных сварных швов на листах любой толщины. Флюс может использоваться в комбинации с различными проволоками как сплошного сечения, так и порошковыми, а потому пригоден для сварки большинства категорий нелегированных и низколегированных сталей.

Таблица 2

Химический состав наплавленного металла проволокой 12-22

C, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %
0,08...0,12	0,90...1,15	0,15...0,30	max 0,015	max 0,020

Таблица 3

Химический состав флюса OK Flux 10-71

$\text{SiO}_2+\text{TiO}_2$	$\text{CaO}+\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$	CaF_2
20	25	32	15

Автоматическая сварка производилась на сварочном аппарате АДФ 1250 с источником питания ВДУ-1250 на постоянном токе обратной полярности. Вылет электрода 40 мм.

Сила сварочного тока является параметром, позволяющим наиболее эффективно повышать мощность дуги и производительность процесса сварки. Вследствие хорошей защиты расплавленного металла от воздуха и возможности подвода тока к электроду на близком расстоянии от его торца можно повысить плотность тока до 60 A/mm^2 , не опасаясь перегрева и окисления электродной проволоки. При этом объём сварочной ванны достигает $10...20 \text{ см}^3$.

Сила сварочного тока зависит от требуемой глубины проплавления и может быть определена из соотношения

$$I_{\text{cb}} = \frac{H_{\text{np}}}{k_h} \cdot 100, \quad (1)$$

где H_{np} – требуемая глубина проплавления; k_h – эмпирический коэффициент пропорциональности, зависящий от условий сварки.

Глубина проплавления зависит от типа сварного соединения. Двухсторонние швы выполняют таким образом, чтобы они перекрывали друг друга, поэтому $H_{\text{пп}} = 0,6 \delta$. Соответственно, согласно выражению (1) сила сварочного тока составляет

$$I_{\text{св}} = \frac{3}{1,30} \cdot 100 = 230,7 .$$

Род и полярность тока влияют на форму и размеры шва. При сварке на постоянном токе обратной полярности глубина проплавления примерно на 40 % больше, чем при сварке на прямой полярности. При сварке на переменном токе глубина провара на 15...20 % ниже, чем при сварке на постоянном токе обратной полярности. Это объясняется формой столба дуги. Анодное пятно занимает большую площадь по сравнению с катодным, поэтому ширина ванны на прямой полярности возрастает.

Напряжение на дуге связано со сварочным током и диаметром электрода эмпирическим соотношением

$$U_d = 20 + \frac{0,05}{\sqrt{d_s}} \cdot I_{\text{св}} . \quad (2)$$

Тогда напряжение на дуге, согласно выражению (2), имеет значение

$$U_d = 20 + \frac{0,05}{\sqrt{3}} \cdot 230,7 = 26,7 .$$

Скорость перемещения дуги (скорость сварки) можно определить как

$$V_{\text{св}} = \frac{\alpha_h \cdot I_{\text{св}}}{F \cdot \gamma} , \quad (3)$$

где α_h – коэффициент наплавки, который при сварке под флюсом имеет значения 12...18 г/(А·ч); F – площадь поперечного сечения наплавленного металла; γ – плотность металла.

Скорость сварки после введения значения соответствующих параметров в формулу (3) определяется так: $V_{\text{св}} = \frac{15 \cdot 230,7}{21 \cdot 0,00785} = 28,9 .$

Критериями качества образования шва являлись взаимное перекрытие противоположных валиков для обеспечения отсутствия непровара между ними и минимальное смещение оси валиков от оси стыка. Для определения наличия и величины взаимного проплавления, глубины проплавления каждого валика поперечное сечение образцов подвергли травлению в реактиве Гейна до проявления структуры сварного соединения. Высоту усиления и ширину шва измеряли на сформированных валиках УШС-3 и штангенциркулем по требованиям РД 03-606-03 «Инструкция по визуальному и измерительному контролю».

После определения оптимальных режимов сварки на малых образцах сваривали образец с более протяжённым стыком размером 1300×350×5 мм. Для обеспечения равномерности вылета электрода сварное соединение после наложения первого валика выправили. В полученном образце определили картину деформирования после образования первого и второго валиков. С этой целью использовали следующую схему проведения замеров: сварной образец располагали на ровной поверхности пола, слева и справа вдоль сварного образца укладывали металлические трубы одинакового сечения.

На трубы устанавливали уголок, являющийся измерительной базой, от которой штангенциркулем с глубиномером измеряли высоту до поверхности образца, в точке, размеченной на нём сетке с ячейкой размером 40×40 мм (см. рис. 1). Данные вносились в Excel с построением графика поверхности.

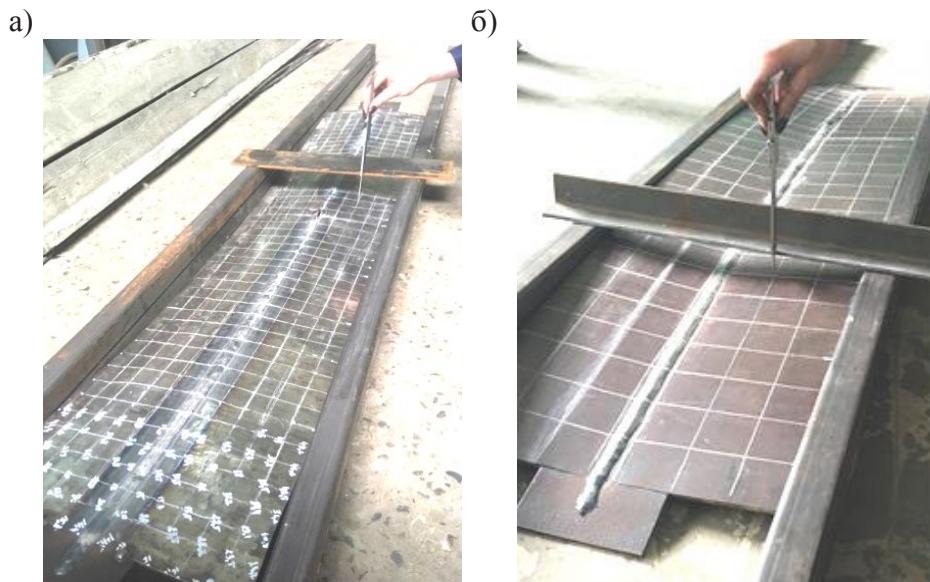


Рис. 1. Измерительная система для определения картины деформирования сварных образцов после сварки: а – первого прохода; б – второго прохода

После сварки пластин для проведения механических испытаний при помощи фрезерного станка были вырезаны образцы по ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств» по схеме, показанной на рис. 2.

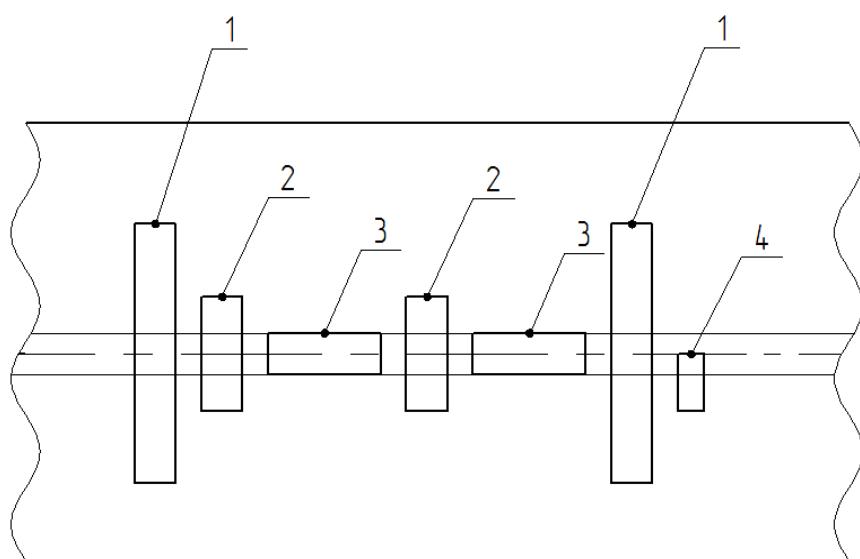


Рис. 2. Схема мест вырезки образцов: 1 – образцы на статическое растяжение; 2, 3 – образцы для испытания на ударную вязкость; 4 – образец для измерения микротвёрдости по сечению и изучения макро- и микрошлифов

Для исследования сварных образцов были проведены следующие испытания:

- 1) испытание сварного соединения на статическое растяжение;
- 2) испытания на ударную вязкость;
- 3) исследование микроструктуры;
- 4) измерение микротвёрдости по сечению сварного соединения.

Испытания (тип ХЦ, размер 5×15×250 мм) на статическое растяжение проводили на универсальной машине INSTRON 3382. Усиление шва было снято до основного металла.

Испытания на ударную вязкость проводили при комнатной температуре и при значении температуры, равном -40 °C, на ударном копле JB-WV 300. Образцы – тип X с v-образным надрезом по оси шва и по линии сплавления в соответствии с ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств».

Обрезка образцов для исследования микроструктуры проводилась на обрезном станке марки Buehler Delta AbrasiMet, предназначенном для резки образцов до необходимых размеров. После получения нужного размера образец залили компаундом.

При заливке образцов использовали акриловый компаунд марки QuickCure, состоящий из акрилового порошка и отвердителя, замешанного в пропорции 2 : 1. При его использовании время заливки пробоподготовки составило 20 мин. Пробоподготовка образцов на исследование микроструктуры велась на шлифовально-полировальном станке Ecomet 250 Pro. Травление образца для исследования микроструктуры проводили в 4%-м спиртовом растворе азотной кислоты в течение двух секунд при промывке в воде и обезвоживании в спирте. Исследования микроструктуры велись на металлографическом микроскопе Nikon MA200. Исследование микротвёрдости в поперечном сечении сварного соединения велись на этих же образцах на микротвердомере SHIMADZU HMV-2 путём проставления точек с интервалом в 1 мм в два ряда, каждый из которых проходил по центру валиков с нагрузкой 0,5 кг.

Результаты исследования

Результаты подбора подходящего режима сварки низкоуглеродистой стали толщиной 5 мм соединения С7 по ГОСТ 8713-79 «Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» приведены в табл. 4.

Таблица 4

Экспериментальные параметры режимов сварки

№ образца	$I_{\text{св}}, \text{А}$	$U_{\text{д}}, \text{В}$	$V_{\text{св}}, \text{м/ч}$	$g, \text{мм}$	$e, \text{мм}$	Величина перекрытия валиков	Примечание	Фото поперечного сечения соединения
1	200	26	28	2,5	12	нет	Провар обоих валиков – 1 мм	
2	220	26	28	2	13,6	нет	Провар обоих валиков – 1,5 мм	
3	240	26	30	2,5	13,5	нет	Провар обоих валиков – 2 мм.	

Продолжение табл. 4

№ образца	I_{cb} , А	U_d , В	V_{cb} , м/ч	g , мм	e , мм	Величина перекрытия валиков	Примечание	Фото поперечного сечения соединения
4	265	26	30	2,8	14,4	нет	Провар обоих валиков – 1 мм	
5	240	26	28	3,3	14	нет	Провар обоих валиков – 2 мм	
6	265	26	30	2,5	15	нет	Провар обоих валиков – 1 мм	
	280			2,1	14,1			
7	265	24	30	2,5	13,5	нет	Валики не соприкоснулись	
	280			2,5	14			
8	280	24	30	2,5	14,3	нет	Соприкосновение валиков – 0,5 мм, но пошёл скос швов	
	300			3	14			
9	280	24	30	2	14	есть	Небольшое соприкосновение валиков – 1 мм	
	320			2,5	16,5			
10	320	24	30	2,5	14,5	нет	Валики соприкоснулись, но не зашли друг на друга	
	320			2,1	16			
11	320	24	32	2	15	есть	Соприкосновение валиков – 1,5 мм, вытек металл, потребовалась шлифовка	
	370			3	16			
12	320	22	32	2,5	14	нет	Вытек металл, произвели шлифование, соприкосновение незначительное	
	350	23		2,5	15			
13	320	23	32	2	14	есть	Вытек металл, произвели шлифование, соприкосновение – 1,1 мм	
	370			3	15			
14	300	24	30	1,5	15	нет	Металл не вытек, провара нет	
	370			2,5	16			
15	300	24	28	2,5	15,5	есть	Соприкосновение валиков – 1,7 мм	
	440			3	16			

В ходе многократного проведения сварки образцов с варьированием её режимов – силы сварочного тока ($I_{св}$), напряжения (U_d) – были получены данные по влиянию режимов на глубину проплавления, которые приведены на рис. 3.

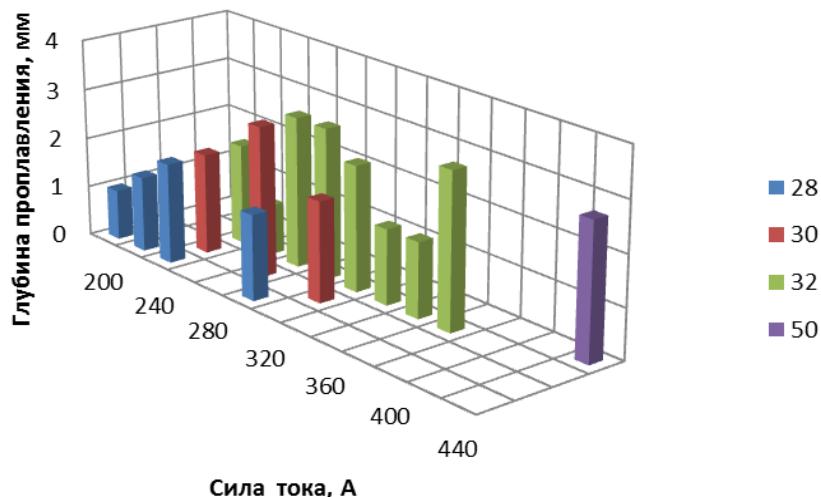


Рис. 3. Диаграмма влияния режимов сварки на глубину проплавления

На рис. 3 видно, что получить стабильное увеличение глубины проплавления при возрастании силы тока и уменьшении скорости сварки достаточно сложно. Например, при скорости, равной 32 м/ч, и при увеличении силы тока до 280 А это приводит к росту глубины проплавления до 3 мм, а дальнейший рост тока – к линейному снижению глубины проплавления до 1,5 мм. Такой же эффект наблюдается и при скорости, равной 28 м/ч.

Данное явление обусловлено тем, что при повышении энергетических параметров сварочной дуги улучшаются условия плавления электродной проволоки, а логическая система сварочного автомата, удерживая определённую длину дуги, увеличивает скорость подачи проволоки, поэтому вместо увеличения глубины проплавления увеличиваются ширина валика и высота его усиления (см. рис. 4 и 5).

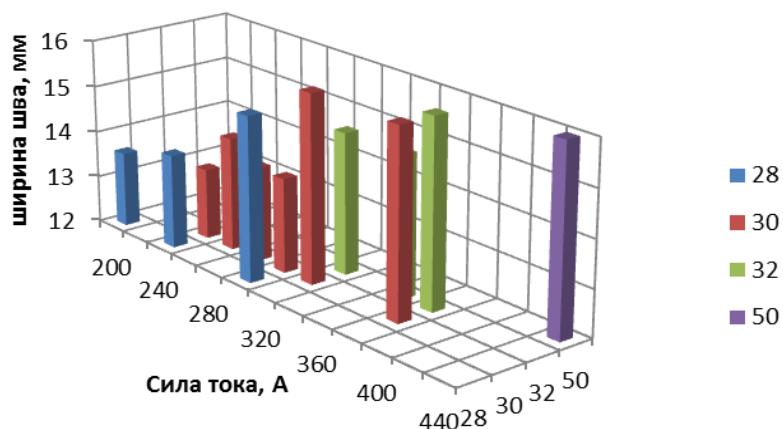


Рис. 4. Гистограмма зависимости ширины шва от силы сварочного тока

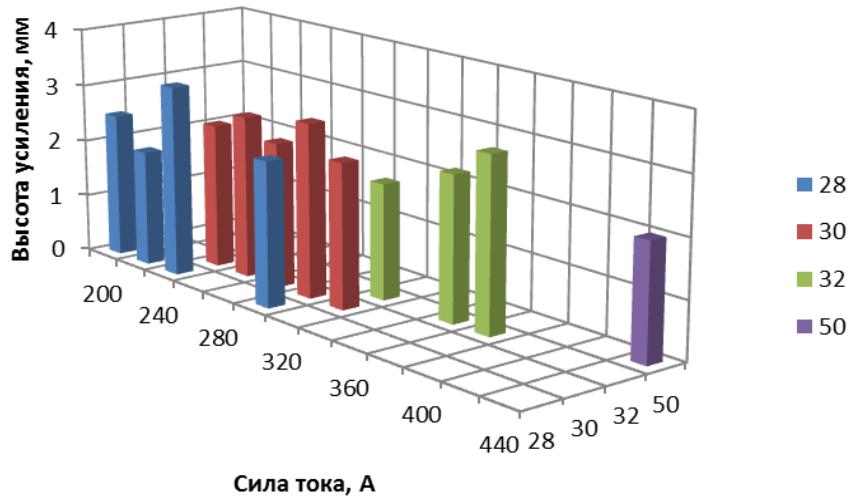


Рис. 5. Гистограмма зависимости высоты усиления от силы сварочного тока

На рис. 6 и 7 видно, что процедура сварки приводит к существенному деформированию свариваемого образца как после 1-го, так и после 2-го прохода. Наблюдаемая после охлаждения деформация имеет седловидную форму с максимальным прогибом в 70 мм после первого прохода и 80 мм после наложения второго валика.

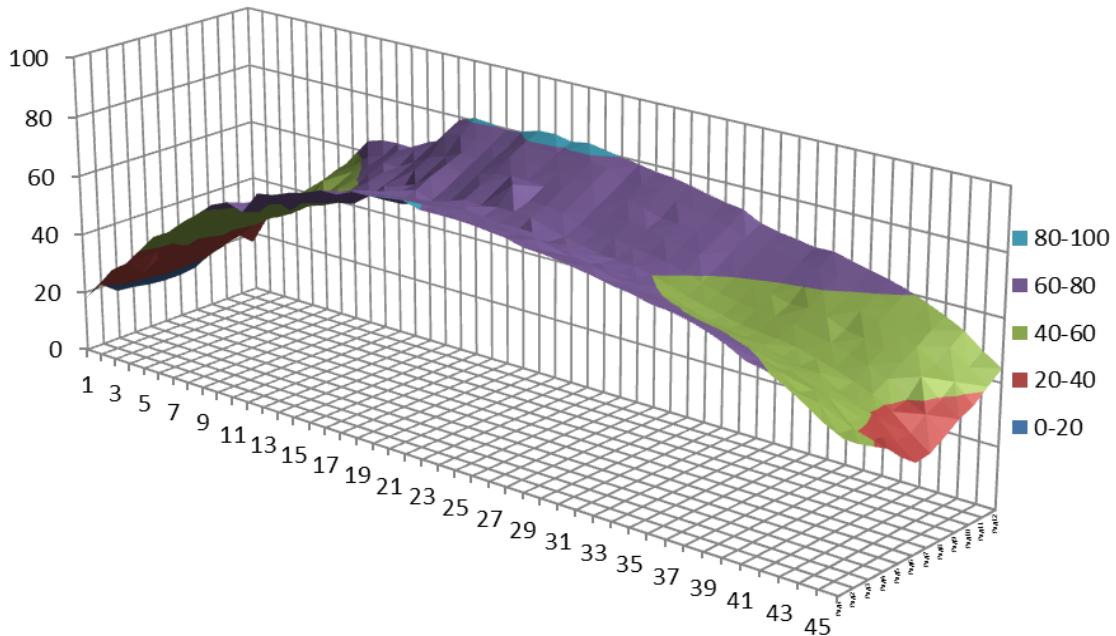


Рис. 6. Картина сварочных деформаций после наложения первого валика

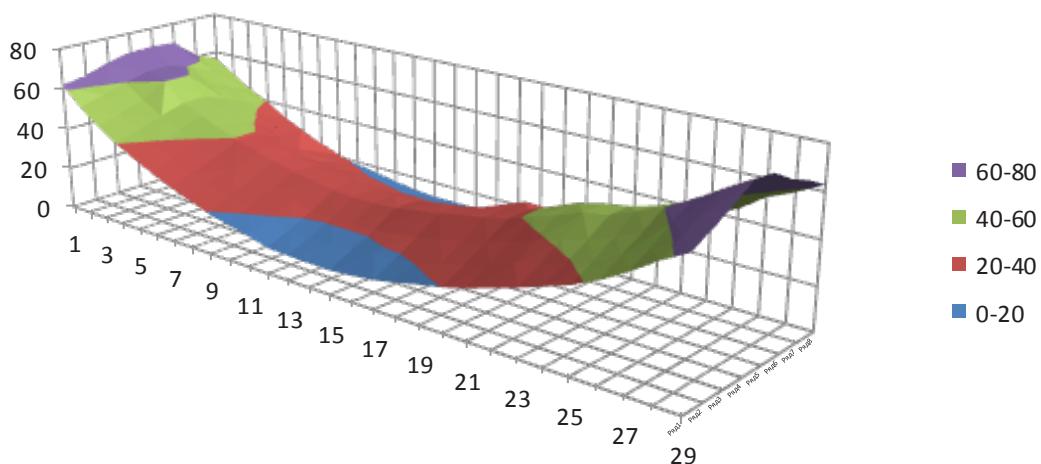


Рис. 7. Картина сварочных деформаций после наложения второго валика

В динамике деформирования в процессе сварки наблюдалось следующее явление: при достижении половины длины сварного шва деталь выгибалась к сварочной головке, как показано на рис. 8, тем самым уменьшая величину вылета электрода, что в свою очередь повлекло образование прожога в ряде участков даже после оперативного вмешательства подъёма сварочной головки.



Рис. 8. Деформация во время сварки

В ходе охлаждения деформация сменила знак на противоположный. Кроме продольной деформации, наблюдается и поперечная деформация, отображающаяся в форме домика, что придаёт сложный характер общей картине деформирования образца (так как изменение геометрии происходит в трёх плоскостях).

Микроструктура поперечного сечения контрольного образца приведена на рис. 9.

На рис. 9 видно отсутствие непровара, то есть обеспечено взаимное перекрытие валиков. Структуры первого и второго валиков отличны друг от друга: в структуре второго валика наблюдается наличие дендритов с игольчатой структурой бейнита отпуска, направленных от линии сплавления поверхности, образованной усилием сварного шва, к его поперечной оси. В структуре первого валика наблюдаем отпускную структуру феррито-перлитной смеси, имеющей зерно, равное по размеру основному металлу. Это явление характеризуется следующим механизмом: в момент нагрева и кристаллизации второго валика происходит нагрев до значения температуры, равного значению температуры аустенизации металла первого валика во всём его объёме, и медленное охлаждение до образования феррито-перлитной смеси среднего размера зерна.

Наибольший интерес представляют объём металла, ограниченный линиями сплавления валиков, и объём зоны термического влияния. Структура этой зоны имеет крупное зерно с игольчатой структурой бейнита-отпуска.

Характерно, что между вышеописанным объёмом металла и объёмом металла первого сварного шва нет чётко наблюдаемой линии сплавления, а существует плавный переход от мелко-зернистой структуры основного металла к крупнозернистой структуре зоны термического влияния. Это объясняется тем же механизмом отпуска первого валика вторым. Но из-за того, что зона термического влияния дважды претерпевает нагрев: первый – после первого валика, второй – после второго, то при этом вдвое увеличивается время пребывания этого объёма металла при повышенной температуре, что приводит к существенному росту зерна.

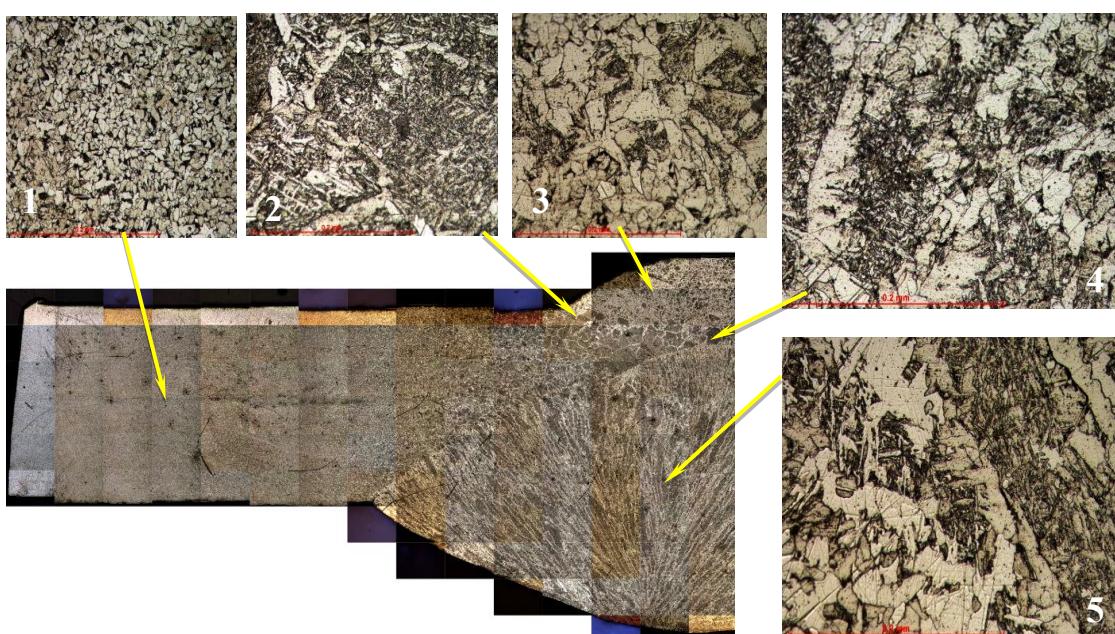


Рис. 9. Микроструктура поперечного сечения сварного соединения контрольного образца:
1 – основной металл; 2 – первый валик шва; 3 – второй валик шва; 4 – перекрытие валиков;
5 – зона термического влияния

В образце 15 наблюдается идентичная структура, что и в контрольном образце (см. рис. 9).

Общий анализ графика (см. рис. 10) распределения микротвёрдости по сечению сварного шва показывает, что сварной шов имеет твёрдость в два раза ниже твёрдости основного металла. В сварном шве так же, как и в основном металле, твёрдость распределется равномерно.

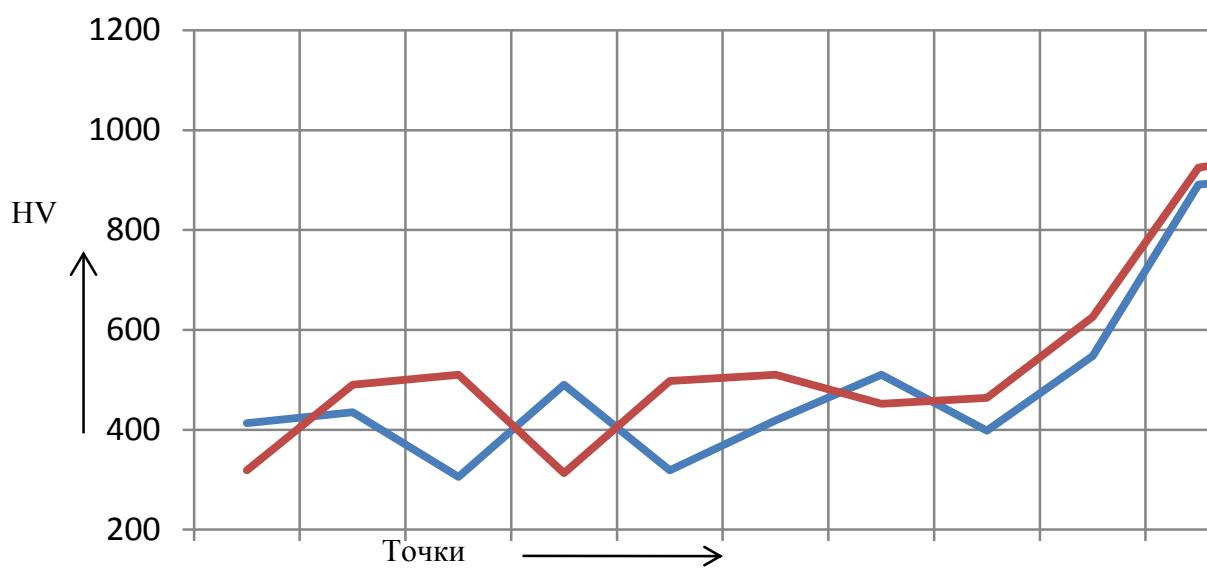


Рис. 10. График изменения микротвёрдости контрольного образца

Испытания на ударную вязкость проводились на двух образцах вдоль и поперёк сварного шва. В обоих случаях показания ударной вязкости превосходили показания из справочников в 2 раза, что говорит нам о высокой способности материала поглощать механическую энергию в процессе деформации. Испытаниям на ударную вязкость подвергался образец, выплавленный вдоль шва, тем самым в испытаниях участвовал исключительно наплавленный металл (металл шва).

Результаты испытаний на ударную вязкость

Охлаждённые до -40°C образцы показывают увеличение ударной вязкости относительно разрушенных при значении комнатной температуры.

Результаты испытаний на разрыв представлены на рис. 11 и в табл. 5.

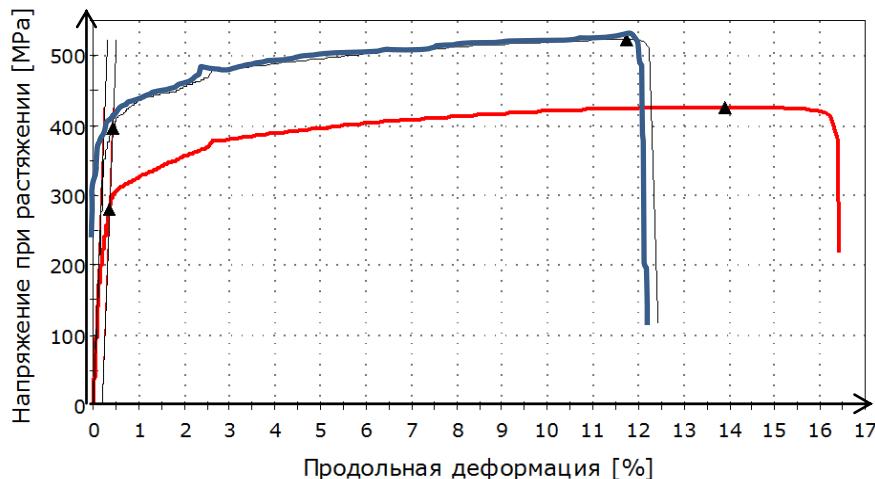


Рис. 11. Результаты испытаний образцов на разрыв

Результаты на статическое растяжение

№ образца	Ширина, мм	Толщина, мм	Площадь, мм^2	Модуль, МПа	Условный предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
1	16,20	3,50	56,70	188 571	278,9	426,4
2	16,30	4,15	67,64	173 961	397,1	522,6

На рис. 12 видно, что произошёл разрыв не по сварному соединению, а по основному металлу. Это свидетельствует об удовлетворительной прочности сварного соединения. Относительное удлинение составило 15,8 % для первого образца и 12 % – для второго.



Рис. 12. Образцы после испытания на статическое растяжение

Выводы

В ходе данной работы экспериментальным путём были подобраны режимы сварки. При подобранных режимах сварки была произведена сварка контрольного длинномерного образца с получением удовлетворительной геометрии плотного шва соединения С7 согласно ГОСТ 8713-79 «Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры». Проведены испытания образцов, в ходе которых установлено их соответствие эксплуатационным характеристикам, относящимся к вертикальным резервуарам и регламентированным следующим нормативным документами: СТО-СА-03-002-2009 «Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов», ГОСТ 31385-2016 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия» и ПБ 03-584-03 «Правила проектирования, изготовления и приёмки сосудов и аппаратов стальных сварных».

Изучена микроструктура сварного соединения. Установлено, что термический цикл сварки второго валика гарантирует термическую обработку сформированного ранее валика и металла в зоне термического влияния. При этом наблюдается эффект размытия границ между ними.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы сварки судовых конструкций: учебник / С. Б. Андреев, В. С. Головченко, В. Д. Горбач [и др.]. – М.: Судостроение, 2006. – 552 с.
2. Стерин, И. С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки: учеб. пособие / И. С. Стерин. – М.: Политехника, 2003. – 343 с.
3. Виноградов, В. С. Оборудование и технология дуговой автоматической и механизированной сварки / В. С. Виноградов. – М.: Высшая школа, 1997. – 319 с.
4. Думов, С. И. Технология электрической сварки плавлением / С. И. Думов. – Л.: Машиностроение, 1978. – 461 с.
5. Технология механизированной дуговой и электрошлаковой сварки / Н. И. Каходский, Ю. Н. Готальский, В. Е. Патон [и др.]. – М.: Высшая школа, 1977. – 358 с.
6. Феклистов, С. И. Моделирование остаточных сварочных деформаций и напряжений / С. И. Феклистов. – М.: Москва, 2003. – 124 с.
7. Талыпов, Г. Б. Сварочные деформации и напряжения / Г. Б. Талыпов. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
8. Рыкалин, Н. Н. Расчёты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: Москва, 1951. – 296 с.



Полянская И. Л., Белова Л. В., Землянова О. В.
I. L. Polyanskaya, L. V. Belova, O. V. Zemlyanova

ПРЕВРАЩЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СТАЛИ 95Х18Ш

TRANSFORMATIONS OF RESIDUAL AUSTENITE IN STEEL COOLING 95X18Sh

Полянская Ирина Леонидовна – кандидат технических наук Уральского государственного университета путей сообщения (Россия, Тюмень); 625008, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Калинина, 5. E-mail: polyanskaya_il@inbox.ru.

Mrs. Irina L. Polyanskaya – PhD in Engineering, Ural State University of Railway Engineering (Russia, Tyumen); 625008, Tyumen region, Tyumen, 5 Kalinin str. E-mail: polyanskaya_il@inbox.ru.

Белова Лариса Владимировна – кандидат технических наук Тюменского индустриального университета (Россия, Тюмень); 625001, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2. E-mail: klv.72@mail.ru.

Mrs. Larisa V. Belova – PhD in Engineering, Tyumen Industrial University (Russia, Tyumen); 625001, Tyumen region, Tyumen, 2 Lunacharsky str. E-mail: klv.72@mail.ru.

Землянова Олеся Владимировна – старший преподаватель Тюменского индустриального университета (Россия, Тюмень); 625001, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2. E-mail: zemlyanovaov@tyuiu.ru.

Mrs. Olesya V. Zemlyanova – Senior Lecturer, Tyumen Industrial University (Russia, Tyumen); 625001, Tyumen region, Tyumen, 2 Lunacharsky str. E-mail: zemlyanovaov@tyuiu.ru.

Аннотация. В статье представлены результаты исследований изменений микроструктуры стали 95Х18Ш при охлаждении и определено влияние понижения температуры на превращения остаточного аустенита. Анализ полученных результатов исследований показал, что для увеличения контактной прочности исследуемой подшипниковой стали целесообразно охлаждение её в жидким азотом для полного перехода аустенита в мартенсит.

Summary. The article presents the results of studies of changes in the microstructure of steel 95X18Sh when cooling and determines the effect of lowering the temperature on the transformation of residual austenite. An analysis of the research results showed that to increase the contact strength of the investigated bearing steel, it is advisable to cool it in liquid nitrogen for a complete transition of austenite to martensite.

Ключевые слова: закалка, температура закалки, температура отпуска, контактная выносливость, длительность старения, закалённые стали, аустенизация, свежезакалённый образец, дилатометрический метод, объёмные эффекты, микроструктура.

Key words: hardening, hardening temperature, tempering temperature, contact endurance, aging time, hardened steels, austenization, freshly hardened sample, dilatometric method, volume effects, microstructure.

УДК 669.111.35:539.4.015

Методика проведения исследований

Превращение остаточного аустенита при охлаждении изучалось дилатометрическим методом на специально сконструированном дилатометре [3; 8]. На дилатометре фиксировали изменения объёма при охлаждении.

Изменения объёма материала, рассчитанные по дилатограммам, совпадают с объёмными эффектами, определёнными методом гидростатического взвешивания.

Опытный образец помещался в кварцевую трубку, запаянную с одного конца. Изменения в объёме образца через толкателем передавались на подвижную ножку индикатора, а через неё – на упругую стальную пластину, на которой наклеены тензодатчики по мостовой схеме. С помощью тензодатчиков объёмные изменения образца преобразовывались в электрический сигнал. Температура образца замерялась термопарой. Холодные спай термопары термостатировались в термостате. Сигналы с тензодатчиков и термопары подавались на усилители, а с них – на двухкоорди-

натный самописец. Температура образца контролировалась потенциометром. Коэффициент усиления дилатометра составлял $K_{\max} = 2500$.

О величине объёмных коэффициентов судили по относительному объёмному эффекту [2; 4], который определяли по формуле

$$\frac{\Delta V}{V} = 3 \cdot \frac{\Delta l}{l},$$

где ΔV – величина изменения объёма образца, мм; Δl – величина, численно равная линейному эффекту превращения, мм; V – исходный объём образца, мм; l – исходная длина образца, мм.

При охлаждении кварцевая трубка с опытным образцом медленно опускалась в сосуд Дюара с жидким азотом. Скорость опускания образца в сосуд Дюара во всех случаях была одинаковой.

Для подтверждения полученных дилатометрических данных применяли исследования микроструктуры опытных образцов.

Результаты исследований

При охлаждении остаточный аустенит переходит в мартенсит, это связано с изменением объёма образца. Поэтому по величине объёмных изменений при охлаждении можно судить о степени превращения остаточного аустенита в мартенсит.

Влияние температуры закалки на превращение остаточного аустенита в мартенсит представлено на рис. 1. Как видно из рис. 1, с повышением температуры закалки от 950 до 1100...1150 °C величина объёмного эффекта, обусловленного $\gamma \rightarrow \alpha$ мартенситным превращением, возрастает. При дальнейшем повышении температуры закалки объёмный эффект, связанный с переходом остаточного аустенита в мартенсит, резко уменьшается. По дилатометрическим кривым хорошо видно температуру начала и конца мартенситного превращения. Начало превращения остаточного аустенита в мартенсит начинается при значении температуры, равном 10 °C. Это говорит о том, что для продолжения $\gamma \rightarrow \alpha$ мартенситного превращения, которое имело место при охлаждении до значения комнатной температуры при закалке, сталь необходимо немногого переохладить до температуры ниже комнатной. Температура конца мартенситного превращения зависит от температуры закалки. Для стали, закалённой с температуры 950 °C, точка M_K находится при значении температуры, равном -1100 °C. Для стали, закалённой с 1100 и 1150 °C, точка M_K составляет -125 и -140 °C соответственно. При закалке стали с температурой 1200 °C точка M_K находится ниже показателя температуры жидкого азота.

Анализ этих данных говорит о том, что для получения максимальной контактной выносливости стали подшипники, изготовленные из стали 95Х18Ш, необходимо охлаждать в жидком азоте до значения температуры, равного -196 °C, а не до -80 °C, как это принято на подшипниковых заводах. Значение температуры, равное -80 °C, находится в центре температурного интервала превращения остаточного аустенита в мартен-

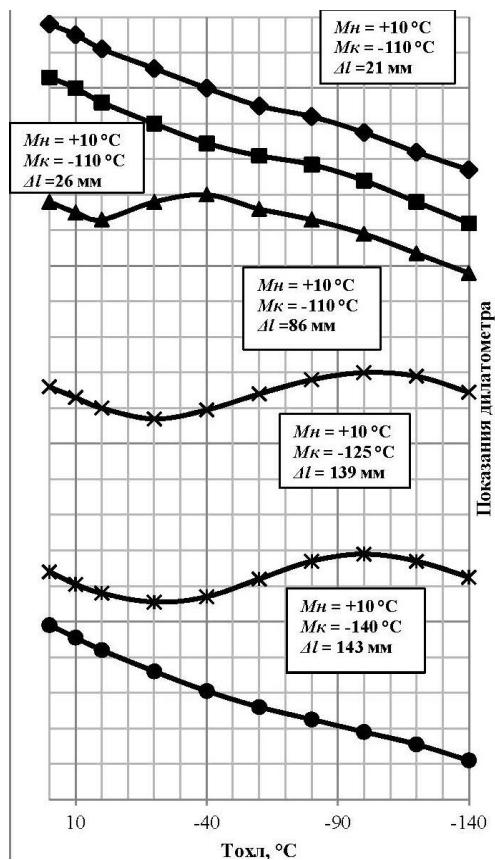


Рис. 1. Дилатограмма стали 95Х18Ш, обработанной при различных режимах:

- ◊ – температура закалки $T_3 = 950$ °C;
- – температура закалки $T_3 = 1000$ °C;
- ▲ – температура закалки $T_3 = 1050$ °C;
- × – температура закалки $T_3 = 1100$ °C;
- * – температура закалки $T_3 = 1150$ °C;
- – температура закалки $T_3 = 1200$ °C

сит, поэтому оно не обеспечивает полного перехода аустенита в мартенсит.

При изучении влияния длительности старения при значении комнатной температуры на $\gamma \rightarrow \alpha$ мартенситное превращение мы не столкнулись с неожиданным явлением, идущим вразрез с существующим мнением. В настоящее время принято считать, что перерыв между закалкой и обработкой холодом всегда приводит к стабилизации остаточного аустенита и уменьшению количества мартенсита, образующегося при обработке холодом. Однако, как показали наши исследования, перерыв между закалкой и обработкой холодом в некоторых случаях приводит к дестабилизации остаточного аустенита и увеличению количества мартенсита в стали во время охлаждения её при температуре ниже комнатной.

Так, при закалке стали с температуры 1100 °C величина объёмного эффекта, обусловленного $\gamma \rightarrow \alpha$ мартенситным превращением при охлаждении свежезакалённого образца, составила 139 мм (см. рис. 2).

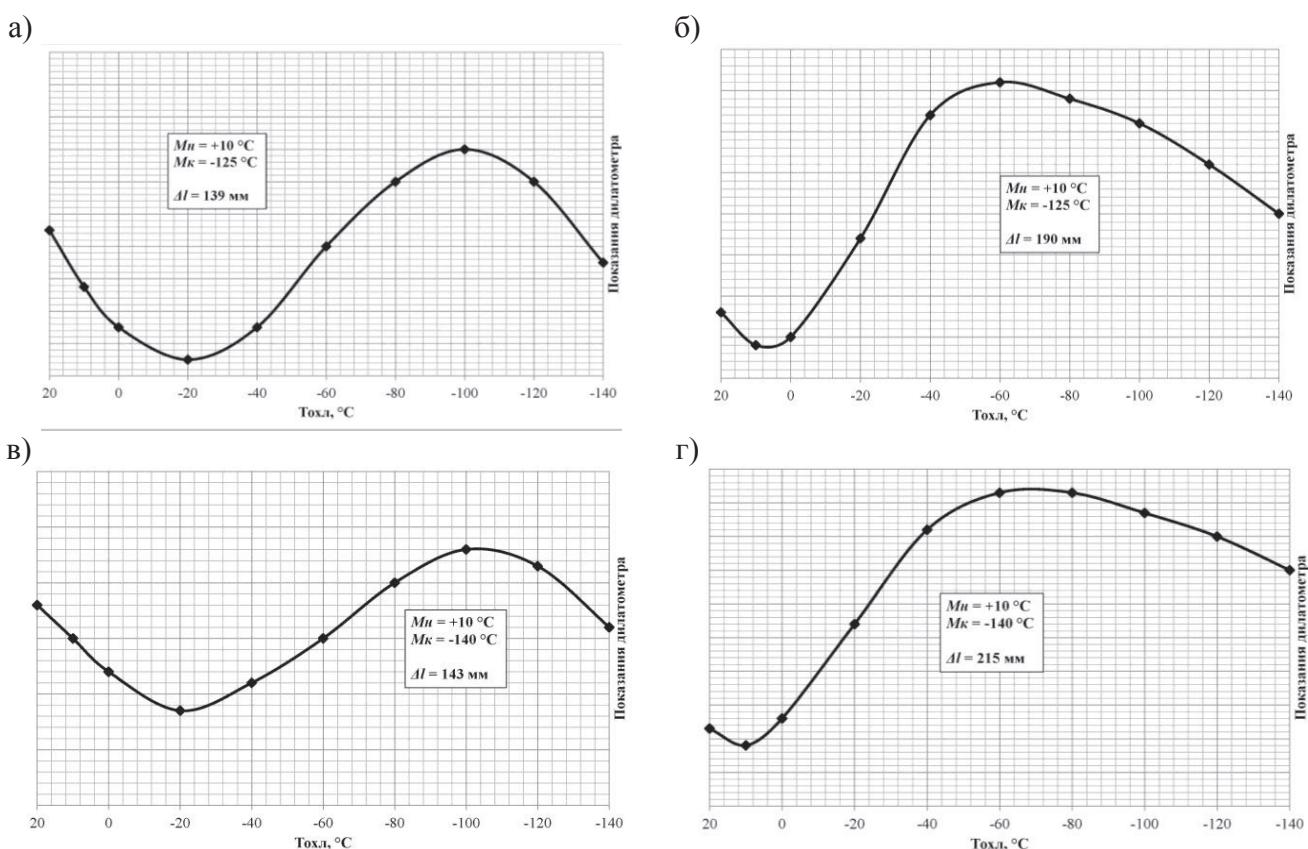


Рис. 2. Дилатограмма стали 95Х18Ш, обработанной по различным режимам: а – температура закалки $T_3 = 1100^{\circ}\text{C}$; б – температура закалки $T_3 = 1100^{\circ}\text{C}$ + старение при 20°C в течение 2 ч; в – температура закалки $T_3 = 1150^{\circ}\text{C}$; г – температура закалки $T_3 = 1150^{\circ}\text{C}$ + старение при 20°C в течение 2 ч

При вылётывании образца до обработки холодом при значении комнатной температуры в течение 3 ч величина объёмного эффекта возросла и составила 190 мм. Для стали, закалённой с температурой 1150 °C, величина объёмного эффекта для свежезакалённого образца составила 140 мм, а для образца, который до обработки холодом пролежал при значении комнатной температуры в течение 2 ч, величина объёмного эффекта составила 215 мм (см. рис. 2). Увеличение объёмного эффекта свидетельствует о том, что старение при значении комнатной температуры приводит к увеличению количества мартенсита, образовавшегося в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ мартенситного превращения, протекающего при обработке холодом. Об этом же говорят данные микроструктурного анализа, выполненного для стали 95Х18Ш, закалённой с температуры 1200 °C в течение

30 мин (см. рис. 3, б). Охлаждение с температуры аустенизации до значения комнатной температуры проводилось в 20%-м растворе щелочи NaOH. Обработка холодом проводилась в жидким азоте.



Рис. 3. Влияние времени выдержки между закалкой и обработкой холодом на количество остаточного аустенита в стали 95Х18Ш. Режим аустенизации – 1200 °C в течение 30 мин, увеличение – в 1440 раз: а – без обработки холодом; б – обработка холодом проведена сразу после закалки; в – обработка холодом проведена через 2 ч после закалки

В образце, который обрабатывался холодом через 2 ч после закалки, количество мартенсита намного больше. Исследование влияния длительности старения при комнатной температуре на величину объёмного эффекта при охлаждении в жидком азоте показало, что имеется оптимальная длительность старения, при которой объёмный эффект максимальен, что и показано на рис. 4.

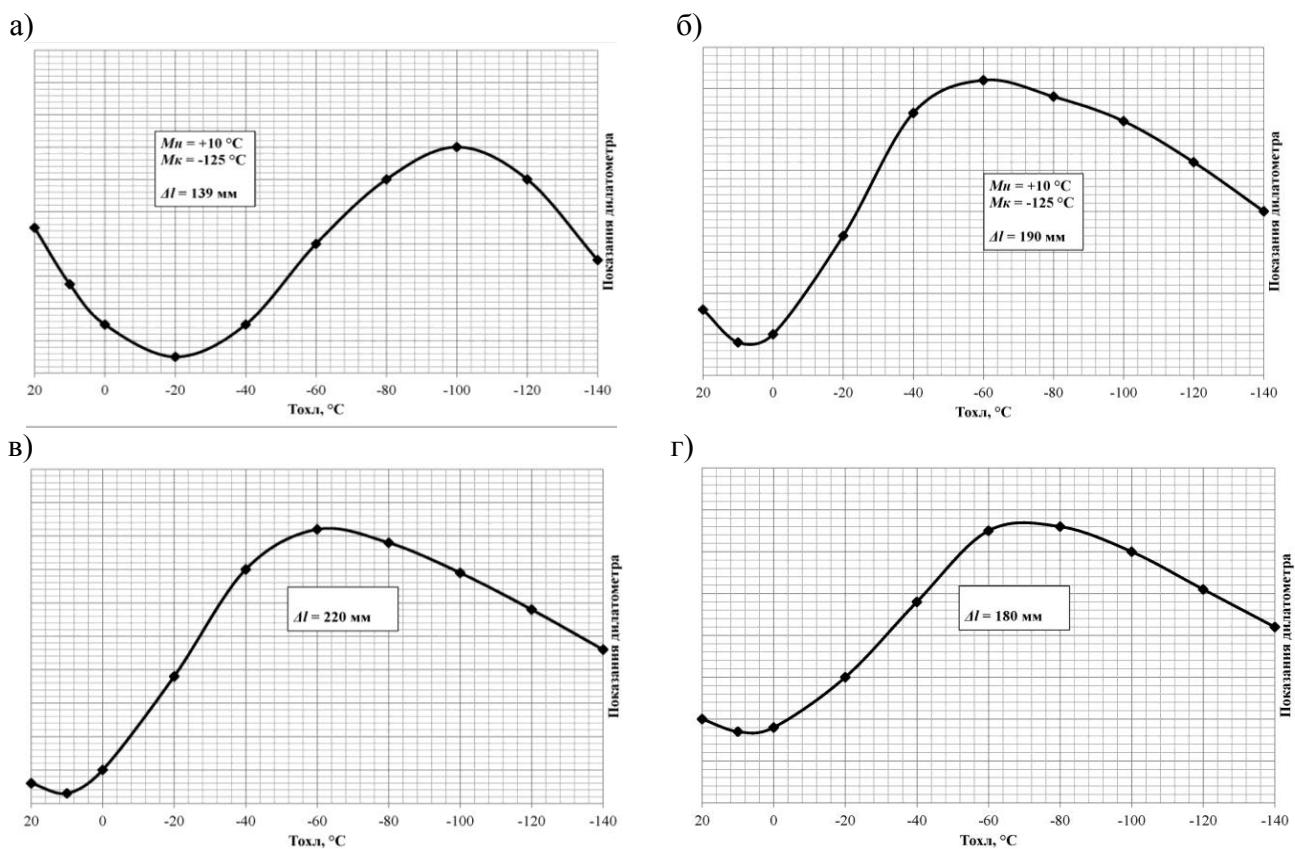


Рис. 4. Дилатограмма стали 95Х18Ш, обработанной по различным режимам: а – температура закалки $T_3 = 1100$ °C ; б – температура закалки $T_3 = 1100$ °C + старение при 20 °C в течение 2 ч; в – температура закалки $T_3 = 1100$ °C + старение при 20 °C в течение 8 ч; г – температура закалки $T_3 = 1050$ °C + старение при 20 °C в течение 34 ч

Для стали 95Х18Ш, закалённой с температуры 1100 °С, оптимальное время старения составляет 8 ч. При увеличении длительности старения свыше 8 ч объёмный эффект уменьшается, что говорит о стабилизации остаточного аустенита и уменьшении количества мартенсита, образующегося в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

О том, что старение образца при значении комнатной температуры в течение 8 ч приводит к увеличению количества мартенсита при охлаждении в жидким азоте, свидетельствуют результаты по измерению твёрдости образцов. Твёрдость образцов, обработанных по режиму «закалка + старение при 20 °С в течение 8 ч + обработка холодом», всегда на 1,5...2,0 единицы (HRC) больше, чем твёрдость образцов, которые после закалки сразу же охлаждались в жидким азоте. Всё это позволяет рекомендовать операцию старения как средство для повышения контактной прочности подшипников, изготовленных из стали 95Х18Ш.

Выводы

Объяснить природу обнаруженного явления мы пока затрудняемся, но можно предположить, что оно связано с перераспределением углерода в аустените закалённой стали.

Изучение особенностей превращения остаточного аустенита при обработке холодом показывает, что уменьшить количество остаточного аустенита в закалённой стали 95Х18Ш можно следующим образом:

- 1) понизить температуру обработки холодом с -180 °С до -196 °С;
- 2) между закалкой и обработкой холодом делать перерыв в течение 8 ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов, Г. В. Превращения в железе и стали / Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. – М.: Наука, 1977. – 273 с.
2. Усиков, М. П. Структурные превращения при низком отпуске углеродистого мартенсита / М. П. Усиков, Ф. Г. Хачатурян // Физика металлов и металловедение. – 1977. – Т. 43. – Вып. 3. – С. 554–561.
3. Отчёт по научно-исследовательской работе. Тема: «Исследование механизма образования, формы, размеров и площади карбидной фазы при обычном отпуске и тепловой обработке в вакууме на износостойкость и долговечность шарирных подшипников из стали 95Х18Ш»; № 78003824 от 01.12.1980 / рук. В. А. Кораблев; исполн. В. А. Кораблев [и др.]. – Тюмень: Тюменский индустриальный институт (ТИИ) им. Ленинского Комсомола, 1980. – 244 с.
4. Полянская, И. Л. Стадии карбидообразования при отпуске закалённых сталей / И. Л. Полянская, И. В. Шушарина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № II-1(26). – С. 105–111.
5. Белоус, М. В. Превращения при отпуске стали / М. В. Белоус, В. Т. Черепнин, М. А. Васильев. – М.: Металлургия, 1973. – 230 с.
6. Лысак, Л. И. Физические основы термической обработки стали / Л. И. Лысак, Б. И. Николин. – Киев, 1975. – С. 95–98.
7. Криштал, М. А. Механизм диффузии в железных сплавах / М. А. Криштал. – М.: Металлургиздат, 1972. – 400 с.
8. Полянская, И. Л. Изучение процессов, протекающих в закалённых углеродистых сталях при низком отпуске: моногр. / И. Л. Полянская, В. А. Кораблев. – Тюмень: РИО ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ», 2015. – 80 с.
9. Новые материалы и технологии. Конструирование новых материалов и упрочняющих технологий / В. Е. Панин, В. А. Клименов, С. Г. Псахье [и др.]. – Новосибирск: ВО «Наука», 1993. – 152 с.
10. Кутсар, А. Р. Изучение превращений при отпуске стали методом ядерного гамма-резонанса / А. Р. Кутсар, Ю. А. Родионов, Г. Г. Исфандияров // Физика металлов и металловедение. – 1980. – Т. 49. – С. 645–648.
11. Кораблев, В. А. Влияние температуры закалки на процессы, протекающие при отпуске стали 35Х4 / В. А. Кораблев, А. П. Школенко // Термическая обработка и физика металлов. Межвузовский сборник. – 1981. – Вып. 6. – С. 107–114.
12. Кораблев, В. А. Изучение начальных стадий карбидообразования при отпуске закалённых углеродистых сталей / В. А. Кораблев, Н. Л. Венедиктов // Термическая обработка, структура и свойства металлов. Межвузовский сборник. – 1985. – Вып. 10. – С. 60–65.

Сарилов М. Ю., Решетник У. Е.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Сарилов М. Ю., Решетник У. Е.

M. Yu. Sarilov, U. E. Reshetnik

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

RESEARCH OF PROCESSES IN THE INTERDELECTRON SPAN AT ELECTROEROSION TREATMENT OF ALUMINUM AND TITANIUM ALLOYS

Сарилов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department of machines and apparatus of chemical production, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sarilov@knastu.ru.

Решетник Ульяна Евгеньевна – студентка кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: reshetnik94@gmail.com.

Mrs. Uliana E. Reshetnik – student of the Department of machines and apparatuses of chemical productions, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: reshetnik94@gmail.com.

Аннотация. В статье представлено исследование процессов электроэррозионной обработки (ЭЭО) в межэлектродном промежутке. Рассмотрены особенности электроэррозионной обработки алюминиевых и титановых сплавов. Выдвинута гипотеза о возможном возникновении оксидных образований («усов») при обработке алюминиевых и титановых сплавов и их влиянии на процесс обработки. Экспериментальными исследованиями доказана возможность появления нитевидных образований при электроэррозионной обработке алюминиевых сплавов и их влиянии на точность и эффективность обработки. В отношении титановых сплавов гипотеза не подтвердилась.

Summary. The article presents a study of the processes of electroerosive processing in the electrode gap. The features are considered at electroerosive processing of aluminum and titanium alloys. A hypothesis has been put forward about the possible occurrence of oxide formations («whiskers») in the processing of aluminum and titanium alloys and their influence on the treatment process. Experimental studies have shown the possibility of formation of filamentous formations during the EDM treatment of aluminum alloys and their influence on the accuracy and efficiency of processing. For titanium alloys, the hypothesis was not confirmed.

Ключевые слова: электроэррозионная обработка, сплавы, межэлектродный промежуток, оксидные «усы».

Key words: electroerosive treatment, alloys, interelectrode gap, oxide whiskers.

УДК 621.9.048

Введение

Эрозия – это длительный процесс, при котором происходит разрушение поверхностного слоя материала из-за воздействия внешних факторов. Если на поверхностный слой металла воздействует электрический ток, то эрозию принято называть электрической. А если на металл применить непосредственное действие коротких электрических разрядов, то такая обработка называется электроэррозионной. В этом процессе воздействие происходит между электродами, то есть один электрод представляет собой саму деталь, а второй – электрод-инструмент [1].

Электроэррозионная обработка применяется во многих отраслях промышленности: станко-, судо-, вертолётно-, самолётостроении и т. д. Однако наибольшее признание на сегодняшний день ЭЭО получила в области машиностроения – в производстве двигателей и прогрессивном самолётостроении. Уровень качества двигателя требует применения усложнённых элементов конструкции, с чем может справиться только электроэррозионная обработка, ведь этот процесс можно применять, если обрабатываемая поверхность размещена в труднодоступных местах для другого вида резания [2].

Производительность с помощью данного метода повысится из-за регулирования параметров обработки, то есть подачи импульсов между электродами с высокой частотой при том же значении энергии импульса, из-за чего обработка улучшит свои качества за счёт влияния уменьшенного расстояния между электродами при снижении энергии для подобранных нами сплавов.

Гипотеза

С помощью проведённых нами исследований мы сделали вывод о том, что алюминий обладает следующими параметрами: 1) повышенной химической активностью; 2) повышенной теплопроводностью; 3) пониженной теплоёмкостью; 4) тугоплавкостью.

Из этих параметров следует, что при обработке данного материала выбранным нами методом могут появиться «усы», которые представляют собой токопроводящие оксидные образования алюминия, полученные из расплавленного и выброшенного материала из лунки. Это доказывает то, что величина между двумя электродами сокращается и растёт количество импульсов, усиливается процесс эрозии и повышается температура электродов, хотя режим обработки является константой.

Гипотеза может рассматриваться не только с позиции алюминия, но и титана, ведь этот материал имеет родственные значения параметров с алюминием. Из-за повышенной температуры во время обработки данных материалов по сравнению с другими мы имеем право рассуждать о подобной особенности алюминия и титана. В свою очередь изменение параметров обработки с учётом этого явления разрешит обрабатывать данные материалы ещё эффективнее, то есть повысить производительность за счёт подачи на межэлектродный промежуток оптимального количества энергии, которое не будет приводить к ухудшению точности обработки и увеличению шероховатости. В авиакосмической области преимущественными являются титановые и алюминиевые сплавы для конструкций ответственных изделий благодаря их прочности и лёгкости. К данным материалам предъявляются жёсткие требования в отношении качества материала и его обработки.

В источнике, опубликованном в работе [3], говорится о повышении эффективности обработки с помощью исследования тепловых явлений.

На рис. 1 и 2 приведены результаты температуры заготовки в процессе обработки в зависимости от изменения параметров обработки.

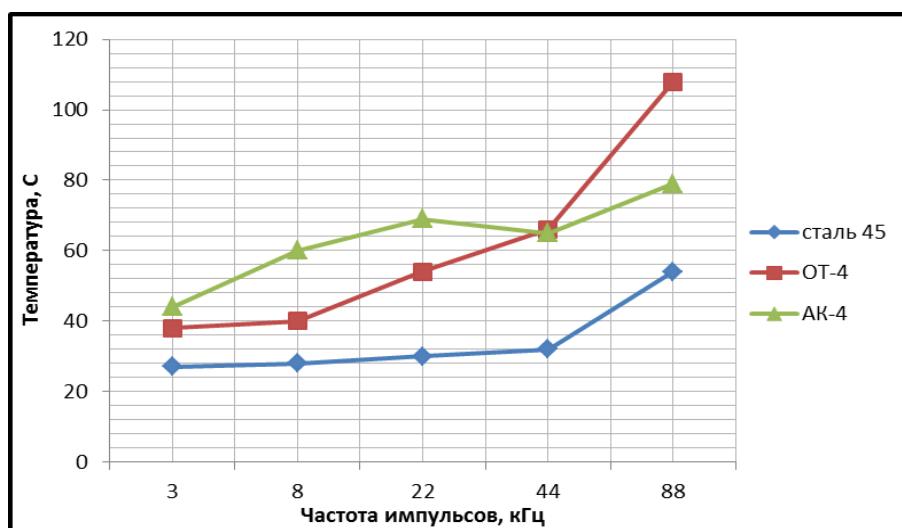


Рис. 1. Зависимость температуры от изменения частоты импульсов

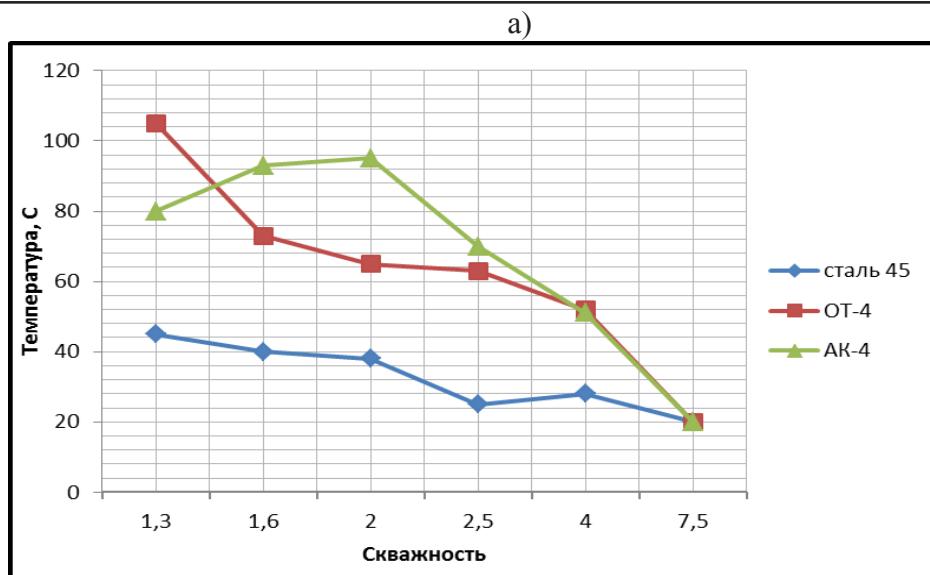


Рис. 2. Зависимость температуры от изменения частоты скважности

У алюминиевого и титанового сплавов концентрация тепловой энергии схожа, хотя у первого компонента коэффициент удельной теплопроводности больше, чем у его оппонента, а сталь имеет коэффициент удельной теплопроводности меньше, в разы меньше. Рассмотрим теплофизические характеристики металлов (см. табл. 1).

Таблица 1
Теплофизические характеристики металлов

Металл	Физическая величина						
	$T_{\text{пл}}$, °C	$T_{\text{исп}}$, °C	$q_{\text{пл}}$, Дж / г	$q_{\text{исп}}$, Дж / г	λ , Вт / см · К	c^* , Дж / г · К	ρ , г / см ³
Al	660	2450 2494	396 400	10 850 10 900	2,09 2,20	0,90 0,94	2,7
	Fe	1535 2750	247 277	6265 6340	0,75	0,46	7,87
Ti	1660 1668	3260 3287	358 392	8970 9227	0,19 0,22	0,52 0,54	4,5

Очень мало времени занимает создание «уса» из алюминия: всё происходит во время пробоя, так как удельная теплота испарения у алюминия в 1,7 раза больше, чем у стали, и больше, чем у титана. Когда на выбранные нами материалы подаётся одинаковое количество энергии за 1 импульс, на алюминий придётся наибольшая доля плавленого материала и наименьшая доля паров, но никак не в лунке на поверхностном слое сплава, где железо – основа сплава. Это значит, что при сжатии газового пузыря и при пропускании заготовки-электрода в МЭП алюминия, в жидкой фазе алюминий остывает быстрее и создаёт «усы». Титан имеет большее значение теплоёмкости и меньшее значение коэффициента теплопередачи в отличие алюминия, но всё равно он должен иметь похожую окислительную способность с алюминием. Из-за таких параметров титан имеет меньшее количество расплавленного материала и меньшие размеры «уса».

Автор исследования [4] рассматривал эффекты, при которых образовывался пробой в жидких диэлектриках. В результате было выявлено, что появление «усов» говорит о наличии у металла химически активного компонента, о типе диэлектрика, промежутка между электродами, размера канала, большой напряжённости внешнего поля при пробое и количества энергии импульса.

«Усы» могут образовываться и достигать нескольких сантиметров при определённых параметрах: повышенной напряжённости поля, удалённости электродов. С помощью экспериментов было выявлено, что от одного пробоя образуются кромки кратера и на алюминиевых и титановых электродах осуществляются разряды с последующим образованием «усов». Для подтверждения нашего предположения были проведены экспериментальные исследования на копировально-прошивочном электроэрозионном станке с генератором импульсов ШГИ 40-440М (см. рис. 3).

а)



б)

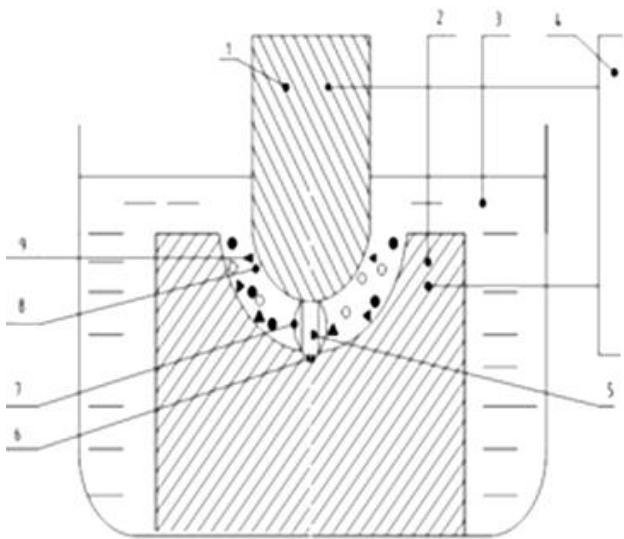


Рис. 3. Копировально-прошивочный электродный станок (а) и схема экспериментальной установки (б): 1 – электрод-инструмент; 2 – электрод-заготовка; 3 – рабочая жидкость; 4 – генератор; 5 – канал заряда; 6 – лунка, образованная разрядом; 7 – газовый пузырь; 8 – частицы металла (шлам); 9 – продукты пиролиза

Электродом при эксперименте послужила медь М1. Обрабатываемыми материалами являются титановый сплав ОТ-4 и алюминиевый сплав АК-4. Нами было выявлено несколько закономерностей: когда повышается энергия, тепловыделение на алюминиевом сплаве увеличивается, а для стального электрода-заготовки в том же диапазоне импульсов тепловыделение носит линейный характер. У титанового сплава растёт температура в конце диапазона мощности. Установлено, что частота импульсов не оказывает большого влияния на тепловые явления и на материалы электродов, а также образование «усов» из-за меньшего времени между разрядами. Но на стальном сплаве температура ниже, чем у других материалов при прочих равных значениях частоты. Дальнейшее исследование описанного явления возможно путём записи происходящего в межэлектродном пространстве с помощью высокоскоростной камеры высокого разрешения (до 100 тыс. кадров/сек).

Данный вид исследования позволил документально удостовериться в наличии оксидных «усов» и условий их возникновения и развития. Установлено, что расширение и сужение канала зависит от введения напряжения и временного интервала, то есть при прекращении введения расширение канала заметно уменьшается и по истечении времени сужается из-за давления от жидкости, окружающей канал. Когда происходит охлаждение металла из-за высокой пластичности и хи-

мической активности, маленькие частички материала, особенно алюминия, окисляются и расплавляются в оксидные «усы» [4].

Процесс показан на рис. 4. По приближенным расчётом, длина этих «усов» может достичь нескольких сантиметров.

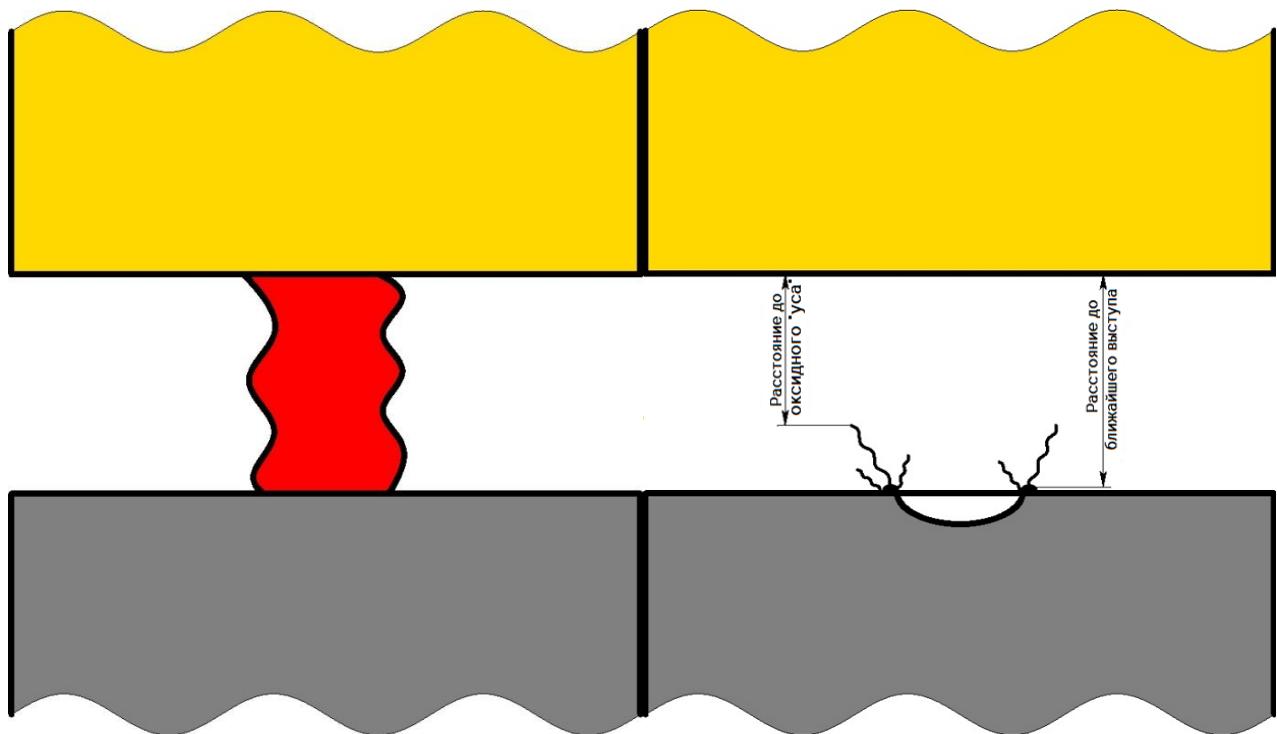


Рис. 4. Упрощённое представление пробоя на алюминиевый сплав

В результате исследований характеристик алюминия и титана можно сделать вывод о схожести процесса пробоя на эти сплавы. Конечно, данные сплавы имеют отличия, так как при таких параметрах титана, как повышенная удельная теплота плавления и пониженная теплопроводность, не сможет подогреться большая поверхность материала, следовательно, оксидные «усы» не будут расти. Было выявлено, что незначительное изменение межэлектродного промежутка может значительно влиять на процесс обработки и конечный результат.

Нами были получены изображения (см. рис. 7) при обработке стали 45, алюминия АК-4, титана ОТ-4 с замером температурного режима электрода-инструмента на копировально-прошивочном электродном станке (см. рис. 3); медь и графит являются электрод-инструментами.

Расчёт теплопроводности подтверждает, что обработка выбранных нами материалов не полностью вписывается в представленную выше теорию. И тогда была выдвинута гипотеза о некоторых особенностях, сопутствующих процессу ЭЭО материалов. Предположительно возможно образование «усов» в процессе разряда, при котором расплавленный материал удалился из лунки, сами же «усы» содействуют образованию последующего пробоя, где эффективно сокращается межэлектродный промежуток.

Графики показывают, что значения температуры алюминия и титана превышают значения температуры стали при обработке в тех же режимах. Такое явление для титана мы можем объяснить благодаря таким параметрам, как повышенная плотность и теплоёмкость, пониженная теплопроводность, которые приводят к образованию тепловой энергии, при которой возникает контакт между материалом и каналом разряда. Что касается алюминия, то данное явление не объяснено из-за того, что этот сплав обладает повышенной и пониженной теплоёмкостью; это должно способствовать теплоотводу от области обработки. Это позволяет думать о том, что механизм пробоя алюминия значительно отличается от механизма пробоя титана.

Дальнейшие исследования единичного импульса также производились с использованием настольного прецизионного электроэррозионного копировально-прошивочного комплекса ДГТ-ЭП-03, изображённого на рис. 5, и микроскопа Neophot 2 с максимальным увеличением х1000, изображённого на рис. 6.



Рис. 5. Настольный прецизионный электроэррозионный копировально-прошивочный комплекс ДГТ-ЭП-03

Рис. 6. Микроскоп Neophot 2

Результаты и обсуждение

После того как были получены и обработаны результаты обработки стали, алюминия и титана, нами были проведены исследования гипотезы на единичном импульсе. Возникающий пробой осуществлялся между электродами с минимальной обработкой, но приближенной к условиям обработки. На рис. 7 представлены фотографии прохождения импульса между медным электродом-инструментом и алюминиевой электрод-заготовкой при одном пробое из множества полученных на воздухе, сделанные через объектив микроскопа.

Видно, что края лунки не имеют образований, которые влияют на процесс пробоя. Были проведены исследования, в результате которых можно утверждать, что лунка в жидким диэлектрике имеет большее значение, чем на воздухе, при одних и тех же материалах.

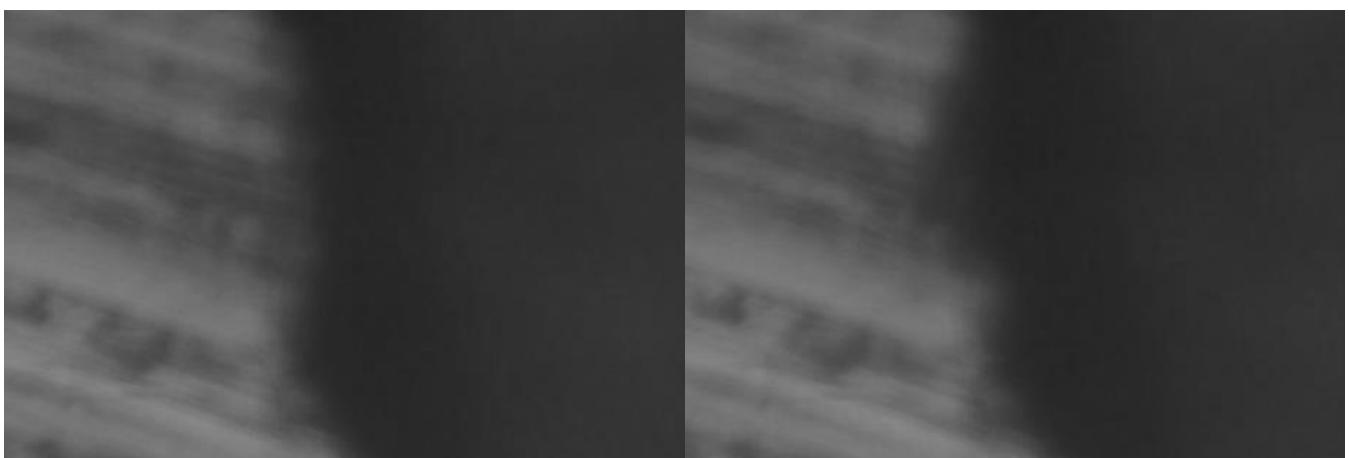


Рис. 7. Прохождение импульса между медным электродом-инструментом и алюминиевой электрод-заготовкой (увеличение в 1000 раз)

На рис. 8 показан результат пробоя алюминия, где в качестве диэлектрической жидкости использовалась дистиллированная вода. На рис. 8, б видны нитевидные образования. Мы считаем, что это и есть те самые «усы».

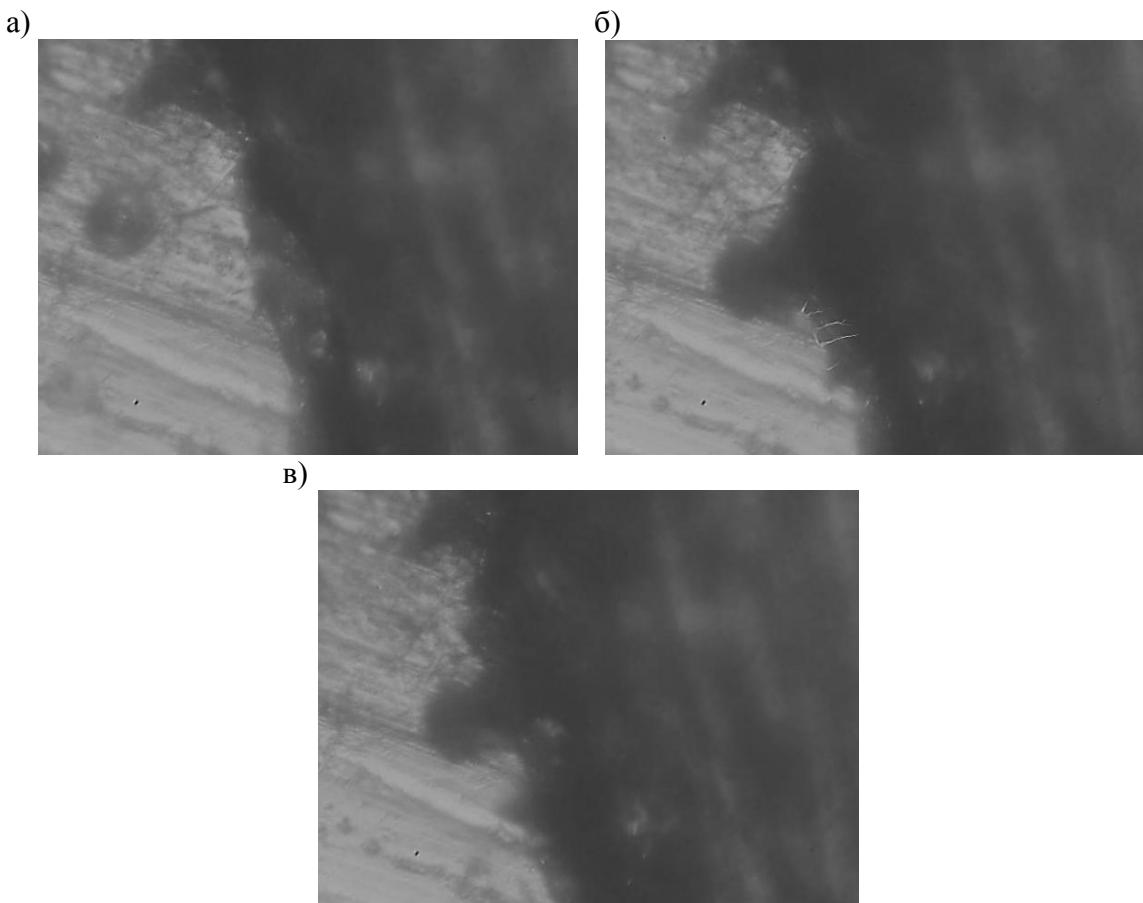


Рис. 8. Пробой в жидком диэлектрике. Электрод-инструмент – медь, электрод-заготовка – алюминий: а – до первого пробоя; б – после первого пробоя; в – после второго пробоя (увеличение в 1000 раз)

На наш взгляд, появление «усов» зависит от энергии импульсов, когда расстояние между электродами сокращается и холостые импульсы переносятся в рабочий вид, зависят от объёма возникающей лунки, от жидкости в межэлектродном пространстве, а также от электродов после пробоя. Но на данный момент времени не получается выявить закономерности образования «усов», так как на это образование влияет слишком много факторов.

Выводы

1. Экспериментально доказано, что при обработке стали «усы» не образовались, так как пробой не провоцирует возникновение отклонений из-за низкой химической активности заготовки.
2. Научно обоснована возможность существования оксидных образований «усов» алюминия и титана; также было сделано обоснование влияния единичного пробоя на весь процесс обработки целиком. «Усы» при обработке алюминия образовывались гораздо чаще, чем при обработке титана, так как химическая активность титана ниже, хотя использовали одни и те же значения температуры. Кроме того, частички титана должны быть тяжелее у такого материала, как титан, следовательно, «усы» при таких условиях образуются реже.
3. Доказано, что образования из оксида алюминия получаются разной длины при разных режимах обработки. Экспериментально доказана малая вероятность появления оксидных образований при обработке титана.

4. Нами внесены корректировки в теорию процесса пробоя в жидким диэлектрике между электродами.

5. В процессе эксперимента выявлены условия тепловых явлений на электрод-заготовках из трёх материалов в разных режимах.

6. Выдвинута гипотеза об образовании нитевидных образований после пробоя, имеющих влияние на последующий пробой.

ЛИТЕРАТУРА

- Сарилов, М. Ю. Механизм электроэррозионного пробоя в воде на алюминиевые и титановые сплавы / М. Ю. Сарилов, А. С. Линёв // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6(6). – С. 1349–1353.
- Сарилов, М. Ю. Исследование процесса межэлектродного пробоя в жидким диэлектрике с целью повышения эффективности электроэррозионной обработки / М. Ю. Сарилов, А. С. Линёв // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. 2013. – № II-1(14). – С. 55–63.
- Сарилов, М. Ю. Влияние процесса электроискрового разряда на эффективность электроэррозионной обработки алюминиевых и титановых сплавов / М. Ю. Сарилов, А. С. Линёв // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № II-1(22). – С. 57–65.
- Сарилов, М. Ю. Повышение эффективности электроэррозионной обработки алюминиевых и титановых сплавов / М. Ю. Сарилов, А. С. Линёв // Металлургия машиностроения. – 2016. – № 3. – С. 52–59.

Ситамов Э. С., Мокрицкий Б. Я., Шакирова О. Г.
E. S. Sitamov, B. Ya. Mokritskii, O. G. Shakirova

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТВЁРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

ESTIMATION OF WEAR-RESISTANCE OF THE MELDOMED TOOLS WHILE PROCESSING STAINLESS STEEL

Ситамов Эрадж Сикандарович – аспирант кафедры технологии машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: +7 (924) 401-01-27. E-mail: Eradj_2303@mail.ru.

Mr. Eradj S. Sitamov – a postgraduate student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: +7 (924)-401-01-27. E-mail: Eradj_2303@mail.ru.

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: +7 (914) 175-75-62. E-mail: Boris@knastu.ru.

Mr. Boris Ya. Mokritskii – Doctor of Engineering, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: +7 (914) 175-75-62. E-mail: Boris@knastu.ru.

Шакирова Ольга Григорьевна – доктор химических наук, доцент, заведующая кафедрой технологии переработки нефти и полимеров Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: +7 (962) 296-74-81. E-mail: Shakirova_Olga@mail.ru.

Ms. Olga G. Shakirova – Doctor of chemical Sciences, associate Professor, head of the Department of technology of oil refining and polymers of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: +7 (962) 296-74-81. E-mail: Shakirova_Olga@mail.ru.

Аннотация. Выбор и приобретение рациональной марки инструментального материала металлорежущего инструмента для обработки нержавеющих сталей затруднён в силу того, что каталоги содержат усреднённую информацию без конкретизации марки нержавеющей стали. Для отдельных марок сталей даже такой выбор отечественного инструмента невозможен в силу того, что разработанные ранее рекомендации не применимы в связи с тем, что либо уже нет такого производителя инструмента, либо такой инструментальный материал снят с производства в силу обстоятельств. Переход на зарубежный инструментальный материал сопряжён с завышенными параметрами режима резания, высокой стоимостью инструмента. Приведены результаты сравнительной оценки износостойкости некоторых твёрдосплавных инструментальных материалов применительно к токарной обработке специализированной нержавеющей стали марки 09Х17Н7Ю, зарубежных аналогов которой нет.

Summary. Selection and acquisition of a rational grade of tool material of metal-cutting tools for stainless steel processing is difficult due to the fact that the catalogs contain averaged information without specifying the grade of stainless steel. For some grades of steel, even such a choice of domestic tools is impossible due to the fact that the previously developed recommendations are not applicable due to the fact that either there is no such tool manufacturer, or such tool material is discontinued due to circumstances. The transition to foreign tool material is also fraught with overestimated parameters of the cutting mode with high tool cost. The results of the comparative evaluation of wear resistance of some carbide tool materials in relation to the turning of specialized stainless steel brand 09X17H7Ю, there are no foreign analogues.

Ключевые слова: износ, период стойкости, рациональный инструментальный материал.

Key words: wear, life, rational tool material.



УДК 621.9

Введение

Уникальность физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств (см. табл. 1 и 2) специализированной нержавеющей стали марки 09Х17Н7Ю [1] создаёт сложности [2] при её механической обработке лезвийным металлорежущим инструментом. Высокая прочность и вязкость этой стали не позволяют применять высокие скорости резания, период износостойкости режущего инструмента низок, что неприемлемо в тех случаях, когда при обработке поверхности заготовки недопустима смена режущей кромки режущей пластины или замена режущего инструмента.

Вместе с тем потребность промышленности в эксплуатационных свойствах такой высококоррозионностойкой стали растёт постоянно. Расширилась область её применения: она востребована в медицине, на химических и пищевых предприятиях, в оборудовании причалов морских портов и т. д.

Нами выполнены сравнительные исследования различных инструментальных материалов для выявления рациональных из них. Для исследования выбрана простейшая конструкция твёрдосплавных пластин. Основное отличие этих пластин друг от друга состоит в инструментальном материале. Инструментальный материал представляет собой основу (субстрат марки ВК8), на которую тем или иным способом нанесено то или иное покрытие. В качестве параметра их сравнения между собой принято время работы до достижения величины износа 0,5 мм по задней грани пластины.

Таблица 1

Химический состав стали марки 09Х17Н7Ю

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Al
до 0,09	до 0,8	до 0,08	7...8	до 0,02	до 0,03	16...17,5	0,5...0,8

Таблица 2

Физико-механические характеристики стали марки 09Х17Н7Ю

Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение при разрыве δ_5 , %	Ударная вязкость КСУ, кДж/м ²	Термообработка
830	735	12	490	Закалка и высокий отпуск

Методология исследования

Рассмотрено наружное точение проходными резцами с механическим креплением режущих пластин. Здесь приведены сведения только по четырёхгранным квадратным пластинам (диаметр описанной окружности 17,5 мм) с центральным крепёжным отверстием и без него, со стружечной канавкой и без таковой. Сведения об инструментальных материалах даны далее.

Диаметр заготовки изменялся в процессе обработки от 280 до 60 мм. Скорость резания поддерживали в пределах 50...55 м/мин за счёт варьирования числа оборотов шпинделя. Использовали токарно-винторезный станок модели 16К25. Подача резца из требований шероховатости обрабатываемой поверхности выбрана равной 0,21 мм/об заготовки. Глубину резания принимали равной 0,5 мм для условий чистовой обработки и 1 мм – для условий черновой обработки. В том и в другом случаях предельно допустимой величиной износа по задней грани считали 0,5 мм. Сопоставляли режущий инструмент по периоду износостойкости, то есть по времени работы режущих

пластин при должной шероховатости до достижения величины износа 0,5 мм по задней грани. Для измерения достигнутой величины износа обработку прерывали через каждые 15 минут. Измерение величины износа осуществляли на мультисенсорном измерительном центре (видеоизмерительной машине) модели Micro-Vu Sol 161. Результаты испытаний дублировали и документировали. Ниже приведена информация только по данным износа h_3 по задней поверхности.

Обсуждение полученных результатов

На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость величины износа h_3 от времени t работы инструмента.

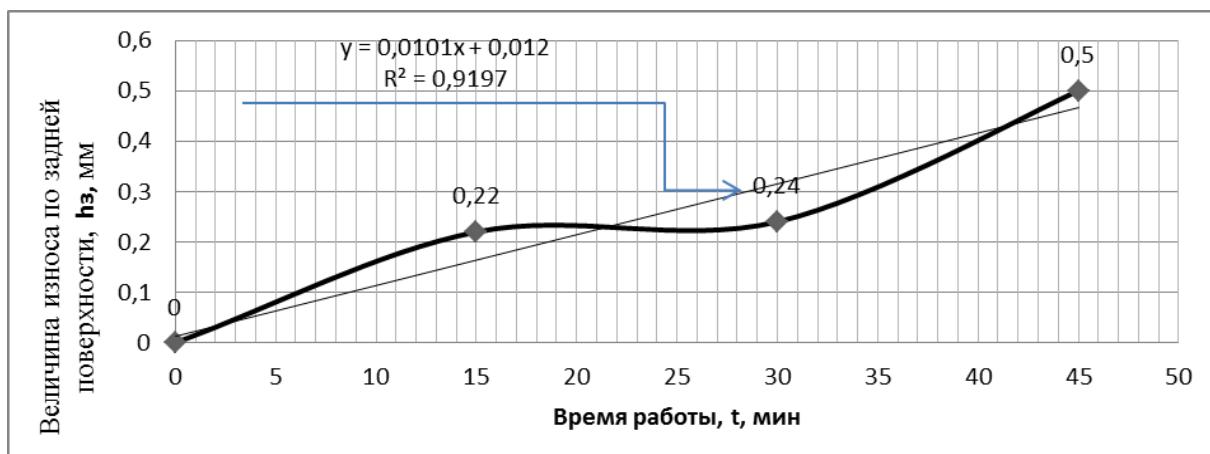


Рис. 1. Пример зависимости величины износа h_3 от времени t работы твёрдосплавного инструмента марки ВК8 (режим резания $v = 55$ м/мин; $n = 160$ об/мин; $s = 0,21$ мм/об; $t = 1$ мм)

Подобные графики построены для различных инструментальных материалов при идентичных условиях эксплуатации. Пример сравнительной оценки их износостойкости показан на рис. 2.

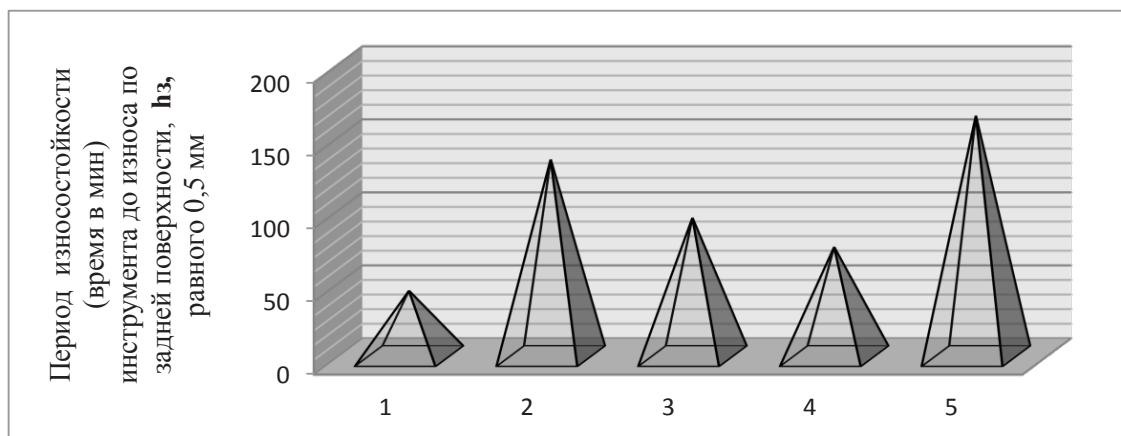


Рис. 2. Пример сравнения периода износостойкости различных инструментальных материалов:
1 – ВК8; 2 – ВК8 + покрытие* № 1; 3 – ВК8 + покрытие* № 2; 4 – ВК8 + покрытие* № 3;
5 – ВК8 + алмазная термозаточка [3] по передней поверхности + полирование
по задней поверхности пластины

* Архитектура покрытий описана в работах [4; 5].



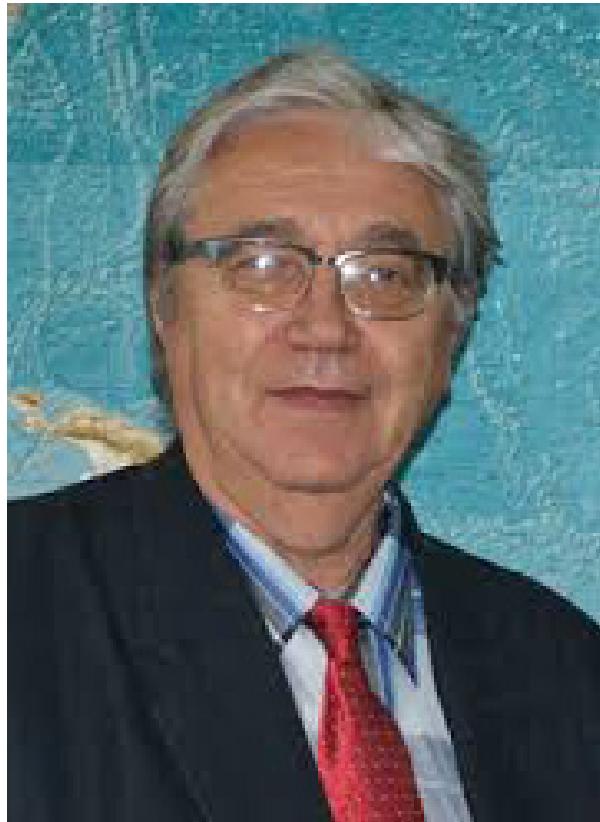
Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что инструментальные материалы существенно неравноценны по износостойкости при обработке указанной стали. Применение покрытий на отечественном твёрдом сплаве марки ВК8 заметно повышает работоспособность режущих пластин.

Технологический приём доработки [3] режущих кромок со стороны передней и задней поверхностей тоже существенно повышает работоспособность инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. – Введ. 1975-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 60 с.
- Упрочнение сложносоставными покрытиями режущих пластин для обработки коррозионностойкой стали 09Х17Н7Ю / Б. Я. Мокрицкий, А. А. Верещака, С. В. Белых, Е. Б. Мокрицкая // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 5. – С. 3–6.
- Мокрицкий, Б. Я. Повышение работоспособности металлорежущего инструмента путём управления свойствами инструментального материала / Б. Я. Мокрицкий. – Владивосток: Изд-во «Дальннаука», 2010. – 232 с.
- Ситамов, Э. С. Результаты сравнительного исследования износостойкости твёрдосплавного инструмента при обработке нержавеющей стали / Э. С. Ситамов, Б. Я. Мокрицкий // Металлообработка. – 2018. – № 4(106). – С. 7–13.
- Мокрицкий, Б. Я. Оценка работоспособности токарных резцов с разными покрытиями при обработке стали 09Х17Н7Ю / Б. Я. Мокрицкий, Э. С. Ситамов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14. – № 10(166). – С. 447–449.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ
SCIENTIFIC LIFE



*28 сентября 2019 года исполняется 80 лет
академику РАН,
лауреату государственной премии Российской Федерации в области науки и техники,
доктору физико-математических наук,
профессору Владимиру Алексеевичу Левину.*

*Коллектив Комсомольского-на-Амуре государственного университета и редакция журнала
«Ученые записки КнАГТУ» сердечно поздравляют Владимира Алексеевича с юбилеем и желают
крепкого здоровья, творческих успехов, жизненного оптимизма и новых научных открытий.*

GEEK.KNASTU

Сеть студенческих конструкторских бюро



geek.knastu.ru

СТАРТ ПРОЕКТА

ЗАХОДИ, РЕГИСТРИРУЙСЯ, УЧАСТВУЙ



#Росмолодежь #Ресурсцентр #ВКМП
#НЛСК #Россиястранавозможностей
#кнагу #knasu #Технофест
#geek_knastu #skb_knastu



GEEKELECTRO



Электроника
и робототехника

Руководитель:
Иванов Юрий Сергеевич

Аудитория: 309/3
Запись: skb.electro@knastu.ru

GEEKROBOT



Промышленная
робототехника

Руководитель:
Сухоруков Сергей Иванович
Аудитория: 101/3
Запись: skb.robot@knastu.ru



Аддитивные технологии

Руководитель:
Куриный Владислав Викторович
Аудитория: 427/3
Запись: skb.3d@knastu.ru

GEEK3D



Автомоделирование

Руководитель:
Плетнёв Никита Олегович
Аудитория: 205/2
Запись: skb.auto@knastu.ru

GEEKAUTO



Беспилотные
летательные
аппараты

Руководитель:
Лозовский Иван Владимирович
Аудитория: 110/3
Запись: skb.aero@knastu.ru

GEEKAERO



Космические
технологии
и ракетостроение

Руководитель:
Киба Дмитрий Анатольевич
Аудитория: 210/3
Запись: skb.space@knastu.ru

GEEKSPACE



Интеллектуальные
технологии

Руководитель:
Жарикова Евгения Павловна
Аудитория: 324/3
пн 9:50-11:30,
вт 11:30-17:30,
чт 14:00-17:00
Запись: skb.it@knastu.ru

GEEKIT