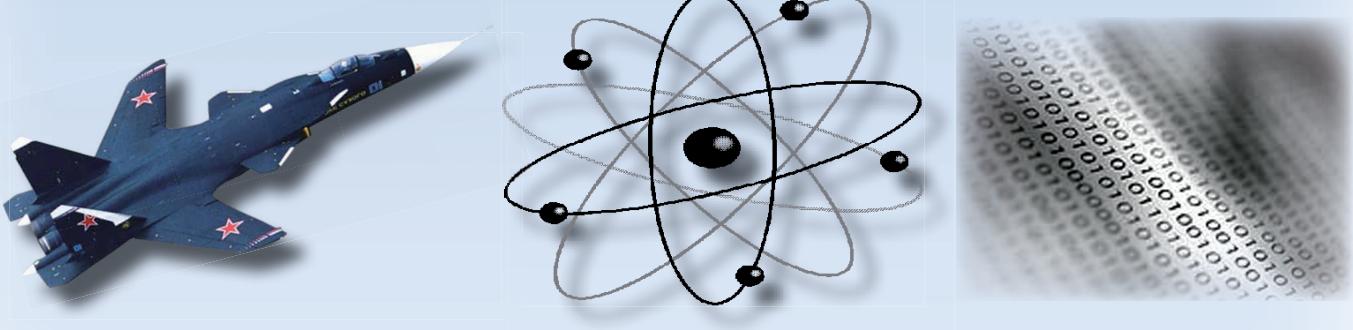


Учёные записки

ISSN 2076-4359
№ VII (63)
2022

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

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

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

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте свои материалы на адрес электронной почты: journal@knastu.ru

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

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

Адрес учредителя и издателя: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27

Телефон для справок: +7 (4217) 24-13-48

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

Телефон для справок: +7 (4217) 24-13-48

Индекс журнала в каталоге Роспечать: 66090.

Цена свободная.

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

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

Журнал основан в 2010 году

Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:

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

Заместитель главного редактора, ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»:

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

Заместитель главного редактора, ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:

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

Технический редактор:

Татьяна Николаевна Карпова

Дизайн и верстка:

Оксана Вадимовна Приходченко,
канд. техн. наук

Менеджер информационных ресурсов:

Иван Константинович Андрианов,
канд. техн. наук

Серия: «Науки о природе и технике»

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (**Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф.);
2. Энергетика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф.);
3. Управление, вычислительная техника и информатика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Николаевич Иванов**, д-р техн. наук, доц., **Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
4. Математика и механика (**Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
5. Машиностроение (**Михаил Юрьевич Сарилов**, д-р техн. наук, доц., **Борис Николаевич Марьин**, д-р техн. наук, проф., **Борис Яковлевич Мокрицкий**, д-р техн. наук, доц., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
6. Металлургия и металловедение (**Владимир Алексеевич Ким**, д-р техн. наук, проф., **Олег Викторович Башков**, д-р техн. наук, доц.);
7. Флот и кораблестроение (**Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Виктор Михалович Козин**, д-р техн. наук, проф.);
8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (**Ирина Павловна Степанова**, д-р техн. наук, проф.);
9. Строительство и архитектура (**Николай Петрович Крадин**, д-р архитектуры, проф., член-корреспондент РААСН, **Олег Евгеньевич Сысоев**, д-р техн. наук, доц.).

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:

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

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

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

СЕРИЯ: «НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ»

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦУЙ СЮЙ, профессор Шенъянского аэрокосмического университета (КНР)

ЭНЕРГЕТИКА

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

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

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

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

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

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

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

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

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

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

МАШИНОСТРОЕНИЕ

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

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

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

МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

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

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

ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕНДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

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

СЕРИЯ: «НАУКИ О ЧЕЛОВЕКЕ, ОБЩЕСТВЕ И КУЛЬТУРЕ»

ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ

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

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

ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОЗНАНИЕ

СВЕТЛНА 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

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Марьин С. Б., Жабаров А. В., Якимец А. А., Тарасов Н. Е.
S. B. Maryin, A. V. Zhabarov, A. A. Yakimets, N. E. Tarasov

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖЁСТКОСТИ КОНЦЕВОЙ ЧАСТИ ПЕРЕДНЕГО ЛОНЖЕРОНА ПРИ СБОРКЕ КЕССОНА ОТЪЁМНОЙ ЧАСТИ КРЫЛА SSJ-100

ENSURING THE RIGIDITY OF THE END PART OF THE FRONT SPAR WHEN ASSEMBLING THE CAISSON OF THE DETACHABLE PART OF THE WING SSJ-100

Марьин Сергей Борисович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Sergey B. Maryin – D.Sc. in Engineering, Head of Aircraft Industry Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Жабаров Александр Владимирович – начальник технологического бюро Комсомольского-на-Амуре авиационного завода им. Ю. А. Гагарина – филиала ПАО «ОАК» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: alexzh@mail.ru.

Alexander V. Zhabarov – Head of the Technological Bureau of the Komsomolsk-on-Amur Aviation Plant named after Yu. A. Gagarin – Branch of PJSC «UAC» (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: alexzh@mail.ru.

Якимец Анастасия Александровна – инженер-технолог Комсомольского-на-Амуре авиационного завода им. Ю. А. Гагарина – филиала ПАО «ОАК» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: yakimers.nastya@mail.ru.

Anastasia A. Yakimets – Engineer-Technologist of the Komsomolsk-on-Amur Aviation Plant named after Yu. A. Gagarin – Branch of PJSC «UAC» (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: yakimers.nastya@mail.ru.

Тарасов Никита Евгеньевич – студент кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: nikita.taradov99@gmail.com.

Nikita E. Tarasov – Student, Aircraft Industry Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: nikita.taradov99@gmail.com.

Аннотация. В статье рассмотрены причины возникновения закрутки концевой части лонжерона при сборке кессона крыла самолёта SSJ-100 и приведён вариант решения вопроса.

Summary. The article discusses the causes of the twist of the end part of the spar during the assembly of the wing caisson of the SSJ-100 aircraft and provides a solution to the issue.

Ключевые слова: лонжерон, закрутка, опора, отъёмная часть крыла, базовое отверстие, стапель.

Key words: spar, twist, support, basing, wing detachable part, base hole, slipway.

УДК 658.512.2

Обеспечение точности при изготовлении как отдельных деталей, агрегатов, так и всего самолёта в целом направлено на удовлетворение тактико-технических требований и достижение взаимозаменяемости составных частей планера самолёта [1; 2]. Проблема отклонений геометрических размеров, возникающих на этапе сборочного производства, от номинальных значений (проектных характеристик) очень сильно влияет на качество выполнения стоящих перед изделием задач. Практика производства самолётов в полной мере не обеспечивает точного соответствия полученных значений теоретически рассчитанным параметрам в силу имеющихся технологических и экономических ограничений.

Для относительно тонких современных крыльев самолётов характерна тонкостенная конструкция, состоящая из продольного и поперечного наборов и обшивок. Основным силовым эле-

ментом отъёмной части крыла (ОЧК) самолёта SSJ-100 является кессон, он выполнен в виде бака и состоит из верхних и нижних клёпаных панелей, а также 2 лонжеронов собранной конструкции и ряда нервюр.

На рис. 1, а изображено поперечное сечение концевой части переднего лонжерона с 19-й по 20-ю нервюру, состоящего из стенки и нижнего пояса, на рис. 1, б – поперечное сечение концевой части переднего лонжерона с 20-й по 21-ю нервюру, состоящего из стенки, нижнего пояса и профиля.

Одним из самых ответственных этапов сборки самолёта является сборка кессона ОЧК, в частности, соединение панелей с лонжеронами. В результате выполнения соединения происходит закрутка концевой части переднего лонжерона (см. рис. 1, в).

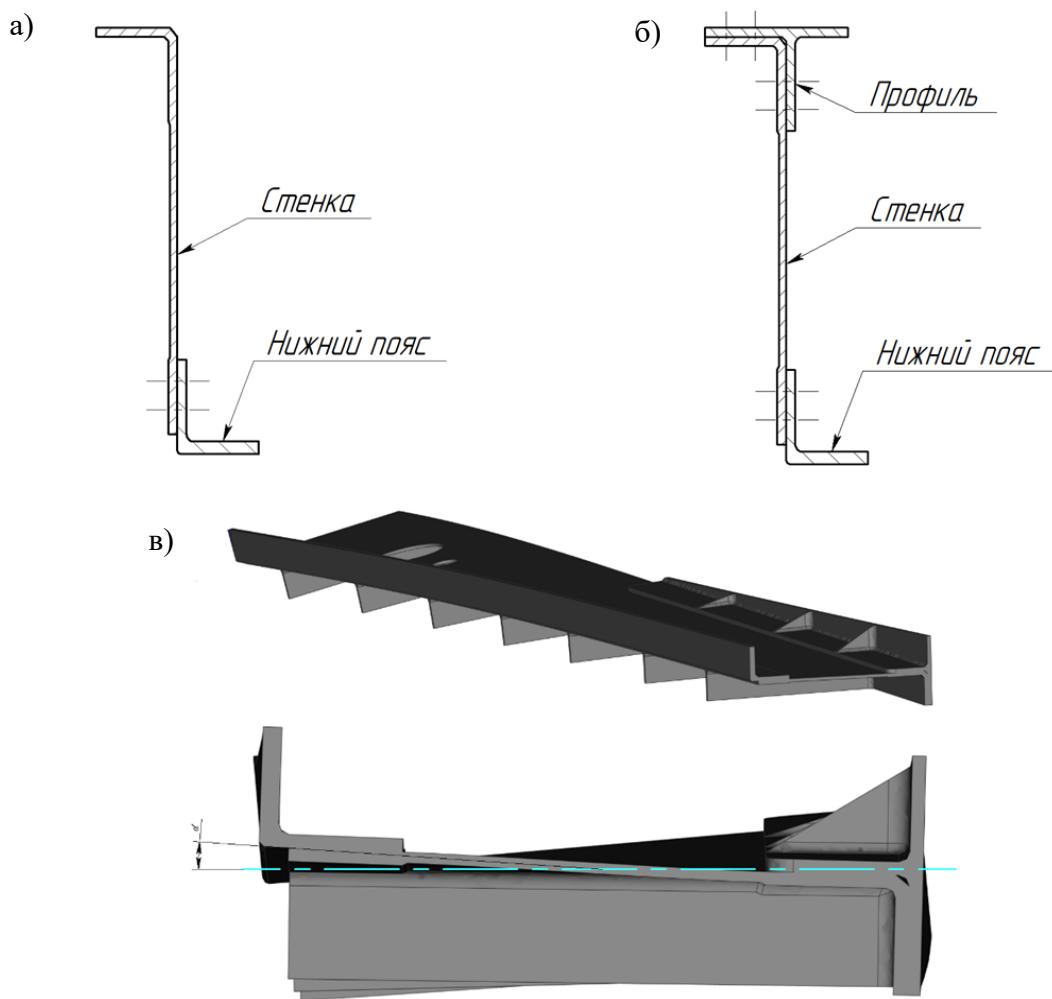


Рис. 1. Конструкция концевой части переднего лонжерона крыла SSJ-100:
 а – поперечное сечение лонжерона с 19-й по 20-ю нервюру; б – поперечное сечение лонжерона с 20-й по 21-ю нервюру; в – угол закрутки α лонжерона

Под закруткой понимается смещение геометрического центра нижнего пояса лонжерона относительно геометрического центра верхнего сечения при неподвижном положении профиля [3; 4].

В процессе производства выявляются случаи, когда на полностью собранном кессоне ОЧК, прошедшем все циклы изготовления, выявляются дефекты в виде значительных отклонений от требуемой геометрии. Картина отклонений контрольных точек от заданных значений, снятых с помощью лазерного трекера, продемонстрирована на рис. 2.

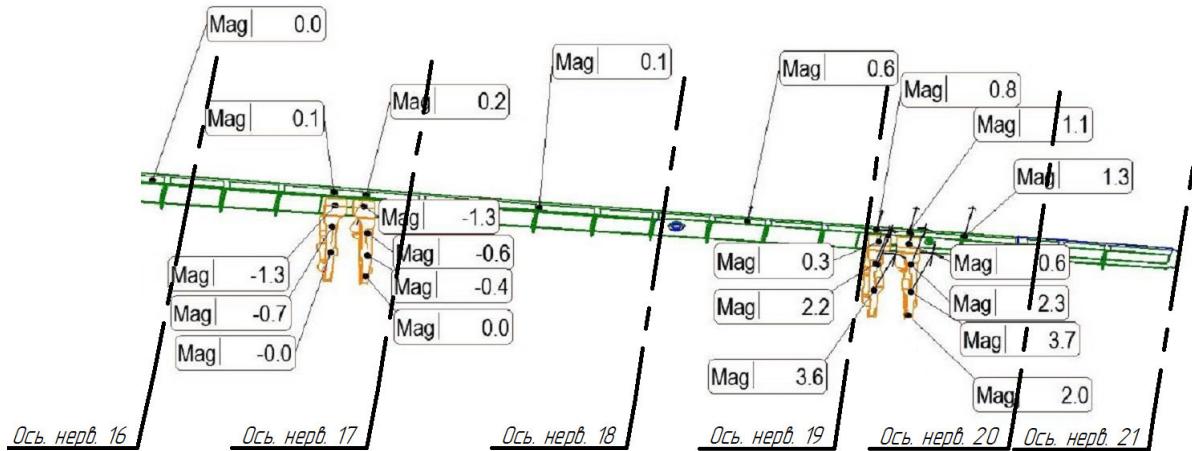


Рис. 2. Результаты измерений концевой части переднего лонжерона при сборке кессона ОЧК

На изображении видно, что максимальные отклонения размеров составляют 3,7 мм и располагаются они на узле навески рельса предкрылков (нервюра 19).

При анализе технологического процесса сборки были выявлены основные причины появления закрутки:

- концевая часть лонжерона обладает малой жёсткостью;
- фиксация концевой части лонжерона в стапеле является недостаточной;
- детали после изготовления оказываются вне допуска вследствие наличия больших остаточных напряжений, возникающих в ходе производства.

Достижение точности геометрических размеров изготовления деталей обеспечивает покрытие всего диапазона возможных отклонений при изготовлении деталей (0...0,3 мм) и их последующей установки в сборочном приспособлении ($\pm 0,2$ мм). Так как изготовление деталей и их установка в сборочном приспособлении выполняются в соответствии с допусками, для уменьшения закрутки предлагается усиление жёсткости концевой части лонжерона при установке и фиксации в стапеле. Для этого предлагается в конструкции стапеля использовать дополнительную опору с базовым отверстием (БО) и выполнить БО в стенке лонжерона в районе нервюры 20 (см. рис. 3).

БО должно отвечать следующим требованиям [5]:

- положение оси отверстия должно быть выполнено с высокой степенью точности $\pm 0,15$ мм;
- обеспечение доступности на стапеле сборки ОЧК для установки опоры под БО;
- стенка лонжерона должна быть усиlena в районе БО.

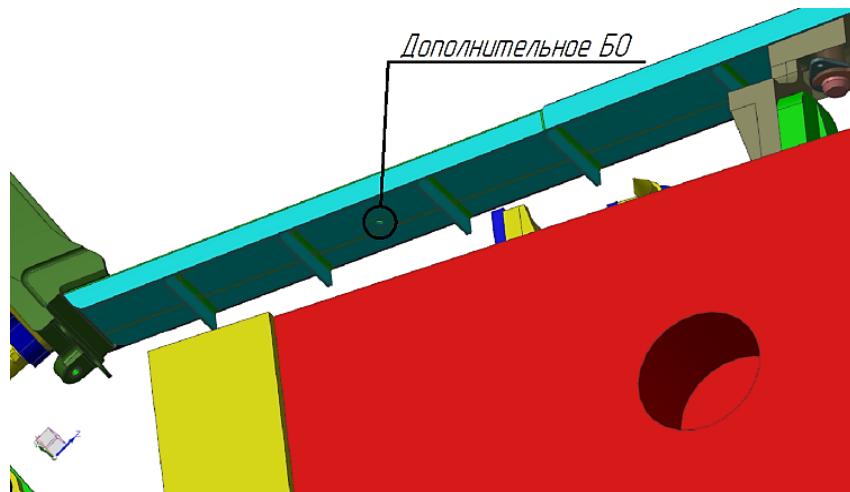


Рис. 3. Расположение дополнительного БО

Кроме того, необходимо ввести компенсацию между стенкой переднего лонжерона и ребром нервюры 21 в месте их крепления (обеспечить зазор и ввести прокладку по фактическому зазору).

В процессе сборки кессона передний лонжерон устанавливается в стапель, затем устанавливается дополнительная опора. После установки опоры необходимо с помощью фиксатора притянуть передний лонжерон к опоре, тем самым более жёстко зафиксировав его в стапеле (см. рис. 4). Затем осуществляется фиксация лонжерона по другим опорным точкам.

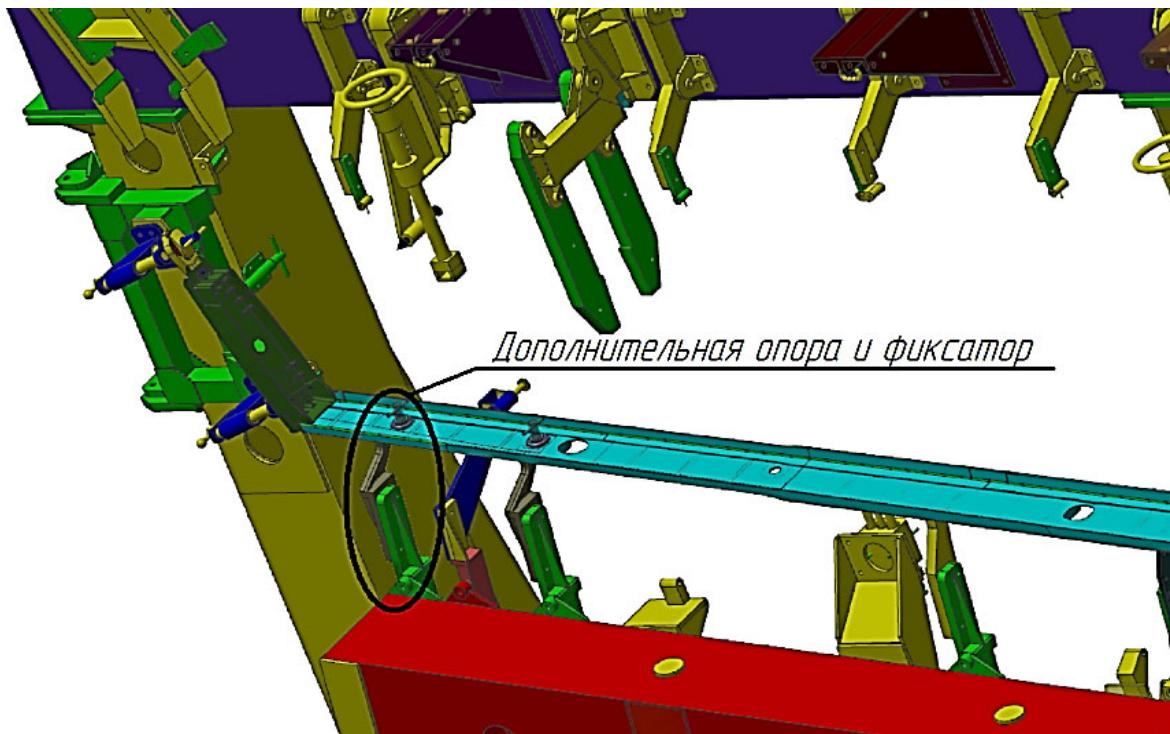


Рис. 4. Расположение дополнительной опоры и фиксатора под БО

Использование дополнительного БО в концевой части стенки лонжерона и применение в конструкции стапеля дополнительной опоры с БО, а также компенсации между нервюрой 21 и стенкой лонжерона в этой зоне позволяют значительно уменьшить закрутку концевой части переднего лонжерона, что увеличит точность сборки кессона ОЧК SSJ-100 и обеспечит вписываемость предкрылка в теоретический контур крыла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусева, Р. И. Проектирование и монтаж сборочных приспособлений: учеб. пособие / Р. И. Гусева, С. Б. Марьин. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – 99 с.
2. Гусева, Р. И. Особенности сборки контейнера тормозного парашюта самолёта / Р. И. Гусева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1 (33). – С. 4-11.
3. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов: учебник для вузов / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, П. А. Бордаков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
4. Гусева, Р. И. Организация работ по установке элементов крепления систем и оборудования на внестапельной сборке фюзеляжа / Р. И. Гусева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 4-11.
5. Гусева, Р. И. К вопросу расчёта точности сборки узлов и агрегатов планера самолёта / Р. И. Гусева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1 (5). – С. 16-22.

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

Феоктистов С. И., Андрианов И. К., Лин Х.
S. I. Feoktistov, I. K. Andrianov, H. Lin

АППРОКСИМАЦИЯ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА В ОБЛАСТИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ С НЕЛИНЕЙНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

APPROXIMATION OF THE METAL DEFORMATION DIAGRAM IN THE FIELD OF ELASTIC-PLASTIC DEFORMATIONS WITH NONLINEAR HARDENING

Феоктистов Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: serg_feo@mail.ru.

Sergey I. Feoktistov – Doctor of Engineering, Professor, Aircraft Building Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: serg_feo@mail.ru.

Андрianов Иван Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Ivan K. Andrianov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Aircraft Building Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Лин Хтет – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Lin Htet – Graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013.

Аннотация. В исследовании рассмотрены методы аппроксимации диаграмм деформирования линейно-степенными функциями. В области упрочнения физическую нелинейность предложено учитывать степенной зависимостью интенсивности напряжений от интенсивности деформаций с учётом предела текучести, предела прочности материала, а также свойств диаграммы деформирования. Деформированное состояние материала описывается через логарифмические деформации, обладающие свойством аддитивности. Проведена оценка погрешности для различных подходов к аппроксимации диаграммы деформирования. Согласно сравнительно-сопоставительному анализу вариантов аппроксимации наиболее оптимальным при решении упругопластических задач методом переменных параметров упругости является метод аппроксимации диаграммы деформирования линейно-степенной функцией по двум точкам со сдвигом степенной функции, который позволяет с высокой точностью описать область перехода из упругого в пластическое состояние.

Summary. The study considers methods of approximating strain diagrams by linear-step functions. In the field of hardening, physical nonlinearity is suggested to be taken into account by a power dependence of stress intensity on strain intensity, taking into account yield strength, material strength, and properties of the strain diagram. The deformed state of the material is described by means of logarithmic deformations, which have the additivity property. The error for different approaches to the approximation of the deformation diagram has been evaluated. According to a comparative analysis of approximation options, the method of approximating the deformation diagram by a linear power function with two points and a shift of the power function, which allows us to describe the elastic-plastic state transition region with high accuracy in solving elastic-plastic problems using alternating elasticity parameters, is the most optimal approach.

Ключевые слова: линейно-степенная аппроксимация, диаграмма деформирования, интенсивность напряжений, упругопластическое деформирование.

Key words: linear-power approximation, deformation diagram, stress intensity, elastic-plastic deformation.

УДК 593.3

Научное исследование выполнено при финансовой поддержке «Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации» в рамках стипендии по проекту СП-2200.2022.5 «Разработка моделей и алгоритмов расчёта пластического формообразования заготовок штамповочного производства».

Для получения численно-аналитических решений, определяющих напряжённо-деформированное состояние при упругопластическом деформировании методом переменных параметров упругости, необходимо иметь аналитическое выражение диаграммы деформирования с учётом сжимаемости материала:

$$\sigma_i = \sigma_i(e_i),$$

где σ_i – интенсивность напряжений; e_i – интенсивность логарифмических деформаций.

Диаграмму деформирования материала обычно получают на основании проведённых испытаний на разрыв при одноосном растяжении. Так как при решении упругопластических задач аналитическое выражение диаграммы деформирования получают аппроксимируя полученную экспериментальную диаграмму, то желательно иметь метод аппроксимации, который позволяет наилучшим образом описать диаграмму деформирования как в упругой области, так и в области пластичности.

Анализ существующих методов аппроксимации диаграмм деформирования, предлагаемых Н. Н. Малининым [1], М. И. Лысовым [2] и другими исследователями [3], показал, что обычно эта кривая аппроксимируется либо степенной зависимостью $\sigma_i = Ae_i^n$, либо линейно-степенной:

$$\sigma_i = \begin{cases} 3Ge_i & \text{при } e_i \leq e_{iT} \\ Ae_i^n & \text{при } e_i > e_{iT} \end{cases}$$

где G – модуль упругости второго рода; e_{iT} – значение интенсивности логарифмических деформаций, соответствующее точке перехода линейной зависимости в степенную (предел текучести); A и n – параметры степенной функции.

Параметры A и n обычно выражаются через основные механические характеристики материала или определяются по экспериментальной диаграмме деформирования, полученной при испытании образцов на разрыв.

Рассмотрим определение параметров аппроксимации через основные механические характеристики материала. Например, эти параметры можно выбрать из условия прохождения степенной функции $\sigma_i = Ae_i^n$ через точку, соответствующую условному пределу текучести ($e_{i0,2}$, $\sigma_{i0,2} = \sigma_{s0,2}$), и точку, соответствующую началу шейкообразования (временному сопротивлению деформирования) ($e_{i\text{ш}}$, $\sigma_{i\text{ш}} = \sigma_{\text{ш}}$) (см. рис. 1).

Подставив координаты этих точек в выражение степенной аппроксимирующей зависимости, получим систему двух уравнений с двумя неизвестными n и A :

$$\begin{aligned} Ae_{i0,2}^n &= \sigma_{s0,2} \\ Ae_{i\text{ш}}^n &= \sigma_{\text{ш}} \end{aligned} \quad (1)$$

Решение системы (1) даёт возможность определить n и A :

$$\begin{aligned} n &= \frac{\ln(\sigma_{\text{ш}}/\sigma_{s0,2})}{\ln(e_{i\text{ш}}/e_{i0,2})} \\ A &= \sigma_{s0,2}/e_{i0,2}^n \end{aligned} \quad \left. \right\}$$

где $\sigma_{SB} = \sigma_B \cdot \exp[e_{ш} - 3k_\mu \sigma_B \cdot \exp(e_{ш})]$ – истинное временное сопротивление деформированию; $\sigma_{S0,2} = \sigma_{0,2} \cdot \exp[e_{0,2} - 3k_\mu \sigma_{0,2} \cdot \exp(e_{0,2})]$ – истинное напряжение, соответствующее условному пределу текучести; $e_{ш}$ – продольная логарифмическая деформация, соответствующая временному сопротивлению деформированию или началу образования шейки; $e_{0,2} = \sigma_{0,2}/E + 0,002$ – деформация, соответствующая условному пределу текучести; $k_\mu = (1 - 2\mu)/3E$ – коэффициент, учитывающий сжимаемость материала; $e_{iш} = (e_{ш} - k_\mu \sigma_{SB})$ – интенсивность деформаций, соответствующая началу образования шейки; $e_{i0,2} = (e_{0,2} - k_\mu \sigma_{S0,2})$ – интенсивность деформаций, соответствующая условному пределу текучести [4].

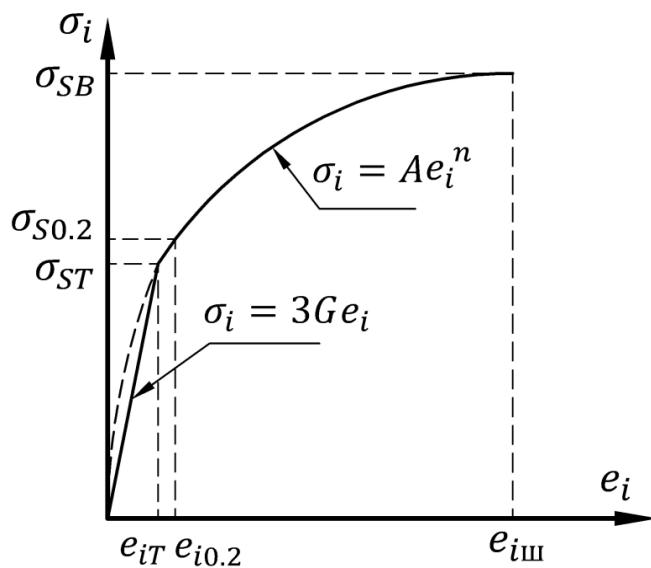


Рис. 1. Схема аппроксимации диаграммы деформирования по двум точкам

Значение интенсивности деформаций, соответствующее точке перехода линейной зависимости в степенную, определяется выражением

$$e_{iT} = (A/3G)^{1/(1-n)}.$$

На рис. 2 и 3 показаны аппроксимация диаграммы деформирования алюминиевого сплава АМг2-М линейно-степенной функцией по двум точкам и погрешность, получаемая в случае такой аппроксимации. Действительная диаграмма деформирования получена на основании диаграммы одноосного растяжения, взятой из справочника «Авиационные материалы» [5].

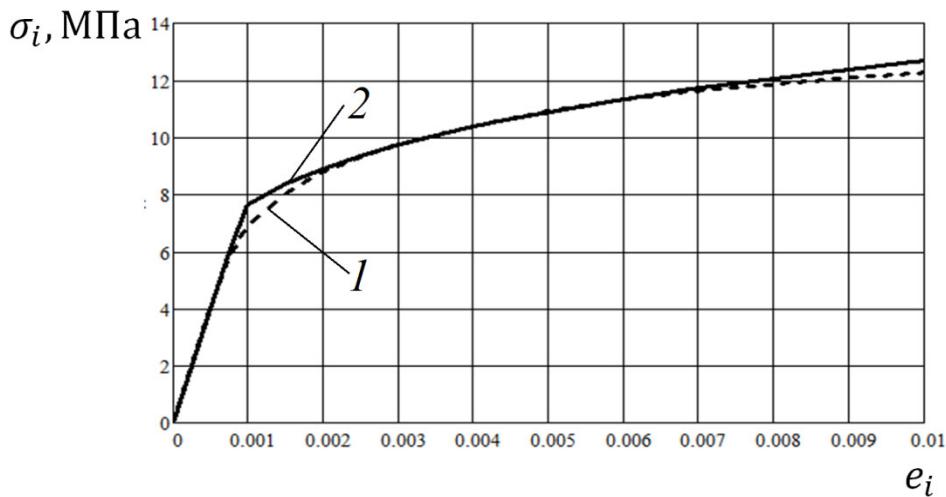
Как видно на рис. 3, погрешность аппроксимации резко увеличивается в точке перехода линейной функции в степенную и достигает 11 %. При решении упругопластических задач, когда рассматриваются одновременно области упругих и пластических деформаций, очень важно точно определить момент перехода материала из упругого в пластическое состояние. Для того чтобы уменьшить погрешность аппроксимации в точке перехода линейной функции в степенную, необходимо сгладить этот переход.

Иногда для того, чтобы сгладить переход от упругого деформирования к пластическому, возможно применение линейно-степенной аппроксимации в виде

$$\sigma_i = \begin{cases} 3Ge_i & \text{при } e_i \leq e_{iT} \\ A(e_i - e_{0i})^n & \text{при } e_i > e_{iT} \end{cases} \quad (2)$$

где e_{0i} – величина смещения степенной функции по оси деформаций.

Схема такой аппроксимации при условии прохождения степенной функции через две характерные точки диаграммы деформирования представлена на рис. 4.



1 – действительная диаграмма деформирования; 2 – аппроксимирующая кривая

Рис. 2. Аппроксимация диаграммы деформирования АМг2-М линейно-степенной функцией по двум точкам

В этом случае систему уравнений (1) необходимо дополнить ещё двумя уравнениями, позволяющими определить e_{0i} и e_{it} и записать в виде

$$\begin{aligned} A(e_{i0,2} - e_{0i})^n &= \sigma_{s0,2} \\ A(e_{i\text{ш}} - e_{0i})^n &= \sigma_{s\text{в}} \\ A(e_{it} - e_{0i})^n &= 3Ge_{it} \\ nAe_{i\text{ш}}^{n-1} &= 3G \end{aligned} \quad (3)$$

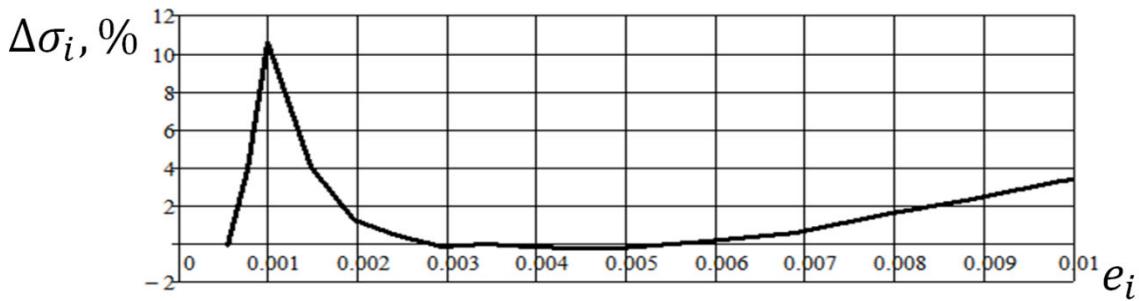


Рис. 3. Погрешность аппроксимации диаграммы деформирования АМг2-М линейно-степенной функцией по двум точкам

В данной системе:

- *первое уравнение* – условие прохождения диаграммы деформирования через точку, соответствующую условному пределу текучести ($e_{i0,2}$, $\sigma_{i0,2} = \sigma_{s0,2}$);
- *второе уравнение* – условие прохождения диаграммы деформирования через точку, соответствующую началу шейкообразования (временному сопротивлению деформированию) ($e_{i\text{ш}}$, $\sigma_{i\text{ш}} = \sigma_{s\text{в}}$);
- *третье уравнение* – условие, определяющее точку e_{it} перехода линейной зависимости в степенную;
- *четвёртое уравнение* – условие равенства первой производной степенной функции в точке (e_{it} , $\sigma_{it} = \sigma_{s\text{т}}$) и коэффициента наклона прямой, соответствующей упругому деформированию.

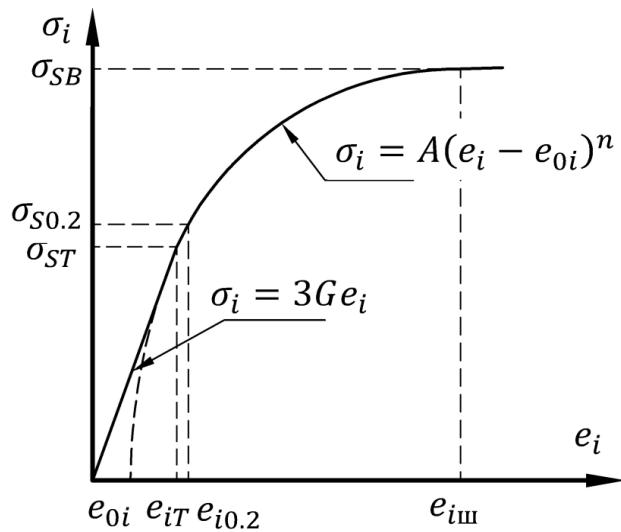


Рис. 4. Схема аппроксимации диаграммы деформирования по двум точкам со сдвигом степенной функции

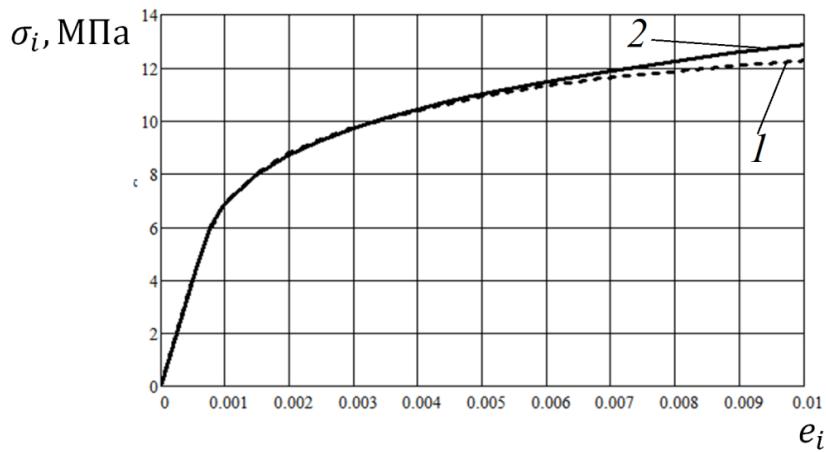
Для решения системы уравнений (3) её приводят к рекуррентному виду и решают методом последовательных приближений:

$$\left. \begin{aligned} n^{(k)} &= \frac{\ln(\sigma_{SB}/\sigma_{S0.2})}{\ln((e_{iш} - e_{0i}^{(k-1)})/(e_{i0.2} - e_{0i}^{(k-1)}))} \\ A^{(k)} &= \frac{\sigma_{S0.2}}{(e_{i0.2} - e_{0i}^{(k-1)})^{n^{(k)}}} \\ e_{iT}^{(k)} &= e_{0i}^{(k-1)} + (n^{(k)} A^{(k)}/3G)^{1/(1-n^{(k)})} \\ e_{0i}^{(k)} &= e_{iT}^{(k)}(1 - n^{(k)}) \end{aligned} \right\}.$$

На первом этапе вычислений принимается начальное приближение $-e_{0i}^{(0)} = 0$. Вычисления повторяются до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность вычислений величины смещения степенной функции в процентах:

$$\Delta e_{0i} \% = |(e_{0i}^{(k)} - e_{0i}^{(k-1)})/e_{0i}^{(k)}| 100\%.$$

На рис. 5 и 6 показаны аппроксимация диаграммы деформирования алюминиевого сплава АМг2-М линейно-степенной функцией по двум точкам со сдвигом степенной функции и погрешность, получаемая в случае такой аппроксимации.



1 – действительная диаграмма деформирования; 2 – аппроксимирующая кривая

Рис. 5. Аппроксимация диаграммы деформирования АМг2-М линейно-степенной функцией по двум точкам со сдвигом степенной функции

Анализ полученных графиков показывает, что аппроксимирующая кривая в этом случае значительно точнее описывает действительную диаграмму деформирования и погрешность аппроксимации в области перехода из упругого в пластическое состояние не превышает 1 %.

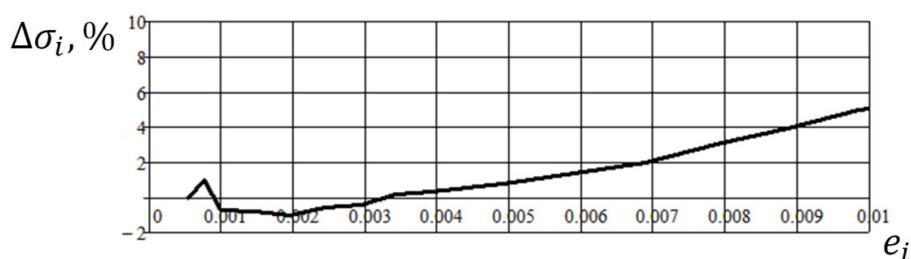


Рис. 6. Погрешность аппроксимации диаграммы деформирования АМг2-М линейно-степенной функцией по двум точкам со сдвигом степенной функции

Таким образом, можно сделать вывод, что при решении упругопластических задач методом переменных параметров упругости желательно аппроксимировать диаграмму деформирования линейно-степенной функцией по двум точкам со сдвигом степенной функции, которая описывается выражением (2) и позволяет с высокой точностью описать область перехода из упругого в пластическое состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 399 с.
2. Лысов, М. И. Теория и расчёт процессов изготовления деталей методами гибки / М. И. Лысов. – М.: Машиностроение, 1966. – 236 с.
3. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справ. / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
4. Феоктистов, С. И. Построение диаграммы деформирования третьего рода с учётом сжимаемости материала и её свойство / С. И. Феоктистов, И. К. Андрианов, Лин Хтет // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы Междунар. науч.-практ. конф., 07-11 февраля 2022 г., Комсомольск-на-Амуре. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 528-531.
5. Кишкина, С. И. Авиационные материалы. В 9 т. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Ч. 1. Деформируемые алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия: справочник для инженерно-технических и научных работников / С. И. Кишкина, И. Н. Фридляндер; под общ. ред. Р. Е. Шалина. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ), 1982. – 626 с.



Бабич М. В., Добрынин Н. В., Змеу К. В.
M. V. Babich, N. V. Dobrynin, K. V. Zmeu

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ

TRAJECTORY OPTIMIZATION OF A SPRAY TOOL IN ROBOTIC SURFACE PROCESSING OF A COMPLEX SHAPE

Бабич Михаил Викторович – аспирант Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); тел. +7(914)731-78-24. E-mail: babich_mv@dvgfu.ru.

Mikhail V. Babich – Graduate Student, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. +7(914)731-78-24. E-mail: babich_mv@dvgfu.ru.

Добрынин Никита Викторович – аспирант Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток). E-mail: dobrynin_nv@dvgfu.ru.

Nikita V. Dobrynin – Graduate Student, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok). E-mail: dobrynin_nv@dvgfu.ru.

Змеу Константин Витальевич – кандидат технических наук, доцент, профессор Департамента компьютерно-интегрированных производственных систем Политехнического института Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); тел. +7(902)506-33-91. E-mail: zmeu.kv@dvgfu.ru.

Konstantin V. Zmeu – PhD in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Computer-Integrated Production Systems, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. +7(902)506-33-91. E-mail: zmeu.kv@dvgfu.ru.

Аннотация. Рассматривается задача построения оптимальной траектории рабочего органа манипуляционного робота в технологических процессах направленного распыления диспергированных материалов на сложнопрофильные поверхности. Окраска является наиболее распространённым примером таких технологий. Критерием качества рассматривается равномерность толщины покрытия. Большое число переменных и ограничений при необходимой точности расчётов требует значительных вычислительных мощностей. В работе рассматривается подход, позволяющий уменьшить количество переменных. Делается расчёт для одного прохода по поверхности объекта сложного профиля, который позволяет сформулировать задачу оптимизации. Затем предлагается использовать метод квадратичного программирования для поиска оптимальных скоростей рабочего органа.

Summary. The problem of constructing the optimal trajectory of a manipulation robot in technological processes of directed spraying of dispersed materials onto complex-profile surfaces is considered. Painting is the most common example of such technologies. The uniformity of the coating thickness is considered as a quality criterion. A large number of variables and restrictions with the necessary accuracy of calculations requires significant computing power. The paper considers an approach that allows reducing the number of variables. A calculation is made for one pass along the surface of an object with a complex profile, which allows us to formulate an optimization problem. Then it is proposed to use the method of quadratic programming to find the optimal speeds of the working body.

Ключевые слова: нанесение покрытий, роботизированная окраска, задача оптимизации, квадратичное программирование, моделирование напыления.

Key words: coating, robotic painting, optimization problem, quadratic programming, spray simulation.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации [контракт №075-11-2021-054]

Введение. Нанесение покрытий и обработка поверхности различными инструментами, образующими факел направленно движущихся к поверхности несвязанных частиц, при наличии требований к форме и размерам пятна взаимодействия, энергии взаимодействия, толщинам, сплошности, плотности образующегося покрытия являются достаточно распространёнными технологическими процессами. Основным направлением автоматизации таких технологических процессов является применение манипуляционных роботов для реализации программного движения рабочего органа над поверхностью. Очевидным примером является роботизированная окраска. Далее в работе оперируем именно этим примером.

Роботизированная окраска в настоящее время активно развивается [15]. Оптимизация этого процесса, направленная на повышение качества покрытий и экономической эффективности, должна рассматриваться как доступный к практической реализации инструмент улучшения [16]. Распространённым критерием качества покрытия является равномерность и достижение заданного значения толщины, что при сложном профиле поверхности и наличии ограничений на форму и распределение материала в объёме факела, ограничений на параметры движения по траектории манипулирующего робота является нетривиальной задачей [12]. Могут также учитываться ограничения на свойства поверхности и наносимого материала [4], уменьшение времени окраски [3], уменьшение затрачиваемых ресурсов [13].

Целью текущей работы является построение траектории инструмента с целью достижения определённой и равномерной толщины покрытия.

Для решения поставленной задачи существуют следующие методы:

- построение траектории движения с использованием свойств кривых Безье с постоянной скоростью инструмента, которая удовлетворяет заданным динамическим ограничениям и позволяет достичь равномерного покрытия [6; 8; 10; 19];
- построение траектории с помощью параллельных проходов [18] с некоторым поперечным интервалом с последующими оптимизациями построенных траекторий [9];
- исследование стереометрических фигур для быстрого построения оптимальной траектории [5];
- итерационное улучшение траектории инструмента для получения субоптимальных траекторий с минимальным разбросом толщины краски [1].

В текущей работе для достижения цели используется метод построения траектории параллельными проходами (секущими плоскостями) для окраски поверхности с фиксированным расстоянием от поверхности объекта до инструмента. При таком построении траектории возникает ряд проблем и задач в оптимизации поперечного интервала и профиля окраски инструмента [12; 17]: исследование оптимального продольного прохождения поверхности сложного профиля в виде внутреннего и внешнего угла при изменении расстояния от поверхности до инструмента [14] (рассматривается профиль поверхности, аналогичный текущей работе); изменение параметров траектории, таких как наклон к поверхности [20], скорость инструмента и др.

Для моделирования толщины напыления используются численные методы, основанные на существующих моделях напыления [2; 11] на поверхность сложного профиля [7]. Поверхность объекта представлена в виде модели в формате stl, состоящей из набора треугольников и нормалей к ним. Наиболее оптимальной и простой в вычислениях для текущей работы является модель, основанная на нормальном распределении для моделирования толщины краски на поверхности сложного профиля [4].

В текущей работе предлагается процесс построения оптимальной траектории инструмента с добавлением динамических ограничений на скорость и ускорение, что позволяет сократить количество вычислений за счёт выбора одного продольного сечения для построения уравнений в задаче оптимизации.

Модель нанесения окраски распылением. Для построения траектории инструмента и корректного расчёта толщины напыления необходима подходящая модель окраски распылением.

Модель распыления должна позволять рассчитать толщину напыления на поверхности сложного профиля при воздействии за время t , распылитель в модели находится в некоторой точке траектории инструмента $a(t)$, которая отвечает за положение и ориентацию инструмента, а скорость напыления в точке на поверхности $(x, y, h(x, y))$ будет соответствовать некоторой явной функции $f(a(t), x, y, h(x, y))$ (см. рис. 1).

В работе используется модель с бесконечным радиусом воздействия на поверхность. Значение функции для модели с бесконечным радиусом воздействия стремится к нулю, когда расстояние между распылителем и целевой точкой на поверхности объекта стремится к бесконечности. Модели с бесконечным радиусом воздействия просто интегрировать в алгоритмы моделирования, и они являются наиболее подходящими для задач оптимизации.

Используемая модель является модифицированной моделью, которую разработали Arıkan и Balkan [4] для поверхности сложного профиля (см. рис. 2):

$$q_s = q(x_Q, y_Q) \left(\frac{h}{h_s} \right)^2 |n_e \cdot n_s|,$$

где $q(x_Q, y_Q)$ – скорость напыления в плоскости точки Q ; h – линейное расстояние от E до проекции Q на n_e ; h_s – линейное расстояние от E до проекции S на n_e .

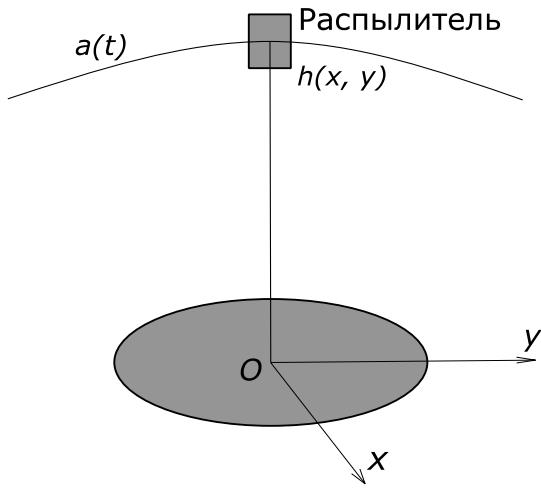


Рис. 1. Модель распыления на поверхность

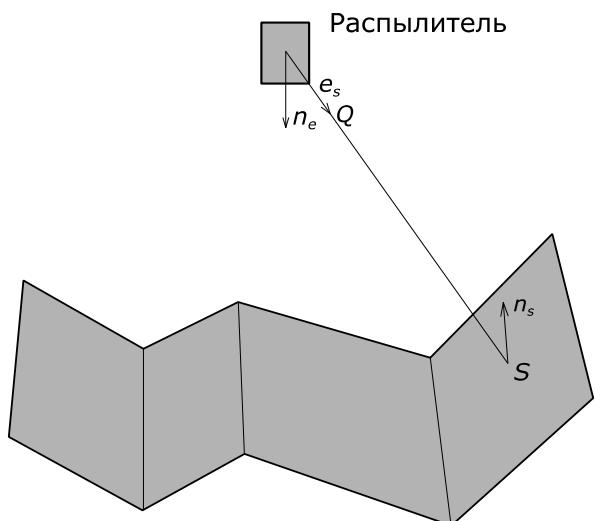


Рис. 2. Модель, разработанная Arıkan и Balkan, для поверхности со сложным профилем

Поверхность сложного профиля рассматривается в формате STL модели, которая состоит из набора треугольников с соответствующей нормалью к ним.

Принцип формирования однородного покрытия как сумма распределений с перекрытием. Окрасочный инструмент проходит параллельными проходами поверхность сложного профиля с некоторым поперечным интервалом w , радиус окраски инструмента в плоскости модели $r = 3\sigma$, где σ – среднеквадратичное отклонение в нормальном распределении (см. рис. 3).

Тогда для выбранного продольного сечения толщина окрасочного слоя в каждом поперечном сечении будет равна сумме окраски от всех продольных проходов инструмента (см. рис. 4).

С учётом свойства нормального распределения периодичность толщины покрытия для однородной поверхности должна проявляться в пределах радиуса окраски в плоскости модели ($r = 3\sigma$). Краевые эффекты в данной работе не учитываются.

При моделировании на плоскости параллельных проходов расчётная толщина покрытия зависит от ширины между параллельными проходами. В результате моделирования для плоскости

представлено отклонение значения в поперечном сечении относительно среднего значения (см. рис. 5). В работе принято $w = 2.0\sigma$.

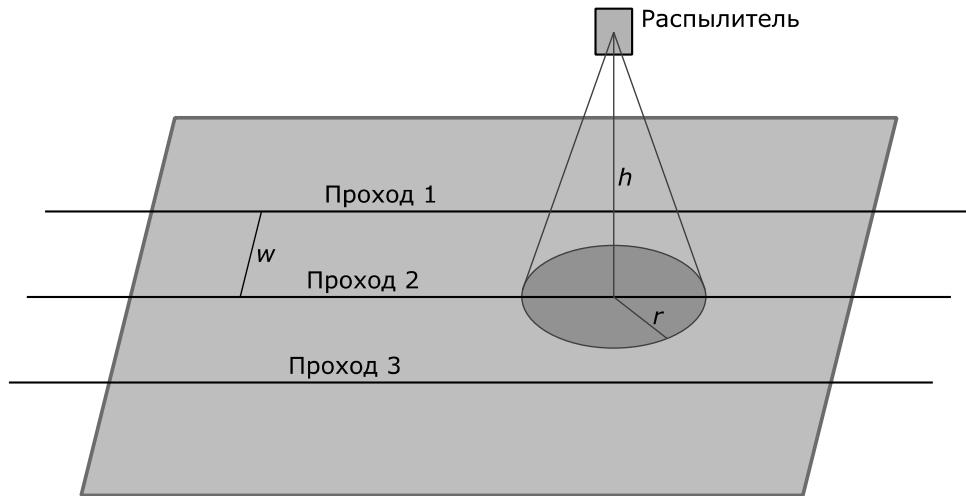


Рис. 3. Схема окраски параллельными проходами

Описание методики оптимизации. Для достижения равномерной толщины покрытия необходимо обеспечить однородную толщину покрытия в каждом продольном и поперечном сечении.

Для достижения равномерного покрытия в каждом поперечном сечении для поверхности сложного профиля в продольном сечении достаточно выбрать оптимальный поперечный интервал при параллельных проходах инструмента. Соответственно, для достижения общей однородной толщины покрытия на поверхности нужно достичь однородной толщины в каждом продольном сечении. При численном моделировании это условие выражается следующим образом:

$$|q_s - q_0| \leq q_0 \varepsilon, \quad (1)$$

где q_s – толщина напыления в точке S (см. рис. 2); q_0 – целевая толщина покрытия; ε – допустимое относительное отклонение от целевой толщины покрытия.

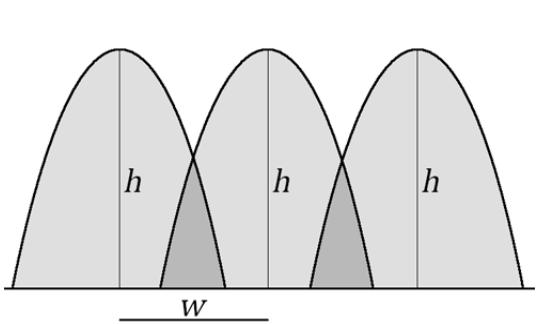


Рис. 4. Формирование толщины финального покрытия

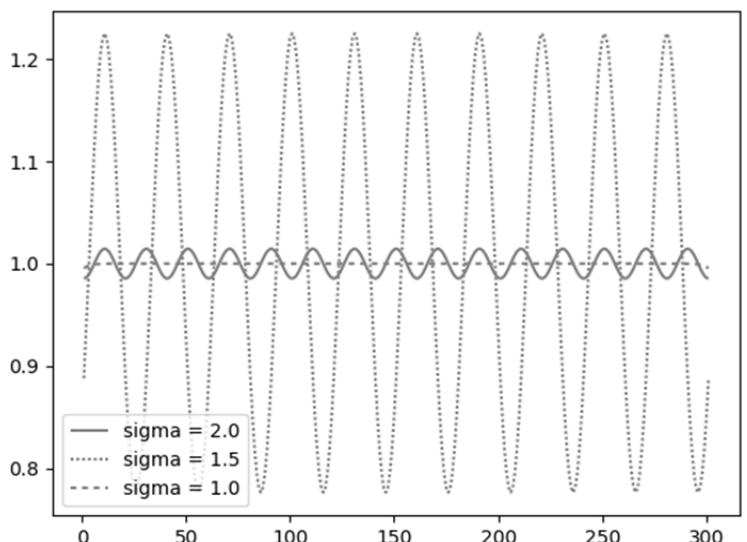


Рис. 5. Моделирование на плоскости

Если для поперечного сечения достаточно определить ширину поперечного интервала, то в продольном сечении необходимо изучить возможность оптимизации толщины напыления. Поскольку для каждого поперечного сечения толщина напыления является суммой распределений от напыления разных проходов инструмента, тогда для оценки качества финального покрытия может быть достаточно анализа одного среза в продольном сечении. Рассмотрим процесс на примере фигуры сложного профиля в виде внешнего угла.

Сделаем проход по фигуре с постоянной скоростью v с фиксированным от поверхности до инструмента расстоянием h . С учётом динамических ограничений по скорости и ускорению инструмента траектория инструмента будет отклоняться от нормали к поверхности в окрестности вершины угла.

Для получившейся траектории инструмента над поверхностью внешнего угла сделаем несколько продольных срезов толщины покрытия для анализа полученных результатов относительно возможности прогнозирования качества покрытия поверхности по этому проходу (см. рис. 6). Для продольных срезов толщина напыления нормируется максимальной толщиной в этом сечении.

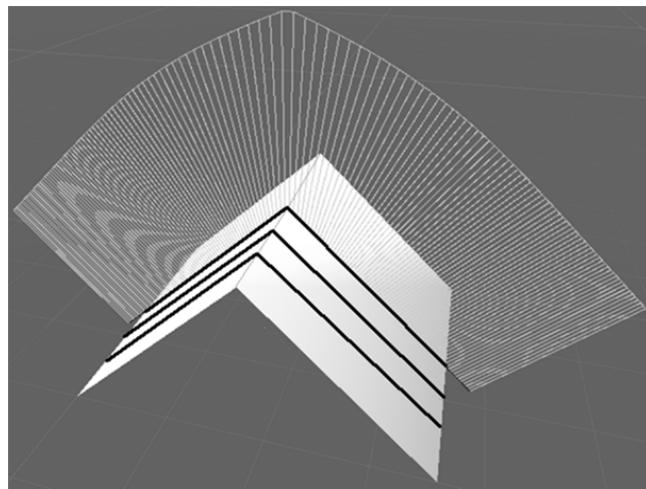


Рис. 6. Траектория прохода инструмента над поверхностью угла и схема продольных сечений для измерения толщины напыления

Характер изменения толщины напыления является подобным для разных продольных смещений для одного прохода инструмента (см. рис. 7). Толщина напыления является минимальной для вершины внутреннего угла и из-за динамических ограничений при построении траектории накапливается в окрестности вершины угла.

Таким образом, для достижения равномерного покрытия всей поверхности нужно произвести равномерное напыление в продольном сечении поверхности при движении инструмента. В качестве параметра в данной оптимизации выступает скорость инструмента. Из формулы моделирования толщины напыления (1) следует, что скорость инструмента обратно пропорциональна времени окраски i , и, соответственно, объёму распылённой краски:

$$q'_i = q_i * \frac{v'_i}{v_i},$$

где q'_i – объём краски от i -й точки траектории; q_i – объём материала, распыленного в i -й точке траектории инструмента; v'_i – искомая скорость; v_i – средняя скорость движения инструмента на i -м участке траектории.

Условие равномерности покрытия, следующее из (1), выражено в уравнениях для объёма краски в некоторой точке на поверхности объекта сложного профиля:

$$\min \left(\sum_i q_i w_i - q_0 \right)^2, \quad (2)$$

$$w_i = \frac{v_i}{v'_i},$$

где w_i – искомый коэффициент в задаче оптимизации, означающий отношение i скорости изначально построенной траектории к i скорости искомой (оптимизированной) траектории.

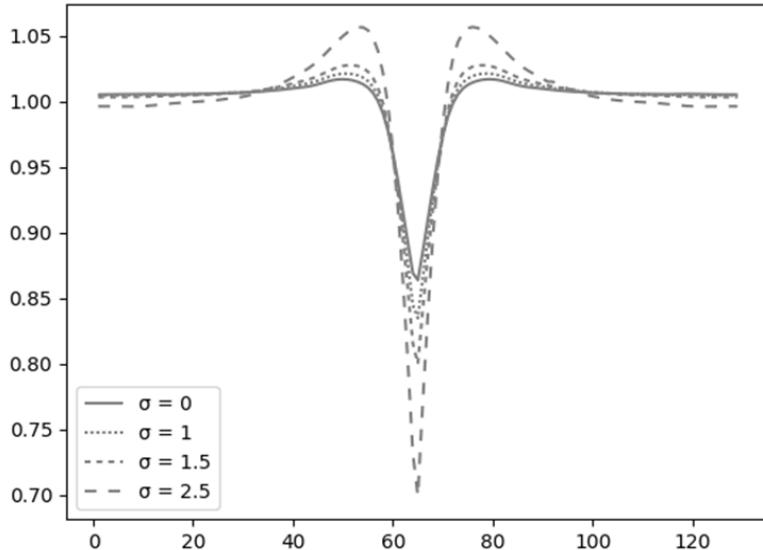


Рис. 7. Нормированная толщина напыления в продольных сечениях со смещением в σ относительно траектории инструмента

В условиях динамических ограничений текущей задачи оптимизации требование по скорости ($v'_i \leq v_{\max}$) выражается следующим образом:

$$-w_i \leq -\frac{v_i}{v_{\max}}, \quad (3)$$

где v_{\max} – максимально допустимая скорость движения инструмента.

Также необходимо выразить условие ограничения инструмента по возможному максимальному ускорению. Для поиска решения предлагается свести задачу оптимизации к задаче квадратичного программирования, а требование к ускорению выразить в виде линейной зависимости, которую предлагается дополнить пересчитываемым итерационно весовым коэффициентом. Траектория инструмента состоит из позиций, в каждой из которых известна её скорость и время. Ускорение инструмента пропорционально изменению скоростей в двух последовательных точках траектории, тогда пересчитываемую итерационно величину ограничения ускорения λ можно выразить так:

$$|v_i - v_{i+1}| \leq \lambda_i. \quad (4)$$

Задача квадратичного программирования формулируется как для искомых величин w :

$$\begin{cases} \min\left(\frac{1}{2}w^T P w + q^T w\right), \\ Gw \leq h \\ Aw = b \end{cases},$$

где неравенство $Gw \leq h$ формулируется как объединение (3) и (4).

Условие $Aw = b$ вырожденное. Условие минимизации выражается через преобразование метода наименьших квадратов к задаче квадратичного программирования:

$$\begin{cases} P = R^T W R \\ q = -R^T W s \end{cases}$$

где матрица R является формулой (2), W – диагональная единичная матрица.

Если ускорение для некоторого участка траектории превышает максимальное ускорение, то итерация повторяется и пересчитывается для каждого такого участка траектории. Новая величина λ_i вычисляется по формуле

$$\lambda_i = \left(\frac{w_i}{v_i} - \frac{w_{i+1}}{v_{i+1}} \right) * \frac{a_{\max}}{a_i},$$

где w_i, w_{i+1} – найденные неизвестные на предыдущей итерации; v_i, v_{i+1} – скорости изначально построенной траектории инструмента; a_{\max} – максимально допустимое ускорение; a_i – соответствующее ускорение на участке траектории после итерации.

Вычислительный эксперимент. Для подтверждения работоспособности метода для разных фигур сложного профиля проведены численные эксперименты в соответствии с моделью распыления (1). Фигуры сложного профиля с заданными параметрами сгенерированы автоматическим скриптом. Система для моделирования и расчётов траектории инструмента реализована в среде Unity с трёхмерной визуализацией фигур и траектории инструмента.

При применении оптимизации к внутреннему углу улучшилось качество покрытия в окрестности излома поверхности (см. рис. 8).

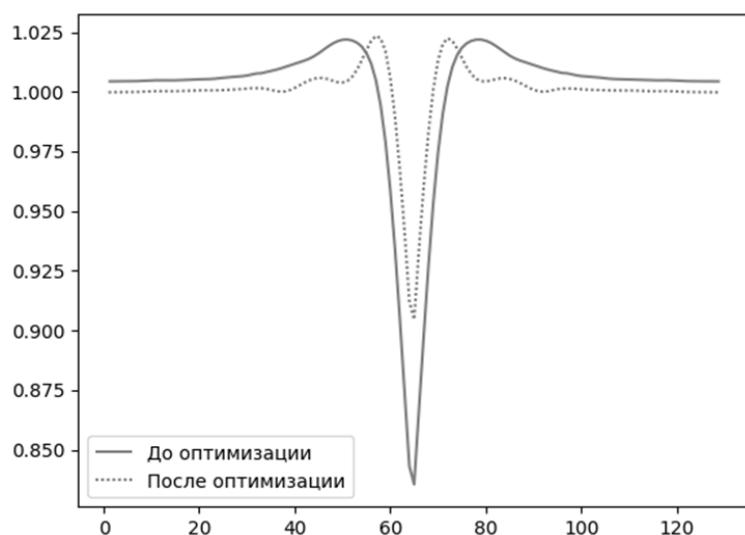


Рис. 8. Улучшение качества покрытия после оптимизации

Целевая толщина напыления на поверхность $h = 16.7 \text{ мкм} = 1.67 * 10^{-5} \text{ м}$.

Базовая скорость пятна окраски инструмента по поверхности объекта, при которой на плоскости с заданной скоростью получается целевая толщина напыления h , $v = 0.4547 \text{ м/с}$.

Максимальная скорость $v_{\max} = 2 \text{ м/с}$.

Максимальное ускорение $a_{\max} = 3 \text{ м/с}^2$.

Ширина между параллельными проходами 0.015 м .

Расстояние инструмента от поверхности объекта $h = 0.2 \text{ м}$.

Радиус окраски в плоскости модели $r = 0.03 \text{ м}$.

$$1\sigma = \frac{r}{3} = 0.01 \text{ м}.$$

Численное моделирование проводилось на фигурах сложного профиля с типовыми паттернами, такими как внешний и внутренний углы, волнообразная фигура, зигзаг, выпуклая и вогнутая фигуры (см. рис. 9), с указанными параметрами (см. табл. 1).

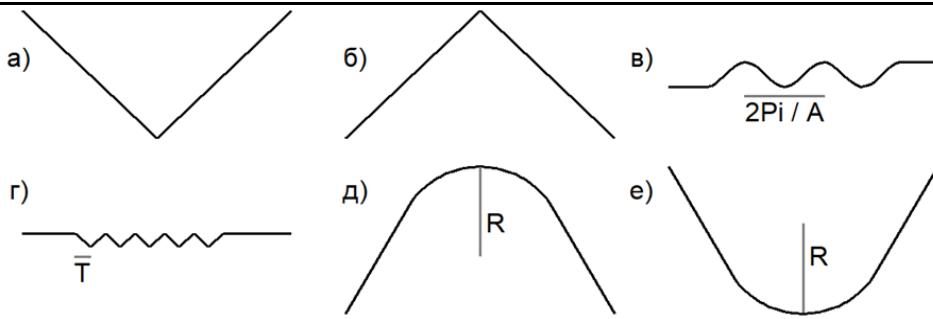


Рис. 9. Типовые фигуры для численного эксперимента различного профиля: а – внешний угол; б – внутренний угол; в – волна; г – зигзаг; д – выпуклая поверхность; е – вогнутая поверхность

Таблица 1

Результаты численных экспериментов

Фигура	Параметр фигуры	Без оптимизации со сглаживанием		С оптимизацией	
		Продольное сечение μ/σ , мкр	Поверхность μ/σ , мкр	Продольное сечение μ/σ , мкр	Поверхность μ/σ , мкр
Внешний угол	-	16.64 / 0.52	16.66 / 0.50	16.68 / 0.27	16.70 / 0.24
Внутренний угол	-	16.65 / 0.34	16.66 / 0.31	16.61 / 0.35	16.62 / 0.31
Волнистая фигура	1.0 σ	16.10 / 1.37	15.99 / 1.93	16.84 / 1.27	16.85 / 1.89
	2.0 σ	16.63 / 1.44	16.60 / 1.82	16.80 / 1.45	16.81 / 1.84
	3.0 σ	16.67 / 1.19	16.65 / 1.47	16.80 / 1.00	16.80 / 1.29
	4.0 σ	16.74 / 0.80	16.74 / 0.80	16.73 / 0.50	16.77 / 0.76
	5.0 σ	16.73 / 0.55	16.74 / 0.71	16.70 / 0.34	16.72 / 0.53
	6.0 σ	16.70 / 0.51	16.69 / 0.68	16.68 / 0.38	16.67 / 0.56
Зигзаг	0.5 σ	13.69 / 3.63	12.67 / 4.21	16.60 / 0.57	16.49 / 0.67
	1.0 σ	15.57 / 1.70	14.79 / 2.18	16.69 / 0.55	16.57 / 0.76
	1.5 σ	15.56 / 1.55	15.29 / 1.76	16.63 / 0.53	16.59 / 0.74
	2.0 σ	16.05 / 1.15	15.85 / 1.39	16.66 / 0.71	16.63 / 0.97
	2.5 σ	16.72 / 0.02	16.63 / 0.02	16.68 / 0.02	16.68 / 0.02
Вогнутая фигура	1.5 σ	16.91 / 0.87	17.26 / 1.25	16.74 / 0.57	16.89 / 0.83
	3.0 σ	16.76 / 0.33	16.84 / 0.43	16.71 / 0.26	16.77 / 0.37
	4.5 σ	16.74 / 0.18	16.77 / 0.24	16.70 / 0.13	16.72 / 0.21
	6.0 σ	16.72 / 0.05	16.73 / 0.08	16.68 / 0.05	16.68 / 0.08
	7.5 σ	16.72 / 0.04	16.72 / 0.06	16.68 / 0.04	16.69 / 0.07
Выпуклая фигура	1.5 σ	16.73 / 0.76	16.79 / 0.98	16.64 / 0.77	16.64 / 0.77
	3.0 σ	16.65 / 0.35	16.60 / 0.40	16.68 / 0.25	16.66 / 0.35
	4.5 σ	16.66 / 0.21	16.62 / 0.25	16.68 / 0.15	16.66 / 0.21
	6.0 σ	16.69 / 0.06	16.67 / 0.10	16.68 / 0.05	16.68 / 0.09
	7.5 σ	16.69 / 0.05	16.68 / 0.07	16.68 / 0.04	16.68 / 0.06

Примечание: μ – среднее значение толщины окрасочного слоя в микрометрах; σ – среднеквадратичное отклонение от требуемой толщины слоя в микрометрах.

Результаты моделирования с оптимизацией сравниваются со сглаженной траекторией без оптимизации, где пятно по поверхности объекта движется с заданной скоростью и инструмент также движется с заданным над поверхностью объекта расстоянием. При сглаживании не гарантируется удовлетворение динамических ограничений по скорости и ускорению в отличие от тра-

ектории, где скорости и ускорения на каждом участке добавлены в задачу оптимизации и строго соответствуют заданным ограничениям.

Таким образом, предложенный метод оптимизации позволяет для фигур сложного профиля достичь более равномерного покрытия, при этом соблюдаются динамические ограничения по скорости и ускорению и значительно сокращается количество вычислений по сравнению с методами для оптимизации траектории инструмента, которые используют всю поверхность для расчёта, формулируя задачи оптимизации только одного прохода инструмента.

Наиболее качественные результаты оптимизации получаются для фигур, когда искривление фигуры сложного профиля сопоставимо радиусу окраски инструмента в плоскости модели. Для сложных фигур с искривлением фигуры ниже радиуса окраски метод работает хуже, но позволяет получить в среднем более близкое к требуемой толщине покрытие.

Направлением дальнейшей работы является исследование сглаживания в окрестности излома фигуры сложного профиля с соблюдением расстояния от инструмента до поверхности объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Andulkar M., Chidderwar S. Incremental approach for trajectory generation of spray painting robot // Industrial Robot: An International Journal. 2015. (42). P. 228-241.
2. Andulkar M., Chidderwar S., Marathe A. Novel integrated offline trajectory generation approach for robot assisted spray painting operation // Journal of Manufacturing Systems. 2015. (37).
3. Antonio J. K. Optimal trajectory planning for spray coating 1994. P. 2570-2577 т. 3.
4. Arıkan M., Balkan T. Process modeling, simulation, and paint thickness measurement for robotic spray painting // Journal of Robotic Systems. 2000. (17). P. 479-494.
5. Bo Z. [et al.]. Fast and templatable path planning of spray painting robots for regular surfaces 2015. P. 5925-5930.
6. Chen H. [et al.]. Automated robot trajectory planning for spray painting of free-form surfaces in automotive manufacturing 2002. P. 450-455 т.1.
7. Chen W. [et al.]. Paint thickness simulation for robotic painting of curved surfaces based on Euler-Euler approach // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2019.
8. Chen W. [et al.]. Path planning scheme for spray painting robot with Bézier curves on complex curved surfaces 2017. P. 698-703.
9. Chen W. [et al.]. Trajectory Optimization of Electrostatic Spray Painting Robots on Curved Surface // Coatings. 2017. № 10 (7). P. 155.
10. Chen W. [et al.]. Trajectory Optimization of Spray Painting Robot for Complex Curved Surface Based on Exponential Mean Bézier Method // Mathematical Problems in Engineering. 2017. (2017). P. 1-10.
11. Chen Y. [et al.]. Paint thickness simulation for painting robot trajectory planning: A review // Industrial Robot: An International Journal. 2017. (44). P. 00-00.
12. Conner D. C. [et al.]. Paint deposition modeling for trajectory planning on automotive surfaces // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2005. № 4 (2). P. 381-392.
13. Fuhlbrigge T., Li X. Automated Industrial Robot Path Planning for Spray Painting Process: A Review 2008. P. 522-527.
14. Guan L., Chen L. Trajectory planning method based on transitional segment optimization of spray painting robot on complex-free surface // Industrial Robot: the international journal of robotics research and application. 2019. (46). P. 31-43.
15. Hertling P. [et al.]. Task curve planning for painting robots. I. Process modeling and calibration // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1996. № 2 (12). P. 324-330.
16. Omar M. [et al.]. Self-adjusting robotic painting system // Ind. Robot. 2006.
17. Park K., Jeon D. Optimization of Tool Path Pitch of Spray Painting Robots for Automotive Painting Quality // International Journal of Control, Automation and Systems. 2018. (16).
18. Suh S.-H., Woo I.-K., Noh S.-K. Automatic trajectory planning system (ATPS) for spray painting robots // Journal of Manufacturing Systems. 1991. № 5 (10). P. 396-406.
19. Tang Y., Chen W. Surface Modeling of Workpiece and Tool Trajectory Planning for Spray Painting Robot // PloS one. 2015. (10). P. e0127139.
20. Zeng Y. [et al.]. Tool Trajectory Optimization of Spray Painting Robot for ManyTimes Spray Painting // International Journal of Control and Automation. 2014. (7). P. 193-208.

Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю.
ОЦЕНКА УРОВНЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю.
I. V. Ignatenko, S. A. Vlasenko, E. Yu. Tryapkin

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

ASSESSMENT OF THE DIGITALIZATION LEVEL OF RAILWAY TRANSPORT ELECTRIC POWER INFRASTRUCTURE

Игнатенко Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: eao79@yandex.ru.

Ivan V. Ignatenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: eao79@yandex.ru.

Власенко Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: vsa_ens@mail.ru.

Sergey A. Vlasenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: vsa_ens@mail.ru.

Тряпкин Евгений Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: evgenmehanik@mail.ru.

Evgeny Yu. Tryapkin – Senior Lecturer, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: evgenmehanik@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрен переход на управление тяговой подстанцией железной дороги за счёт использования различных типов построения систем управления потоками информации, а также взаимодействия с другими объектами. Проведение анализа работы цифровых технологий обмена информацией на информационных моделях цифровых подстанций и ускорения внедрения в эксплуатацию является актуальной задачей для развития цифровой железной дороги в целом.

Summary. The article considers the transition of control of a railway traction substation through the use of various types of building information flow control systems, as well as interaction with other objects. Analyzing the work of digital technologies for information exchange on information models of digital substations and accelerating the introduction into operation is an urgent task for the development of the digital railway as a whole.

Ключевые слова: цифровизация, цифровые технологии, уровень цифровизации, цифровая тяговая подстанция, системы тягового электроснабжения, электроэнергетика.

Key words: digitalization, digital technologies, digitalization level, digital traction substation, traction power supply systems, electric power industry.

УДК 621.311

Трансформация железной дороги при переходе на управление с помощью современных информационных технологий [1] требует разработки ряда информационных моделей устройств, существующих только в определённых сегментах, например в системе тягового электроснабжения. Попытка внедрения технологии обмена информацией для реализации информационного обмена в электроэнергетической инфраструктуре при управлении режимами работы электрических сетей за счёт только технического перевооружения оборудования может быть недостаточной [2]. В тяговом электроснабжении очень важным фактором является взаимодействие между службами тяги, пути, сигнализации, управления движением. Качественная интеграция всех причастных

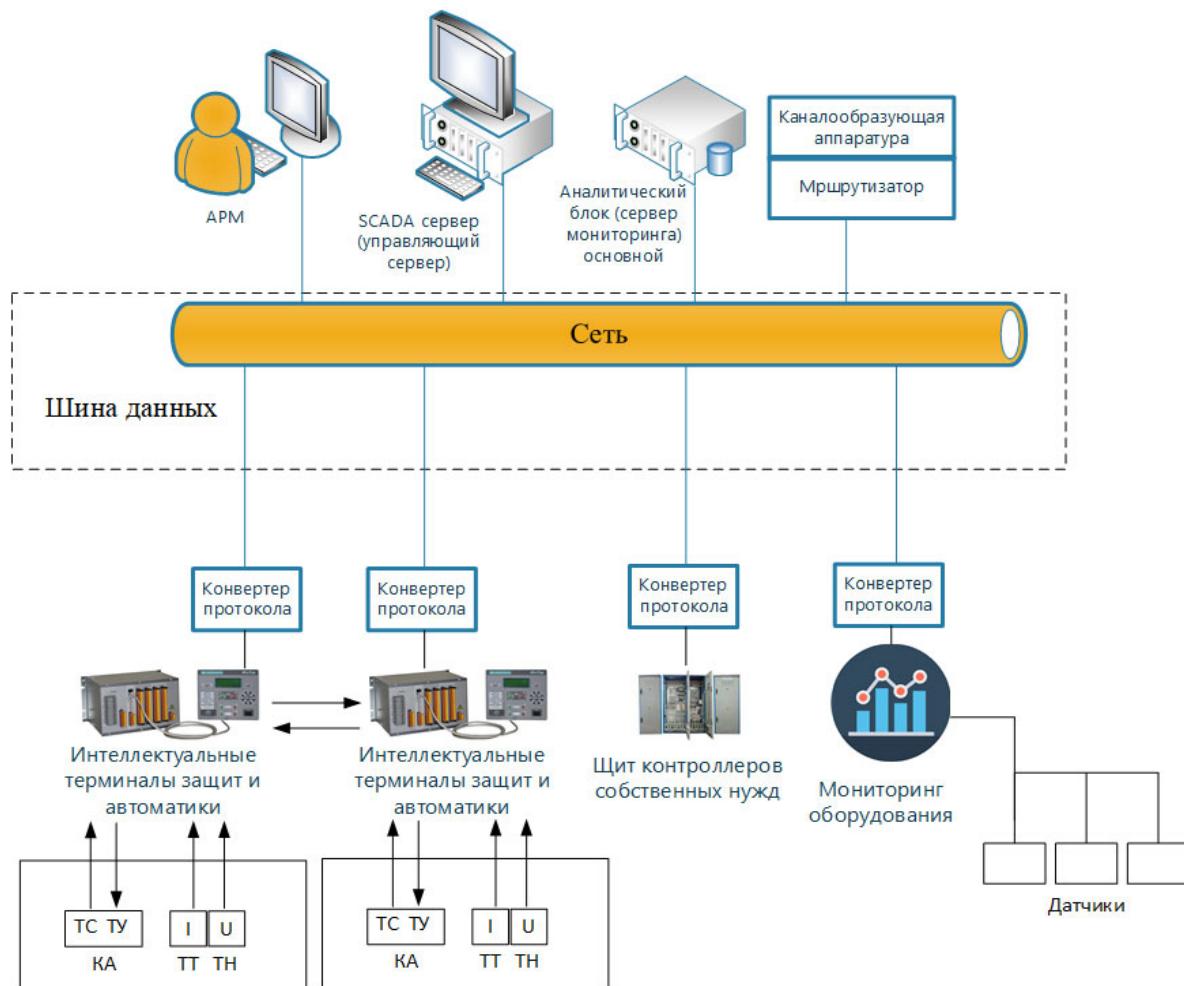
служб в единый информационный процесс мониторинга и управления повысит эффективность её применения [3]. Одним из первых элементов в системе тягового электроснабжения является тяговая подстанция. Сложность управления отдельными устройствами, а также обеспечение надёжности не позволяют допустить отклонений от требуемых технологических параметров [4]. Поэтому проведение анализа работы цифровых технологий обмена информацией на информационных моделях цифровых подстанций с оценкой экономического эффекта [5] и ускорения внедрения в эксплуатацию является актуальной задачей для развития цифровой железной дороги в целом [6].

Уровень цифровизации подстанции – совокупность принятого типа структурных и функциональных схем организации информационных потоков и объёма внедрения цифровых систем на подстанции, подлежащей обновлению, реконструкции, расширению или новому строительству [7].

Цифровая тяговая подстанция представляет собой сложный информационно-технический объект, реализацию которого целесообразно разделить на несколько этапов в зависимости от глубины цифровизации, применяемых технологий, состава информационных потоков и получаемых результатов. Можно выделить 4 типа цифровых подстанций, характеризующихся этапностью применения технических решений, основанных на принятых ранее уровнях цифровизации [8].

Нулевой тип характеризуется применением отдельных технологий цифровизации, внедрением интеллектуальных информационных модулей и устройств [9], организующих отдельные функции управления, мониторинга и др.

Структурная схема организации информационных потоков на цифровой тяговой подстанции нулевого типа представлена на рис. 1.



Первый тип характеризуется реализацией резервируемой шины подстанции. Данная шина объединяет оборудование подстанции и связывает его с оборудованием процесса. На этом этапе внедряется единый информационный стандарт передачи данных, формируется информационная модель подстанции, участвующая во всех этапах жизни подстанции (проектирование, наладка, эксплуатация) [7]. Структурная схема организации информационных потоков на цифровой тяговой подстанции первого типа представлена на рис. 2.

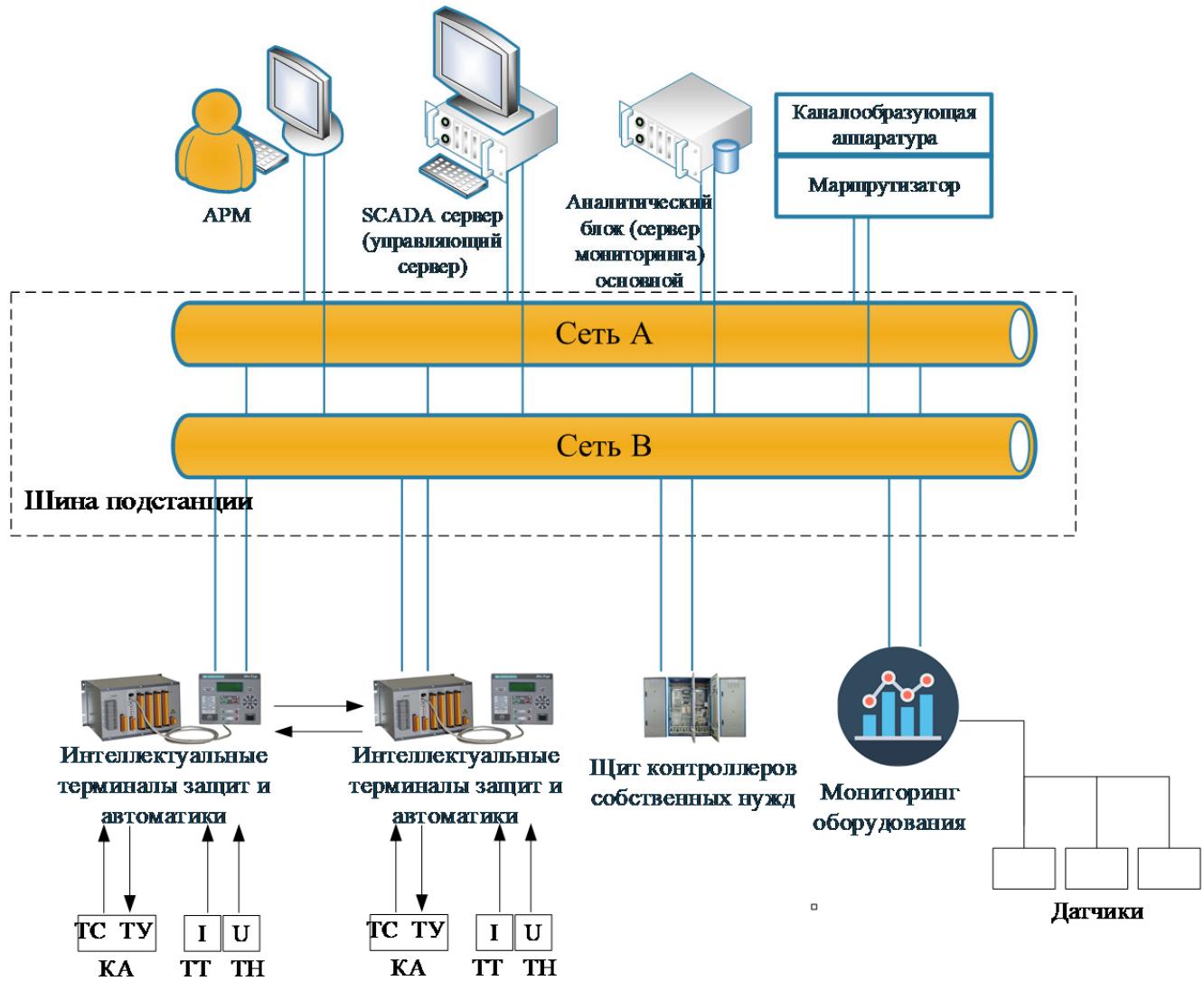


Рис. 2. Структурная схема формирования информационных потоков в цифровой тяговой подстанции первого типа

Второй тип – реализация шины присоединения, объединение данной шиной оборудования уровня присоединения и полевого уровня. На данном этапе дискретные цепи управления, сигнализации и блокировки заменяются цифровой сетью. В рамках данной сети устройства являются одноранговыми и могут обмениваться широковещательными, групповыми или индивидуальными сообщениями. Сообщения передаются по канальному уровню передачи данных. Для целей управления и сигнализации коммутационных аппаратов устанавливаются преобразователи дискретных сигналов в шкафах управления. Вся сеть уровня присоединения функционирует с применением протокола бесшовного резервирования.

Структурная схема организации информационных потоков на цифровой тяговой подстанции второго типа представлена на рис. 3.

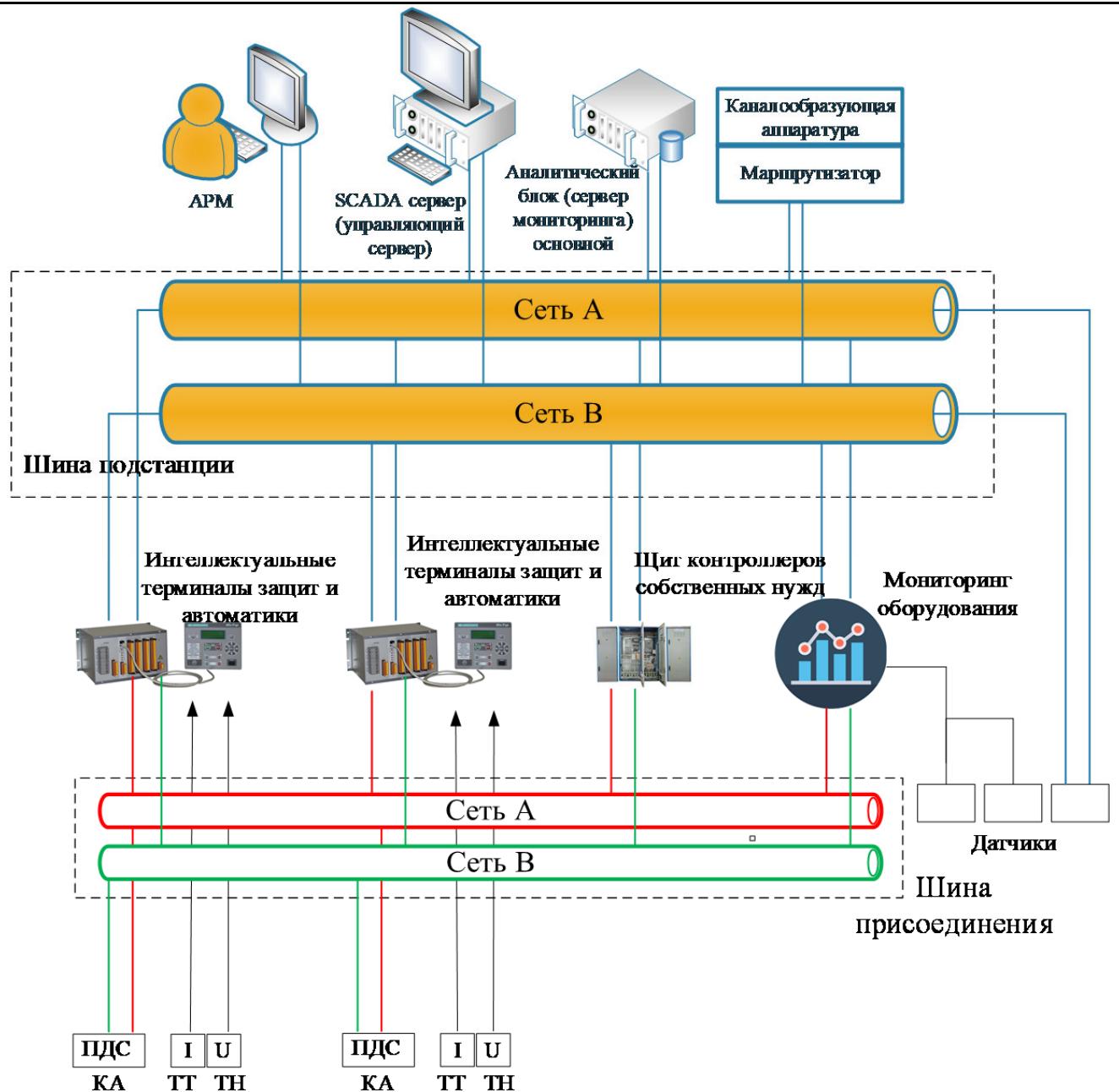


Рис. 3. Структурная схема формирования информационных потоков в цифровой тяговой подстанции второго типа

Третий тип – реализация шины процесса. На этом этапе применяются цифровые цепи трансформаторов напряжения (ТН) и трансформаторов тока (ТТ), которые оснащаются преобразователями аналогового сигнала (ПАС) или заменяются цифровыми. Передача цифровых сигналов осуществляется по шине процесса. Вся сеть уровня процесса функционирует с применением протокола бесшовного резервирования. Структурная схема организации информационных потоков на цифровой тяговой подстанции третьего типа представлена на рис. 4.

Решение о принятии того или иного типа цифровизации строится исходя из следующих параметров: экономической эффективности реализации; технического эффекта от реализации; показателей надёжности цифровой подстанции [10].

Из имеющихся источников можно определить в допустимом доверительном интервале только достигаемый технический эффект [11], тогда как экономический эффект и показатели

надёжности принимаемых технических мероприятий главным образом зависят от соответствия поставляемого оборудования и программного обеспечения техническим требованиям, правильности монтажа и обслуживания программно-технических средств (ПТК) [12]. Достижение требуемых показателей зависит от качества и полноты проведённых предварительных испытаний.

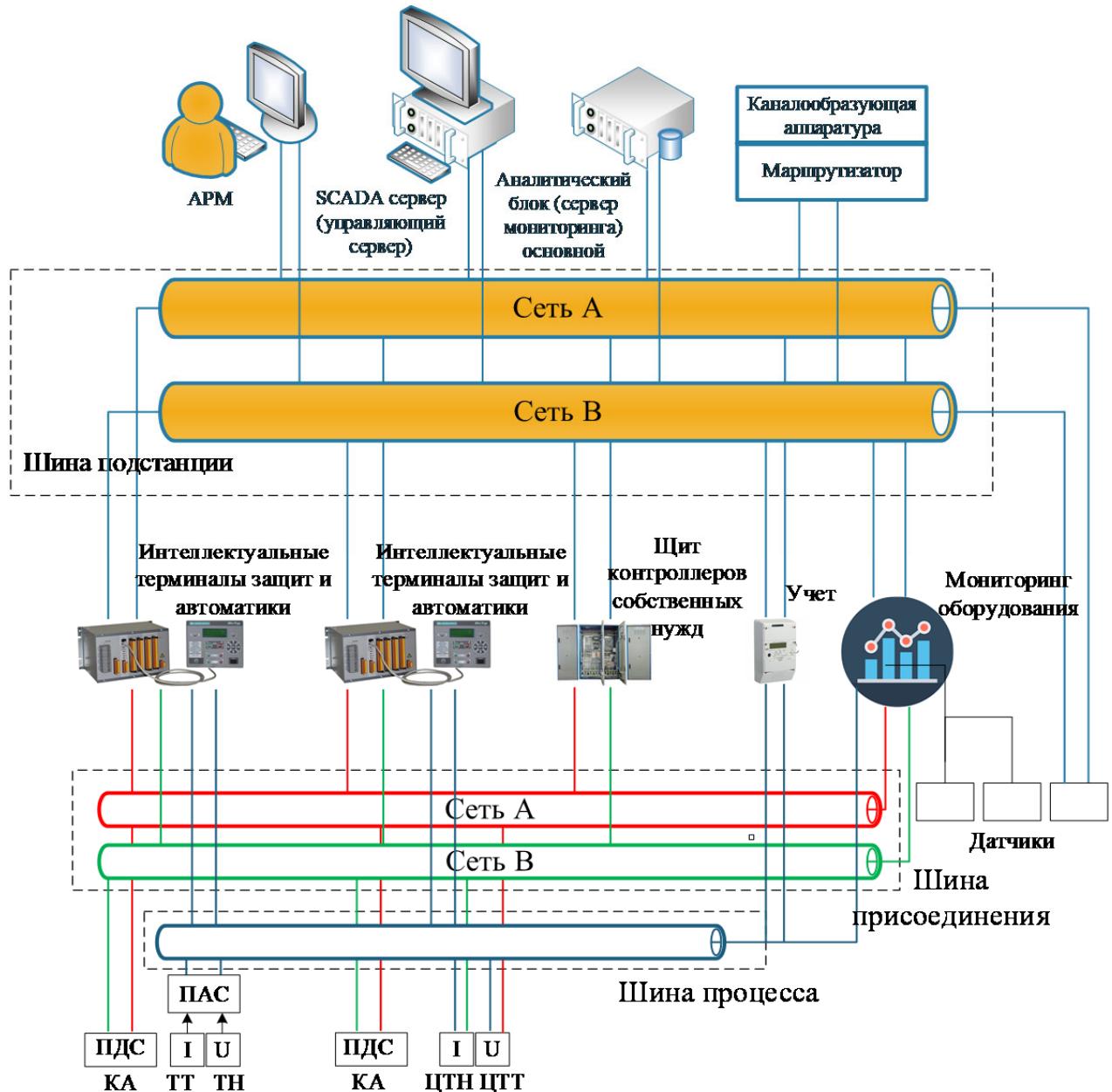


Рис. 4. Структурная схема формирования информационных потоков
в цифровой тяговой подстанции третьего типа

Параметры надёжности достигаются выбором наиболее эффективного и надёжного способа передачи информации – выбором топологии сети и стандартов (протоколов) передачи информации, а также соответствием поставляемой программно-технической продукции заявленным требованиям [11]. Программные и технические средства при приёмке до внедрения на действующих подстанциях должны быть опробованы и протестированы на предмет комплексного взаимодействия во всех режимах работы на специализированном полигоне или в лаборатории. В ходе данного тестирования в том числе должны быть отработаны вопросы взаимодействия оборудования,

программ и сетей связи с учётом влияния систем безопасности на работу оборудования (наличие активных и пассивных средств и систем безопасности может повлиять на процесс транспортировки и обработки информационных сигналов). Данная процедура также необходима при обновлении программного обеспечения серверов и оборудования, антивирусных баз.

Достоверные параметры экономической эффективности выявляются на этапах опытной эксплуатации цифровой тяговой подстанции на выбранном полигоне действующей подстанции и сравниваются с соответствующими показателями схожего объекта [9].

Для принятия решения о готовности типа применяемых технических решений к внедрению на тяговой подстанции предлагается проведение мероприятий, представленных в блок-алгоритме (см. рис. 5).

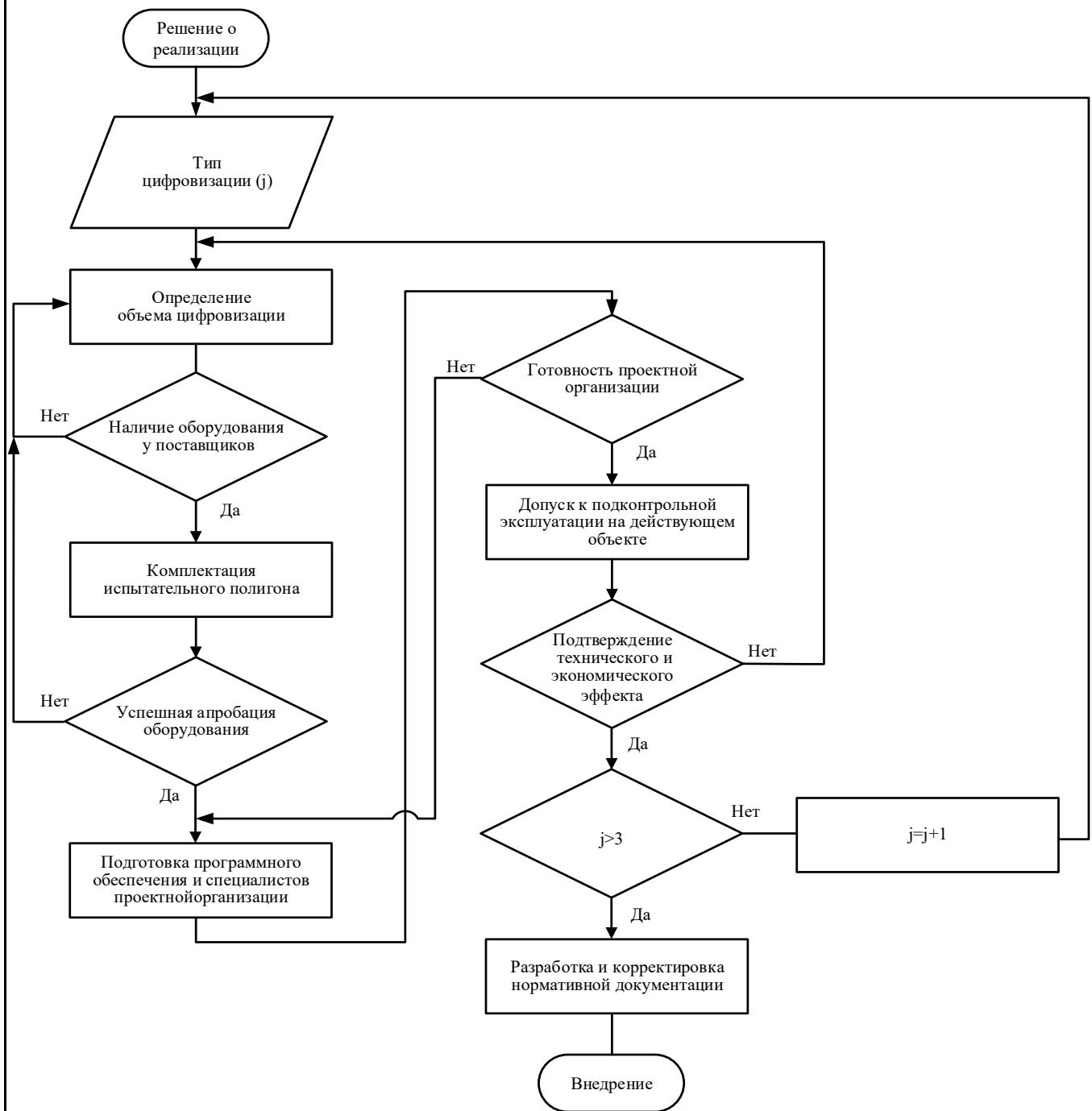


Рис. 5. Блок-алгоритм проведения мероприятий для подготовки и проверки технических решений, внедряемых на цифровой тяговой подстанции

Согласно представленному блок-алгоритму принимается решение о подготовке к внедрению типа цифровизации j . Каждый тип цифровизации подразумевает развитие определённого сегмента сети, принятие и поддержку стандартов передачи информации, протоколов резервирования и синхронизации, стандартных моделей описания логических функций, узлов, синтаксиса. В рамках рассматриваемого этапа производители оборудования производят научно-конструкторские работы и изготовление устройств и программных продуктов в соответствии с предъявляемыми требованиями, в том числе по параметрам надёжности функционирования программно-аппаратных средств.

Для принятия решения о соответствии оборудования потенциальных поставщиков требованиям, типу цифровизации, оборудование и ПО должны быть опробованы и протестированы на предмет комплексного взаимодействия во всех режимах работы на специализированном полигоне или в лаборатории [12]. В ходе данного тестирования в том числе должны быть отработаны вопросы взаимодействия оборудования, программ и сетей связи с учётом влияния систем безопасности на работу оборудования (наличие активных и пассивных средств и систем безопасности также может влиять на процесс транспортировки и обработки информационных сигналов) [13].

На данном этапе возможно появление новых требований к оборудованию и программным средствам, а также отдельных технических и инженерных решений для комплексного взаимодействия оборудования, снижения сложности и повышения технологичности обслуживания и эксплуатации [14]. При получении результатов, подтверждающих надёжность и эффективность предлагаемых технических решений, делается заключение о реализации пилотного проекта на территории действующей подстанции. Проектирование должно осуществляться с учётом уровня цифровизации. Начиная с цифровой подстанции первого типа проект должен выполняться в программных средствах с применением технологии BIM [11]. При проектировании осуществляется информационное моделирование устройств и программно-технических комплексов. Формируются алгоритмы работы логических узлов интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), производится описание всех сетей связи, информационных протоколов и сообщений. Далее формируются модель подстанции, содержащая однолинейную схему, описание основного оборудования, данные по параметрированию интеллектуальных устройств и их сетей связи. Проектирование должно осуществляться с использованием информационных моделей оборудования, которые разрабатывают и предоставляют производители оборудования.

Протокол коммуникаций и модель описания функций оборудования (логических узлов) должны быть составлены на основе единого стандарта, описывающего сети и системы связи. После изготовления проекта, отвечающего стандартам BIM проектирования, строится опытный образец на территории действующей подстанции.

В течение достоверного интервала времени сравниваются показатели надёжности, окупаемости, эффективности, безопасности в сравнении с аналогичным объектом предыдущего поколения. При получении положительного опыта внедрения данного типа цифровизации он признаётся эффективным и принимается решение о его применении в качестве типового для внедрения на вновь строящихся и реконструируемых объектах. Также принимается решение о начале внедрения следующего этапа цифровизации.

Уровень цифровизации зависит от следующих факторов:

1. типа цифровизации подстанции, принятого для внедрения;
2. объёма монтируемого оборудования на подстанции, выраженного в количественном или стоимостном выражении от общего количества (стоимости) оборудования, выражается в %.

В зависимости от объёма реконструируемого оборудования можно различить 4 наиболее эффективных уровня цифровизации, определяемых сценарными условиями внедрения цифровых технологий (см. рис. 6).

Сценарное условие 1 – некомплексная реконструкция, расширение, техническое перевооружение до 10 %.

Оборудование внедряется в существующую автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУ ТП) и телемеханизации (ТМ). Дополнительная сетевая инфра-

структура не строится, управление происходит с существующего щита управления, для чего происходит его расширение. При наличии в составе устанавливаемого оборудования цифровых систем диагностики и мониторинга рекомендуется его подключение к пульту управления дежурного подстанцией для сбора/обработки информации.

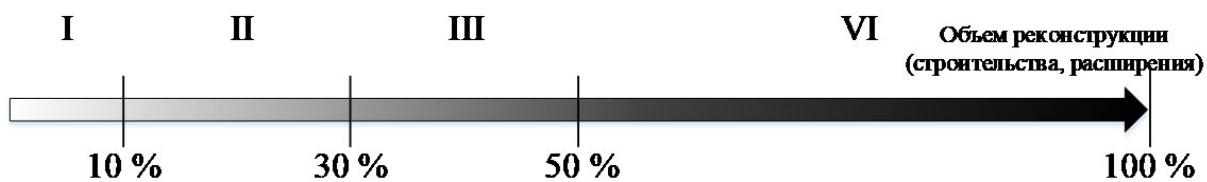


Рис. 6. Определение сценарных условий внедрения цифровых технологий

Сценарное условие II – некомплексная реконструкция, расширение, техническое перевооружение, от 10 до 30 %.

Управление новым и старым оборудованием происходит с щита управления. Всё новое оборудование управляется также с АСУ ТП. Для реализации АСУ ТП строится шина подстанции. Устанавливаются SCADA-сервер и автоматизированное рабочее место (АРМ) оперативного персонала. Объём цифровизации шины подстанции происходит в масштабе модернизируемого/вновь устанавливаемого оборудования с учётом возможности подключения дополнительного оборудования при прогнозе его установки в пятилетней перспективе без учёта дополнительного оборудования в более поздние сроки. При наличии уже установленного оборудования, поддерживающего работу шины подстанции, происходит его подключение к данной шине. Управление новыми выключателями и разъединителями происходит при использовании традиционных каналов связи. При наличии средств мониторинга/диагностики, достаточном для принятия решения на переход обслуживания ряда электроустановок по состоянию, устанавливается сервер мониторинга с организацией канала связи с АРМ контроля состояния.

Сценарное условие III – некомплексная реконструкция, расширение, техническое перевооружение, от 30 до 50 %.

Всё новое оборудование АСУ ТП объединено шиной подстанционного уровня. Подстанционный уровень проектируется в полном объёме с учётом возможности расширения. Все ИЭУ должны быть обеспечены возможностью осуществлять их дистанционную настройку, управление и мониторинг состояния.

Шина присоединения и шина процесса проектируются в объёме планируемой реконструкции (расширения). Управление новыми коммутационными аппаратами осуществляется через шину присоединения при условии наличия в шине процесса всех сигналов, участвующих в логике оперативной блокировки. При отсутствии части сигналов блокировка осуществляется электромагнитным способом, но закладывается сетевая инфраструктура для дальнейшей модернизации оборудования.

При наличии уже установленного оборудования, поддерживающего работу шины подстанции, происходит его подключение к шинам подстанции, шинам процесса и шинам присоединения. Все шины выполняются резервированными, с функцией бесшовного резервирования шины присоединения и шины процесса.

Устройства телемеханики интегрируются в АСУ ТП или демонтируются. В последнем случае управление происходит через ПТК АСУ ТП.

В случае установки цифровых ТН и ТТ на стороне питающего напряжения целесообразно установить ПАС на ТТ вводов остальных классов напряжения для функционирования устройств защите трансформатора с использованием шины процесса и шины присоединения.

Новое оборудование: (авто)трансформаторы, высоковольтные ввода, выключатели, разъединители, реакторы и др. – оснащается устройствами, позволяющими осуществить дистанционный мониторинг состояния.

Сценарное условие IV – комплексная реконструкция, от 50 до 100 %.

Условием для проектирования подстанции будет отсутствие постоянного дежурного персонала. Строится полнофункциональная система АСУ ТП. Шина подстанционного уровня строится в полном объёме. При наличии оборудования, не поддерживающего интеграцию в шину подстанции по принятому протоколу связи, интеграция происходит с использованием преобразователей протоколов. Все ИЭУ должны быть обеспечены возможностью осуществлять их дистанционную настройку, управление и мониторинг состояния.

Шины всех уровней выполняются резервированными, с функцией бесшовного резервирования шины присоединения и шины процесса.

Шина присоединения и шина процесса проектируются в полном объёме. На реконструируемых объектах устанавливаются цифровые ТН и ТТ. При наличии традиционных ТТ и ТП на вводах трансформатора устанавливаются ПАС. Управление всеми новыми коммутационными аппаратами осуществляется через шину присоединения. При наличии оборудования, не имеющего функции интегрирования в шину присоединения, интеграция происходит через преобразователь дискретных сигналов. Управление подстанцией осуществляется через ПТК АСУ ТП. Всё новое электроэнергетическое оборудование оснащается устройствами, позволяющими осуществить дистанционный мониторинг состояния.

В настоящее время отечественные решения в области информационных систем и поставки ИЭУ не могут в полной мере реализовать все типы цифровых тяговых подстанций с достаточным уровнем надёжности их работы. Увеличение производительности серверов по обработке и управлению информационными потоками делает возможным появление в скором времени нового типа подстанции, реализующего все протоколы управления устройствами в рамках виртуальной системы, проработка и анализ возможных вариантов исполнения которого требуют проведения отдельного исследования с точки зрения как технического исполнения, так и обеспечения безопасности и устойчивости в особо критичной инфраструктуре железнодорожного транспорта. Дальнейшее техническое и информационное развитие основных производителей оборудования позволит реализовать цифровые подстанции всех типов и использовать наиболее эффективный уровень цифровизации подстанции, зависящий от объёма реконструкции (строительства, модернизации, расширения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг, Е. Н. О стратегии развития цифровой железной дороги / Е. Н. Розенберг, В. В. Батраев // Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО «РЖД». – 2018. – № 1. – С. 9-27.
2. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р // Министерство транспорта Российской Федерации, сайт. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/11577> (дата обращения: 10.12.2021). – Текст: электронный.
3. Жаворонков, А. Е. Технологии Цифровой подстанции / А. Е. Жаворонков, С. В. Митрофанов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч.-методической конф. (с международным участием), Оренбург, 30 января – 01 февраля 2013 г. – Оренбург: Издательско-полиграфический комплекс «Университет», 2013. – С. 289-296.
4. Tryapkin, E. Development of «digital substation» technology for power supply of railways / E. Tryapkin, I. Igнатенко, M. Keino // MATEC Web of Conferences, Novosibirsk, 16-19 мая 2018 года. – Novosibirsk: EDP Sciences, 2018. – Р. 01051. – DOI 10.1051/matecconf/201823901051.
5. Положительный опыт внедрения систем на базе технологий МЭК 61850-9-2 / А. Ю. Мартихин, А. В. Вылегжанин, В. В. Семин, С. Э. Беккер // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 6. – С. 16-21.
6. Кондратьев, Ю. В. Концепция развития цифровой тяговой подстанции / Ю. В. Кондратьев, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: материалы третьей междунар. науч.-практ. конф. – Омск: ОМГУПС, 2018. – С. 13-20.

7. Digital information exchange technologies at electric power facilities of the railway transport and its cost-benefit / A. N. Kobylitsky, I. V. Ignatenko, S. A. Vlasenko [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 8, Novosibirsk, 22-27 мая 2020 года. – Novosibirsk, 2020. – Р. 012185. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012185.
8. Болдырев, В. В. Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения / В. В. Болдырев, М. А. Горьковый // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 9-18.
9. Ye Cai, Yu Chen, Yong Li, Yijia Cao, Xiangjun Zeng. Reliability Analysis of Cyber-Physical Systems: Case of the Substation Based on the IEC 61850 Standard in China. Energies 2018, 11, 2589.
10. Цифровая линия электропередач / Е. В. Добрынин, С. А. Блинкова, А. М. Батищев, М. А. Гузитаева // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – № 9 (250). – С. 84-88.
11. Игнатенко, И. В. Перспективы развития технологии обмена информацией цифровой тяговой подстанции / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, Е. Ю. Тряпкин // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 16-26 февраля 2021 г. / Редкол.: С. И. Сухоруков (отв. ред.), А. С. Гудим, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 106-110.
12. Применение методов машинного обучения в задачах оценки технологических процессов / О. В. Попова, Я. Ю. Григорьев, Е. П. Жарикова, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 68-72.
13. Киселёва, О. Индустриальная революция и кибербезопасность / О. Киселёва, Ю. Широков // Современные технологии автоматизации. – 2019. – № 2. – С. 44-49.
14. Власенко, С. А. Определение уязвимостей и меры по информационной защите цифровой тяговой подстанции / С. А. Власенко, И. В. Игнатенко, Е. Ю. Тряпкин // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. – № 4 (21). – С. 78-82.
15. Krause, T.; Ernst, R.; Klaer, B.; Hacker, I.; Henze, M. Cybersecurity in Power Grids: Challenges and Opportunities. Sensors 2021, 21, 6225. <https://doi.org/10.3390/s21186225>.

Жарикова Е. П., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Н.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА
МИРОВОГО ОКЕАНА И КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

Жарикова Е. П., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Н.
E. P. Zharikova, Ya. Yu. Grigoriev, A. L. Grigorieva

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА МИРОВОГО ОКЕАНА И КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

MACHINE LEARNING FOR MONITORING THE OCEANS AND CONTINENTAL SURFACE WATERS

Жарикова Евгения Павловна – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Evgeniia P. Zharikova – Postgraduate, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

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

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

Григорьева Анна Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Anna L. Grigorieva – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. С целью безопасного использования водных ресурсов человеком и предотвращения пагубного влияния на системы мирового океана необходимо обеспечивать своевременный мониторинг состояния водной поверхности. Для решения поставленной задачи эффективными оказываются методы компьютерного зрения, при этом возможно использование спутниковых систем или мобильных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Применение последних позволяет оперативно решать поставленные задачи. В работе рассматривается модель искусственного интеллекта, основанная на применении нейронных сетей, позволяющая с достаточной точностью детектировать области, содержащие патогенные биомассы, нефтяные разливы. Набор данных, на котором обучается и тестируется модель, содержит multispectralные изображения, полученные с сенсоров, расположенных на борту Sentinel. Разметка набора производится автоматически при помощи спектральных индексов, применяемых в задачах дистанционного зондирования земли. Результаты проверки качества обученной архитектуры подтверждают применимость нейронных сетей к решению задач мониторинга мирового океана и континентальных поверхностных вод.

Summary. In order to ensure safe human use of water resources and to prevent detrimental effects on the world ocean systems, it is necessary to ensure timely monitoring of water surface conditions. Computer vision methods are effective for solving this task, at those satellite systems or mobile unmanned aerial vehicles (UAV) can be used. Application of the latter allows solving assigned tasks operatively. This paper describes an artificial intelligence model based on the application of neural networks, which allows detecting areas containing pathogenic biomass and oil spills with sufficient accuracy. The dataset on which the model is trained and tested contains multispectral images from sensors onboard Sentinel. The dataset is automatically partitioned using spectral indices used in remote sensing tasks. The results of the quality check of the trained architecture confirm the applicability of neural networks to global ocean and continental surface water monitoring tasks.

Ключевые слова: классификация, регрессионное моделирование, искусственный интеллект, нейронные сети, спектральный анализ, база данных, машинное зрение, машинное обучение.

Key words: classification, regression modeling, artificial intelligence, neural networks, spectral analysis, database, machine vision, machine learning.

Последнее десятилетие применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения задач дистанционного зондирования (ДЗ) становится всё более распространённым. Одним из самых явных преимуществ использования БПЛА относительно искусственных спутников земли (ИСЗ) является их манёвренность и способность обеспечивать своевременный контроль заданной области, в то время как период мониторинга области посредством спутников может составлять до 15-17 дней [6]. К задачам ДЗ, решаемым с применением БПЛА, относится контроль состояния прибрежных зон морских акваторий. Мониторинг включает в себя анализ морской флоры и фауны, своевременное обнаружение различных загрязнений и определение их границ.

В работе [5] приводится решение одной из ключевых задач ДЗ водной среды, состоящей в оценке концентрации хлорофилла фитопланктона. Наличие хлорофилла проявляется в виде сильного поглощения в синем (443 нм) и красном (675 нм) спектральных диапазонах и высокой отражательной способности в зелёном (550-555 нм) и красном (685-710 нм) спектрах [1; 2; 3]. Для решения поставленной задачи авторами применяется мультиплатформенный подход: используются мультиспектральные данные как со спутников, так и с БПЛА.

Целью исследований в работе [4] является мониторинг (с использованием БПЛА, оснащённого десятиполосной мультиспектральной камерой) экосистемы морских макрофитов, наиболее подверженных угрозе антропогенной деятельности и изменения климата. В работе применяются такие алгоритмы, как классификатор максимального правдоподобия (MLC), классификатор минимального расстояния (MDC) и классификатор спектрального угла (SAC).

В работе [7] на основе снимков с БПЛА производится мультиспектральный анализ цветения водорослей при помощи вегетационных индексов и алгоритмов MLC.

Большинство рассматриваемых исследований свидетельствует о том, что результаты анализа, проводимого с применением БПЛА, не уступают по надёжности спутниковым данным, а в ряде случаев имеют превосходство. Также явным преимуществом применения БПЛА является оперативность полученных решений.

Цель исследования – разработка системы с применением моделей искусственного интеллекта, способной на основе мультиспектральных данных производить анализ и определять границы областей водной поверхности, имеющих отклонения, угрожающие нарушением нормального состояния существующей экосистемы.

Рассматривается задача, состоящая в определении правила $X \rightarrow Y$ при имеющейся некоторой обучающей выборке $L = \{(\mathbf{x}_i, y_i)\}_{i=1}^N$, где $\mathbf{x}_i \in X$ – вектор признаков, $y_i \in Y$ – значение класса, прилежащее множеству $\{0, 1, 2, \dots, n\}$.

Разрабатывается алгоритм, позволяющий производить нормализацию данных, классификацию загрязнений и определение границ загрязнённых областей. Количество классов зависит от набора данных, на котором обучается нейронная сеть. Архитектура нейронной сети, при помощи которой производится классификация, рассматривается на рис. 1.

Дальнейшее уточнение состояния внутри класса производится отдельной нейронной сетью (см. рис. 2).

Каждый классификатор обучается на своём наборе данных. Гарантируется (см. рис. 1), что на вход подаётся область, содержащая пиксели только предназначенного для соответствующей нейронной сети класса.

Требования к набору данных указаны в табл. 1.

Сбор необходимого набора данных затруднён отсутствием оборудования. Возможным решением проблемы является использование информации, собранной при помощи лабораторного оборудования, однако сенсоры, доступные для сбора данных, выдают информацию в диапазонах Blue, Green, Red и NIR, что не соответствует указанным в табл. 1 требованиям, вследствие чего спектр возможностей разрабатываемой системы сужается. Для сохранения функционала системы и проверки гипотезы о том, что интеллектуальная система, анализирующая все спектральные каналы, применяемые при вычислении индексов в задачах ДЗ, способна производить необходимую

классификацию состояний водной поверхности, набор данных формируется на основе спутниковых мультиспектральных изображений водоёмов. Все полученные снимки сделаны спутником Sentinel и сгенерированы при помощи открытого ресурса [8].

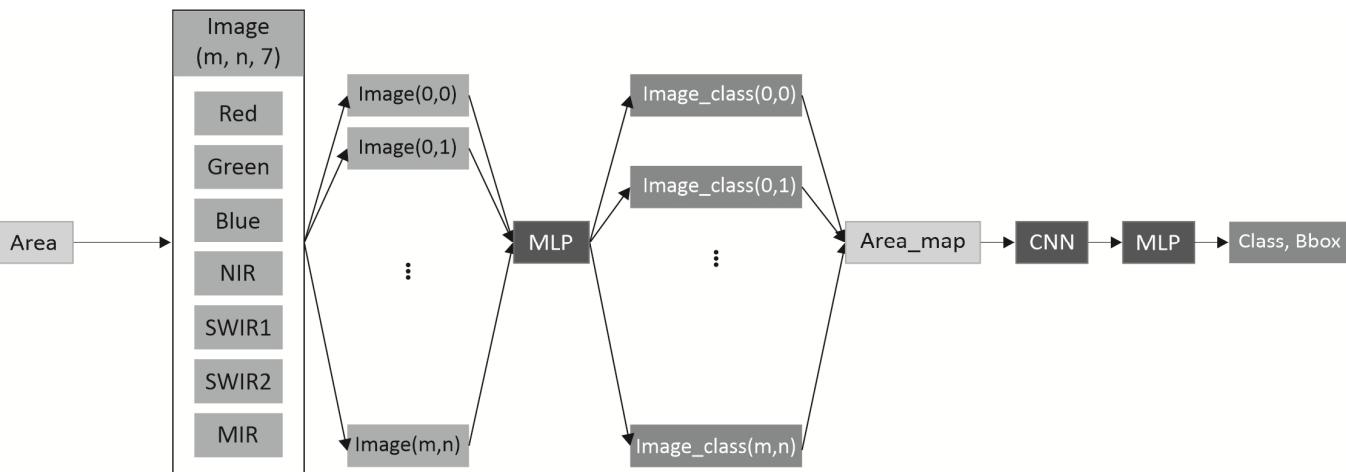


Рис. 1. Архитектура нейронной сети

Описание спектральных каналов Sentinel представлено в табл. 2, пример спектральных изображений области (см. рис. 3) представлен на рис. 4 и 5.

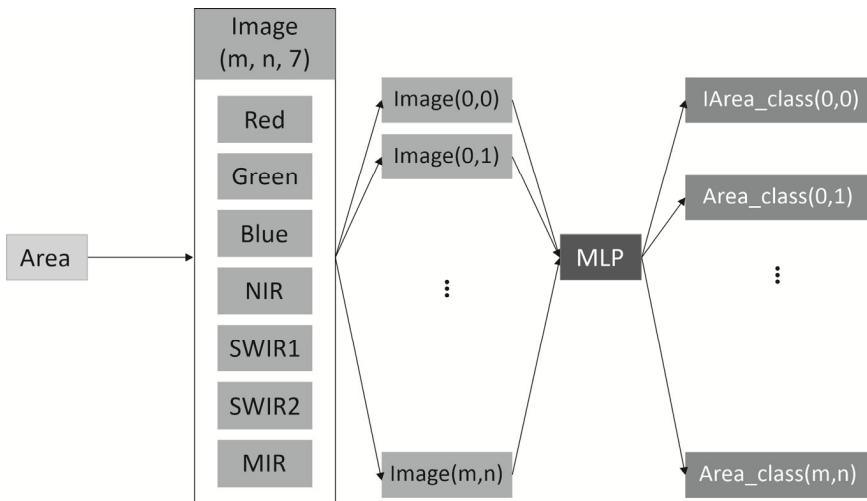


Рис. 2. Общий вид классификаторов

Таблица 1
Требования к набору данных

Таблица 1

Требование	Значение
Обязательные спектральные диапазоны для каждой области	Blue, Green, Red, NIR, SWIR
Классы являются векторами размерности 2, первое значение которых соответствует наличию класса, а второе уточняет его	Растительность (здоровая, угнетённая); водная поверхность (с загрязнением); поверхность без растительности (естественный объект, антропогенный объект)
Минимальное количество областей	30 000

Характеристики спектральных каналов

Обозначение	Название	Центральная длина волны, нм
B01	Coastal aerosol	442.7
B02	Blue	492.4
B03	Green	559.8
B04	Red	664.6
B05	Vegetation red edge	704.1
B06	Vegetation red edge	740.5
B07	Vegetation red edge	782.8
B08	NIR	832.8
B08A	Narrow NIR	864.7
B09	Water vapour	945.1
B10	SWIR – Cirrus	1373.5
B11	SWIR	1613.7
B12	SWIR	2202.4

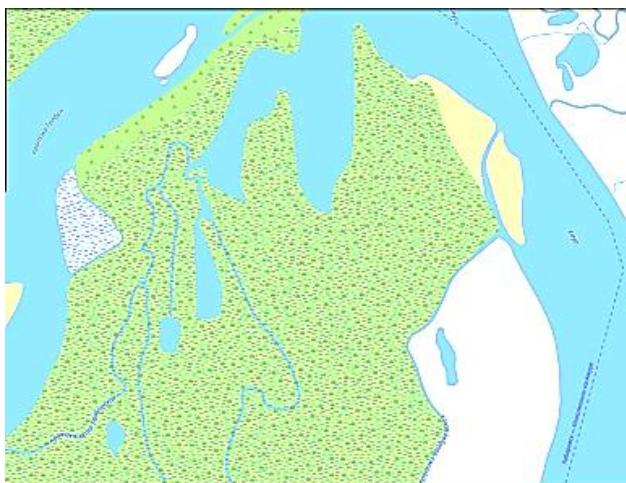


Рис. 3. Карта анализируемой области

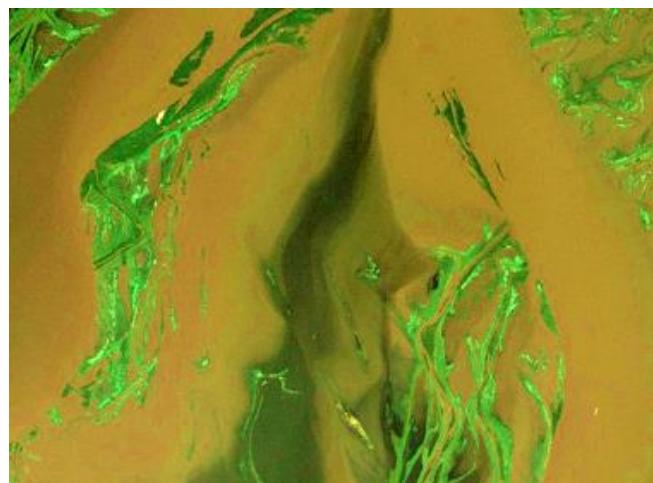


Рис. 4. Изображение области, где R = B04, G = B03, B = B02

В текущем исследовании разметка набора данных производится автоматически при помощи известных индексов ДЗ.

Конечной целью исследования является создание интеллектуальной системы для анализа мультиспектральных потоков с БПЛА, поэтому текущий набор данных является средством проверки гипотез. Следующий этап исследований предполагает формирование базы данных мультиспектральных изображений с сенсоров, применяемых на БПЛА.

Реализация нейронной сети производится с помощью библиотеки PyTorch без применения предобученных архитектур с начальной скоростью обучения 0.001, которая снижается в 10 раз каждые 200 эпох. Функцией потерь является кросс-энтропия, т. к. количество классов равно N :

$$\text{Loss} = - \sum_x p(x) \log q(x),$$

где $p(x)$ – истинное распределение вероятностей; $q(x)$ – прогнозируемое распределение вероятностей.

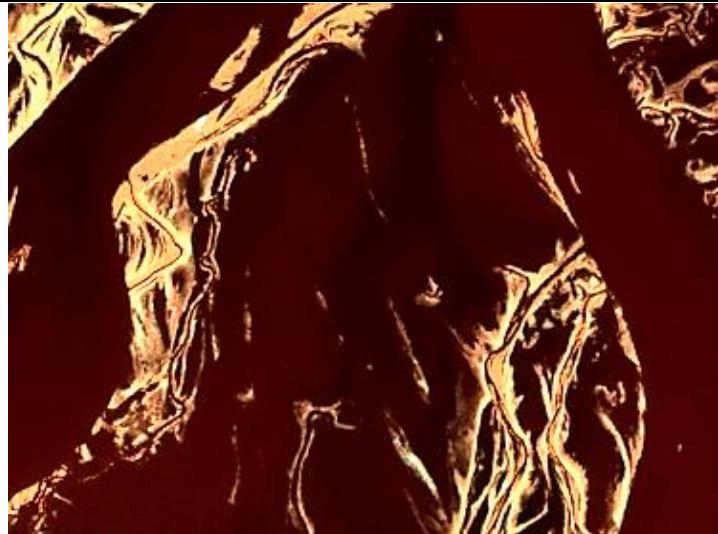


Рис. 5. Изображение области, где R = B08, G = B11, B = B12

Размер пакета при обучении составляет 512, а алгоритмом оптимизации является Adam. Изменение параметров сети описано формулой

$$w_p = w_{p-1} - \frac{\eta \widehat{m}_p}{\sqrt{\widehat{v}_p} + \epsilon},$$

где η – скорость обучения; m_p , v_p – соответственно скользящее среднее градиентов и квадратов градиентов функции потерь; ϵ – параметр, исключающий деление на ноль.

В ходе обучения проводится серия экспериментов по выборочному отключению спектральных каналов. В качестве метрики используется accuracy:

$$\text{accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}},$$

где TP и TN – верные определения класса; FP и FN – неверные определения класса.

Анализ диаграммы значимости каналов (см. рис. 6) показывает, что большее влияние оказывает инфракрасный спектр.

Результаты тестирования обученной модели представлены на рис. 7-9.

Из результатов тестирования видно, что применение всех доступных в наборе данных спектральных каналов увеличивает точность распознавания. Причиной малых изменений качества классификации является относительно небольшой объём набора данных, т. к. исследование в большей степени направлено на проверку гипотез. Подтверждение гипотез позволяет перейти к следующему этапу, состоящему в формировании качественной базы данных изображений, полученных посредством сенсоров, устанавливаемых на БПЛА.

Вариант результата работы обученной модели для тестовой области (см. рис. 10-12) представлен на рис. 13.

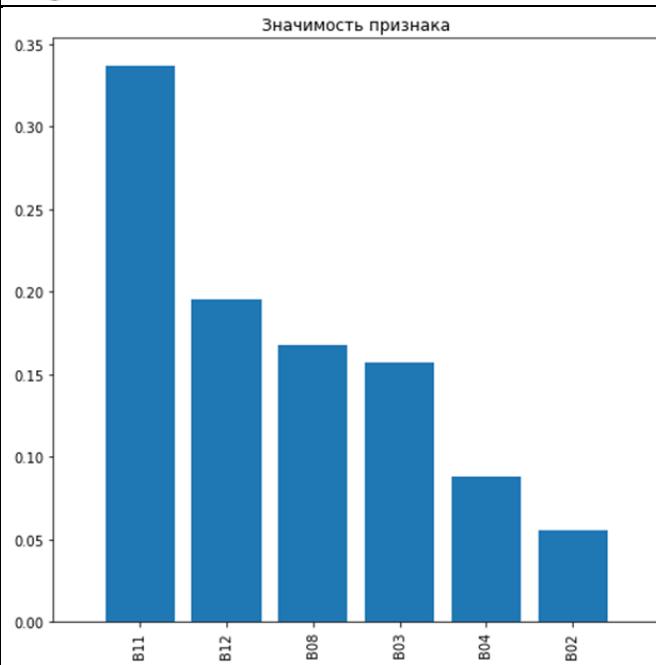


Рис. 6. Значимость каналов для классификации загрязнений водной поверхности

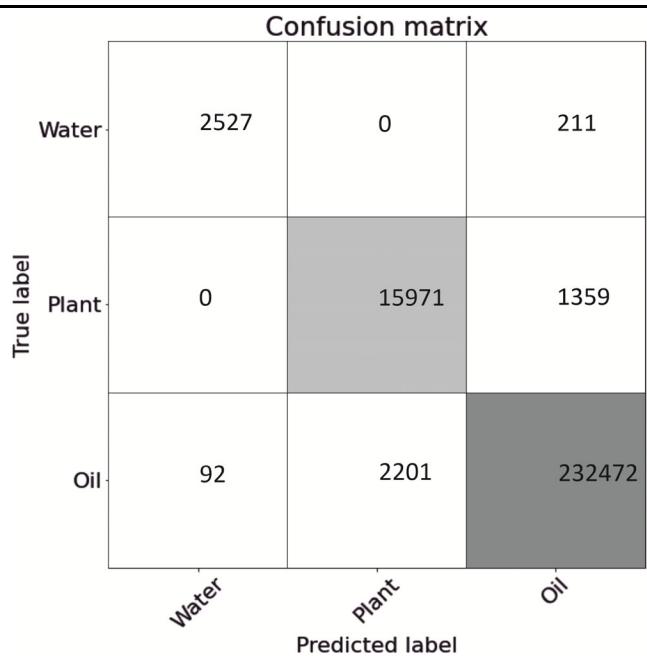


Рис. 7. Матрица ошибок для модели, обученной на RGB данных

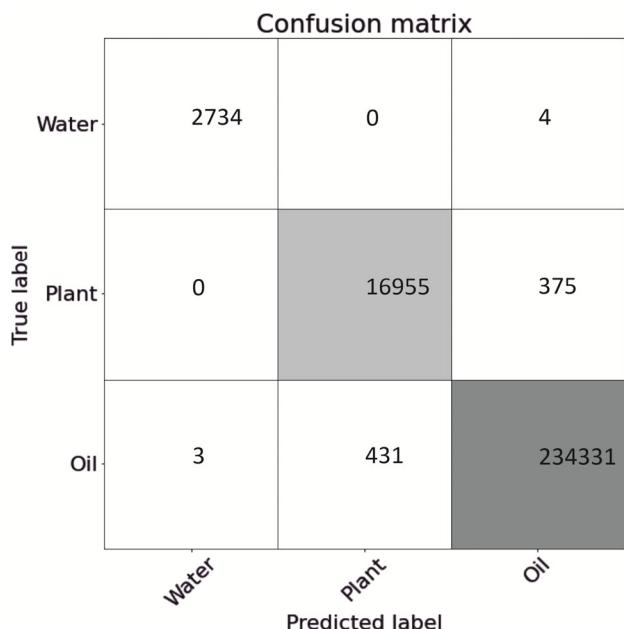


Рис. 8. Матрица ошибок для модели, обученной на RGB, NIR данных

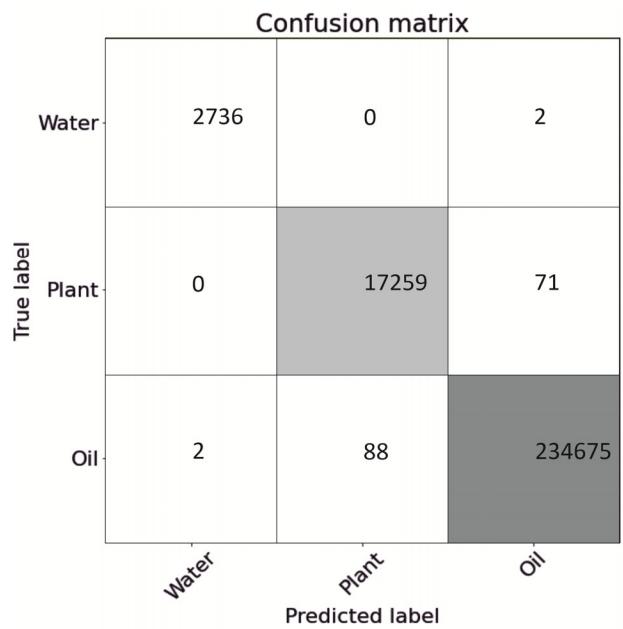


Рис. 9. Матрица ошибок для модели, обученной на RGB, NIR, SWIR данных



Рис. 10. Карта анализируемой области

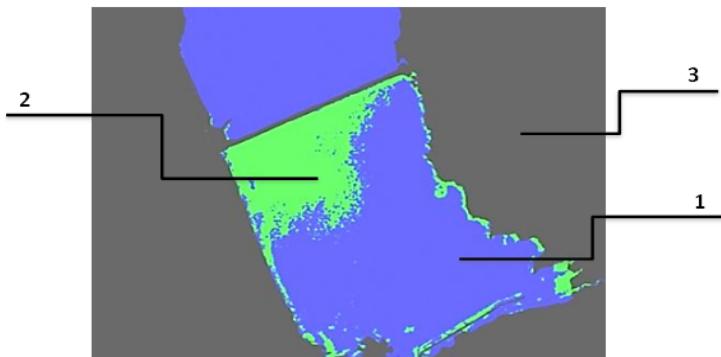


Рис. 11. Изображение области, где $R = B04$,
 $G = B03$, $B = B02$

Так как задача классификации разделена на два этапа, на выходе каждого генерируется карта. Первый этап включает в себя определение пикселей водной поверхности. Второй этап состоит в классификации выделенных пикселей.



Рис. 12. Изображение области, где $R = B08$,
 $G = B11$, $B = B12$



1 – чистая водная поверхность,
2 – водная поверхность с растительностью,
3 – поверхность, не являющаяся водной

Рис. 13. Сгенерированное изображение

В результате исследования была создана и обучена модель, позволяющая с достаточной точностью детектировать области, содержащие патогенные биомассы, нефтяные разливы. Оценка эффективности модели производилась на сравнительно небольшом объёме данных, полученных с сенсоров Sentinel-2 L2A. Для повышения результативности проводимых исследований требуется формирование размеченного набора данных, содержащего мультиспектральные данные, полученные с сенсоров, устанавливаемых на БПЛА.

Оценка качества работы нейронной сети производится на тестовой части определённого набора данных путём сравнения полученных результатов с State of the Art (SOTA), что указывает на соответствие разрабатываемой и обучаемой модели современным стандартам в рассматриваемой области. Обучение и валидации на нескольких наборах данных дают более полное представление о качестве работы реализуемой модели.

Специфика решаемой задачи заключается в отсутствии наборов данных, необходимых для обучения и валидации разработанной математической модели, вследствие чего на первом этапе

производится формирование собственного набора данных, удовлетворяющего требованиям решаемой задачи. Также определяется подход к аннотированию собранных данных для минимизации ошибок в разметке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gitelson A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: Relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. *Int. J. Remote Sens.*, 1992, 13, p. 3367-3373.
2. Kirk J. T. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, 2nd ed. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1994. 509 p.
3. Mobley C. D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic Press: Cambridge, MA, USA, 1994. 608 p.
4. Using a UAV-Mounted Multispectral Camera for the Monitoring of Marine Macrophytes / Román A. [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2021. № 8.
5. An UAV and satellite multispectral data approach to monitor water quality in small reservoirs / Cillero Castro C. [et al.] // *Remote sensing*. 2020. № 12 (9). P. 1514.
6. Long-term monitoring of wetlands via remote sensing and gis: A case study from turkey / Musaoglu N. [et al.] // *The International Institute of Knowledge Management-TIICKM*.
7. Multispectral UAV monitoring of submerged seaweed in shallow water / Taddia Y. [et al.] // *Applied geomatics*. 2020. № 12 (S1). P. 19-34.
8. Облачный API для спутниковых снимков // *Sentinel Hub*. – URL: <http://sentinel-hub.com> (дата обращения: 12.06.2021). – Текст: электронный.
9. Жарикова, Е. П. Модели расчёта и фильтрации вегетационных индексов / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: сборник материалов 4-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 2 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – С. 162-164.
10. Жарикова, Е. П. Сравнение вегетационных индексов в задачах оценки поверхностей / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: сборник материалов 4-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 2 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – С. 165-167.
11. Жарикова, Е. П. Модели компьютерного зрения в задачах дистанционного зондирования / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Постулат. – 2018. – № 4-1 (30). – С. 78.
12. Zharikova, E. P. Artificial intelligence methods for detecting water pollution / E. P. Zharikova, J. Y. Grigoriev, A. L. Grigorieva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference «Earth Science»*, ISTC EarthScience 2022 – Chapter 1. 2022. – P. 022082.
13. Коротеева, Л. И. Анализ негативных процессов, влияющих на состояние земельных ресурсов на территории Комсомольского района Хабаровского края / Л. И. Коротеева, Л. О. Ливицина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I-1 (57). – С. 100-104.
14. Столяров, В. Я. Универсальный программный комплекс подготовки изображений идентификаторов перед распознаванием / В. Я. Столяров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 78-86.

Гринкруг М. С., Пухов А. А.
M. S. Grinkrug, A. A. Pukhov

СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

EXISTING WAYS FOR DIESEL GENERATOR ENGINES REGULATION AND THEIR POTENTIAL IMPROVEMENT ROUTES

Гринкруг Мирон Соломонович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(909)866-56-96. E-mail: grin@knastu.ru.

Miron S. Grinkrug – PhD in Engineering, Associate Professor, Thermal Power Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(909)866-56-96. E-mail: grin@knastu.ru.

Пухов Алексей Александрович – магистр специальности «Управление в технических системах» факультета энергетики и менеджмента Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(984)179-15-04. E-mail: lemonsqueezyeasy@yandex.ru.

Aleksey A. Pukhov – Master's Degree Student Major in Management in Technical Systems, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(984)179-15-04. E-mail: lemonsqueezyeasy@yandex.ru.

Аннотация. В данной статье рассмотрены существующие проблемы в области эксплуатации двигателей внутреннего сгорания, работающих по циклу Дизеля в составе дизельных электрических станций, связанные со снижением их эффективного КПД при изменении нагрузок в меньшую сторону от номинальных. На основании имеющихся данных проведён анализ величин снижения эффективного КПД дизель-генераторов при уменьшении нагрузки до долей от номинальной для разных значений мощности. По имеющейся информации в текущих источниках научного знания дана оценка величины снижения эффективности выработки электроэнергии на дизельных электростанциях, вызванная динамикой электропотребления в течение суточного и годового временного интервалов. Далее дан краткий обзор имеющихся способов регулирования двигателей внутреннего сгорания при работе на режиме частичных нагрузок с указанием физических принципов их функционирования, ограничения применимости, положительных качеств и текущих недостатков. По итогу выведены критерии для разработки новых способов регулирования двигателей внутреннего сгорания, работающих по циклу Дизеля, и дано заключение о текущем статусе обсуждаемой проблемы с предложением её решения.

Summary. This article discusses the existing problems in the field of operation of internal combustion engines operating on the Diesel cycle as part of diesel power plants, associated with a decrease in their efficiency when loads change down from the nominal ones. Based on the available data, an analysis was made of the reduction in the efficiency of diesel generators when the load is reduced to fractions of the nominal for different power values. According to the available information in the current sources of scientific knowledge, an assessment is made of the magnitude of the decrease in the efficiency of electricity generation at diesel power plants, caused by the dynamics of electricity consumption during the daily and annual time intervals. The following is a brief overview of the available methods for regulating internal combustion engines when operating at partial loads, indicating the physical principles of their operation, limitations of applicability, positive qualities and current disadvantages. As a result, criteria are derived for the development of new ways to regulate internal combustion engines operating on the Diesel cycle, and a conclusion is given on the status of the problem under discussion with a proposal for its solution.

Ключевые слова: регулирование ДВС, дизельная электростанция, частичные нагрузки.

Key words: ECE control, diesel power station, partial loads.

УДК 620.93

По причине особенностей эксплуатации в качестве устрйств привода различного вида потребителей или преобразователей механической энергии устанавливаемые и используемые мощности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) всегда подвергаются инженерному расчёту исходя из необходимости покрытия пиковых, максимальных потребностей, т. е. на максимальную мощ-

ность потребителя [1; 2; 3]. Покрытие такого рода рассчитывается у дизель-генераторов (ДГ) так, чтобы номинальная мощность дизельного привода, обусловленная его конструктивными и эксплуатационными особенностями, покрывала полностью максимальную расчётную мощность потребителя (генератора), т. к. работа на номинальной мощности возможна в течение длительного срока без возникновения негативных последствий. Эксплуатация на мощностях выше номинальной зачастую хоть и считается условно-допустимой в ограниченных пределах и регламентируется особыми условиями [4], включающими временные ограничения и изменения, связанные с работой вспомогательных систем ДВС, но не может быть частью повседневного эксплуатационного процесса и зачастую не применяется у ДГ. В то же время режимы работы на номинальной мощности в течение всего срока эксплуатации являются по своей сущности исключительными, т. к. пиковое энергопотребление развивается в очень ограниченных периодах [5]. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев двигатели ДГ в современной энергетике осуществляет свою работу на режимах частичных нагрузок, т. к. имеющаяся практика показывает, что значительная дискретизация генерируемой мощности ограничивается замедляющимся приростом эффективности в сравнении с растущими экономическими затратами на каждый дополнительный элемент системы и чаще всего подобные системы включают в себя не более пяти ДВС, работающих на одну нагрузку. Также нарастающая сложность подобного рода систем приводит к возрастанию сложности управления, в особенности синхронизации работы электрических генераторов, что также сдерживает верхнюю границу числа ДГ в системе.

С другой стороны, переход ДВС на работу в режиме частичных нагрузок в подавляющем числе случаев означает увеличение доли механических потерь, потерь тепла в окружающую среду, потерь с уходящими газами по отношению к суммарной выработке, а также снижение термодинамической эффективности.

На рис. 1 представлена нагрузочная характеристика дизельного двигателя ЯМЗ-236, представленная в виде зависимости удельного расхода топлива от эффективного давления [6].

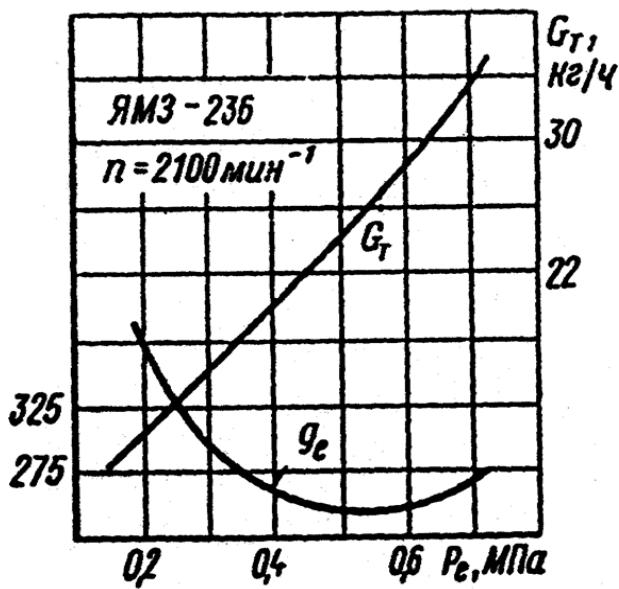


Рис. 1. Нагрузочная характеристика двигателя ЯМЗ-236

Как видно из рис. 1, с уменьшением нагрузки, выраженной в падении эффективного давления P_e ДВС относительно номинальной, сразу после незначительного снижения, вызванного улучшением процесса смесеобразования, возникает увеличение удельного расхода топлива g_t , иными словами, возникает снижение его эффективного коэффициента полезного действия (КПД). При этом зависимость имеет вид нелинейной функции, что обуславливает значительное падение эффективного КПД двигателя при снижении нагрузки в область низких значений.

В данном графике рассмотрение эффективного давления как аналога вырабатываемой мощности возможно, поскольку частота вращения вала двигателя является постоянной величиной, таким образом, мощность двигателя может быть выражена следующей формулой:

$$N = \frac{P_e * n * V * \eta_m}{60 * x},$$

где P_e – эффективное давление внутри цилиндра, МПа; n – частота вращения двигателя, об./мин; V – рабочий объём цилиндра, л; η_m – механический КПД; x – тактность двигателя; 60 – количество секунд в минуте.

Наблюдаемое снижение КПД приводит к большому количеству негативных последствий, включающих как удорожание стоимости единицы вырабатываемой двигателем полезной энергии, так и снижение эксплуатационных параметров, что является обосновывающим фактором для поиска возможных путей увеличения КПД двигателей ДГ при их работе на частичных нагрузках [7].

Для определения характерных величин снижения эффективного КПД ниже приведена таблица изменения КПД от нагрузки для различных видов применяемых на практике двигателей ДГ, пересчитанная на основании данных, указанных в [8] (см. табл. 1).

Таблица 1
Относительное снижение эффективного КПД ДГ при уменьшении нагрузки
до долей от номинальной

Марка дизель- генератора	Номиналь- ная мощ- ность, кВт	Доля КПД по отношению к КПД номинальному			
		100 % номиналь- ной мощности	75 % номиналь- ной мощности	50 % номиналь- ной мощности	25 % номиналь- ной мощности
11Д100	1100	1	0,9792	0,8858	0,6828
ДГ-72М	880	1	0,9794	0,8853	0,6826
ДГ-72М	880	1	0,9795	0,8855	0,6827
ДГ-73	690	1	0,9795	0,8855	0,6827
ДГА-315	315	1	0,9792	0,8855	0,6827
ДГА-320	320	1	0,9792	0,8855	0,6827
ДГРА-150	150	1	0,9795	0,8855	0,6828
ДГРА-160	160	1	0,9795	0,8855	0,6828
АСД-200	200	1	0,9796	0,8857	0,6826
АСД-100	100	1	0,9796	0,8857	0,6826
АД-60	60	1	0,9796	0,8857	0,6826
АД-30	30	1	0,9793	0,8858	0,6828
Средние по- казатели	407	1	0,9794	0,8855	0,6827
Уменьшение эффективно- сти, %	-	0	2,06	11,45	31,73

Как видно из таблицы, падение эффективного КПД при снижении нагрузки до 25, 50 и 75 % составляет в среднем 31,73, 11,45, 2,06 % соответственно, что является значительным с технической и экономической точек зрения.

С другой стороны, падение эффективности выработки полезной энергии ДГ более правильно рассматривать не как мгновенную величину, а как среднюю за определённый срок эксплуатации.

Для такого анализа систем стационарных ДВС, осуществляющих привод электрогенератора, работающего на нужды электроснабжения, были взяты реальные данные из источника [9], соответствующие графику изменения нагрузок электропотребления малого автономного поселения. Гистограмма с временной шкалой суток [9] приведена на рис. 2.

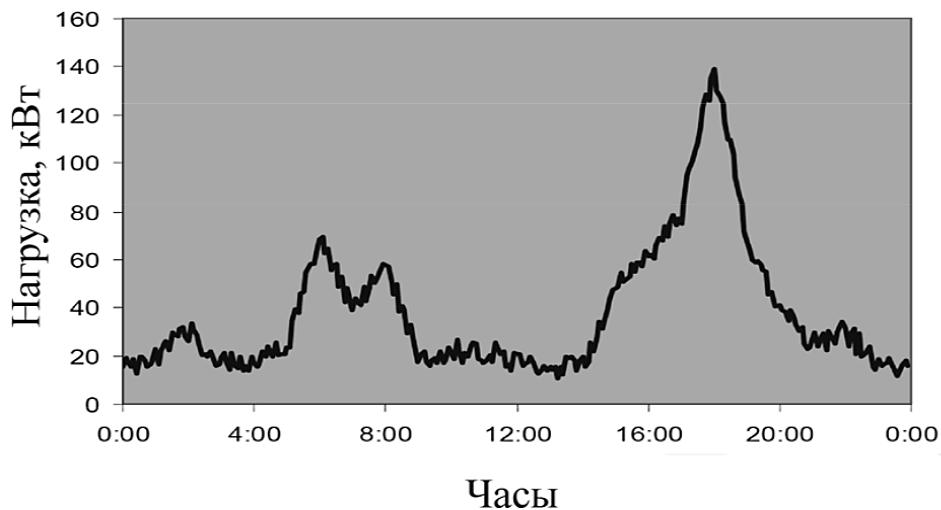


Рис. 2. Суточный график изменения электрических нагрузок малого автономного поселения

Как видно из гистограммы, значительную долю времени потребляемая нагрузка составляет доли от максимальной, что в условиях использования дизельной электростанции (ДЭС) означает значительное снижение эффективности выработки электроэнергии за счёт ухода двигателя ДГ с оптимальных режимов работы в сторону режимов частичных нагрузок.

С другой стороны, более обобщённые данные может дать анализ графика годовых нагрузок, характерным примером которого является рис. 3.

Как видно из графика, довольно длительный срок эксплуатации осуществляется на режимах частичных нагрузок, составляющих не более 80 % от максимальной. Перенося данные по динамике потребления электроэнергии в целом по ЕЭС на дизельные электростанции, мы получаем снижение эффективного КПД выработки электроэнергии примерно на 2 % (в соответствии с данными табл. 1). Однако следует учитывать, что данные динамики, представленные выше, отражают энергетический баланс для энергосистемы, охватывающей все типы электростанций (тепловые, атомные, гидроэлектростанции и т. д.). Это в большинстве случаев сильно контрастирует с энергетической динамикой ДЭС, наиболее часто применяющихся в регионах, отдалённых от единой энергетической системы и не присоединённых к ней, осуществляющих отпуск электроэнергии в локальную сеть, в которой суточные и годовые колебания потребляемых мощностей от совокупности частных потребителей не компенсируется потреблением электроэнергии со стороны производств и перебросом электроэнергии по смежным электросетям ввиду отсутствия и тех, и других, и оттого могут быть более значительны, чем в приведённом примере.

Важность анализа данных графиков изменения нагрузки для суточного, и годового временных интервалов возникает от того, что для некоторых регионов мира годовые колебания нагрузок позволяют организовывать системы электроснабжения с использованием ДЭС при питании от нескольких единиц ДВС таким образом, что в сезоны с низким уровнем потребления часть двигателей находится в простое. В связи с этим вычисление средней загрузки ДВС по всей станции необходимо выполнять с поправкой на суммарный объём энергии, сгенерированный при определённой загрузке двигателя.

Исходя из вышесказанного, одна из наиболее важных задач управления ДВС представляется в виде определения наиболее эффективного способа регулирования двигателей на промежуточных нагрузках с целью достижения наибольшей их эффективности.

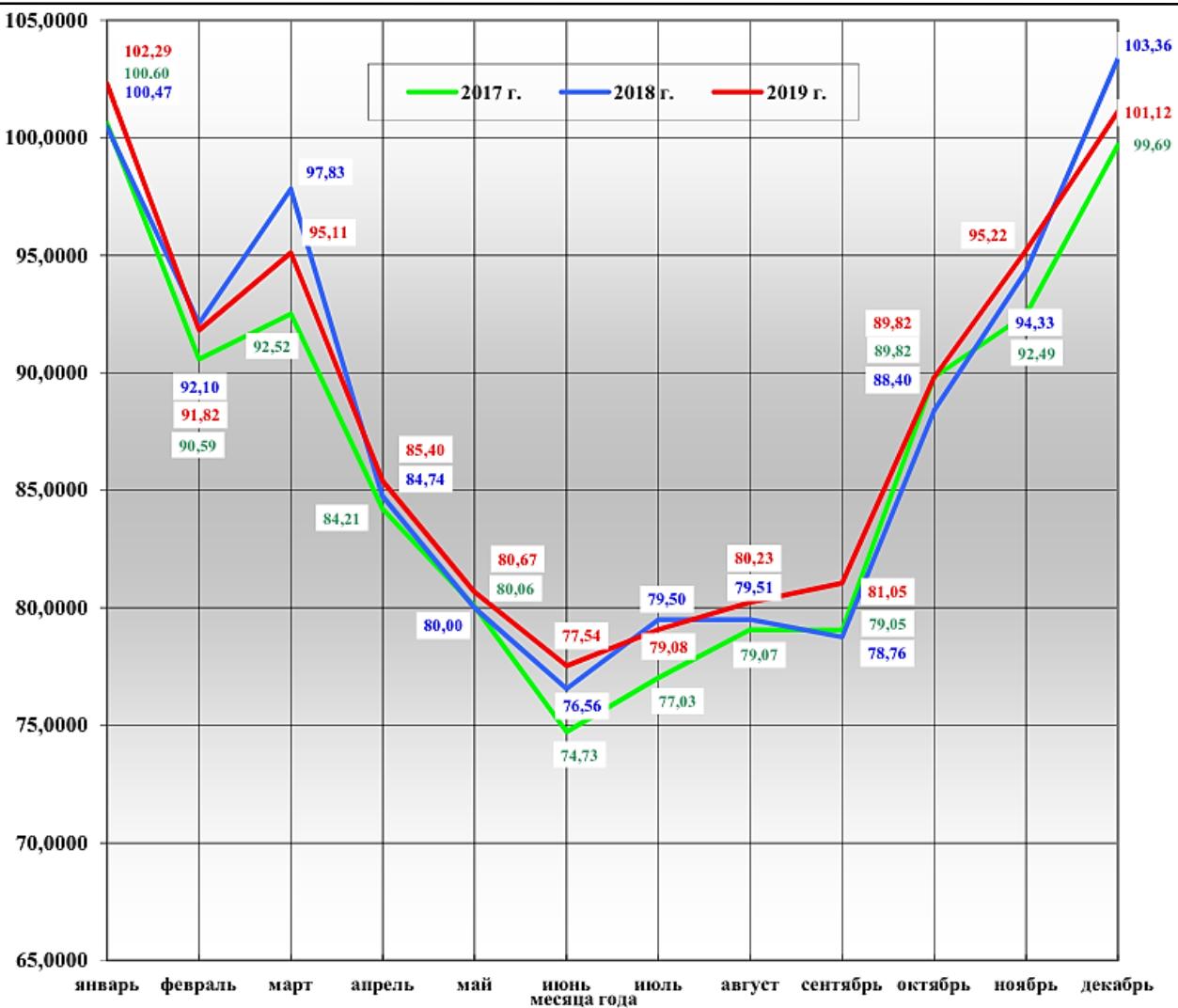


Рис. 3. Годовой график изменения потребления электроэнергии для ЕЭС (единой энергетической системы) России (2017-2019 гг.)

Из проведённого анализа способов регулирования нагрузок двигателей ДГ в качестве наиболее часто применяемых можно выделить следующие:

- изменение цикловой подачи топлива;
- изменение угла опережения впрыска;
- изменение фракционного состава топлива;
- изменение количества задействованных в работе двигателя цилиндров;
- управление временем открытия впускных и выпускных клапанов;
- изменение давления наддува;
- изменение степени рециркуляции.

Изменение цикловой подачи топлива. Несмотря на наличие некоторых редких способов регулирования рабочего объёма цилиндра, подавляющее большинство ДВС конструктивно выполнены таким образом, который не позволяет изменять рабочий объём во время их работы. Поэтому объём поступающего воздуха на каждом цикле без осуществления регулируемого давления наддува остаётся примерно постоянным. При этом объём впрыскиваемого топлива практически не оказывает на него влияние после образования топливно-воздушной смеси (ТВС) в связи с его малостью, что позволяет не учитывать в приближённых расчётах влияние впрыска топлива на общий объём ТВС. Таким образом, в идеализированном термодинамическом процессе сгорания топлива

к одной и той же массе рабочего тела за счёт изменения массы впрыскиваемого топлива возможно подведение в ходе цикла различной величины теплоты, что приводит к изменению мощности двигателя.

В техническом плане регулирование цикловой подачи (масс впрыскиваемого в ходе одного цикла топлива) у двигателя, работающего по циклу Дизеля, осуществляется изменением доли перепуска топлива из системы высокого давления в систему низкого.

При этом существуют две основные системы, связанные с характером осуществления процесса перепуска: плунжерные и клапанные.

В плунжерных системах с помощью так называемой топливной рейки производится изменение угла поворота плунжера плунжерной пары относительно её основного состояния. За счёт выполненного в нём профилированного канала, соединяющего проводящим каналом его головку (область высокого давления) с заранее заданным местом на боковой поверхности, которое в свою очередь соосно с топливоперепускным отверстием на золотнике, ведущем во внутренний блок топливного насоса высокого давления (ТНВД), путём варьирования угла поворота плунжера можно добиться более раннего или более позднего начала процесса перепуска топлива относительно такта хода плунжерной пары. За счёт этого возникает изменение фактического объёма подачи топлива в форсуночный тракт.

В клапанных системах рабочий объём плунжерной пары соединяется каналом с клапаном на механическом приводе. В момент движения плунжерной пары в сторону уменьшения обозначенного объёма и в течение заданного времени после этого клапан остаётся открытым, позволяя топливу из пространства плунжерной пары свободно перетекать в топливное пространство ТНВД. После закрытия данного клапана оставшийся в камере объём топлива подаётся под давлением в систему форсунок. Изменением временного промежутка между моментом начала хода сжатия у плунжерной пары и моментом закрытия перепускного клапана достигается варьирование подаваемого на форсунку объёма топлива.

Отдельно стоит упомянуть систему регулирования объёма топливоподачи за счёт регулирования хода иглы внутри форсунки, который определяет продолжительность акта впрыска и гидравлическое сопротивление в самой форсунке.

Однако описанный способ, связанный с варьированием топливоподачи, обладает несколькими недостатками. Например, в условиях малых нагрузок на ДВС значительная доля теплоты уходит на бесполезное нагревание чрезмерных объёмов воздуха (в связи с постоянством объёма цилиндра), таким образом приводя к значительным потерям тепла в окружающую среду. Кроме того, сгорание топлива вдалеке от стехиометрического отношения негативно сказывается на экологических аспектах, создавая условия для повышенной эмиссии токсичных газов и продуктов неполного сгорания в атмосферу.

Изменение угла опережения впрыска. При изменении нагрузки на ДВС изменяется цикловая подача топлива. Изменившийся объём топлива требует иного времени на проведение процедуры впрыска и распыления с целью образования оптимальной ТВС, прежде чем рациональным будет осуществлять поджог смеси. Поскольку в дизельных ДВС поджог ТВС осуществляется за счёт достижения определённой степени сжатия и повышения температуры до точки воспламенения, то изменение продолжительности процесса впрыска и распыления топлива осуществляется путём изменения отрезка времени, разделяющего момент начала впрыска топлива и момент его воспламенения. Данный промежуток времени называется углом опережения впрыска. Увеличение угла опережения впрыска рационально в случаях изменения нагрузок на ДВС в положительную сторону, т. к. благодаря увеличившейся задержке больший объём топлива успевает равномерно распределиться по камере сгорания, тем самым положительно сказываясь на полноте и скорости процесса сгорания, а также увеличение угла опережения впрыска может быть рационально и в случае увеличения частоты вращения. Кроме того, большая задержка во времени (больший угол опережения) создаёт условия для образования более равномерной и насыщенной ТВС, что может влиять как на мощность, так и на эффективный КПД двигателя.

В техническом плане существуют три основных решения по реализации изменения угла опережения впрыска, практически реализующих один и тот же принцип: механическое, электрическое и гидравлическое.

В случае механического регулирования угла опережения к ТНВД через систему зубчатых колёс или непосредственно к его валу подключается дополнительное устройство, называемое муфтой опережения впрыска. Через данное устройство осуществляется привод ТНВД таким образом, что заданное изменение угла поворота данной муфты относительно вала привода топливного насоса изменяет момент времени, разделяющий движение поршней внутри цилиндров и положение кулачкового вала внутри ТНВД. При увеличении частоты вращения двигателя находящиеся внутри муфты подвижные грузы под действием центробежной силы смещаются относительно прежнего положения по проточенным в присоединённом к муфте ведомом диске (от которого осуществляется привод самого кулачкового вала) каналам, тем самым вызывая угловое смещение вала привода ТНВД относительно муфты. В результате этого угол опережения впрыска увеличивается.

В электрическом и гидравлическом методах достигается схожая ситуация, когда смещение кулачкового вала ТНВД осуществляется электрическим приводом или за счёт поворота вала под действием давления масла.

Несмотря на широкое применение и необходимость регулирования угла опережения впрыска для стабильной и эффективной работы дизельного двигателя, изменение угла опережения впрыска плохо подходит для управления мощностью двигателя, т. к. выполняет в первую очередь функцию управления смесеобразованием, что может оказывать лишь косвенное влияние на процесс управления нагрузкой, и оттого при применении в этой роли неизбежно приводит к возникновению нарушений в работе ДВС, приводя к таким негативным явлениям, как детонация топлива, неполное его сгорание, повышение тепловых нагрузок на цилиндр.

Изменение фракционного состава топлива. Одним из наиболее редких способов является изменение фракционного состава топлива. Путём смешения лёгких и тяжёлых фракций дизельного топлива в различных пропорциях возможно регулирование температуры воспламенения ТВС. За счёт изменения температуры воспламенения возможно варьирование степени сжатия в цилиндре (т. к. она ограничена сверху достижением точки самовоспламенения ТВС), что при осуществлении необходимого управления величиной запаздывания при открытии впускных клапанов относительно тактов двигателя позволяет изменять как выдаваемую двигателем мощность, так и эффективный КПД. Однако данный способ требует достаточно сложных технических решений для своей реализации, в связи с чем применяется достаточно редко и ограниченно.

Изменение количества задействованных в работе двигателя цилиндров. При проектировании ДВС больших мощностей возникает проблема их перевода на режим частичных нагрузок, т. к. сокращение объёмов цикловой подачи топлива приводит, во-первых, к значительному снижению эффективности работы, а во-вторых, к неспособности обеспечить стабильную работу двигателя в условиях низких нагрузок.

В таких условиях достаточно разумной мерой является изменение количества задействованных в работе цилиндров. При этом в работающих цилиндрах поддерживаются оптимальные и эффективные режимы работы. Недостатками данного способа являются повышенные внутренние потери на трение, возможность применения лишь для диапазонного изменения нагрузок, а также необходимость применения специальной автоматики, усложняющей конструкцию ДВС и ухудшающей его надёжность.

Управление временем открытия впускных и выпускных клапанов. Из вышесказанного совершенно очевидным становится тот факт, что уменьшение расхода воздуха (или, более конкретно, наполнимости цилиндра воздухом) на режимах нагрузок, меньших относительно номинальных, благоприятно сказывается на эффективности ДВС за счёт меньших потерь тепла в окружающую среду с отработавшими газами, а также за счёт улучшения процесса сгорания как такового. Одним из вариантов осуществления данного изменения является регулирование времени открытия и закрытия впускных или выпускных клапанов (цикл Миллера). В соответствии с этой

идеей в момент начала такта всасывания впускные клапаны находятся в закрытом состоянии, открываясь с некоторой временной задержкой. За счёт этого в цилиндр поступает объём (в перерасчёте из массы на стандартные условия) воздуха меньший, чем объём самого цилиндра. Другим вариантом реализации данного цикла является увеличение времени задержки до закрытия выпускных клапанов во время такта сжатия. За счёт этого часть избытка воздуха, поступившего в цилиндр во время такта впуска, вытесняетсядвигающимся в сторону верхней мёртвой точки (ВМТ) поршнем, однако этот метод является менее продуктивным, т. к. на момент начала впрыска топлива выпускные клапаны должны быть закрыты во избежание потерь образующейся ТВС. В свою очередь эта необходимость ограничивает возможный к вытеснению объём воздуха, т. к. после впрыска топлива происходит образование ТВС, требующее определённого времени.

Несмотря на то что описанный способ управления ДВС является опосредованным по отношению к изменению рабочего объёма цилиндра и оттого считается достаточно эффективным, он запрашивает отдельное устройство привода клапанов или же устройство смещения начального положения кулачкового вала, что в свою очередь усложняет конструкцию и сложноосуществимо без существенной модификации двигателя.

Изменение давления наддува. На данный момент в дизельном двигателестроении широко распространена методика повышения наполняемости цилиндра воздухом за счёт повышения давления всасывания. Увеличение давления всасывания приводит к увеличению массы поступающей в ходе этого процесса в цилиндр воздуха, за счёт чего, при сохранении одного и того же массового отношения топливо/воздух, возможно осуществление большей величины поступающей в ходе цикла теплоты.

Повышение давления наддува осуществляется в свою очередь добавлением в конструкцию по ходу воздушного тракта двигателя специального компрессорного устройства, которое получает своё питание от газовой турбины через передачу от вала двигателя или от электрического привода. При этом регулирование скорости вращения ротора компрессорного устройства может осуществляться путём варьирования параметров электропитания в случае электрического привода или путём применения редукционно-передаточного устройства между валом ДВС и валом компрессора. Однако ввиду технической сложности реализации узла передачи в механическом приводе последний зачастую оказываетсянерегулируемым и частота его вращения пропорциональна частоте вращения двигателя. По этой причине положительная прибавка к мощности двигателя на номинальных нагрузках при применении наддува имеет недостаток на промежуточных нагрузках. Дополнительная масса воздуха, поступающая в цилиндр при малых нагрузках, приводит по механизму, описанному выше, к дополнительным потерям теплоты в окружающую среду и тем самым снижает эффективность двигателя в целом.

Изменение степени рециркуляции. Как уже было сказано выше, избыток воздуха в цилиндре ДВС приводит к снижению его экономичности, таким образом, достижение обратной ситуации может привести к обратным последствиям. Для этого в начале цикла всасывания в ДВС направляются отработавшие газы путём пропуска их через регулируемый заслонкой тройник, связанный с всасывающим трактом ДВС, которые частично разбавляются присасываемым из атмосферы воздухом. При этом часть теплоты, которая должна была покинуть цикл, вновь в него возвращается, за счёт чего полезная работа, совершаемая двигателем, растёт при снижении потерь тепла в окружающую среду, за счёт чего достигается прирост эффективности. Однако данный метод приводит к тому, что часть отработавших газов проходит через цикл двигателя несколько раз, тем самым увеличивая суммарное время нахождения образованных в ходе горения химических соединений, что в свою очередь может приводить к ухудшению экологических параметров ДВС. Также необходимо учитывать, что в современном двигателестроении процесс регулирования степени рециркуляции выхлопных газов осуществляется резко ступенчато (заслонка зачастую принимает три возможных значения: полностью открыта, на рабочем режиме, полностью закрыта), что не может положительно сказаться на эффективности применения данного метода управления частичным нагрузками дизельного двигателя.

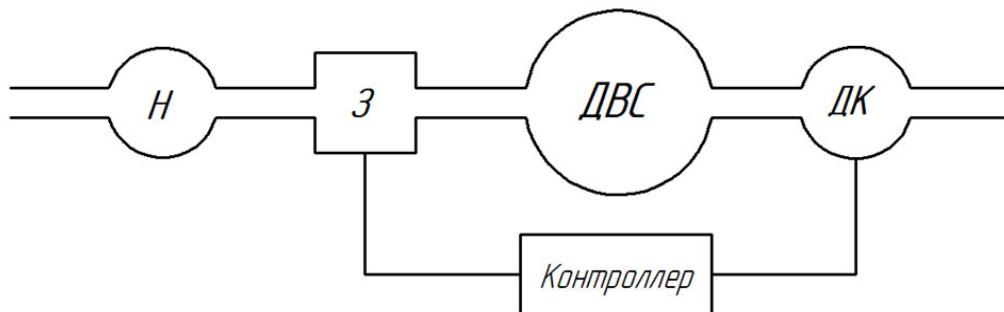
Выводы. Исходя из вышеописанной информации, можно сделать вывод о том, что наибольшей проблемой при регулировании ДВС, работающих по циклу Дизеля на режимах частичных нагрузок, является необходимость снижения ряда потерь, включающих потери на трение, потери, связанные с нарушением смесеобразования, и потери тепла с отработавшими газами, где последние, безусловно, играют наибольшую роль. Во время работы ДВС на малых нагрузках, когда полезно утилизируемая мощность невелика, паразитные нагрузки и неустранимые потери могут приводить к снижению КПД более чем на 40 %, что оказывает значительный материальный и экономический ущерб их эксплуататорам. В связи с этим возникает потребность в создании такого способа регулирования ДВС в данных режимах, который будет удовлетворять следующим требованиям:

1. простоте, выраженной в том, что его техническая реализация в рамках уже устоявшегося двигателестроения не будет вызывать серьёзных рисков снижения надёжности;
2. дешевизне, выражющейся в том, что его применение с учётом необходимых дополнительных вложений будет являться экономически обоснованным;
3. экологической безопасности, выраженной в том, что использование этого способа не будет приводить к росту удельной эмиссии токсичных газов относительно не модернизированного устройства;
4. универсальности, характеризующейся возможностью применения данного способа на широком модельном и техническом ряде уже применяющихся ДВС.

На основании проанализированной информации и выделенных критериев можно заключить, что наиболее перспективным способом регулирования ДГ, работающих по циклу Дизеля, на данный момент является управление объёмом поступающего в ходе цикла свежего воздуха. Такой тип регулирования имеет большое количество преимуществ, включающих в себя относительную простоту технической реализации, её дешевизну, а самое главное, возможность применения на уже имеющемся оборудовании без внесения значительных изменений в его конструкцию и, как следствие, снижения её надёжности. При этом индивидуальные особенности регулирования, предусмотренные в конкретном ДВС специальными системами, автоматикой, могут быть также использованы без значительных изменений, какие могут требовать иные способы регулирования нагрузкой.

Как показывает текущая практика, стационарные ДВС, применяемые в качестве ДГ, используют на данный момент регулирование, связанное с изменением объёмов топливоподачи, а также с изменением величины наддува [8]. Однако последнее выполняется лишь частично, только при использовании энергии отработавших газов для привода турбины турбокомпрессора, т. к. частота вращения двигателя при работе в составе ДЭС фиксирована, а значит, прямая кинематическая связь его с валом приводит к образованию статичной характеристики частоты вращения и вала компрессора. Таким образом, необходимость чёткого соблюдения частоты вращения обозначает невозможность регулирования давления наддува при механической связи компрессора с валом двигателя. В связи с этим на текущий момент имеются весьма значительные проблемы в области управления ДВС в составе ДЭС с целью повышения их эффективности, что, в свою очередь, актуализирует связанные с этим направления исследования.

Существует множество способов регулирования объёмного расхода газов, среди которых одним из простейших и наиболее предсказуемых является создание дополнительного газодинамического сопротивления по ходу движения газового потока. Путём регулирования степени перекрытия сечения по ходу течения газа возможны создание управляемого газодинамического сопротивления и, как следствие, контролируемое изменение расхода протекающей среды. Поэтому для решения обозначенной проблемы предлагается использовать устанавливаемую по ходу всасывающего воздушного тракта регулируемую по размеру проходного сечения диафрагму (см. рис. 4). При этом в зависимости от устройства воздушной системы двигателя места для наиболее рационального размещения диафрагмы будут различными.



Н – нагнетающее устройство, З – диафрагма-задвижка, ДВС – двигатель внутреннего сгорания, ДК – датчик содержания кислорода

Рис. 4. Простейшая форма реализации управления расходом воздуха с помощью диафрагмы-заслонки

При отсутствии наддува целесообразнее всего устанавливать диафрагму после воздушного фильтра двигателя с целью уменьшить влияние имеющихся во всасываемом воздухе механических загрязнений на надёжность и долговечность устройства.

В случае двигателя с установленной системой наддува принципиально возможно выделить три места для установки диафрагмы. Для систем с турбокомпрессорным наддувом логичнее всего устанавливать две диафрагмы по ходу выпускного тракта двигателя: первую – на участке, ведущем на турбинную часть турбокомпрессора, вторую – на участке, ведущем в выхлопную систему. Таким образом, частично перекрывая поток на турбину и синхронно приоткрывая на выхлопную систему, можно добиться изменения объёмов проходящего через турбину турбокомпрессора воздуха, тем самым уменьшив его частоту вращения и величину давления наддува. При этом за счёт открытия второй диафрагмы не наступает повышение давления в выпускном тракте, что положительно сказывается на газообменных процессах в ДВС.

В случае двигателя с системой наддува, использующего энергию для своего привода от вала двигателя, возможна как установка системы перепуска воздуха между всасывающей и нагнетающей частями компрессора, так и установка диафрагмы в нагнетающем тракте.

Первый случай установки рационален тогда, когда развиваемое давление нагнетания при полностью открытой диафрагме в тракте перепуска соответствует оптимальной величине при минимальной нагрузке, что для ДГ означает нахождение в зоне минимального потребления. Второй случай должен применяться в таких условиях, когда наиболее экономичная работа ДГ на режиме минимальной нагрузки создаётся при давлении во всасывающем тракте ниже атмосферного.

Таким образом, задачей дальнейшей работы является поиск оптимальных законов регулирования ДВС вышеуказанным способом для различных видов установки диафрагмы, где критерием оптимальности является достижение максимально возможного эффективного КПД, а также разработка самого устройства регулирования и сопутствующего ему оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карякин, А. Л. Выбор параметров электротехнического комплекса дизельной электростанции для систем питания потребителей первой категории особой группы / А. Л. Карякин, Д. А. Булыгин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 228.
2. Гринкруг, Я. С. Определение оптимального распределения мощности нагрузки между дизель-генераторами в дизельной электростанции / Я. С. Гринкруг, В. А. Соловьёв, Ю. И. Ткачёва // Межвузовский сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – С. 168-171.
3. Технико-экономический анализ применения ветродизельных электростанций для электроснабжения энергоудалённых поселений / Е. Н. Соснина, А. В. Шалухо, И. А. Липужин, Т. А. Александрова // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2016. – №1. – С. 65-72.
4. Панкратов, Г. П. Двигатели внутреннего сгорания, автомобили, тракторы и их эксплуатация: учеб. / Г. П. Панкратов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1984. – 296 с.

5. Прогнозирование нагрузки на электросеть как способ эффективного управления потреблением электрической энергии / А. Д. Моргоева, И. Д. Моргоев, Р. В. Клюев, В. И. Ляшенко // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2021. – № 4. – С. 39-51.
6. Анисимов, Г. М. Лесотранспортные машины: учеб. пособие / Г. М. Анисимов, А. М. Кочнев; под ред. Г. М. Анисимова. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 448 с.
7. Зейнетдинов, Р. А. Влияние технического состояния ДВС на эффективность преобразования тепловой энергии / Р. А. Зейнетдинов // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: сборник научных трудов международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, Санкт-Петербург-Пушкин, 28-30 января 2016 года / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – Санкт-Петербург-Пушкин: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2016. – С. 379-383.
8. Гринкруг, Я. С. Управление режимами работы дизельных электростанций в автономных сетях электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Гринкруг Яков Соломонович. – Комсомольск-на-Амуре, 2006. – 170 с.
9. Лукутин, Б. В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями / Б. В. Лукутин, И. О. Муравлев, И. А. Плотников. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 120 с.



Колесник М. Б., Гудим А. С.
M. B. Kolesnik, A. S. Gudim

ИМИТАЦИОННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ГЕРМЕТИЧНОЙ ЗАДВИЖКИ

SIMULATION AND EXPERIMENTAL MODELING OF THE ELECTROMECHANICAL DRIVE OF A SEALED VALVE

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

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

Гудим Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, декан факультета энергетики и управления Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: feu@knastu.ru.

Alexander S. Gudim – PhD in Engineering, Associate Professor, Dean of the Faculty of Energy and Management, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: feu@knastu.ru.

Аннотация. В статье предложена методика проектирования силового узла системы, а именно электроприводов линейного перемещения, на примере привода герметичной задвижки. Описаны её основные этапы, дано подробное объяснение каждого из них. Приведены возможные способы снижения требуемой мощности от приводного двигателя, повышающие экономическую и энергетическую эффективность электромеханической системы в целом. Представлены исходная и конечная модели привода герметичной задвижки. Рассчитана требуемая мощность асинхронного короткозамкнутого двигателя. Приведена структурная схема для моделирования пусковых характеристик двигателя. Построены пусковые характеристики. Собран экспериментальный стенд для оценки работоспособности винтовой передачи и её передаточных возможностей. Получены предварительные результаты. Сформулирован план дальнейших действий.

Summary. The article proposes a method for designing the power unit of the system, namely linear displacement electric drives on the example of a sealed valve drive. Its main stages are described, a detailed explanation of each of them is given. Possible ways of reducing the required power from the drive motor, increasing the economic and energy efficiency of the electromechanical system as a whole are given. The initial and final drive model of a sealed valve is presented. The required power of an asynchronous short-circuited motor is calculated. A block diagram for modeling the starting characteristics of the engine is given. The starting characteristics are constructed. An experimental stand has been assembled to evaluate the operability of the helical transmission and its transmission capabilities. Preliminary results have been obtained. A plan of further actions has been formulated.

Ключевые слова: привод герметичной задвижки, методика, SolidWorks Simulation, SimInTech, модель, экспериментальный стенд.

Key words: sealed valve drive, methodology, SolidWorks Simulation, SimInTech, model, experimental stand.

УДК 621.31:621.25

Введение. На сегодняшний день по магистральным трубопроводам перекачивается более 99 % всей добываемой нефти и 100 % природного газа. При этом поставляемый трубопроводным транспортом объём нефти одной из ведущих нефтяных компаний России за 2021 г. составил почти 450 млн т. Кроме того, общий грузооборот страны, осуществляется трубопроводным транспортом, стремится к 50 % и превышает в этом отношении железнодорожный транспорт. Поэтому важным и необходимым мероприятием для уменьшения экономического ущерба от утечки нефти

или природного газа ($\approx 1,7$ млрд р.), простоя на время ремонта или устранения неисправности в трубопроводе и вредного воздействия на окружающую среду при повреждении его участка является контроль за состоянием трубопровода и оперативное перекрытие в случае утечки.

Причиной внезапных утечек могут быть не только техническая неисправность металлоконструкций, но и диверсионные и террористические действия. Примером таких противоправных действий является подрыв 26 сентября 2022 г. части магистральных газопроводов, связывающих Россию и Германию («Северный поток – 1» и «Северный поток – 2»).

Также в связи со сложившимися отношениями России с внешним миром компаний, в том числе «Газпром», начали искать замену европейскому рынку. Для изменения направления экспорта планируется построение новых газопроводов, получивших следующие названия: «Сила Сибири 1, 2 и 3» и «Пакистанский поток». На сегодняшний день газопровод «Сила Сибири» введён в эксплуатацию, но не на полную мощность, остальные газопроводы находятся на этапе планирования строительства. Открытие последнего газопровода намечено на 2030 г. Общая протяжённость построенных линий составит почти 11 тыс. км. Кроме того, мировой рынок газа к 2050 г. практически удвоит свои позиции.

Таким образом, актуальным и перспективным направлением развития нефтяной промышленности является разработка установок, обеспечивающих непрерывный контроль состояния трубопровода и в случае аварии оперативную локализацию повреждённого участка.

Авторы статьи предлагают свою разработку, в которой роль привода заслонки выполняет привод герметичной задвижки. Чтобы осуществить перемещение заслонки в запорной арматуре, необходимо организовать пуск приводного двигателя в соответствии с заданными ограничениями. Для этого необходимо знать величины всех влияющих на пусковые характеристики факторов. Поэтому прежде чем начинать моделировать пусковые и регулировочные характеристики двигателя, нужно сначала определить его мощность, а также размерные соотношения исполнительного механизма, материалы, из которых будет производиться изготовление физической модели, и т. д. Результаты всех этих этапов влияют на конечную требуемую мощность двигателя и, соответственно, на экономическую и энергетическую эффективность всей системы, поэтому для повышения показателей необходимо использование систем автоматизированного проектирования. Модели и результаты расчётов, приведённые в статье, выполнены в пакете SolidWorks Simulation, выбор которого обусловлен удобством использования и профессиональным уровнем программы, рекомендуемой для решения инженерных задач.

Разработка модели привода. Исходными данными для решения прикладной задачи являются: давление в трубопроводе P_N ; средняя скорость течения жидкости в канале w_0 ; диаметр трубопровода D_N ; конструкция и материал запорной арматуры. Так как описываемая ниже методика проектирования показана на примере задвижки нефтепровода, то в качестве исходных данных для проектирования примем параметры в магистральных нефтепроводах: $P_N = 10$ МПа; $w_0 = 3$ м/с; $D_N = 300$ мм.

Исходная модель привода герметичной задвижки заданного диаметра приведена на рис. 1.

Для выбора мощности двигателя, размерных соотношений исполнительного элемента и других компонентов электромеханической системы необходимо знать максимальные нагрузки, которые в ней создаются. Для реализации системы управления также необходима информация о том, как изменяются нагрузки во всём диапазоне перемещения заслонки (клина) в сечении трубопровода. Для её получения используем модуль пакета SolidWorks Flow Simulation, в котором можно осуществить моделирование потоков течения различных сред с выводом результирующих сил, действующих на детали модели. Для упрощения и сокращения времени работы расчёты производились с использованием воды в качестве среды, протекающей в трубопроводе, поскольку её параметры внесены в базу данных пакета SolidWorks, в отличие от параметров нефти, которая к тому же по своим характеристикам может сильно отличаться в зависимости от места добычи.

Для определения нагрузок необходимо весь диапазон перемещения заслонки разделить на определённое количество участков и в каждом её фиксированном положении выполнить инженерный расчёт моделирования потоков течения жидкости в задвижке.

В ходе решения задачи были рассмотрены два способа: изменение параметров канала в области заслонки и изменение формы клина. Для подтверждения возможности и правильной реализации изменения параметров канала необходимо знание теории гидравлических и аэродинамических процессов. Согласно современной теории, при номинальном диаметре трубопровода 300 мм сужение в области задвижки до 200 мм является допустимым и не влечёт за собой больших потерь. Для минимального увеличения местных гидравлических сопротивлений в результате изменения формы канала необходимо проектировать модель с оптимальными параметрами. В примере, описанном ниже, угол сходимости конфузора принят равным 40° , угол конусности диффузора принят $9,2^\circ$. Величина угла конусности обусловлена ограниченностью габаритов запорной арматуры. Полученная конструкция модели корпуса задвижки, вид сбоку, приведена на рис. 2.

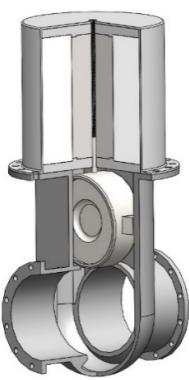


Рис. 1. Исходная модель задвижки

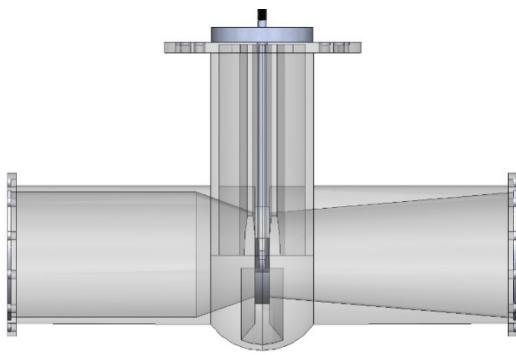


Рис. 2. Конструкция модели корпуса задвижки в разрезе

Гидравлические расчёты в модуле Flow Simulation показали, что сужение диаметра с 300 до 200 мм приводит к увеличению падения давления в задвижке лишь на 0,05 %, а расчёты численными методами – менее чем на 1 %, что пренебрежимо мало по сравнению с тем, что мощность приводного двигателя в таком случае снижается более чем в 3,5 раза.

Вторым способом снижения максимальной нагрузки является изменение формы клина. Жидкость, протекающая в трубопроводе, действует непосредственно на поверхность заслонки, поэтому её конструкция оказывает значительное влияние на вид тяговых характеристик и, как следствие, на необходимую мощность, отбираемую от двигателя. Для определения зависимостей изменения сил, действующих на поверхность заслонки, от её формы были исследованы пять разных моделей. Конечная модель приведена на рис. 3.

Таким образом, поверхности заслонки должны быть параллельны друг другу, а её толщина должна быть минимальной, чтобы уменьшить выталкивающую силу, действующую на клин в направлении снизу вверх в процессе закрытия. Второй причиной уменьшения толщины и, как следствие, массы является усиление её влияния при снижении рабочего давления, увеличении диаметра трубопровода и изменении перекачиваемой среды на газообразную. Масса исходного клина составляет порядка 60 кг, а конечного – 6,5 кг, что почти в 10 раз меньше массы исходной модели. Также необходимо, чтобы клин выдерживал нагрузки, действующие на него со стороны потока жидкости, поэтому при каждом изменении формы необходимо производить расчёт на прочность.

Следующим этапом проводятся опыты в пакете Flow Simulation, в результате которых получают значения сил, действующие на клин задвижки в каждом его положении. Далее массив данных пересчитывается и строятся тяговые характеристики для всех контрольных случаев конструкции задвижки: для исходной модели, для модели с изменённой формой клина и для модели с изменённой формой клина и сужением пропускного канала.

Следующим этапом является подбор геометрических соотношений исполнительного механизма. Для этого составляется план исследования, по которому последовательно выполняются

расчёты на прочность исполнительного механизма с различными параметрами. План исследования приведён в табл. 1. Опыты выполнялись в модуле *Simulation*. Расчёты в плане желательно выстраивать в порядке возрастания вращающего момента, необходимого для создания требуемого тягового усилия. В качестве нагрузки, задаваемой при расчётах, выбираем наибольшее значение, которое принимает тяговая характеристика. В данном примере её величина составляет 47,127 кН. В результате проведённых экспериментов выбираем исполнительный элемент с名义альным диаметром резьбы $d = 14$ мм и шагом $P = 2$ мм. Запас прочности механизма составляет $n = 2,059$.

Разработанная модель привода герметичной задвижки приведена на рис. 4.

Таблица 1

Результаты исследования исполнительного механизма

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F , кН	47,127	47,127	47,127	47,127	47,127	47,127	47,127	47,127	47,127	47,127
d , мм	14	14	16	18	16	20	18	22	20	22
d_2 , мм	13,0	12,5	15,0	17,0	14,0	19,0	16,0	21,0	18,0	20,5
P , мм	2	3	2	2	4	2	4	2	4	3
n	2,059	1,742	2,296	2,773	1,961	3,01	2,691	4,414	2,209	4,845

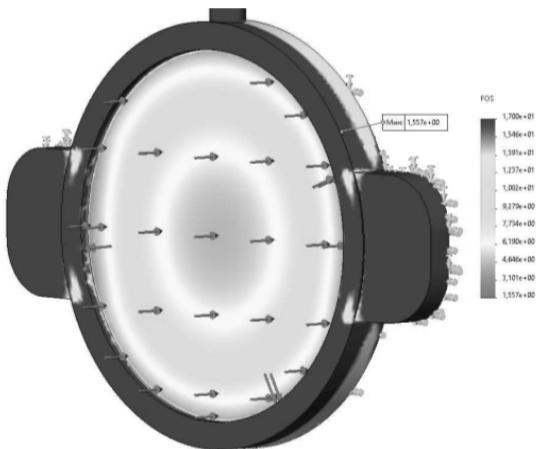


Рис. 3. Конечная модель клина

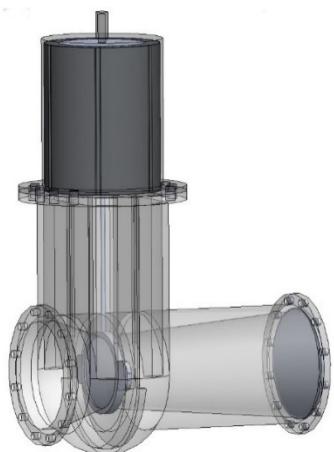


Рис. 4. Конечная модель привода герметичной задвижки

Моделирование пуска в пакете SimInTech. Для реализации пуска в пакете *SimInTech* была построена структурная модель, которая приведена на рис. 5.

Далее необходимо задать параметры источника питания, нагрузки и свойства асинхронного двигателя: номинальные параметры и параметры схемы замещения. Параметры схемы замещения, заданные с учётом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния, приведены на рис. 6.

На рис. 7 приведены пусковые и механические характеристики асинхронного двигателя, смоделированные в программе. Они имеют сходство с графиками, полученными в результате аналитических вычислений.

Для отражения эффективности применения частотного преобразователя при пуске для примера примем одно условие – уменьшение времени разгона двигателя. Для этого сначала запустим двигатель напрямую на номинальную частоту сети, а затем – с плавным её изменением. На рис. 8 приведены графики пусковых характеристик при разных параметрах.

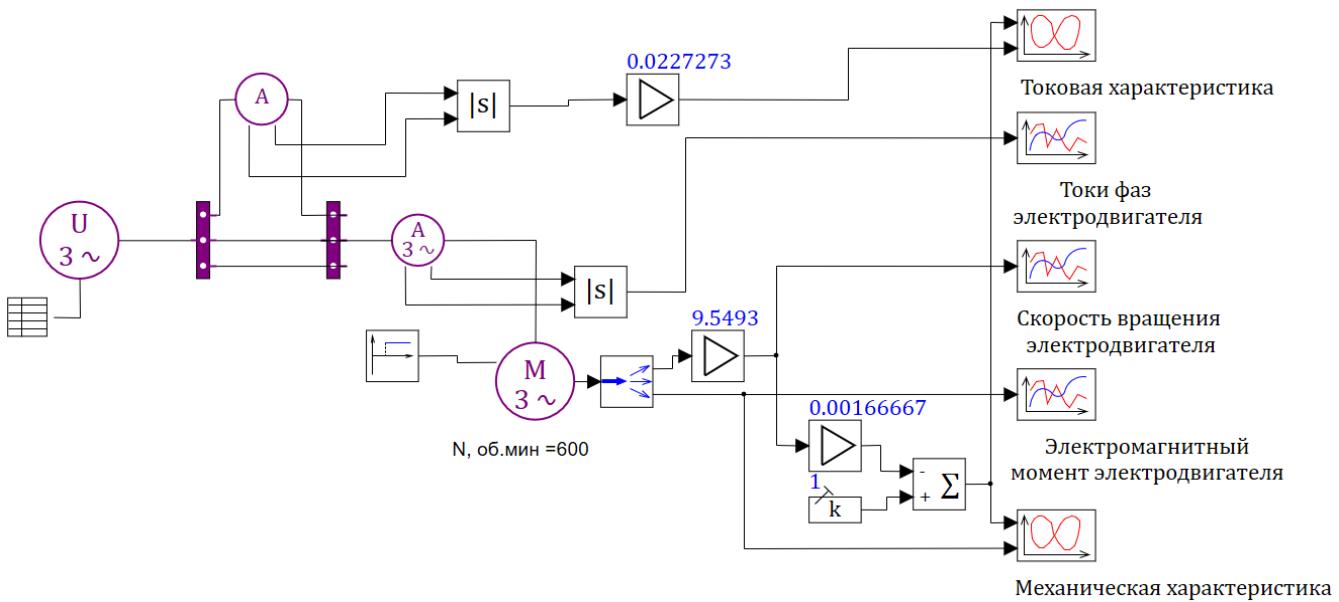


Рис. 5. Структурная модель

Название	Имя	Формула	Значение
Номинальные			
Тип	TYPE		ВАН 14-26-10
Номинальная мощность, кВт	Pnom		320
Номинальное напряжение, В	Unom		6000
Номинальная частота питающей сети, Гц	fnom		50
Номинальная частота вращения, об/мин	Nnom		590
Число пар полюсов	p		5
Момент инерции, кг·м ²	J		150
Номинальный момент, Н·м	Mnom	5179.27950400744	5179.2795
Схема замещения			
Сопротивления статора [Xls, Rs], Ом	Zs		[10.401841, 1.5062735]
Сопротивление намагничивания [Xm], Ом	Zm		[154.55927]
Сопротивление ротора при s=0 [Xlr0, Rr0], Ом	Zr_s0		[9.7486986, 1.411693]
Сопротивление ротора при s=1 [Xlr1, Rr1], Ом	Zr_s1		[8.0651097, 3.4781127]
Расчет параметров схемы замещения			
Номинальный коэффициент мощности (CosF)	CosF		0.762
Номинальный КПД, %	Eff		91.8
Кратность максимального момента, о.е.	Mmax_oe		2.2
Кратность пускового момента, о.е.	Mp_oe		0.94
Кратность пускового тока, о.е.	Ip_oe		4.2
Коэффициент степени моментной характеристики	MA		1
Рассчитать параметры схемы замещения	calculate		0
Записать расчетные параметры в свойства	write_c		0
Сопротивления статора [Xls, Rs], Ом	Zs_c		[10.401841, 1.5062735]
Сопротивление намагничивания [Xm], Ом	Zm_c		[154.55927]
Сопротивление ротора при s=0 [Xlr0, Rr0], Ом	Zr_s0_c		[9.7486986, 1.411693]
Сопротивление ротора при s=1 [Xlr1, Rr1], Ом	Zr_s1_c		[8.0651097, 3.4781127]

Рис. 6. Параметры двигателя

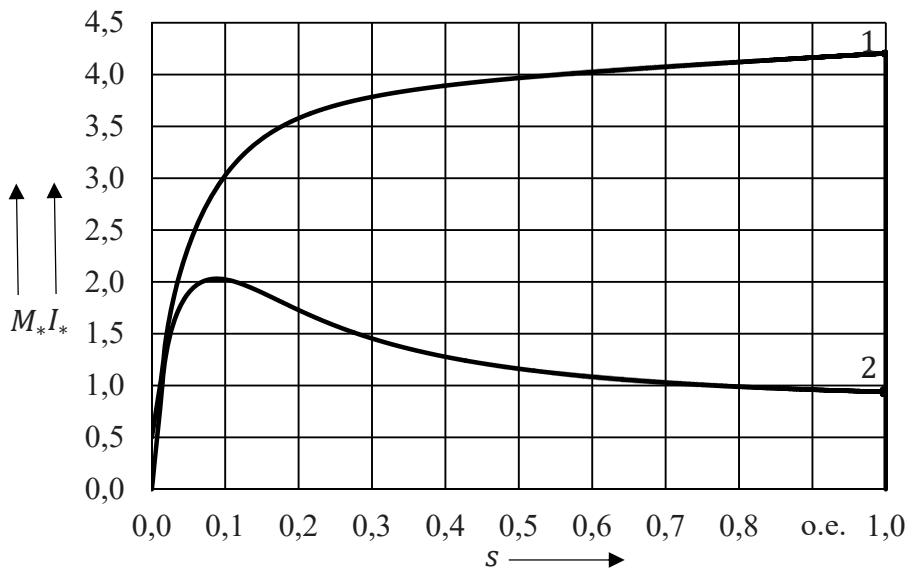
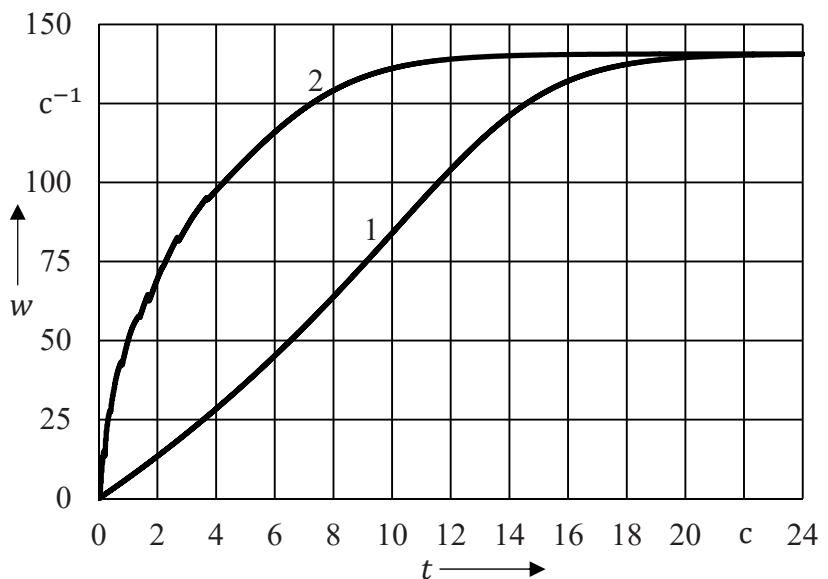
1 – Зависимость $M_* = f(s)$; 2 – Зависимость $I_* = f(s)$

Рис. 7. Пусковые характеристики

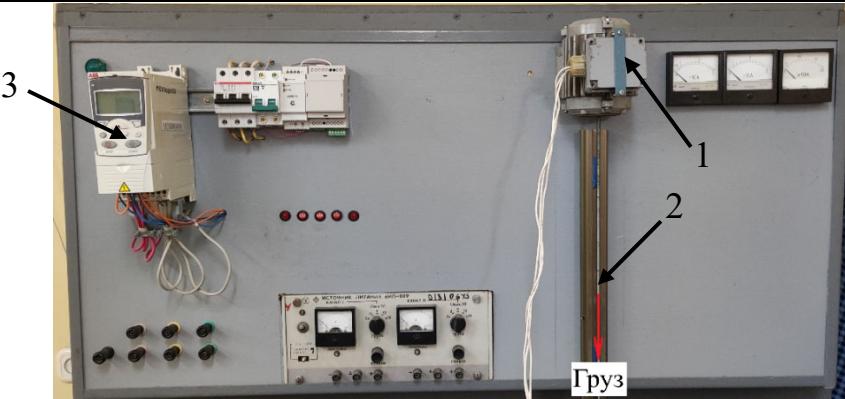
По приведённым кривым видно, что время переходного процесса (разгон двигателя) при изменении частоты уменьшилось примерно на 35 %. Аналогично, грамотно задавая параметры пуска и регулирования в частотном преобразователе, можно добиться выполнения заданных условий.



1 – прямой пуск; 2 – пуск при изменении частоты питания

Рис. 8. Графики переходных процессов

Экспериментальная установка. После завершения работ в пакете автоматизированного проектирования необходимо было перейти к практическим испытаниям. Для экспериментальной оценки работоспособности винтовой передачи и её передаточных возможностей был собран стенд. Внешний вид стендса с позициями приведён на рис. 9.



1 – электродвигатель; 2 – тяга; 3 – частотный преобразователь

Рис. 9. Испытательный стенд

Заключение. Таким образом, разработана методика проектирования электроприводов линейного перемещения на примере привода герметичной задвижки. Описаны её основные этапы, дано подробное объяснение каждого из них. Приведены возможные способы снижения требуемой мощности от приводного двигателя на примере изменения параметров канала в области заслонки и изменение формы клина, повышающие экономическую и энергетическую эффективность электромеханической системы в целом. Представлена исходная и конечная модель привода герметичной задвижки. Рассчитана требуемая мощность асинхронного короткозамкнутого двигателя. Построены пусковые характеристики. Собран экспериментальный стенд для оценки работоспособности винтовой передачи и её передаточных возможностей. Получены предварительные результаты. Проведённый выше расчёт является основой для дальнейших практических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

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

Ким К. К., Иванов С. Н., Колесова А. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОВОЛНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВО ВЗАИМНО
ПЕРЕМЕЩАЮЩЕЙСЯ КОНТАКТНОЙ ПАРЕ

Ким К. К., Иванов С. Н., Колесова А. В.

K. K. Kim, S. N. Ivanov, A. V. Kolesova

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОВОЛНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВО ВЗАИМНО ПЕРЕМЕЩАЮЩЕЙСЯ КОНТАКТНОЙ ПАРЕ

MODELING OF ELASTIC-WAVE INTERACTIONS IN A MUTUALLY MOVING CONTACT PAIR

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

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

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

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

Колесова Анна Владимировна – старший преподаватель кафедры электротехники и теплоэнергетики Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: toe@pgups.ru.

Anna V. Kolesova – Senior Lecturer, Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University Emperor Alexander I (Russia, Sankt-Petersburg). E-mail: toe@pgups.ru.

Аннотация. Повышение скоростей движения электрифицированного транспорта связано с проблемой обеспечения качества процесса токосъёма. Задача создания условий для надёжной передачи электрической энергии требует рассмотрения взаимодействия токоприёмника движущегося средства с контактным проводом. С точки зрения теоретической механики процесс взаимодействия двух колебательных систем характеризуется случайно изменяющейся степенью связи. Аналитически получены выражения для собственных частот колебаний и соответствующие им собственные функции с учётом конструктивных элементов, обеспечивающих равноЭластичность контактной подвески.

Summary. The increase in the speeds of electrified transport is associated with the problem of ensuring the quality of the current collection process. The task of creating conditions for reliable transmission of electrical energy requires consideration of the interaction of the moving vehicle current collector with a contact wire. From the point of view of theoretical mechanics, the process of interaction between two oscillatory systems is characterized by a randomly varying degree of coupling. The expressions for the natural frequencies of oscillations and the corresponding natural functions were obtained analytically, taking into account the structural elements that ensure the equilibrium elasticity of the contact suspension.

Ключевые слова: токосъём, контактная пара, равноЭластичность, самосопряжённый оператор.

Key words: current collector, contact pair, equal elasticity, conjugate operator.

УДК 538.3:538.4

Введение. Проблема повышения качества процесса токосъёма приобретает особое звучание при высоких скоростях движения подвижного состава (ПС). В связи с этим возникает потребность в построении ряда классов моделей реакции контактного провода (КП) на статическое и динамическое воздействие пантографа [1].

Изначально были приняты следующие допущения:

- колебания КП с малой амплитудой происходят в вертикальной плоскости;
- пантограф – источник постоянной точечной силы;
- ПС движется с постоянной скоростью;
- натяжение КП постоянно по всей его длине;
- модель формулируется как краевая задача для некоторого самосопряжённого оператора.

Постановка задачи. В основе математической модели лежит модельное уравнение:

$$\frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial t^2} + \hat{L}Y(x,t) = \frac{F}{\rho S} \delta(x - vt),$$

где $Y(x,t)$ – смещение КП; \hat{L} – самосопряжённый дифференциальный оператор, не зависящий от времени (t); F , ρ , S , v – соответственно сила, действующая со стороны токоприёмника, скорость ПС, плотность, площадь поперечного сечения КП.

Статическое воздействие пантографа описывается выражением

$$\hat{L}y(x, x_0) = \frac{F}{\rho S} \delta(x - x_0),$$

где $y(x, x_0)$ – смещение КП в точке с координатой x_0 .

Как любой самосопряжённый оператор, \hat{L} имеет полную систему ортонормированных собственных функций $\{\psi_n(x)\}$, удовлетворяющих уравнению $\hat{L}\psi_n = \lambda_n \psi_n$ и граничным условиям для этого оператора [2, 3]. Поэтому если существует функция $\hat{L}z$ и $z(x)$, которая удовлетворяет отмеченным граничным условиям, то она может быть представлена сходящимся (по норме пространства L_2) рядом по системе функций $\{\psi_n(x)\}$, имеющим вид

$$z(x) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \psi_n(x),$$

где $B_n = \int_{x_1}^{x_2} z(x) \psi_n(x) dx$ – интервал интегрирования, который является областью задания оператора. С учётом этого функция $y(x, x_0)$ раскладывается в ряд

$$y(x, x_0) = \sum_{n=1}^{\infty} R_n(x_0) \psi_n(x),$$

где $R_n(x_0) \lambda_n = \frac{F}{\rho S} \psi_n(x_0)$.

По аналогии правую часть уравнения можно записать

$$\frac{F}{\rho S} \delta(x - x_0) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n(x_0) \psi_n(x),$$

где $D_n(x_0) = \frac{F}{\rho S} \psi_n(x_0)$.

Расчёт эластичности ведётся по формуле

$$\eta(x) \equiv \frac{y(x, x_0)}{F}.$$

Подстановка в последнее выражение $R_n(x_0)$ приводит к модифицированной формуле:

$$\eta(x) = \frac{1}{\rho S} \sum_n \frac{\psi_n^2(x)}{\lambda_n}.$$

Интегрирование полученного выражения в интервале $[0, L]$ и деление на длину интервала приводят к следующей формуле для средней эластичности:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\rho S L} \sum_n \frac{1}{\lambda_n} = \frac{1}{T L} \sum_n \frac{1}{k_n^2},$$

где $k_n = \sqrt{\frac{\lambda_n}{c^2}}$.

При решении уравнения, описывающего воздействие движущегося токоприёмника, используется метод разложения в ряд по собственным функциям.

Решение выглядит следующим образом:

$$Y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(t) \psi_n(x),$$

где $\phi_n(t)$ – коэффициенты.

Учитывая этот ряд и соотношение $\hat{L} \psi_n = \lambda_n \psi_n$, можно прийти к следующему уравнению:

$$\phi_n''(t) + \lambda_n \phi_n(t) = \frac{F}{\rho S} \psi_n(vt).$$

Для него известно решение:

$$\phi_n(t) = P_{1n}(t) \sin(\sqrt{\lambda_n} t) + P_{2n}(t) \cos(\sqrt{\lambda_n} t),$$

где $P_{1n}(t) = \frac{f}{\sqrt{\lambda_n}} \int_0^t \psi_n(v\tau) \cos(\sqrt{\lambda_n} \tau) d\tau$, $P_{2n}(t) = -\frac{f}{\sqrt{\lambda_n}} \int_0^t \psi_n(v\tau) \sin(\sqrt{\lambda_n} \tau) d\tau$, здесь $f \equiv \frac{F}{\rho S}$ [4].

Отсюда можно получить

$$Y(x, t) = f \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(x)}{\sqrt{\lambda_n}} \int_0^t \psi_n(v\tau) \sin(\sqrt{\lambda_n} (t - \tau)) d\tau.$$

Вид модельного оператора \hat{L} можно конкретизировать. Пусть к КП для достижения нормативной эластичности приложены силы в точках крепления струн и фиксаторов (см. рис. 1) и эти силы линейно зависят от смещения КП.

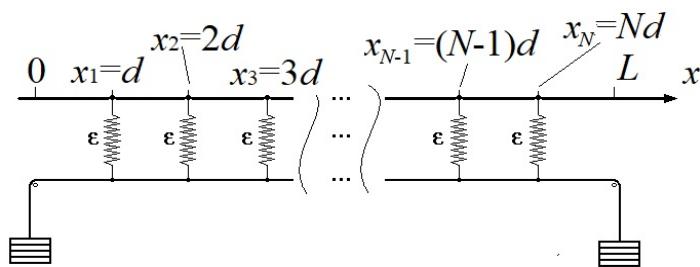


Рис. 1. Модель контактной пары

В результате выражение для модельного оператора приобретает вид

$$\hat{L} \equiv -c^2 \frac{d^2}{dx^2} - \sum_{i=1}^N G \delta(x - x_i),$$

где x_i , ϵ , N – соответственно, координата точки приложения эквивалентной пружины, её жесткость и количество фиксаторов и струн на анкерном участке. Множители:

$$c^2 = \frac{T}{\rho S}; \quad G = \frac{\epsilon}{\rho S}.$$

Взаимодействие КП с фиксаторами и струнами учитывается вторым членом в формуле для оператора. Оператор самосопряжённый, следовательно, обосновано использование подходов, описывающих упруговолновые взаимодействия [5].

Для анкерного участка при краевых условиях $Y(0, t) = Y(L, t) = 0$ модельное уравнение можно записать так:

$$\frac{\partial^2 Y(x, t)}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 Y(x, t)}{\partial x^2} - \sum_{i=1}^N G \delta(x - x_i) Y(x, t) = f \delta(x - vt).$$

Суть численного метода для решения данного уравнения легко пояснить на следующем примере. Рассматривается натянутый однородный КП длиной $2d$, концы которого жёстко закреплены с помощью пружины, прикреплённой к его середине, который разделяется на два участка. Требуется найти собственные частоты подвески. Участки КП совершают колебания, которые подчиняются волновому уравнению с решением вида

$$a_n \sin(k_n x) + b_n \cos(k_n x).$$

Границные условия определяют a_n и b_n . В точках закрепления КП решение должно давать нулевое значение, для этого на одном участке КП $b_n = 0$, а a_n может принимать любое значение (для упрощения принимается равным 1).

На другом участке КП справедливо условие

$$a_n \sin(k_n 2d) + b_n \cos(k_n 2d) = 0.$$

В месте прикрепления пружины выполняются равенства

$$\sin(k_n d) = a_n \sin(k_n d) + b_n \cos(k_n d);$$

$$k_n a_n \cos(k_n d) - k_n b_n \sin(k_n d) = \frac{\epsilon}{T} \sin(k_n d),$$

где T – сила натяжения струны (см. рис. 2).

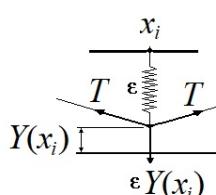


Рис. 2. Направление сил натяжения

Первое равенство характеризует непрерывность КП в точке прикрепления пружины, а второе – величину скачка производной функции профиля КП, обусловленного пружиной.

После исключения a_n и b_n можно прийти к уравнению с одним неизвестным k_n , от которого зависят собственные частоты подвески.

Допустимые значения k_n – решения уравнений

$$\sin(k_n d) = 0;$$

$$2 \cos(k_n d) + \frac{\epsilon}{k_n T} \sin(k_n d) = 0.$$

Для первого уравнения решениями являются $k_n = \frac{n\pi}{d}$. Второе уравнение решается численными методами. Подставляя множество значений $\{k_n\}$ в соотношение $\nu_n = \frac{ck_n}{2\pi}$, где c – фазовая скорость волны в КП, можно найти собственные частоты подвески.

На всяком участке КП, не содержащем точек приложения сосредоточенных сил, решение имеет вид

$$\psi_n(x) = N_n \{ a_{nm} \sin(k_n x) + b_{nm} \cos(k_n x) \},$$

где N_n – нормирующий множитель ($x_{m-1} < x < x_m$); m – номер участка [6].

На соседнем участке при том же виде решения $a_{nm+1}; b_{nm+1}$ будут другими. Связь между ними находится из условий в точке x_m :

$$\begin{cases} \psi_n(x_m - 0) = \psi_n(x_m + 0), \\ \psi'_n(x_m + 0) - \psi'_n(x_m - 0) = \frac{\varepsilon}{T} \psi_n(x_m). \end{cases}$$

Подстановка в них выражения для функций $\psi_n(x)$ (слева и справа от точки x_m) позволяет выразить a_{nm+1}, b_{nm+1} через две другие a_{nm}, b_{nm} . Формулы в матричной форме имеют вид

$$\begin{pmatrix} a_{nm+1} \\ b_{nm+1} \end{pmatrix} = \hat{P}_m \begin{pmatrix} a_{nm} \\ b_{nm} \end{pmatrix},$$

при этом матрица \hat{P}_m определяется так:

$$\begin{pmatrix} 1 + \frac{\varepsilon}{k_n T} \sin(k_n x_m) \cos(k_n x_m) & \frac{\varepsilon}{k_n T} \cos^2(k_n x_m) \\ -\frac{\varepsilon}{k_n T} \sin^2(k_n x_m) & 1 - \frac{\varepsilon}{k_n T} \sin(k_n x_m) \cos(k_n x_m) \end{pmatrix}.$$

На первом участке из-за граничного условия $\psi_n(0) = 0$ значение $b_{n0} = 0$, а $a_{n0} = 1$. Применяя найденное соотношение при переходе через все элементы неоднородности, для последнего ($N+1$) участка можно получить

$$\begin{pmatrix} a_{nN+1} \\ b_{nN+1} \end{pmatrix} = \hat{P}_N \begin{pmatrix} a_{nN} \\ b_{nN} \end{pmatrix} = \hat{P}_N \hat{P}_{N-1} \hat{P}_{N-2} \dots \hat{P}_2 \hat{P}_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \hat{Q} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Если $\psi_n(L) = 0$, то

$$\psi_n(L) = N_n \{ q_{11} \sin(k_n L) + q_{21} \cos(k_n L) \} = 0,$$

где q_{11} и q_{21} – элементы матрицы \hat{Q} .

Увеличение количества струн приводит к существенному усложнению уравнения для нахождения k_n , но в этом прослеживается определённая закономерность. Используя метод математической индукции, можно вывести формулу для любого количества струн.

Расчёт k_n состоит из двух этапов:

1. нахождение множество корней $\{z_\alpha\}$ некоторого полинома степени, равной количеству струн;

2. решение для каждого корня уравнения:

$$2 \cos(k_n d) + \frac{\epsilon}{k_n T} \sin(k_n d) = z_\alpha.$$

От величины ϵ , характеризующей упругие свойства контактной подвески, зависят значения собственных частот. Числовые значения ϵ определяются методом итераций. Логично принять значение, соответствующее нормативной средней эластичности [7–9].

Вводя новые безразмерные величины

$$\frac{\epsilon d}{T} \equiv H, \quad k_n d \equiv X_n,$$

где d – расстояние между струнами, можно преобразовать матрицу \hat{P}_m следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 1 + \frac{H}{X_n} \sin(mX_n) \cos(mX_n) & \frac{H}{X_n} \cos^2(mX_n) \\ -\frac{H}{X_n} \sin^2(mX_n) & 1 - \frac{H}{X_n} \sin(mX_n) \cos(mX_n) \end{pmatrix},$$

при этом выражение для средней эластичности приобретает вид

$$\bar{\eta} = \frac{d}{T} \frac{1}{N+1} \sum_n \frac{1}{X_n^2}.$$

Анализ полученных результатов. Аналитического решения для матричного уравнения при произвольных значениях H и N нет. Однако если считать N известным, то при любом H множество $\{X_n\}$ находится численно. Были выполнены расчёты для трёх значений N (139, 209 и 279), что соответствует 10, 15 и 20 пролётным анкерным участкам по 13 струн в каждом. По результатам расчётов построены зависимости $X_n^2(n^2)$ для $H = 0,2$ (см. рис. 3).

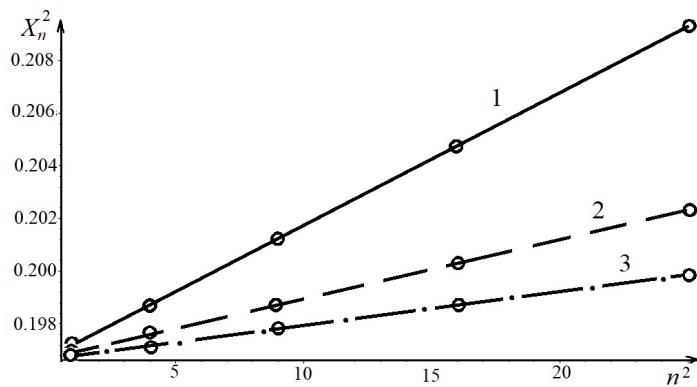


Рис. 3. Результаты расчётов

Зависимость 1 соответствует $N = 139$, зависимость 2 – $N = 209$, зависимость 3 – $N = 279$. Из рисунка следует, что зависимость $X_n^2(n^2)$ линейна. Линейность сохраняется и при других собственных значениях.

Спектр модельного оператора состоит из бесконечного числа полос, каждая из которых содержит N собственных значений. Расчёты при существенно различающихся значениях параметров H и N показали, что линейность сохраняется даже при переходе между несколькими полосами.

Для каждой серии из пяти численно найденных собственных значений определены коэффициенты формулы

$$X_n^2 = A(H) + B(H, N)n^2, \quad (1)$$

приведённые в табл. 1.

Таблица 1
Значения расчётных коэффициентов

H	N = 139		N = 209		N = 279	
	A(H)	B(N, H)	A(H)	B(N, H)	A(H)	B(N, H)
0,1	0,099172196	0,000503523	0,099172196	0,000223788	0,099172196	0,000125881
0,15	0,148143617	0,000503489	0,148143616	0,000223773	0,148143617	0,000125872
0,2	0,19671069	0,000503441	0,196710689	0,000223752	0,19671069	0,00012586
0,21	0,206375938	0,00050343	0,206375938	0,000223747	0,206375938	0,000125858
0,22	0,216025205	0,000503419	0,216025205	0,000223742	0,216025205	0,000125855
0,23	0,225658524	0,000503406	0,225658524	0,000223736	0,225658524	0,000125852
0,24	0,235275927	0,000503394	0,235275926	0,000223731	0,235275926	0,000125848
0,2498	0,244685569	0,000503381	0,244685569	0,000223725	0,244685569	0,000125845
0,251	0,245836724	0,000503379	0,245836723	0,000223724	0,245836723	0,000125845
0,35	0,340025917	0,000503219	0,340025916	0,000223653	0,340025916	0,000125805
0,4	0,387015499	0,00050312	0,387015498	0,000223609	0,387015498	0,00012578
0,45	0,433620491	0,000503008	0,433620489	0,000223559	0,433620489	0,000125752

Можно отметить, что коэффициент A не зависит от значения параметра N . Его зависимость от параметра H в первом приближении аппроксимируется выражением

$$A = H - \frac{H^2}{12} + \frac{H^3}{180}.$$

Зависимость коэффициента B от N более выражена, чем от H , поэтому предлагаемая ниже формула содержит H как малую поправку:

$$B = \left(\frac{\pi}{N+1} \right)^2 \left(1 - \frac{H^2 e^{-H}}{180} \right).$$

Сравнительные расчёты в рассматриваемых интервалах изменения параметров N и H с достаточно высокой точностью показали возможность использования предложенных аппроксимирующих формул.

Для расчёта собственных частот (X_n) может быть использована формула (1). Если считать значение параметра N известным, то требуется выбрать соответствующее значение H для конкретной подвески, при этом используется среднее значение эластичности:

$$\bar{\eta} = \frac{d}{T} \frac{1}{N+1} \sum_n \frac{1}{X_n^2}.$$

Известно, что

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{A + Bn^2} = \frac{1}{2B} \left(\frac{\pi \times \operatorname{cth}(\pi \times s)}{s} - \frac{1}{s^2} \right), \quad s \equiv \sqrt{\frac{A}{B}}.$$

После преобразований получается следующее уравнение:

$$WB = \left(\frac{\pi \times \operatorname{cth}(\pi \times s)}{s} - \frac{1}{s^2} \right),$$

где $W \equiv 2 \frac{\bar{\eta} T}{d} (N+1)$.

Это уравнение содержит одно неизвестное H и может быть решено численно.

Для параметров подвески КС200 ($T = 12\,000$ Н, $S = 120$ мм 2 , $\bar{\eta} = 0,00\,037$ мм/Н, $\rho = 8900$ кг/м 3) уравнение для нахождения параметра H было решено при значениях N : 50, 100, 150, 200, 250 и 300. Полученная зависимость $H(N)$ приведена на рис. 4.

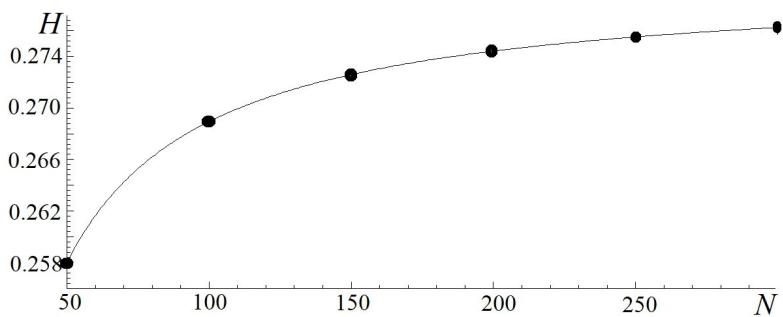


Рис. 4. Связь между параметрами модели

Для каждой пары (N, H) найдены первые тридцать собственных частот, для которых на рис. 5 показаны зависимости собственной частоты от её номера (зависимость 1 соответствует $N = 50$; зависимость 2 – $N = 100$; зависимость 3 – $N = 150$; зависимость 4 – $N = 200$; зависимость 5 – $N = 250$; зависимость 6 – $N = 300$).

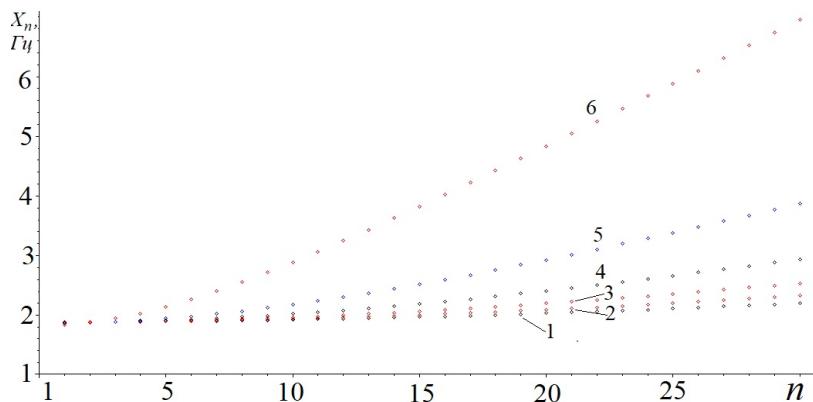


Рис. 5. Зависимости собственной частоты от её номера

Собственные значения можно найти в результате решения уравнения

$$2\cos(X_n) + \frac{H}{X_n}\sin(X_n) = z_\alpha$$

для всех $\{z_\alpha\}$, которые представляют собой корни полинома степени N с коэффициентами, зависящими только от N . Все эти корни лежат в интервале $(-2\dots 2)$, и с ростом N расстояние между соседними корнями уменьшается, особенно у границ. Самое большое значение N , для которого находятся все коэффициенты и корни, равно 57, поэтому полином не используется.

Независимость вида полинома от параметра H даёт возможность косвенно проверить правильность найденных другим способом значений X_n . Достаточно сравнить между собой значения, получаемые по выражению

$$2\cos(X_n) + \frac{H}{X_n}\sin(X_n),$$

если в него подставить X_n , вычисленные при одинаковом значении N и различных H . Приведённое выше выражение равно одному из корней полинома, а т. к. вид полинома не зависит от H , то при любом H должен получиться одинаковый результат.

При реализации численного алгоритма нахождения собственных значений одновременно находятся и собственные функции, а точнее коэффициенты a_{nm} и b_{nm} уравнения

$$\psi_n(x) = a_{nm} \sin(k_n x) + b_{nm} \cos(k_n x).$$

Индекс n относится к собственным функциям, индекс m – к интервалам между струнами. На каждом интервале коэффициенты a_{nm} и b_{nm} постоянны. После нахождения значений k_n определяется закон изменения коэффициентов вдоль анкерного участка. Для удобства анализа данных, полученных при различных значениях параметра N , интервал изменения индекса m $[0\dots N]$ линейно преобразуется в интервал $[-\pi\dots\pi]$ новой переменной M : $M = \frac{\pi}{N}(2m - N)$.

Графики зависимости $a_n(M)$ и $b_n(M)$ при изменении значения n от 1 до 5 построены для N , равных 209 и 279. Определено, что все найденные значения с весьма малой погрешностью представимы в виде

$$A_1 \cos(F_1 M + P_1) + A_2 \cos(F_2 M + P_2)$$

с соответствующим образом выбранными параметрами A_1 , F_1 , P_1 , A_2 , F_2 , P_2 .

В качестве примера приведены формулы для случая $N = 279$, $H = 0,23$, $X_1 = 0,4751677$:

$$a_1(M) = 20.49058 \cos(21.59767M + 2.12083) + 21.4625 \cos(20.6012M - 4.16235);$$

$$b_1(M) = -20.49058 \cos(21.59767M + 0.55) - 21.4625 \cos(20.6012M + 0.55).$$

Анализ результатов расчётов позволяет получить простые соотношения, связывающие A_1 , F_1 , P_1 , A_2 , F_2 , P_2 :

- значения A_1 , F_1 , A_2 , F_2 одинаковы при всех n для $a_n(M)$ и $b_n(M)$;

- разность фаз P_1 для $b_n(M)$ и P_1 для $a_n(M)$ равна $\pi/2$ при всех n ; такое же соотношение выполняется для P_2 ;

- разность фаз P_2 и P_1 для $a_n(M)$, и для $b_n(M)$ равна $(n-1)\pi$.

Таким образом, коэффициенты $a_n(M)$ и $b_n(M)$ можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} a_n(M) &= A_{1n} \cos(F_{1n}M + P_{1n}) + A_{2n} \cos(F_{2n}M + P_{2n}) = \\ &= A_{1n} \cos(F_{1n}M + P_{1n}) + (-1)^{n-1} A_{2n} \cos(F_{2n}M + P_{1n}); \end{aligned}$$

$$b_n(M) = -A_{1n} \sin(F_{1n}M + P_{1n}) + (-1)^n A_{2n} \sin(F_{2n}M + P_{1n}).$$

После упрощений формула собственной функции принимает вид

$$\psi_n = A_{1n} \sin(k_n x - F_{1n}M - P_{1n}) + (-1)^n A_{2n} \sin(k_n x - F_{2n}M - P_{1n}).$$

Установление зависимости параметров A_{1n} , A_{2n} , F_{1n} , F_{2n} , P_{1n} от аргументов n , H , N представляет отдельную научно-исследовательскую задачу.

Заключение. Выведены формулы для волны, возникающей в контактном проводе, и для упругости в форме ряда собственных функций краевой задачи для модельного самосопряжённого оператора. В рамках однопараметрической модели взаимодействия контактной пары получено

уравнение для собственных частот контактной сети и предложен способ его решения. На основании полученных результатов можно выявить определяющие факторы, влияющие на качество токосъёма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Улучшение токосъёма в транспортной системе типа «HYPERLOOP» / К. К. Ким, А. В. Колесова, С. Л. Колесов // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 5-15.
2. Шубин, М. А. Псевдодифференциальные операторы и спектральная теория / М. А. Шубин. – М.: Добровес, 2003. – 299 с.
3. Кузнецов, А. А. Модернизация спектрального оборудования для диагностирования и ремонта подвижного состава / А. А. Кузнецов, О. Б. Мешкова // Транспорт Урала. – 2009. – № 2. – С. 86-90.
4. Румянцев, В. В. Распространение упругих волн в неидеальной слоистой среде / В. В. Румянцев, С. А. Федоров, В. М. Юрченко // Журнал технической физики. – 2013. – Вып. 2. – С. 111-114.
5. Толипов, Х. Б. Неоднородная стоячая упругая волна в клиновидной пластине / Х. Б. Толипов // Журнал технической физики. – 2014. – Вып. 3. – С. 152-154.
6. Погудалина, С. В. Прямое численное моделирование аэроупругих колебаний стержня большого удлинения для режимов, близких к резонансным / С. В. Погудалина, Н. Н. Федорова // Прикладная механика и техническая физика. – 2021. – № 2. – С. 183-192.
7. Sidorov O. A., Smerdin A. N. Improvement of methods of tests of catenaries and pantographs. Railway Transport Journal, 2010, no. 11, p. 72-74.
8. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. Application of reasonable current collection quality methods for high speed. Transport Urala, 2011. no 1 (28), p. 70-76.
9. Беляев, И. А. Устройство и обслуживание контактной сети при высокоскоростном движении / И. А. Беляев. – М.: Транспорт, 1989. – 144 с.
10. Kim K. K., Antonov Y. A. (2008). Models of interacting the contact wire with the pantograph / 16th International Symposium EURNEX-Zel 2008, 4-5th June 2008. Zilina, Slovak Republic. Lectures, NR1.
11. Антонов, Ю. А. К вопросу распространения механических волн по контактному проводу / Ю. А. Антонов, К. К. Ким // Электрификация и организация скоростных и тяжеловесных коридоров на железнодорожном транспорте: материалы 4-го Междунар. симпозиума Eltrans'2007, 23-26 окт. 2007 г., г. Санкт-Петербург. – СПб.: ПГУПС, 2009. – С. 26-31.
12. Ким, К. К. Метод учёта взаимодействия контактного провода с пантографом / К. К. Ким, С. Н. Иванов, А. В. Колесова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III-1 (59). – С. 48-53.

Ларченко Ю. Г., Котляров В. П.
Y. G. Larchenko, V. P. Kotlyarov

ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

CONSTRUCTION OF THE EQUATION OF PREDICTIVE ANALYSIS OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE LABOR PRODUCTIVITY

Ларченко Юлия Геннадьевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры проектирования, управления и разработки информационных систем Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: l_uliya_g@mail.ru.

Yulia G. Larchenko – PhD in Economics, Associate Professor, Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: l_uliya_g@mail.ru.

Котляров Валерий Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования, управления и разработки информационных систем Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kvp@knastu.ru.

Valery P. Kotlyarov – PhD in Engineering, Associate Professor, Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kvp@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассматривается производительность труда как ключевой показатель эффективности использования финансового капитала, позволяющий оценить достижение стратегической цели промышленного предприятия АО «Полиметалл», направленной на стабилизацию производства. При этом производительность труда зависит от ряда факторов: суммарных денежных затрат, зарплатоёмкости, фондооружённости, доли несчастных случаев и коэффициента текучести кадров и т. п., в совокупности характеризующих состояние человеческого капитала предприятия и стратегическую цель по устойчивому развитию предприятия. В этой связи актуальной и практически значимой задачей исследования является выявление характера зависимости между производительностью труда и указанными факторами. В качестве основного инструмента моделирования выступает корреляционно-регрессионный анализ, выполненный в аналитической платформе Deductor. В результате проведённого анализа составляется уравнение множественной регрессии, отражающее наибольшую линейную зависимость функции (производительности труда) от соответствующих переменных величин при отсутствии мультиколлинеарности между ними. Полученное уравнение множественной регрессии позволит использовать результаты предиктивной аналитики для предсказания будущего поведения хозяйствующего субъекта.

Summary. The article considers labor productivity as a key indicator of the effectiveness of the use of financial capital, which makes it possible to assess the achievement of the strategic goal of the industrial enterprise JSC «Polymetal», aimed at stabilizing production. At the same time, labor productivity depends on a number of factors: total cash costs, wage intensity, capital-labor ratio, the share of accidents and the staff turnover rate, etc., which together characterize the state of the human capital of the enterprise and the strategic goal for sustainable development of the enterprise. In this regard, an urgent and practically significant task of the study is to identify the nature of the relationship between labor productivity and these factors. The main modeling tool is the correlation-regression analysis performed in the Deductor analytical platform. As a result of the analysis, a multiple regression equation is compiled, which reflects the greatest linear dependence of the function (labor productivity) on the corresponding variables in the absence of multicollinearity between them. The resulting multiple regression equation will allow using the results of predictive analytics to predict the future behavior of an economic entity.

Ключевые слова: предиктивная аналитика, производительность труда, корреляционно-регрессионный анализ, факторы, мультиколлинеарность.

Key words: predictive analytics, labor productivity, correlation-regression analysis, factors, multicollinearity.

УДК 519.862

В современных условиях хозяйствования крупные промышленные предприятия холдингового типа ориентированы на прирост совокупного капитала, который, согласно Международному стандарту интегрированной отчётности, состоит из шести взаимосвязанных элементов: финансового капитала, производственного капитала, человеческого капитала, природного капитала, интеллектуального капитала и социально-репутационного капитала [4]. От эффективности использования каждого вида капитала зависит финансовая свобода предприятия и степень его манёвренности на рынке [2; 3]. Оценка эффективности использования капиталов осуществляется посредством соответствующих ключевых показателей. При этом показатели, характеризующие использование капиталов и позволяющие оценить достижение стратегических целей предприятия, являются взаимовлияющими и дополняющими друг друга в системе комплексной оценки эффективности хозяйствования. В этой связи актуальной задачей исследования выступает установление типа связи между ключевыми показателями эффективности для прогнозирования их значений при изменении параметров внешней среды [7; 8].

Рассмотрим ключевой показатель эффективности использования финансового капитала АО «Полиметалл», направленный на оценку степени достижения стратегической цели предприятия, связанной со стабилизацией производства, – это производительность труда [12]. Для измерения производительности труда используются два показателя: выработка и трудоёмкость [10; 11]. Применительно к объекту исследования под выработкой будем понимать количество произведённой продукции (унций золотого эквивалента), приходящееся на одного среднесписочного работника в год. Трудоёмкость – это обратный показатель производительности труда, который характеризует необходимое количество работников для производства единицы продукции в год. В дальнейшем предметом изучения является производительность труда (выработка) и факторы, влияющие на данный показатель за период с 2007 по 2021 год включительно.

В соответствии с отчётом об устойчивом развитии АО «Полиметалл», среди факторов, влияющих на производительность труда, выделяют: суммарные денежные затраты на единицу продукции, зарплатоёмкость, фондооружённость, долю несчастных случаев и коэффициент текучести кадров [5; 8; 12]. Проверим тесноту связи и характер зависимости между результирующим показателем и этими факторами с помощью корреляционно-регрессионного анализа.

Корреляционно-регрессионный анализ основывается на том, что динамику изучаемого явления можно представить в виде математической факторной модели, т. е. выразить через систему связей и взаимозависимостей различных показателей. В зависимости от числа факторов выделяют парную регрессию и множественную (многофакторную) регрессию. При парной регрессии наблюдается зависимость результативного показателя от одного фактора. Множественная регрессия показывает зависимость результативного показателя от двух и более факторов. Характер зависимости между результативным показателем (функцией) и факторами (переменными) может быть линейным или нелинейным [6]. В исследовании принимается линейный характер зависимости между производительностью труда и факторами, влияющими на её динамику [1; 9].

Согласно теории корреляционно-регрессионного анализа, в уравнение множественной регрессии должны входить только те факторы, которые имеют тесную связь с результирующим показателем. При этом сами факторы должны быть независимыми между собой, иметь несущественную связь, т. е. не быть мультиколлинеарными [1; 9].

Реализация всех этапов процесса построения уравнения регрессии требует значительных трудовых и временных затрат. В этой связи применение специализированного программного обеспечения является необходимой мерой, направленной на снижение затрат проведения процедуры предиктивной аналитики.

Рассмотрим алгоритм создания линейной модели в аналитической платформе Deductor (см. рис. 1). Основные этапы построения уравнения регрессии:

1. Выбор показателей, позволяющих оценить результативность деятельности предприятия и достижение его стратегических целей. При этом, как правило, показатели результативности явля-

ются приведёнными относительно соответствующей базы распределения (объём выпуска/реализации продукции, численность персонала и т. п.).

2. Составление матрицы значений показателей. В матрице столбцами являются виды показателей, а строки – это период их анализа (год, квартал или месяц).

3. Преобразование табличной формы исходной информации в текстовый файл и импорт его в программу.

4. Настройка параметров текстового файла: назначение строковых данных (период – год, квартал или месяц) – информационное, вид данных – дискретный; тип вещественных данных (показатели) – непрерывный, их назначение – входное для переменных величин и выходное для анализируемого показателя.

5. Запуск процесса импорта исходных данных.

6. Запуск мастера обработки данных: очистка данных; корреляционно-регрессионный анализ. На этом этапе осуществляется проверка тесноты связи между функцией и переменными величинами. При обнаружении незначащих факторов аналитик принимает решение о продолжении процесса моделирования данных или прекращении дальнейших расчётов.

7. Запуск мастера обработки данных: Data Mining; линейная регрессия.

8. Настройка столбцов выходных данных: назначение (информационное, входное или выходное); разбиение исходных данных на обучающее подмножество (100%-е обучение); ограничение диапазона выходных значений (установка по умолчанию); отбор переменных в регрессионные модели (полное включение).

9. Запуск процесса построения линейной модели.

10. Выбор способов отображения результатов визуализации (коэффициенты регрессии, отчёт по регрессии, диаграмма рассеяния, подбор параметров модели «что-если» и т. п.).

11. Завершение визуализации.

Необходимо отметить, что корреляционно-регрессионный анализ и построение линейной модели исследуемого показателя можно провести и с помощью электронных таблиц в Microsoft Excel с помощью функции линейного массива данных. Однако использование специализированного программного обеспечения имеет ряд преимуществ:

- возможность визуализации выходных данных: отчёт по регрессии, таблица с фактическими и расчётыми значениями функции, гистограмма, диаграмма рассеяния и др.;
- возможность проведения дальнейших расчётов при выявлении и очистке несущественных факторов;
- возможность прогнозирования анализируемого показателя с помощью сценария «что-если»;
- возможность трансформации уже импортированных исходных данных для применения в других видах анализа (например, кластеризация) или построения новой экономико-математической модели;
- снижение ошибки вычислений вследствие исключения необходимости ввода математических зависимостей и закономерностей.

На основании всего вышеизложенного используем предложенный алгоритм для построения уравнения множественной регрессии применительно к АО «Полиметалл» и последующего его использования для целей прогнозирования результативного показателя.

На основе исходных данных табл. 1 рассчитаем коэффициенты корреляции между производительностью труда и факторами (см. табл. 2), а также коэффициенты мультиколлинеарности (см. табл. 3) [12].

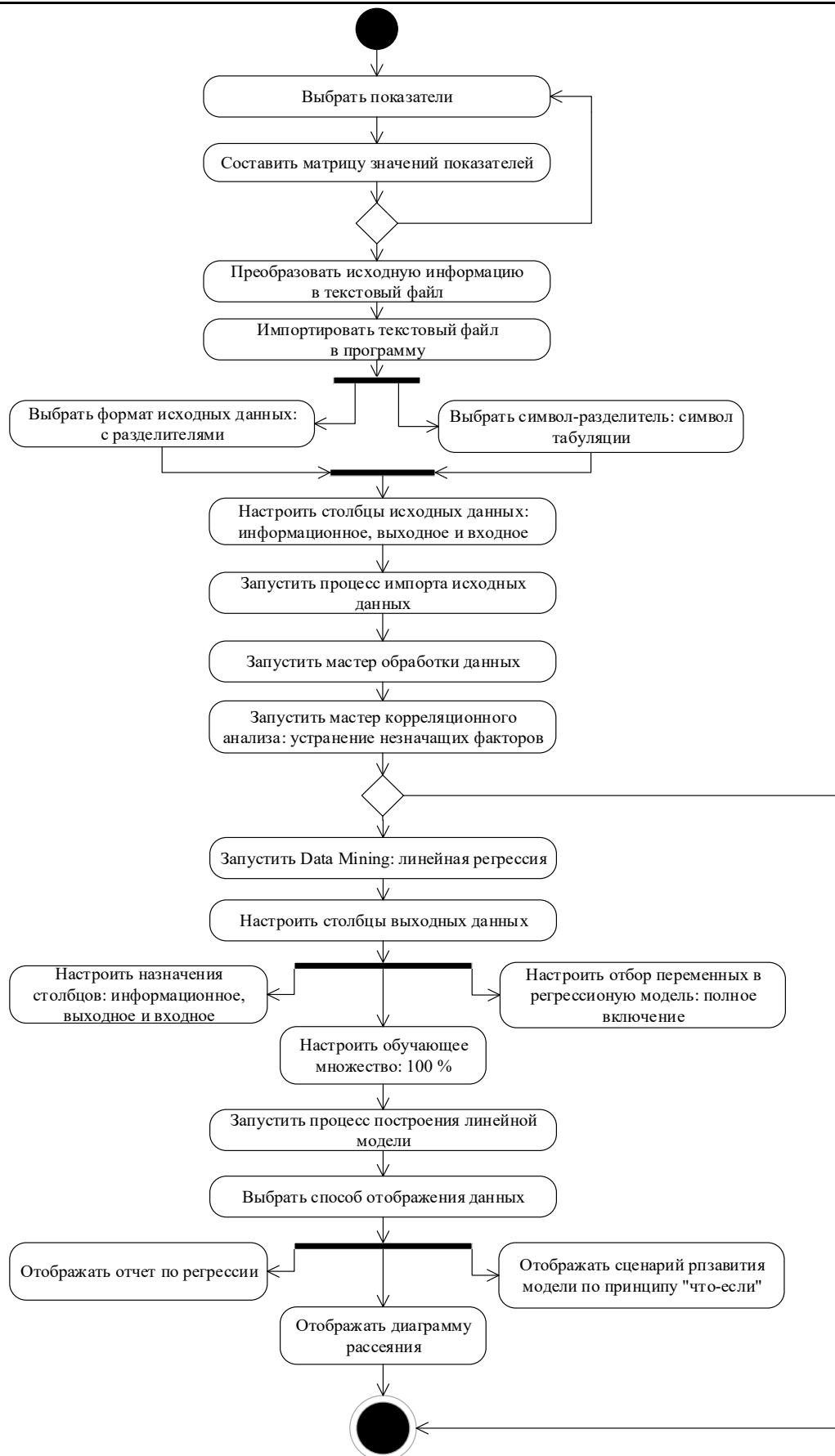


Рис. 1. Алгоритм проведения линейной регрессии в Deductor

Таблица 1
Динамика показателей эффективности использования капитала АО «Полиметалл»

Год	Производи- тельность тру- да, унций золо- того эквива- лента / чел.	Суммарные де- нежные затраты, доллар / унцию золотого экви- валента	Зарплато- ёмкость	Фондоору- жённость, тыс. долларов / чел.	Доля несчаст- ных слу- чаев	Коэффици- ент текуче- сти кадров
	y	x_1				
2007	50,80	397	0,217	105,5	0,0021	0,230
2008	59,15	472	0,159	100,5	0,0029	0,210
2009	48,70	479	0,219	170,3	0,0025	0,200
2010	100,52	555	0,137	202,8	0,0032	0,200
2011	100,61	701	0,181	236,2	0,0014	0,196
2012	115,08	1059	0,153	238,8	0,0004	0,178
2013	142,48	1086	0,178	232,8	0,0008	0,192
2014	148,20	893	0,147	221,9	0,0012	0,114
2015	137,15	733	0,141	147,2	0,0017	0,083
2016	115,85	776	0,140	164,8	0,0014	0,055
2017	124,04	893	0,157	177,8	0,0010	0,054
2018	128,67	861	0,167	199,8	0,0009	0,058
2019	139,01	866	0,177	242,0	0,0017	0,058
2020	137,59	874	0,138	231,0	0,0011	0,065
2021	123,95	1030	0,163	247,5	0,0011	0,082

Таблица 2
Теснота связи между функцией и переменными

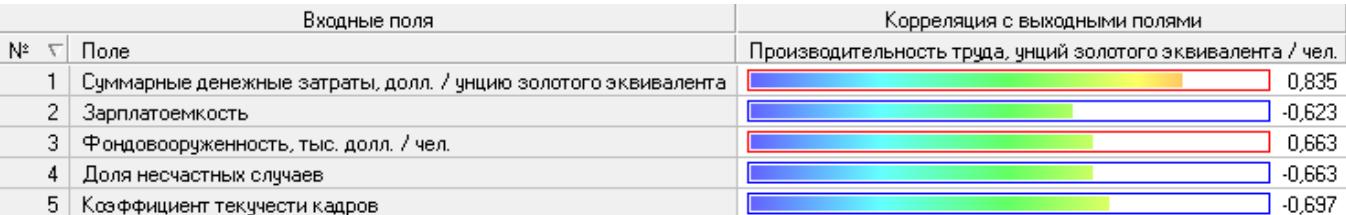


Таблица 3
Теснота связи между факторами (мультиколлинеарность)

Факторы	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
x_1	1	—	—	—	—
x_2	-0,402	1	—	—	—
x_3	0,763	-0,222	1	—	—
x_4	-0,859	0,175	-0,565	1	
x_5	-0,519	0,495	-0,290	0,478	1

Из проведённого анализа следует, что тесная линейная связь (значение коэффициента корреляции больше 0,6) наблюдается между производительностью труда и всеми факторами: суммарные денежные затраты на единицу продукции, зарплатоёмкость, фондооружённость, доля несчастных случаев и коэффициент текучести кадров. Однако не все из указанных факторов могут быть включены в модель. Это объясняется наличием причинно-следственной связи, т. е. мультиколлинеарности между следующими переменными: суммарные денежные затраты на единицу

продукции и фондооружённость, доля несчастных случаев. Следовательно, на данном этапе исследования уравнение множественной линейной регрессии может быть представлено только тремя переменными, влияющими на результативный показатель: это суммарные денежные затраты на единицу продукции, зарплатоёмкость и коэффициент текучести кадров, либо зарплатоёмкость, фондооружённость и доля несчастных случаев. Рассмотрим оба варианта уравнения множественной линейной регрессии (см. рис. 2 и 3).

Множ. коэффициент корреляции, R	Коэффициент детерминации, R^2	Скоррект. коэффициент детерминации	Стандартное отклонение	Размер выборки	Метод отбора переменных
0,9157	0,8386	0,7945	15,1543	15	Полное включение

Таблица дисперсионного анализа (ANOVA)

Источник	Сумма квадратов, SS	Число степеней свободы, df	Средние квадраты, MS	F-критерий	Значимость
Регрессия	13122,6643	3	4374,2214	19,0472	1,155E-04
Ошибки	2526,1711	11	229,6519		
Сумма	15648,8353	14			

Коэффициенты регрессии

	Нестандартизованные коэффициенты		Стандартизованные коэффициенты	t-критерий	Значимость	Доверительный интервал (95%)	
	Значение	Ошибка				Значение	Ошибка
(Константа)	110,5369	37,8647		2,9193	0,0140	27,1972	193,8766
"Суммарные денежные затраты, долл. / унцию золотого эквивалента" (X0)	0,0912	0,0220	0,5981	4,1388	0,0016	0,0427	0,1397
"Зарплатоёмкость" (X1)	-324,3994	182,9344	-0,2525	-1,7733	0,1038	-727,0354	78,2365
"Коэффициент текучести кадров" (X2)	-125,6203	73,4317	-0,2608	-1,7107	0,1152	-287,2425	36,0019

Рис. 2. Уравнение множественной линейной регрессии 1

Таким образом, получены следующие уравнения множественной линейной регрессии:

$$y = 0,0912x_1 - 324,3994x_2 - 125,6203x_5 + 110,5369,$$

$$y = -616,3982x_2 + 0,2306x_3 - 16149,8487x_4 + 193,4359,$$

где y – производительность труда, унций золотого эквивалента / чел.; x_1 – суммарные денежные затраты, долл. / унцию золотого эквивалента; x_2 – зарплатоёмкость; x_3 – фондооружённость, тыс. долл. / чел.; x_4 – доля несчастных случаев; x_5 – коэффициент текучести кадров.

По первому уравнению коэффициент детерминации, полученный путём сравнения фактических значений результативного показателя и его расчётных значений, равен 0,8386, а по второму уравнению – 0,7781. Коэффициент детерминации показывает степень приближения расчётных значений показателя к фактическим значениям. Чем ближе коэффициент детерминации к единице, тем достовернее полученное уравнение регрессии и точнее результаты прогноза на будущие периоды. Из двух уравнений множественной линейной регрессии для целей предсказания значений производительности труда следует выбрать первый вариант. В этом случае производительность труда зависит от суммарных денежных затрат на единицу продукции, зарплатоёмкости и коэффициента текучести кадров.

Ларченко Ю. Г., Котляров В. П.
ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Множ. коэффициент корреляции, R	Коэффициент детерминации, R ²	Скоррект. коэффициент детерминации	Стандартное отклонение	Размер выборки	Метод отбора переменных		
0,8821	0,7781	0,7175	17,7682	15	Полное включение		
Таблица дисперсионного анализа (ANOVA)							
Источник	Сумма квадратов, SS	Число степеней свободы, df	Средние квадраты, MS	F-критерий	Значимость		
Регрессия	12175,2110	3	4058,4037	12,8549	6,450E-04		
Ошибки	3472,7856	11	315,7078				
Сумма	15647,9966	14					
Коэффициенты регрессии							
	Нестандартизованные коэффициенты		Стандартизованные коэффициенты	t-критерий	Значимость	Доверительный интервал (95%)	
	Значение	Ошибка				Значение	Ошибка
(Константа)	193,4359	46,0337		4,2021	0,0015	92,1165	294,7553
"Зарплатоемкость" (X0)	-616,3982	187,5998	-0,4797	-3,2857	0,0073	-1029,3025	-203,4938
"Фондооборуженность, тыс. долл. / чел." (X1)	0,2306	0,1201	0,3357	1,9199	0,0812	-0,0338	0,4950
"Доля несчастных случаев" (X2)	-16149,8487	7229,4949	-0,3868	-2,2339	0,0472	-32061,8597	-237,8376

Рис. 3. Уравнение множественной линейной регрессии 2

С помощью опытно-статистического метода и электронных таблиц в Microsoft Excel определим возможные значения суммарных денежных затрат на единицу продукции, зарплатоёмкости и коэффициента текучести кадров в 2022 году: 1116,22 долларов / унцию золотого эквивалента 0,164 и 0,078 соответственно. Исходя из плановых значений факторов спрогнозируем значение производительности труда 2022 году. Для этого воспользуемся функцией «что-если» в аналитической платформе Deductor. Результаты вычислений показаны на рис. 4.

Поле	Значение
Входные	
9.0 Суммарные денежные затраты, долл. / унцию золотого эквивалента	1116,22
9.0 Зарплатоемкость	0,164
9.0 Коэффициент текучести кадров	0,078
Выходные	
9.0 Производительность труда, унций золотого эквивалента / чел.	149,30

Рис. 4. Прогнозное значение производительности труда АО «Полиметалл» в 2022 году

Прогнозное значение производительности труда (149,3 унций золотого эквивалента / чел. в 2022 году) свидетельствует о сохранении тенденции роста данного результативного показателя. Необходимо отметить, что в 2022 году АО «Полиметалл», согласно стратегии корпоративного управления и устойчивого развития, планирует сократить текучесть кадров, что подтверждается и прогнозными данными.

В заключение отметим, что выбранное уравнение множественной линейной регрессии, описывающее зависимость производительности труда от суммарных денежных затрат на единицу продукции, зарплатоёмкости и коэффициента текучести кадров, является достоверным и может быть использовано для планирования ключевых показателей эффективности в краткосрочном периоде. Вместе с тем необходимо продолжить факторный анализ производительности труда, расширив временной лаг исследования, что позволит включить в уравнение множественной линейной регрессии другие переменные, являющиеся значимыми для оценки указанного результативного показателя (например, удельные инвестиции в охрану труда и технику безопасности, удельные инвестиции в обучение персонала и др.) [13; 14; 15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубина, И. Н. Основы математического моделирования социально-экономических процессов / И. Н. Дубина. – 1-е изд. – М.: Юрайт, 2019. – 349 с.
2. Кириченко, Л. П. Экономическая эффективность формирования и использования человеческого капитала корпорации / Л. П. Кириченко, А. С. Мотырева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2021. – № VI-2 (52). – С. 115-120.
3. Ларченко, Ю. Г. Текущее положение и перспективы стратегического развития предприятия сферы лесозаготовки и лесопереработки / Ю. Г. Ларченко, А. В. Третьяков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2021. – № II-2 (50). – С. 103-108.
4. Международный стандарт интегрированной отчётности // IFRS Foundation 2022. – URL: https://www.integratedreporting.org/wp-content/uploads/2015/03/13-12-08-THE-INTERNATIONAL-IR-FRAMEWORK.docx_en-US_ru-RU.pdf (дата обращения: 14.03.2022). – Текст: электронный.
5. Пономарев, Ю. Ю. Внедрение новых технологий и совокупная факторная производительность: микроэконометрический анализ / Ю. Ю. Пономарев, Р. Н. Магомедов // Экономические отношения. – 2019. – Т. 9. – № 3. – С. 2249-2268.
6. Применение методов машинного обучения в задачах оценки технологических процессов / О. В. Попова, Я. Ю. Григорьев, Е. П. Жарикова, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 68-72.
7. Сафина, Д. М. Управление ключевыми показателями эффективности: учеб. пособие / Д. М. Сафина. – Казань: Казан. ун-т, 2018. – 123 с.
8. Яковлева, Т. А. Ключевые показатели эффективности в инновационной сфере / Т. А. Яковлева, В. А. Гордиенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2017. – № VI-2 (32). – С. 93-95.
9. Яроцкая, Е. В. Экономико-математические методы и моделирование: учеб. пособие / Е. В. Яроцкая. – Саратов: Ай Пи Ар Медиа, 2020. – 196 с.
10. Экономическая добавочная стоимость, EVA // Альт-Инвест, 2004-2022. – URL: <https://www.alt-invest.ru/lib/eva/> (дата обращения: 14.03.2022). – Текст: электронный.
11. Аудиторская фирма «Авдеев и Ко»: аудиторские и бухгалтерские услуги: сайт. – Калининград, 1999 –. – URL: <https://www.audit-it.ru/> (дата обращения: 14.03.2022). – Текст: электронный.
12. АО «Полиметалл»: сайт. – URL: <https://www.polymetalinternational.com> (дата обращения: 12.03.2022). – Текст: электронный.
13. Cirillo, V., Ricci, A. Heterogeneity matters: temporary employment, productivity and wages in Italian firms. *Econ Polit*, 2020. DOI: 10.1007/s40888-020-00197-2. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40888-020-00197-2.pdf>.
14. Herman, E. Labour Productivity and Wages in the Romanian Manufacturing Sector. 13th International Conference Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG 2019). *Procedia Manufacturing*, 2020, Vol. 46. – P. 313-321. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.046. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2351978920309240?token=D5131654787F2679FF77348D3344F006C9E5202380CD07BCE23C0FD894A0FD519F55BB150AEC480324D743139C23C373&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220315105153>.
15. Steshenko, Ju., Artemyev, A., Myktybaev, T., Khavanova, I., Masterov, A., & Ponomareva, M. Assessment of the impact of socio-economic factors on productivity increase. *Economic Annals-XXI*, 2019, 177(5-6), P. – 70-81. DOI: 10.21003/ea.V177-06.

Марченко О. В.
O. V. Marchenko

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

RESEARCH OF TIME SERIES USING NEURAL NETWORKS

Марченко Олеся Владимировна – старший преподаватель кафедры «Проектирование, управление и разработка информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: olemarchenko@yandex.ru.

Olesya V. Marchenko – Senior Lecturer, Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: olemarchenko@yandex.ru.

Аннотация. Рассматривается возможность использования нейронных сетей для исследования временных рядов с целью прогнозирования поведения динамической системы. Математические теоремы Такенса, Горбаня, Колмогорова и других предоставляют возможность привести задачу прогноза временных рядов к задаче интерполяции нелинейной функции нескольких переменных. Посредством анализа нейронных сетей и методов их обучения предложен алгоритм проектирования структуры нейронной сети. Основной этап алгоритма – подбор и обучение нейронной сети. Искусственные нейронные сети предлагается применить для решения задач, где формализация процедур решения либо достаточно сложная, либо по определённым причинам невозможна.

Summary. The possibility of using neural networks for the study of time series in order to predict the behavior of a dynamic system is considered. Mathematical theorems of Takens, Gorban, Kolmogorov and others provide an opportunity to bring the problem of forecasting time series to the problem of interpolation of a nonlinear function of several variables. Through the analysis of neural networks and methods for their training, an algorithm for designing the structure of a neural network is proposed. The main stage of the algorithm is the selection and training of the neural network. Artificial neural networks are proposed to be used for solving problems where the formalization of the solution procedures is either rather complicated or impossible for certain reasons.

Ключевые слова: временной ряд, нейронные сети, обучение ИНС, интерполяция, аппроксимация, скорость обучения.

Key words: time series, neural networks, ANN learning, interpolation, approximation, learning rate.

УДК 519.711.3

Введение. Получив широкое применение в различных исследовательских областях, таких как компьютерная графика, машинное зрение, обработка зашумленных данных, нелинейное оценивание, распознавание, дополнение речи и образов [1–3], искусственные нейронные сети (ИНС) положительно зарекомендовали себя в качестве перспективной вычислительной технологии при решении задач в технике, экономике и управлении. Для решения задач, где формализация процедур решения либо достаточно сложная, либо по определённым причинам невозможна, предлагается применить ИНС [4; 5]. К примеру, подлежат разработке качественно новые подходы к исследованию динамических моделей в области техники, экономики и управления, опирающиеся на свойства нелинейности и самообучения с применением ИНС [6–8].

Целями работы являются исследование временных рядов и прогнозирование поведения динамической системы с применением нейронных сетей.

Постановка задачи и математическая модель временного ряда. Математическая основа применения нейронных сетей поясняется на примере задачи анализа и прогнозирования временного ряда x_k , $k = 0, 1, \dots$, порождённого некоторой динамической системой. Имеются входные значения временного ряда экономического показателя x_k . Необходимо определить его структуру и ма-

тематическую модель, а также оптимизировать её параметры и оценить соответствие входных и моделируемых значений временного ряда. В данных условиях применяются нелинейные модели следующего вида [7]:

$$\hat{x}_{k+1} = \Phi(x_k, \dots, x_{k-n+1}),$$

где $\Phi(\cdot)$ – нелинейная функция нескольких переменных; \hat{x}_{k+1} – прогнозируемое значение ряда; x_k, \dots, x_{k-n+1} – ретроспективные значения; n – порядок модели.

Нейросетевой анализ. Эффективность применения нейросетевой технологии для прогнозирования временных рядов обосновывается математическими теоремами Такенса, Горбаня и Колмогорова.

Теорема Такенса [10] устанавливает существование глубины погружения, обеспечивающей однозначное предсказание значений временного ряда. Её величина равна эффективному числу степеней свободы динамической системы, порождающей временной ряд.

Теорема о полноте Горбаня свидетельствует о том, что «любая непрерывная функция $f(\cdot)$ на замкнутом ограниченном множестве S_x может быть равномерно приближена функциями, которые вычисляет ИНС» [11]. Данное утверждение справедливо в случае нелинейности функции активации и существования её непрерывной второй производной.

В качестве активационной функции может выступать всякая математическая функция. Активационные функции имеют определённые преимущества и особенности применения. На практике, помимо пороговой (ступенчатой) и линейной, одной из часто применяемых является сигмоида (логистическая функция). Данная функция имеет следующий вид:

$$g(z) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha z}}.$$

Сигмоида дифференцируема всюду:

$$g'(z) = \alpha \cdot g(z) \cdot (1 - g(z)),$$

и это её свойство широко реализовано в алгоритмах обучения. Другое свойство – способность усиливать слабые сигналы – позволяет избежать насыщения от сильных сигналов. Такая особенность объясняется тем, что сильные сигналы соответствуют областям аргументов на тех промежутках, где наклон графика функции изменяется постепенно.

Гиперболический тангенс, являющийся скорректированной сигмоидой, также применим в качестве функции активации нейронов:

$$th(z) = \frac{e^{2z} - 1}{e^{2z} + 1}.$$

Отличие гиперболического тангенса от сигмоиды заключено в возможности принимать значения любых знаков. Как и сигмоида, гиперболический тангенс показывает хорошие результаты при группировке слоёв. Однако при числе слоёв ≥ 8 рекомендовано использовать функцию «выпрямитель» (rectifier), реализующую переход в 0, а также вариации:

$$g(z) = \max(0, z).$$

Предсказывающая временной ряд нейронная сеть будет представлена функцией f от двух векторов $f(X, W)$, где $X \in R^n$ – входные параметры, $W \in R^m$ – внутренние параметры (веса).

Процесс обучения нейронных сетей построен следующим образом. Для заданных значений входного вектора X_i рассчитываются выходные значения целевого вектора y_i . При подборе значений весового вектора W необходимо соблюдать условия обучающей матрицы X для всех векторов-строк X_i :

$$y_i \approx f(X, W).$$

Существуют различные методы минимизации погрешности. Наиболее часто для определения меры погрешности приближения используется функция

$$S(W) = \sum (f(X_i, W) - y_i)^2,$$

при качественных результатах модели она должна принимать минимальное значение.

Значения векторов X_i последовательно подаются на вход нейросети. После вычисления значений выходного вектора $f(X, W)$ ИНС сравнивает расчётное значение с целевым вектором y_i . Далее рассчитывается ошибка. Производится сопоставление полученного значения ошибки с критерием погрешности. В том случае, если ошибка критерию не удовлетворяет, значения внутренних параметров подстраиваются по алгоритму минимизации функции ошибки $S(W)$. Следует отметить, что один и тот же входной вектор X_i может периодически подаваться на вход такое количество раз, какое потребуется для работы алгоритма минимизации. Это обусловлено необходимостью соответствия ошибки по всему обучающему массиву X требуемому уровню.

Для выполнения основного принципа формирования ИНС – достижения минимальных значений функции ошибки – используются различные методы. К примеру, в программном пакете Statistica данный принцип реализован с помощью метода градиентного спуска. Один шаг с заданной скоростью обучения LR означает переход:

$$W_0 \rightarrow W_1 = W_0 - LR \frac{\nabla S}{|\nabla S|},$$

где ∇S – градиент функции $S(W)$.

Помимо функции $f(X_i, W)$, используется расстояние Кульбака-Лейблера – функция, построенная на основе критерия максимума правдоподобия [7]:

$$E = \sum_{k=1}^P \left[d_k \log \frac{d_k}{y_k} + (1-d_k) \log \frac{1-d_k}{1-y_k} \right].$$

Отдавать предпочтение тому или иному методу снижения погрешности необходимо в зависимости от степени сложности поставленной задачи и особенностей архитектуры ИНС, используемой для обучения.

Важным показателем обучения нейронной сети является оптимальная скорость сходимости метода. Если коэффициент скорости обучения выбран относительно небольшим, то и погрешность будет равномерно уменьшаться при каждом шаге. Для измерения эффективности шага используется следующая величина:

$$q = 1 - S \frac{S_1}{S_0},$$

где S_0, S_1 – соответственно значение целевой функции (величины погрешности) в начале шага и в конце.

Отрицательная динамика будет означать увеличение целевой функции на данном шаге. В таком случае можно говорить о преодолении глобального минимума функции в процессе обучения.

Способ проектирования нейросетевой модели временного ряда. Для построения модели временного ряда необходимо выполнить следующие действия:

- подготовить и преобразовать исходные данные: сформировать временной ряд, нормализовать массив исторических данных; упорядочить, сгруппировать данные и выполнить прочие необходимые процедуры для повышения эффективности процесса обучения;

- выполнить декомпозицию временного ряда, выявив трендовую, циклическую (сезонную), шумовую составляющие (разложение временного ряда в ряд Фурье, применение аппарата спектрального анализа и др.);

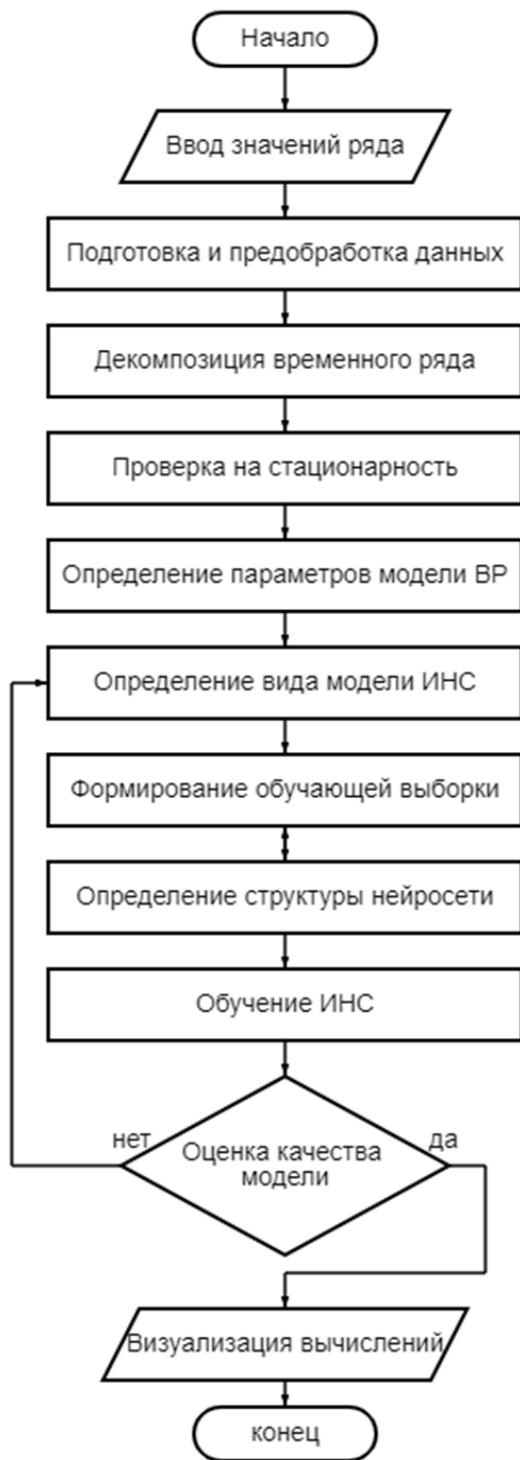


Рис. 1. Блок-схема алгоритма проектирования модели временного ряда на ИНС

- осуществить проверку временного ряда на стационарность с использованием статистических тестов, включая дополненный тест Дики-Фуллера; в случае необходимости выполнить преобразование к стационарному виду (метод конечных разностей);
- определить параметры математической модели временного ряда (автокорреляционная функция (частично автокорреляционная) преобразованного стационарного ряда для устранения зависимости между промежуточными наблюдениями);
- определить вид модели ИНС на основании выявленных свойств временного ряда;
- сформировать обучающую выборку на основе исходных значений;
- определить структуру нейронной сети: состав входов, число слоёв, количество нейронов в слое;
- непосредственно обучить нейросеть (алгоритм обратного распространения и модификации, метод сопряжённых градиентов, метод Левенберга-Маркара и др.);
- оценить качество построенной модели, в том числе на данных, не использованных для обучения; внести корректировки в параметры в случае получения неудовлетворительных результатов обучения;
- окончательно обучить и построить модель (запомнить ИНС) для дальнейшего применения при прогнозировании исследуемого временного ряда.

По сформированной информации о временном ряде выполняется построение его прогнозной математической модели. На основе предложенного способа была разработана блок-схема алгоритма, отражающая последовательность всех этапов построения модели, основанной на ИНС (см. рис. 1).

Иллюстрирующий пример. Временной ряд представляет собой статистические данные о численности населения города Комсомольска-на-Амуре, подобранные по годам. Поскольку рассматриваемый в примере временной ряд является стационарным, необходимо использовать соответствующую нейросетевую модель временного ряда следующего вида:

$$y_k = f(y_{k-1}, y_{k-2}, \dots, y_{k-n}),$$

где $n = \max(p, q)$, параметры p и q определены на основании автокорреляционной (частично автокорреляционной) функции, – и обучающую выборку вида

$$\{(y_{k-n}, \dots, y_{k-2}, y_{k-1}, y_k), t = \overline{n+1, L}\}.$$

Для описания процедуры построения и работы нейронной сети в программе Statistica спрогнозируем значения показателя социально-экономического развития муниципального образования. Входные данные представлены на рис. 2.

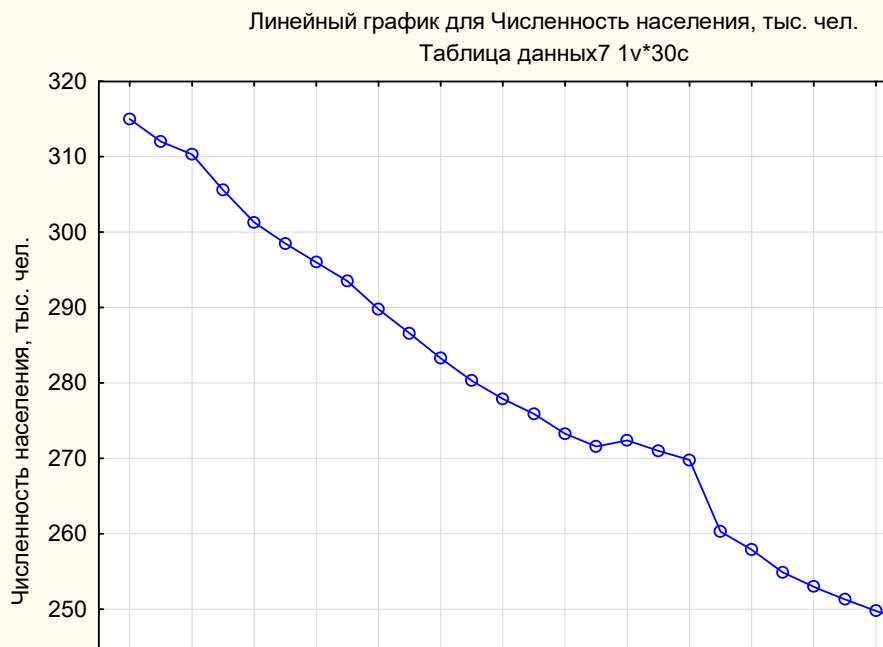


Рис. 2. Входные данные для построения ИНС

Устанавливается тип задачи (Временные ряды (регрессия)) и далее проектируется структура искусственной нейронной сети: производится выбор переменной «Численность населения»; подбирается стратегия (автоматизированная нейронная сеть (АНС)); создаются подвыборки и также задаётся период прогнозирования.

Контрольная выборка применяется следующим образом: при росте её значения необходима остановка обучения, т. к. происходит переобучение модели.

Задаются расчётные параметры перед построением и обучением искусственной нейронной сети. Настройка параметров ИНС представлена на рис. 3.

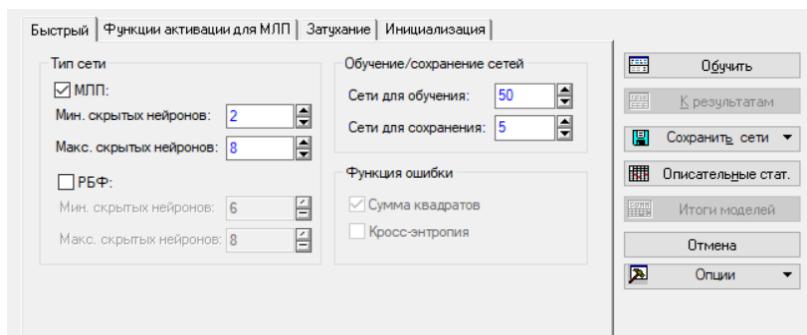


Рис. 3. Настройка параметров ИНС

Следующим этапом осуществляется обучение нейронной сети. На контрольном и тестовом множествах предусмотрено сравнение по различным критериям построенных сетей. Далее производится анализ результатов. В табл. 1 представлено описание построенных сетей.

Наилучшие сети будут иметь наибольшую производительность, которая характеризуется корреляцией исторических и спрогнозированных значений ряда.

Далее производится оценка распределения остатков для обучающей и контрольной выборки (см. рис. 4).

Таблица 1

Параметры ИНС

Модель	Архи- тектура	Произ- води- тель- ность обуче- ния	Кон- троль- ная произ- води- тель- ность	Тесто- вая про- изводи- тель- ность	Ошибка обуче- ния	Кон- троль- ная ошиб- ка	Тесто- вая ошиб- ка	Алго- ритм обуче- ния	Функ- ция ошиб- ки	Функция активации скрытых нейронов	Функция активации выходных нейронов
I	MLP 1-3-1	0,9049	0,9988	0,8859	1,5317	3,0472	0,6990	BFGS 99	Сум. квадр.	Гипербо- лическая	Логисти- ческая
II	MLP 1-8-1	0,9043	0,9988	0,8851	1,6838	3,0889	0,8920	BFGS 172	Сум. квадр.	Логисти- ческая	Логисти- ческая
III	MLP 1-2-1	0,9041	0,9985	0,8834	1,6721	3,6324	0,6759	BFGS 37	Сум. квадр.	Гипербо- лическая	Экспо- нента
IV	MLP 1-8-1	0,9035	0,9985	0,8835	1,8065	3,2996	0,5411	BFGS 51	Сум. квадр.	Гипербо- лическая	Логисти- ческая
V	MLP 1-8-1	0,9037	0,9985	0,8831	1,8423	3,2529	0,6616	BFGS 29	Сум. квадр.	Логисти- ческая	Экспо- нента

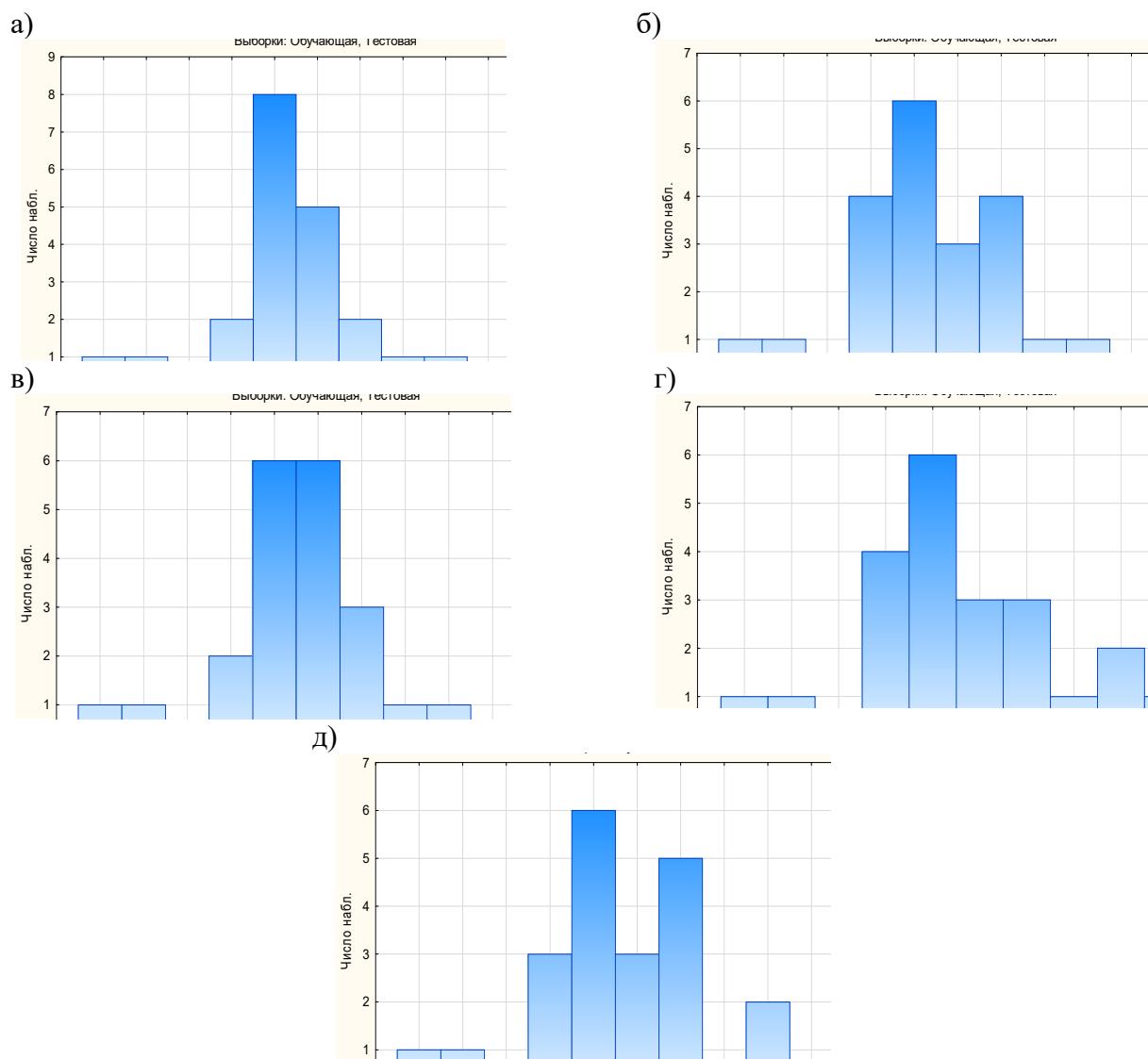


Рис. 4. Гистограммы распределения остатков по моделям: а – I; б – II; в – III; г – IV; д – V

Очевидно, что все модели демонстрируют достаточно адекватное распределение остатков. Также иллюстрацией качественно построенной модели является построенная диаграмма, представленная на рис. 5.

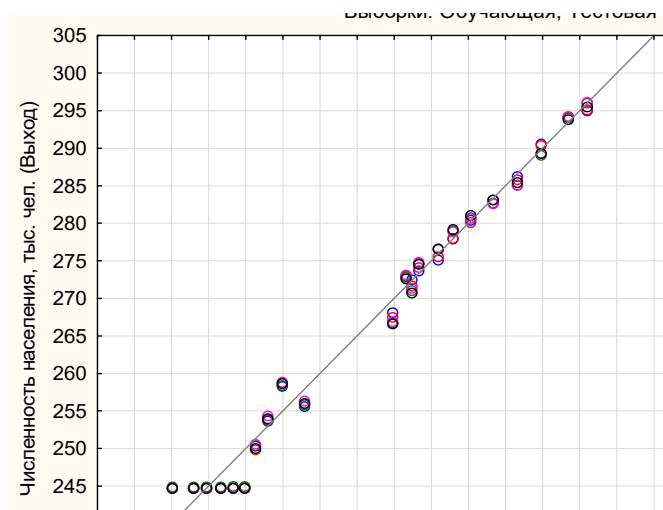


Рис. 5. Диаграмма рассеяния целевых и выходных переменных

Поскольку явные выбросы не наблюдаются, делаем вывод о том, что ИНС достаточно хорошего качества.

Графическим методом оценивается, насколько хорошо данные модели прогнозируют исходный временной ряд (см. рис. 6).

Каждое значение предсказанного ряда строится по предыдущим значениям исходного ряда. Для прогнозирования будущих значений используется проекция временного ряда.

Поскольку среднее значение отклонения значений временного ряда, построенного по первой модели, принимает наименьшее значение, таким образом, делаем вывод, что наиболее точно исходному ряду соответствует первая модель.

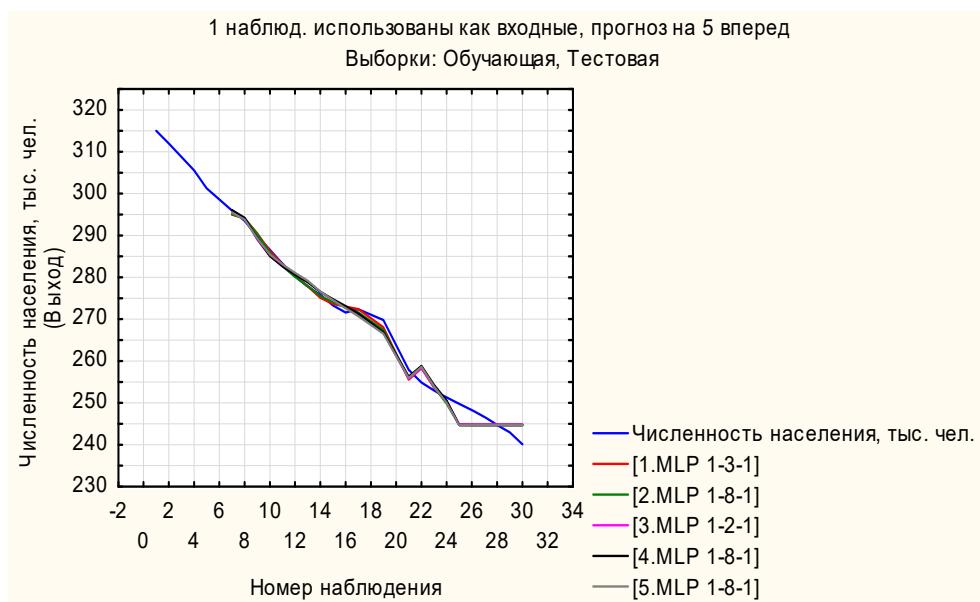


Рис. 6. Исходный ряд и предсказанные значения моделей

Оптимальная ИНС характеризуется наименьшими ошибками на обучающем, контрольном и тестовом подмножествах. Значения параметров обученной нейросети подтверждают качество построенной модели (см. табл. 2).

Для повышения точности прогноза предлагается построить дополнительные сети. Для построения только линейной модели регрессии выбрана тождественная функция активации. Запускается процесс обучения.

Параметры ИНС

Таблица 2

Тип сети	MLP 1-3-1		
Вид множества	Обучающее	Контрольное	Тестовое
Производительность сети	0,904850	0,998818	0,885894
Ошибка сети	1,531679	3,047173	0,699031

Производительность построенных сетей практически одинаковая, выбирается первая и новая сеть с наибольшей производительностью. Далее строится график проекции (см. рис. 7).

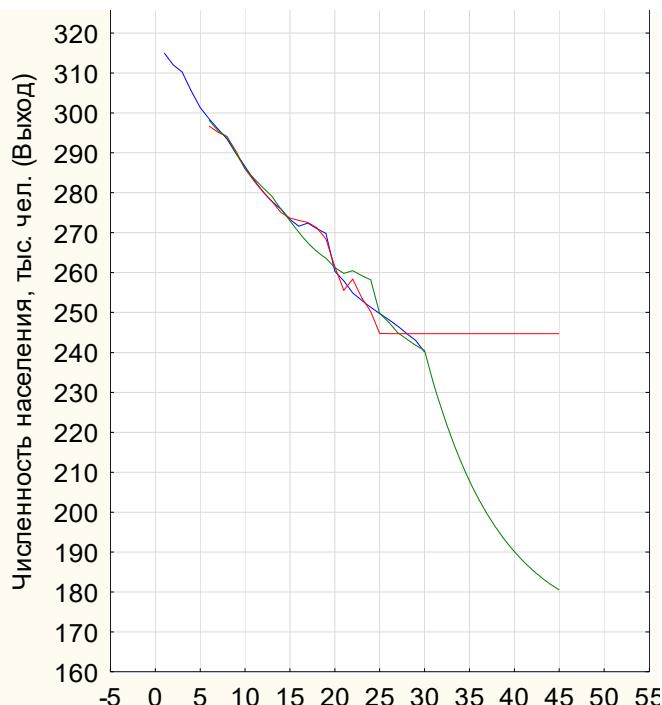


Рис. 7. Графики проекций

Очевидно улучшение качества прогнозных значений, полученных по линейной модели. Прогнозные значения представлены в табл. 3.

Прогнозные значения ИНС

Таблица 3

Год	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Население, тыс. чел.	232,26	224,97	218,53	212,83	207,79	203,34	199,39	195,91	192,82	190,09	187,68

При расчёте значения относительных ошибок моделей получено значение для линейной модели, равное 0,762 %, что говорит о её высоком качестве.

Что касается классических методов, то, например, модель АРПСС (ARIMA), предложенная в 1976 году Боксом и Джленкином и включающая не только параметры авторегрессии, но и параметры скользящего среднего, показывает на этих же самых данных ошибку 0,844 %. Поэтому можно говорить о достаточно схожих результатах как нейронных сетей, так и классических методов для данной модельной задачи. Необходимо также акцентировать внимание на том, что применение технологии нейронных сетей не преследует своей целью вытеснение традиционных методов, а увеличивает охват вычисляемых задач.

Выводы. Сформулирована постановка задачи и предложено её решение на основе нейронных сетей. Предложен алгоритм проектирования структуры нейронной сети. Рассмотрено практическое применение описанной вычислительной технологии при решении задачи экономики и управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов, О. С. Байесовское оценивание с использованием нейронной сети с радиальными базисными функциями / О. С. Амосов, С. Г. Баена // Информатика и системы управления. – 2013. – № 2 (36). – С. 127-133.
2. Hao, Hu, Image interpolation using classification-based neural networks / Hao, Hu, Holman P. M., G. de Haan // IEEE International Symposium on Consumer Electronics. – 2004. – Р. 133-137.
3. Nasonov, A. V. Edge-directional interpolation algorithm using structure tensor / A. V. Nasonov, A. S. Krylov, X. Petrova, M. N. Rychagov // Electronic Imaging, Image Processing: Algorithms and Systems XIV – Society for Imaging Science and Technology. – 2016. – Р. 1-4.
4. Марченко, О. В. Сравнительный анализ методов прогнозирования социально-экономического развития муниципального образования / О. В. Марченко, Г. И. Бурдакова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № IV-2 (36). – С. 98-103.
5. Марченко, О. В. Проблемы прогнозирования показателей социально-экономического развития муниципального образования / О. В. Марченко, Г. И. Бурдакова // BENEFICIUM. – 2019. – № 3 (32). – С. 52-66.
6. Гафаров, Ф. М. Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. пособие / Ф. М. Гафаров, А. Ф. Галимьянов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 121 с.
7. Ширяев, В. И. Финансовые рынки. Нейронные сети. Хаос и нелинейная динамика / В. И. Ширяев. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 232 с.
8. Николенко, С. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей / С. Николенко, А. Кадурин, Е. Архангельская. – СПб.: Питер, 2021. – 476 с.
9. Галушкин, А. И. Нейронные сети: основы теории / А. И. Галушкин. – М.: РиС, 2014. – 496 с.
10. Takens, T. Detecting strange attractors in turbulence / T. Takens // Lec. Notes in Math., 1981. – Р. 366-381.
11. Нейроинформатика / А. Н. Горбань, В. Л. Дунин-Барковский, А. Н. Курдин и др. – Новосибирск: Наука, 1998. – 296 с.

Черняго А. Б.
A. B. Chernyago

ТЕХНОЛОГИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОИСКА ДАННЫХ В ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА ЭТАПЕ СТРОИТЕЛЬСТВА

TECHNOLOGY IMPLEMENTATION OF INTELLIGENT DATA SEARCH IN THE PROJECT DOCUMENTATION OF THE AUTOMOTIVE ROAD AT THE CONSTRUCTION STAGE

Черняго Андрей Борисович – аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск). E-mail: abs706080@gmail.com.
Andrei B. Chernyago – Post-graduate Student, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk). E-mail: abs706080@gmail.com.

Аннотация. Рассмотрена возможность реализации интеллектуального поиска данных в проектной документации автомобильной дороги на этапе строительства при помощи Томита-парсера. Анализ и обработку текста предполагается осуществлять с использованием мобильного устройства, применяя для основных операций и вычислений облачный сервер с готовой программной средой.

Summary. The possibility of implementing intelligent search for data in the pro-project documentation of the automotive road at the construction stage with the help of Tomita-parser is considered. Analysis and processing of text is assumed to be carried out when using a mobile device, applying a cloud server for basic operations and calculations with a ready-made software environment.

Ключевые слова: автомобильные дороги, искусственные нейронные сети, BIM, интеллектуальный поиск, парсер.

Key word: roads, artificial neural networks, BIM, intelligent search, parser.

УДК 05.13.18

В ходе строительства, реконструкции, капитального ремонта линейного объекта подрядная организация, выполняющая работы, и организация, выполняющая строительный контроль, постоянно взаимодействуют. При производстве автомобильной дороги и при сдаче выполненных работ прежде всего осуществляется контроль соответствия выполняемых работ проектной документации (ПД) и требованиям технических регламентов.

Проектная документация – это основной источник технологических и конструктивных решений объекта, заложенных на этапе проектирования. На её основе подрядная организация, выполняющая строительные работы, составляет проект производства работ (ППР), где учитывает все свои имеющиеся ресурсы при организации работ по возведению этого объекта.

Данные, содержащиеся в ПД и ППР, нужно сверять с данными, которые представляются в исполнительной документации, где также для проверки потребуются нормы, рекомендации, ведомости технологических и конструктивных решений, а также проект организации строительства (ПОС). Всё это требует поиска необходимой информации для надзора непосредственно на месте производства работ. Но осуществлять подобный поиск, зачастую держа в руках тома печатных документов, не всегда удобно. Наиболее практичным и эффективным поиск проектных решений (при наличии доступа в интернет) представляется с использованием ноутбуков, планшетных компьютеров или мобильных устройств [5]. Такой контроль должен сопровождаться анализом существующей ситуации [6] с целью оптимизации и оперативного разрешения, связанного с образовавшейся нехваткой времени, что требует автоматического отслеживания нарушений режима работ [8], технологического процесса эксплуатации или сроков работ, поставленных в календарном графике.

Результатом проверки может являться отчёт с перечнем рекомендаций по устранению замечаний. При значительных нарушениях таким отчётом будет являться предписание, которое составляется на оптимальный срок (в рамках календарного плана), необходимый для исправления несоответствий.

Материал и методы исследования. При организации поиска в проектной документации целью является точное определение смысла текста, закладываемого потребителем. Чтобы предварительно уменьшить объём обрабатываемого текста и выделить его смысловую нагрузку в набор текстового корпуса (близких по смыслу слов) при поиске, эффективно применять средства искусственных нейронных сетей с векторизацией слов [1]. Далее нужно провести грамматический разбор слов или предложений («*parsing*» от лат. «*pars orationis*» означает часть речи) в этом корпусе текста для выделения ключевых и значимых для поиска результата данных.

Остановимся на некоторых понятиях, принятых в данной технологии.

Парсинг – это метод разбивки текста на синтаксические компоненты, которые затем переформатируются для дальнейшего использования в прикладных задачах.

Для анализа заданного текста обычно используют отдельный лексический анализатор – **токенайзер** (токенизатор) или лексер, который разбивает входные данные на отдельные символы, называемые токенами.

Токены в свою очередь являются входными символами для специальной программы – парсера. Парсер анализирует эти символы, создавая синтаксическое древо, на основе чего генерируется код или идёт выборка по некоторым критериям.

Для реализации интеллектуального поиска данных в проектной документации автором статьи была применена технология компании «Яндекс» Томита-парсер (написан на языке программирования C++) при использовании облачных сервисов с готовой программной средой на удалённых серверах (это позволит задействовать портативные устройства при обработке необходимых данных на стройке). Следует отметить, что Томита-парсер в 2012 году был выложен в открытый доступ с лицензией, позволяющей коммерческое использование.

Томита-парсер работает по следующему принципу: по написанным пользователем шаблонам (КС-грамматикам) из текста выделяются цепочки слов или факты. По сути, *факты* – это таблицы с колонками (*полями*). Парсер анализирует предложения, заполняя факты соответственно конкретной грамматике на специальном языке в отдельный файл [2]. Такой процесс называется *интерпретацией*.

Укажем лингвистические процессы, на основе которых работает парсер. Это упомянутый выше токенизатор, который выполняет разбиение входных данных на слова, *сегментатор*, где выполняется разбиение на предложения, и, наконец, *морфологический анализатор* (*mystem*).

Парсер включает ряд компонентов, перечисленных ниже.

КС-грамматики содержат набор правил, где описана синтаксическая структура выделяемых цепочек слов. Таким образом, на основе входной текстовой информации парсер получает цепочки распознанных слов.

Газеттер – это словарь ключевых слов, на основе которых КС-грамматики выполняют анализ. Газеттер содержит *статьи*, включающие множества словосочетаний по некоему общему признаку. Основное поле статьи называется *ключом*. Причём в одной статье может быть несколько ключей. Здесь указано, как именно ищутся цепочки распознанных слов.

Основным компонентом грамматики для Томита-парсера являются *правила*. Формат записи каждого правила следующий:

$$S \rightarrow S_1 \dots S_n \{ Q \}.$$

Здесь левая и правая части разделены символом \rightarrow . Справа – список *нетерминалов* или *терминалов* с указанием условий (Q), которые могут отсутствовать, слева – один нетерминал (S в примере, приведённом выше).

Рассмотрим алгоритм работы парсера на примере одного предложения и одной грамматики:

1. Анализируются вхождения всех ключей из газеттира. При наличии нескольких слов в ключе создаётся так называемый *мультиворд* – новое искусственное слово.

2. Далее делается отбор этих ключей соответственно правилам в грамматике. Если среди отобранных ключей встречаются пересекающиеся друг с другом мультиворды, то парсер стремится покрыть предложение непересекающимися ключевыми словами таким образом, чтобы большие фрагменты предложения были охвачены ими.

3. Полученная цепочка слов и мультивордов передаётся в качестве входной информации GLR-парсеру, который строит из них возможные варианты, как можно шире покрывающие предложение.

4. Затем запускается процедура интерпретации на синтаксическом древе, которое построил парсер. При интерпретации отбираются подузлы, а соответствующие им слова записываются в поля фактов, создаваемые грамматикой.

Анализ и обработку текста предполагается осуществлять при использовании мобильного устройства, применяя для основных операций и вычислений облачный сервер.

Облачный сервер – это обычно виртуальный вычислительный сервер, к которому получают доступ пользователи по сети. Облачные серверы предназначены для обеспечения одинаковых функций, поддержки одних и тех же операционных систем (ОС) и приложений. Они предлагают характеристики производительности, аналогичные традиционным физическим серверам, которые работают в локальном центре обработки данных.

Данные могут храниться на локальном компьютере. Возможно также их хранение в облаке либо непосредственно в базе данных.

Результаты исследования и их обсуждение. В качестве примера был произведён поиск во фрагменте текста из пояснительной записи ПД значений параметров [3] конструктивных элементов дорожной одежды (ДО) автомобильной дороги.

Рассмотрим описанную выше технологию на примере сбора информации о том, у какого конструктивного элемента ДО какое значение из текста (см. рис. 1).

Объёмы работ по устройству дорожной одежды по основной дороге:

Устройство дорожной одежды Тип 1

- Устройство дополнительного слоя основания из щебено-песчаной смеси 0/31,5 толщиной 0,2м-32645,17 м3;*
 - Устройство нижнего слоя основания из щебено-песчаной смеси К90 М1 0/31,5 толщиной 0,15м-86427,13 м2;*
 - Устройство верхнего слоя основания из асфальтобетона А220н по ГОСТ Р 58406.2-2020 h=0,07м - 77132,86 м2;*
 - Устройство слоя покрытия из асфальтобетона А16Вн по ГОСТ Р 58406.2-2020, толщиной 0,05м-77132,86 м2;*
 - Устройство присыпных обочин из ПГС- 4085,28 м3;*
 - Укрепление обочин из щпс К90 М1 0/31,5 / асфальтогранулят толщиной 0,12м - 3042,91 м3.*

Рис. 1. Фрагмент текста из пояснительной записи проектной документации

В первую очередь обозначим и опишем поля факта. Факт представляется в виде таблицы, а поля – это колонки этой таблицы. В данном примере требуются две колонки: первая – для названия конструктивного элемента ДО, вторая – для его значения. Сам факт назовём PavFact.

message PavFact: NFactType.TFact

```

{
    required string Pavement = 1;
    required string Value = 2;
}

```

Напишем грамматику, которая может описать рассматриваемый текст:

```

Pav -> Word<kwtype=pav>;
Val -> AnyWord<wff=/[0-9]{4,7},[0-9]{1,2}\s?[а-я]?[2-3]?/>;
S -> Pav interp(PavFact.Pavement) AnyWord* Val interp(PavFact.Value);

```

Правило Pav описывает возможные предикаты, которые могут указывать на конструктивный элемент ДО, и ссылается на kw-type газеттира pav Word<kwtype=pav>. Терминал здесь выбран Word, т. к. искомые слова могут быть и существительными, и прилагательными. Правило Val описывает размерные значения, запишем в виде регулярного выражения для чисел от 0000,00 до 9999999,99 с возможными единицами измерения «м2» или «м3» в конце: AnyWord<wff=/[0-9]{4,7},[0-9]{1,2}\s?[а-я]?[2-3]?/>. Правило, собирающее вместе нетерминалы: $S \rightarrow Pav \ interp(PavFact.Pavement) \ AnyWord^* \ Val \ interp(PavFact.Value)$.

Создадим статью, в которой определим наборы наименований слоёв дорожной одежды в поле статьи *key*. В поле *key* каждое слово следует описать в единственном числе и именительном падеже (для существительных). Каждое название слоя ДО уникально, и к ним не нужно применять грамматические пометы в описании ключей.

```

pav "ДСО"
{ key = "дополнительный слой основание" lemma = "дополнительный слой основания" }
*** аналогично для каждого последующего слоя основания ДО ***
pav "СП"
{ key = "покрытие" lemma = "слой покрытия" }
pav "ПО"
{ key = "присыпной обочина" lemma = "присыпные обочины" }
pav "УО"
{ key = "укрепление обочина" lemma = "укрепление обочин" }
TAuxDicArticle "СлойДО"
{ key = { "tomita:elementdo.cxx" type=CUSTOM } }

```

В статье типа *pav* перечисляются ключевые слова и словосочетания конструктивных слоёв ДО, чтобы на соответствующие типы этих слоёв можно было ссылаться в грамматике. Статья СлойДО ссылается на грамматику (elementdo.cxx), о которой говорилось ранее. Для того чтобы в поле *PavFact.Pavement* все записи про конструктивный элемент были единообразны, добавлено поле *lemma*=, учитывающее вариант названия, который должен быть использован при нормализации.

После служебных импортов с помощью ключевого слова *message* укажем новый тип (kw-тип) *pav* в файле *kwtypes_my.proto*.

```
message pav : TAuxDicArticle {}
```

Приведём конфигурационный файл (*config.proto*) для выполнения запуска парсера:

```

encoding "utf8";
TTextMinerConfig {
    Dictionary = "dic.gzt";
    PrettyOutput = "result.html";
    Input = { File = "test.txt" }

```

```
Articles = [ { Name = "СлойДО" } ]  
Facts = [ { Name = "PavFact" } ]  
Output = { File = "facts.txt" Format = text }  
}
```

Результатом обработки будет генерация файлов: *facts.txt* и *result.html* (см. рис. 2). Файл (*facts.txt*) содержит факты, полученные в результате обработки текста. Второй файл (*result.html*) включает отладочную информацию, где имеют место морфологический разбор и цепочки слов, соответствующие статьям корневого словаря.

PavFact	
Pavement	Value
дополнительный слой основания	32645,17 м3
нижний слой основания	86427,13 м2
верхний слой основания	77132,86 м2
слой покрытия	77132,86 м2
присыпные обочины	4085,28 м3
Укрепление обочин	3042,91 м3

Рис. 2. Факты из файла *result.html*

Реализуем данный алгоритм поиска через мобильное устройство путём загрузки исходного текстового документа на облачный сервер для дальнейшей обработки и посчитаем количество застраиваемого трафика для полной операции.

Используются два приложения, серверное и клиентское, разработанные в Visual Studio 19 [4].

Серверное приложение создано на основе шаблона консольного приложения с .NET Framework. Порт и IP-адрес текущего сервера будут использоваться в качестве конечных точек для возможности связаться с клиентом по TCP. Консольное приложение приёма и обработки сообщения [4] и отправки команды в командную строку написано на языке C#.

В качестве команды от клиента мы должны получить строку «*parsing*».

Клиентское приложение создано на основе проекта Xamarin.Forms. Приложение требует ввода данных IP-адреса и порта соответствующего сервера.

После установки соединения появится возможность отправить команду «*parsing*», которая задействует командную строку на удалённом сервере, активировав парсер.

Выходные данные парсера на сервере будут отправлены в данное приложение в виде обработанного текста и фактов (в виде текста, который далее можно сохранить в формате xml для последующей автоматической обработки), выделенных в процессе парсинга.

Количество трафика мобильной связи, используемого для отправки команды на сервер и приёма выходных данных на мобильное устройство, определилось в размере 10-11 КБ.

Выводы. Важным результатом использования данной программной технологии является оперативный поиск информации из ПД в условиях нахождения на строительном участке даже при минимальной мобильной связи. При этом следует отметить, что с мобильного устройства предполагается отправлять лишь команды на удалённый сервер. Далее этот сервер будет обрабатывать весь массив текстовой части ПД, а обратно отправленные выходные данные на основе ключевых слов и значений будут давать конкретные ответы на поставленные вопросы. Подобный объём выходной информации не превышает нескольких десятков килобайт.

Таким образом, создаётся многомерность информационной модели автомобильной дороги [8–12], которая дополняет эту модель доступностью информации для любого участника строительства при минимальном доступе интернета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dmitrieva, T. L., Shaburov, S. S., Chernyago, A. B. Artificial neural networks as a tool for creating a road information model // IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences this link is disabled, 2021, 751(1), 012109.
2. Панкратов, Д. Томита-парсер. Руководство разработчика. Версия 1.0 / Д. Панкратов, Н. Остапук, В. Бочаров. – М.: ООО «ЯНДЕКС», 2015. – 41 с.
3. Калина, А. Извлечение фактов с Томита-парсер / А. Калина // Калина Алексей, блог программиста. – URL: <https://alexeykalina.github.io/technologies/tomita-parser.html> (дата обращения: 10.12.2021). – Текст: электронный.
4. Xamarin.Forms – Controlling Your PC With Your Phones Using TCP/IP Protocol – Part One // Ahsan Sidique // Available. – URL: <https://www.ahsancodes.com/2020/04/xamarinforms-controlling-your-pc-with.html> (дата обращения: 10.12.2021). – Текст: электронный.
5. Крастынь, В. В. Исследование и разработка методов извлечения именованных сущностей / В. В. Крастынь. – СПб., 2017. – 45 с.
6. Рубайло, А. В. Программные средства извлечения информации из текстов на естественном языке / А. В. Рубайло, М. Ю. Косенко // Альманах современной науки и образования. – 2016. – № 12 (114). – С. 87-92.
7. Мифтахова, Р. Г. Извлечение лексических единиц с релевантными характеристиками как основная задача обработки естественного языка / Р. Г. Мифтахова // Доклады Башкирского университета. – 2017. – Т. 2. – № 4. – С. 636-640.
8. Рогачёв, И. BIM-стандарт организации для линейных объектов / И. Рогачёв, Д. Пожидаев, С. Бенклян. – М., 2015. – 58 с.
9. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook. Second edition. – NJ: Wiley, 2011. – 626 с.
10. Кузахметова, Э. К. К новой нормативной базе современных дорог / Э. К. Кухахметова // Дороги. Инновации в строительстве. – 2020. – № 83. – С. 12-15.
11. СП 301.1325800.2017. Правила организации работ производственно-техническими отделами / Национальный исследовательский университет «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ). – М.: Минстрой России, 2017. – 32 с.
12. Implementation of Building Information Modeling (BIM) in the Infrastructure Division of Deutsche Bahn AG, Deutsche Bahn AG 2019, Available. – URL: <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/4114234/f17c340682cd9e8f6bfe3faae86e0f52/BIM-Strategy-Deutsche-Bahn-en-data.pdf> (дата обращения: 10.12.2021). – Текст: электронный.
13. Ермаков, П. Д. Организация видеосвязи / П. Д. Ермаков, Ю. Ю. Рейман, В. А. Алешин. – М., 2010. – 47 с.
14. Ямашкин, С. А. Выделение фактов о геопозиции из текстов на естественном языке / С. А. Ямашкин, С. А. Федосин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 11. – С. 265-268.
15. National Building Information Modelling Standard. National Institute of Building Sciences, buildingSMART alliance. 2007. 182 P.
16. Дмитриева, Т. Л. Разработка и тестирование численных алгоритмов решения условно экстремальных задач / Т. Л. Дмитриева, Х. Уламбаяр // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 59-72.

МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

Федорченко С. К., Давыдов В. М., Гимадеев М. Р., Иванищев Ю. Г.
S. K. Fedorchenko, V. M. Davydov, M. R. Gimadeev, U. G. Ivanishev

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСКАТНОГО ИНСТРУМЕНТА В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

USE OF ROLLING TOOL UNDER CONDITIONS OF MULTIPLE PRODUCTION

Федорченко Сергей Константинович – аспирант Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: s.k.fedor@mail.ru.

Sergey K. Fedorchenko – Postgraduate, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: s.k.fedor@mail.ru.

Давыдов Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: davellut@mail.ru.

Vladimir M. Davydov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Technological Informatics and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: davellut@mail.ru.

Гимадеев Михаил Радикович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: jl_wiegott@list.ru.

Mikhail R. Gimadeev – PhD in Engineering, Associate Professor, Technology Computer Science and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: jl_wiegott@list.ru.

Иванищев Юрий Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: Ivanishev41@mail.ru.

Urii G. Ivanishev – PhD in Engineering, Associate Professor, Technology Computer Science and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: Ivanishev41@mail.ru.

Аннотация. Рассматривается использование раскатного инструмента в условиях многономенклатурного производства с целью уменьшения шероховатости поверхности и повышения производительности труда за счёт уменьшения времени обработки и исключения переустановок детали между оборудованием.

Summary. The paper considers the use of a rolling tool under conditions of multi-nomenclature production in order to reduce surface roughness and increase labor productivity by reducing machining time and excluding reinstallation of the part between equipment.

Ключевые слова: раскатка поверхности, шероховатость, твёрдость поверхности, полирование.

Key words: surface rolling, roughness, surface hardness, polishing.

УДК 621.7

Введение. В научно-технической литературе вопросам обеспечения производительности и шероховатости поверхности при обработке на окончательных операциях уделяется большое внимание [1–9]. В условиях многономенклатурного производства необходимо получать поверхности с различной амплитудой параметров шероховатости, при том что в большинстве случаев необходимо обрабатывать только определённые поверхности, чаще всего криволинейной, пространственно-сложной формы. Ввиду сложности формообразующих траекторий операции возможны только с использованием технологического оборудования (ТО) с числовым программным управлением (ЧПУ). К примеру, требуемая шероховатость рабочих шеек валов для разного типа машин находится в диапазоне $Ra = 0,4 \dots 0,2$ мкм. Если для получения шероховатости в пределах

$R_a = 6,3 \dots 1,6 \text{ мкм}$ можно обойтись без операций шлифования и полирования, то для получения шероховатости в пределах $0,8 \dots 0,2 \text{ мкм}$ весьма велика роль таких окончательных операций, обеспечивающих качество поверхностей с использованием дополнительного ТО. Помимо вышесказанного, шероховатость зависит и от обрабатываемого материала [9]. Например, при обработке жаропрочной нержавеющей стали 08Х13 требуемая шероховатость поверхности достигается на чистовых операциях шлифовки и полировки. Окончательные (чистовые) операции занимают значительную часть общего времени обработки, например, при точении крупногабаритных деталей типа вала выбор режимов обработки ограничен значением шероховатости на поверхностях, указанных на чертеже.

В целях оптимизации производственного процесса изготовления детали есть смысл в использовании специального оборудования для токарных станков, чтобы исключить необходимость переустановки детали с одного станка на другой. Так как раскатка относится к процессам поверхностно-пластического деформирования (ППД), процесс обработки протекает без снятия стружки. В работах [10–12] рассматривается процесс раскатки фасонных и плоских поверхностей, однако для токарных работ также актуально исследовать данный процесс.

Цель данной работы – разработка технологии получения поверхностей со среднеарифметической шероховатостью в заданном диапазоне с использованием раскатного инструмента.

Для достижения этой цели ставятся следующие задачи:

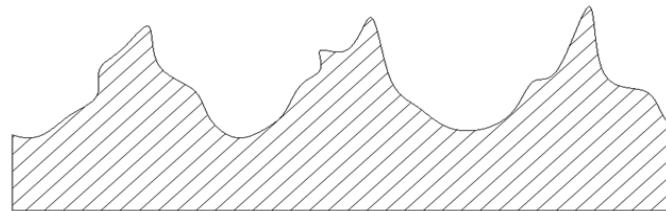
1. исследовать влияние режимов обработки на изменение шероховатости детали;
2. определить изменение размеров обрабатываемой детали;
3. исследовать изменение прочности поверхности детали после раскатки.

Методика исследований. Процесс раскатки поверхностей, как оговаривалось выше, протекает без снятия стружки, за счёт пластического разглаживания неровностей. В работе [13] исследуется процесс ППД плоской поверхности на микроуровне и рассматриваются явления, сопровождающие данный процесс. А. А. Лукьянов [14] представил обзор режимов обработки ППД выглаживанием для наружных цилиндрических поверхностей. На рис. 1 представлена поверхность до раскатки и после. Благодаря прижиму ролика к детали с усилием (натягом) неровности под действием сил трения ролика о деталь вершины неровностей деформируются и заполняют собой впадины детали, образуя наклённый слой, благодаря этому получаем поверхность с необходимой шероховатостью. Принцип работы инструмента показан на рис. 2. Стрелками показан маршрут движения ролика в процессе обработки. В направлении 1 ролик подходит к детали и, прижимаясь с определённым натягом к поверхности, таким образом, готов к работе, направлением 2 указан рабочий ход ролика вдоль детали; после обработки по траектории детали ролик отходит от поверхности, процесс принципиально не отличается от точения, ролик движется вдоль детали, тем самым раскатывая поверхность. Сам ролик закреплён в корпусе на оси, т. е. при обработке ролик крутится свободно.

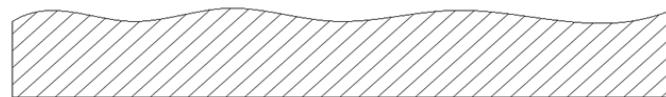
В данной работе используется раскатной инструмент Yamasa RX-45. В качестве детали взят цилиндрический образец стали марки 40Х с химическим составом, представленным в табл. 1. Данный материал часто применяется для производства валов и других тел вращения, т. к. он отвечает требованиям по прочностным и износостойким требованиям к деталям, применяемым в машиностроении.

Раскатной инструмент имеет технические характеристики и требования к обрабатываемым поверхностям, которых рекомендует придерживаться производитель (см. табл. 2).

Для измерения шероховатости поверхности в ходе эксперимента использовался портативный профилометр Mitutoyo Surftest SJ-210 с радиусом измерительной иглы 2 мкм, измерительное усилие 0,75 мН, диапазон отображения $R_a, R_q: 0,01 \dots 100 \text{ мкм}$, погрешность измерений на длине оценки в пределах 5 %.



Поверхность до раскатки, условная шероховатость
 $Ra = 3,2$



Поверхность после раскатки, условная шероховатость
 $Ra = 0,8$

Рис. 1. Поверхность после предварительной обработки и после роликовой раскатки

Результаты экспериментов. Было поставлено 2 эксперимента. Первый направлен на исследование изменения твёрдости поверхности. Раскатка проводилась по режимам, рекомендуемым производителем инструмента: натяг ролика $N = 0,2$ мм, подача $F = 0,08$ мм/об, скорость обработки $S = 120$ мм/мин.

Отдельно производилась обработка диаметра и торца детали. Измерения шероховатости проводились в соответствии с методикой несколько раз, чтобы получить наиболее точное значение шероховатости поверхностей. Полученные данные в ходе эксперимента сведены в табл. 3.



Рис. 2. Маршрут движения ролика при обработке детали

Химический состав опытного образца

Таблица 1

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
98,5	0,36	0,2	0,63	0,8	0,1	0,08

Таблица 2

Технические характеристики оборудования

Максимальная твёрдость обрабатываемого материала	до 45 HRC
Максимальная скорость обработки, м/мин	300
Максимальная подача, мм/об	1
Предварительная шероховатость Ra, мкм	12,5...1

Таблица 3

Данные, полученные при первом эксперименте

Поверхность измерения	Шероховатость до раскатки Ra, мкм	Шероховатость после раскатки Ra, мкм
Торец	0,660...0,640	0,089...0,079
Диаметр	1,820...1,770	0,172...0,120

Опираясь на данные табл. 3, рассчитаем все значения как среднее для каждой поверхности и заполним табл. 4.

Таблица 4

Обработанные данные после первого эксперимента

Параметры	До раскатки	После раскатки
Средняя шероховатость торца Ra, мкм	0,650	0,082
Средняя шероховатость диаметра Ra, мкм	1,770	0,150
Твёрдость диаметра НВ	150	202
Твёрдость торца НВ	152	206
Диаметр, мм	101,91	101,9

Таким образом, проанализировав данные табл. 4, можно сделать следующие выводы: средняя шероховатость торца уменьшилась в 7,9 раз, а средняя шероховатость диаметра уменьшилась в 11,8 раз. Твёрдость увеличилась на 25 % на диаметре и на 26 % на торце.

Второй эксперимент направлен на исследование влияния режимов обработки и начальной шероховатости на изменение качества поверхности после раскатки. В табл. 5 представлены полученные данные второго эксперимента.

Таблица 5

Данные второго эксперимента

№ опыта	Натяг, мм	Скорость резания, мм/мин	Подача, мм/об	Шероховатость Ra до обработки, мкм	Шероховатость Ra после обработки, мкм
1	0,07	100	0,2	3,27	0,22
2	0,25	150	0,4	3,27	0,33
3	0,4	100	0,2	3,27	0,06
4	0,5	150	0,4	3,27	0,07
5	0,44	100	0,8	1,9	0,17
6	0,44	100	0,4	1,9	0,14
7	0,44	150	0,4	1,9	0,06
8	0,44	200	0,4	1,9	0,06

В большинстве случаев поверхности невооружённым глазом друг от друга не отличаются. На рис. 3 представлены типовые поверхности.

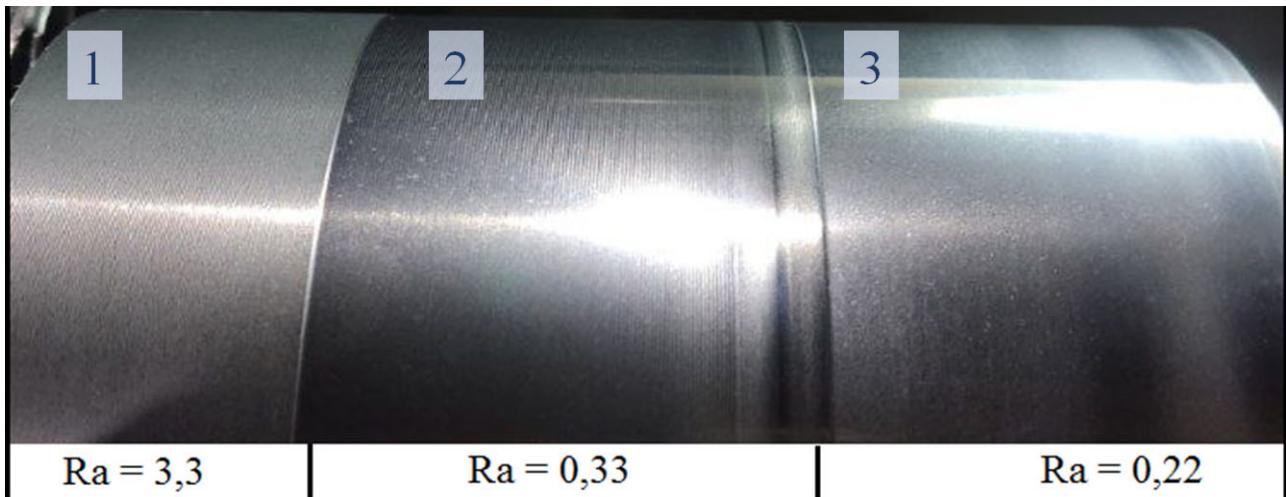


Рис. 3. Поверхности: 1 – до раскатки; 2, 3 – после раскатки

В ходе раскатки выявлено, что при изменении шероховатости в среднем на 1 мкм диаметр детали уменьшается в пределах 0,005...0,01 мм.

Исходя из данных табл. 4 можно сделать следующие выводы:

- начальная шероховатость в пределах $Ra = 3,2 \dots 1,6$ мкм не влияет на конечную шероховатость после раскатки;
- подача в сравнении 0,8 и 0,4 мм/об влияет на шероховатость в пределах 0,03 мкм, при сравнении подачи 0,4 и 0,2 мм/об различие шероховатости зафиксировано в 57 % (при 0,4 мм/об $Ra = 0,14$ мкм, при 0,2 мм/об $Ra = 0,06$ мкм);
- при увеличении натяга на 43 % ($0,25 \rightarrow 0,44$) шероховатость изменяется на 82 % ($0,33 \rightarrow 0,06$);
- при увеличении скорости резания на 33 % ($100 \rightarrow 150$) шероховатость изменяется на 57 % ($0,14 \rightarrow 0,06$).

Выводы. В ходе проведения экспериментов удалось выполнить поставленные задачи, а именно: выяснили влияние режимов обработки на конечную шероховатость, получили значения твёрдости, которую обеспечивает раскатной инструмент, установили, как изменяется диаметр детали после проведения раскатки.

Из всего вышесказанного сделаны следующие заключения:

- при уменьшении шероховатости с помощью раскатного инструмента на 1 мкм диаметр детали также уменьшается на 0,005...0,01 мм;
- для получения шероховатости 0,2 мкм (шероховатость, применяемая для поверхностей шеек валов в машиностроении) возможно ставить режимы: $N = 0,4$ мм; $S = 200$ мм/мин; $F = 0,8$ мм/об;
- помимо уменьшения шероховатости, раскатник позволяет упрочнить поверхностный слой детали в среднем на 25 %.

Используя данный инструмент, можно исключить из технологического процесса операции шлифования, полирования и ручной доводки. Особенно актуально использовать данный инструмент для обработки рабочих шеек валов в условиях многонорматурного производства, значение шероховатости которых должно быть, как правило, не более $Ra = 0,2$ мкм. Ограничением в использовании служат только габариты инструмента и поверхности, закрытые торцами с обеих сторон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ международной практики профильной и трёхмерной оценки шероховатости поверхности / В. М. Давыдов, В. В. Заев, П. Н. Паночевый [и др.] // Учёные заметки ТОГУ. – 2013. – Т. 4. – № 4. – С. 1061-1074.
2. Безъязычный, В. Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин / В. Ф. Безъязычный // Вестник РГАТА. – 2002. – № 2. – С. 64-78.
3. Безъязычный, В. Ф. Взаимосвязь технологических условий обработки с параметрами качества поверхностного слоя, модулем упругости и пределом выносливости детали / В. Ф. Безъязычный // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 9. – 18 с.
4. Гимадеев, М. Р. Обеспечение качества поверхности при механообработке сложнопрофильных деталей / М. Р. Гимадеев, В. М. Давыдов // Технология машиностроения. – 2018. – № 11. – С. 9-16.
5. Пономарев, Б. Б. Выбор оптимальных параметров стратегии фрезерования поверхностей сложной формы / Б. Б. Пономарев, Д. Б. Пайкин // Вестник ИрГТУ. – 2010. – № 6 (46). – С. 52-56.
6. Формирование параметров шероховатости на основе корреляционных связей при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей / В. М. Давыдов, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, А. В. Сарыгин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15. – № 6 (174). – С. 243-248.
7. Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2018. – № 10. – С. 3-13.
8. Суслов, А. Г. Проектирование операций отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием / А. Г. Суслов, Р. В. Гуров // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 3. – С. 14-16.
9. Отряскина, Т. А. Прогнозирование шероховатости обрабатываемой поверхности на основании исследования деформационных процессов при резании / Т. А. Отряскина, Д. А. Павловская // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I-1 (57). – С. 83-87.
10. Амбросимов, С. К. Чистовая обработка фасонных поверхностей обкатыванием / С. К. Амбросимов, Р. В. Грибков // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XV междунар. науч.-практ. конф., Курск, 19-20 марта 2020 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 25-28.
11. Черемухина, Н. Ю. Технологические параметры выглаживания / Н. Ю. Черемухина // Вестник научных конференций. – 2016. – № 11-5 (15). – С. 190-191.
12. Инновационный инструмент для выглаживания наружных и внутренних поверхностей деталей на станках с ЧПУ / В. П. Кузнецов, А. С. Скоробогатов, В. Г. Горгоц, С. В. Кузнецов // Современные проблемы машиностроения: труды XII Междунар. науч.-техн. конф., Томск, 28 октября – 01 ноября 2019 года / Под ред. А. Ю. Арляпова. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 147-150.
13. Kuznetsov V. P., Scorobogatov A. S., Gorgots V. G. Impact of Indentor Sliding Velocity and Loading Repetition Factor on Shear Strain and Structure Dispersion in Nanostructuring Burnishing // Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering. – Vol. 17. – № 2. – P. 161-168.
14. Лукьянов, А. А. Обзор режимов обработки металлов поверхностно-пластическим деформированием / А. А. Лукьянов, И. Н. Бобровский, А. С. Севостьянов // Инновации в науке. – 2014. – № 36. – С. 23-28.



Мокрицкий Б. Я., Скрипилев А. А.

B. Ya. Mokritsky, A. A. Skripilev

ФРЕЗЕРОВАНИЕ ВЫСОКОТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ СБОРНОЙ ТОРЦЕВОЙ ФРЕЗОЙ

MILLING OF HIGH-HARD MATERIALS WITH A PREFABRICATED END MILL

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник управления научно-исследовательской деятельностью Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)175-75-62. E-mail: boris@knastu.ru.

Boris Ya. Mokritsky – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of the Department of Research Activities, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)175-75-62. E-mail: boris@knastu.ru.

Скрипилев Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)179-28-59. E-mail: skripilev.aal@email.knastu.ru.

A. A. Skripilev – PhD in Engineering, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)179-28-59. E-mail: skripilev.aal@email.knastu.ru.

Аннотация. Требования к свойствам материалов растут стремительно. Например, в оборонной и космической отраслях твёрдость материалов на уровне HRC 50 не отвечает требованиям, нужна твёрдость HRC 65 и выше. Причём эта твёрдость нужна в поверхностном слое, а подложка должна обладать твёрдостью на уровне HRC 35. Технологии для получения таких сэндвичевых материалов с градиентом свойств разработаны. Известно, что такие материалы получают статико-импульсным нагружением наплавляемого материала, пока он находится ещё в горячем состоянии. Но существует и другой процесс, при котором поверхностный слой получают наплавкой специальными порошковыми проволоками. Волнистость и шероховатость такого слоя недопустимы для детали, необходима механическая обработка. Шлифование недопустимо по разным причинам. Исследована рациональность применения торцевых сборных фрез с механическим креплением многогранных твёрдосплавных режущих пластин для обработки таких наплавленных материалов. Установлены рациональные параметры режима резания, даны рекомендации по применению таких фрез. Установлены механизмы износа и разрушения режущих пластин при разных скоростях резания, подачах и глубинах резания, сделан прогноз на повышение работоспособности таких фрез.

Summary. The requirements for the properties of materials are growing rapidly. For example, in the defense and space industries, the hardness of materials at the level of HRC 50 does not meet the requirements. Hardness of HRC 65 and above is needed. Moreover, this hardness is needed in the surface layer, and the substrate must have a hardness at the level of HRC 35. Technologies for obtaining such sandwich materials with a gradient of properties have been developed. It is known that such materials are obtained by static-pulse loading of the deposited material while it is still in a hot state. But there is another process in which the surface layer is obtained by surfacing with special powder wires. The undulation and roughness of such a layer are unacceptable for the part. Mechanical processing is required. Grinding is unacceptable for various reasons. The rationality of the use of end-end prefabricated milling cutters with mechanical fastening of polyhedral carbide cutting plates for processing such deposited materials is investigated. Rational parameters of the cutting mode are established, recommendations on the use of such cutters are given. The mechanisms of wear and destruction of cutting plates at different cutting speeds, feeds and cutting depths are established, a forecast is made for improving the performance of such cutters.

Ключевые слова: фрезерование твёрдых наплавок, торцевая фреза со сменными пластинами.

Key words: milling of hard surfacing, end mill with replaceable plates.

УДК 621.9

В ряде отраслей промышленности, а также в оборонной и космической отраслях всё острее становится вопрос о необходимости создания материалов, обладающих уникальными свойствами: на мягкой основе (твёрдость на уровне HRC 35) должен быть слой материала, обладающего высо-

кой твёрдостью (HRC 65 и выше). Для сравнения: напильник, выполненный из углеродистой инструментальной стали, имеет твёрдость не более HRC 50. Легко понять, как трудно механически обработать (фрезеровать, точить, сверлить и т. д.) напильник. А промышленности требуются ещё более твёрдые материалы, обрабатывать которые ещё сложнее.

Специалисты профессора А. В. Киричека [1; 2] разработали технологию изготовления высокотвёрдых материалов, основанную на сочетании «печатания» заготовки изделия на 3D-принтере нержавеющей проволокой со статико-импульсным нагружением наплавляемой проволоки, пока она находится ещё в горячем состоянии. Данная технология ещё не поставлена на поток, но её перспективность очевидна.

Наряду с этой технологией известна технология получения таких сэндвичевых материалов с направленным градиентом свойств путём применения наплавок из специальных порошковых проволок [3; 4]. Волнистость и шероховатость поверхности такого наплавленного слоя оставляют желать лучшего. Необходима механическая обработка. Шлифование недопустимо по разным причинам.

Ниже приведены отдельные результаты обработки таких высокотвёрдых наплавок торцевыми сборными фрезами с механическим креплением многогранных твёрдосплавных режущих пластин.



Рис. 1. Пример отработки рациональных параметров режима резания
фрезерование на форсированной скорости резания

На рис. 1 показан пример фрезерования заготовки на вертикально-фрезерном станке, на рис. 2 – заготовки деталей с обработанными поверхностями.

В качестве примера результаты применения торцевой фрезы (см. рис. 1) с механическим креплением десяти пятигранных пластин приведены в табл. 1.



Рис. 2. Примеры обработанных поверхностей, на которые наплавками были нанесены высокотвёрдые (HRC 65) слои разных параметров (левый образец – высота наплавок равна двум ширинам наплавок, в центре – высота наплавок равна ширине наплавок, справа – сплошная наплавка)



Эксплуатационные свойства торцевой фрезы

Время работы сменных пластин торцевой фрезы, мин	5	10	15	20	30
Величина износа режущих пластин, мм	-	0,1...0,2	0,7...0,9	до 1,5	Скол двух режущих пластин

Во фрезу устанавливали пяти- или шестигранные твёрдосплавные пластины с покрытиями и без них, СОТС (полив водой) применяли и фрезеровали насухо. Во всех случаях получали свои результаты. Итогом исследований стали следующие результаты:

1. Период стойкости (износ до 0,5 мм или скол) пяти- и шестигранных пластин сопоставим.

2. Для пластин без покрытия период стойкости составляет 14...16 мин при скорости резания 60 м/мин, подаче 600 мм/мин, глубине фрезерования 0,5 мм. Форсирование скорости резания до 100 м/мин снижает период стойкости до 4...5 мин. Форсирование подачи до 1000 мм/мин снижает период стойкости до 8...10 мин. Форсирование глубины резания до 1 мм снижает период стойкости до 10 мин, а при глубине резания 2 мм период стойкости снижается до 2...4 мин и затем сопровождается сколом.

3. Применение покрытий на режущих пластинах повышает период стойкости минимум на 10 %. Применение наноструктурированных многослойных композиционных покрытий повышает период стойкости пластин до 30 %.

В качестве примечания отметим:

1. Механизм разрушения инструмента при указанных условиях фрезерования во многом аналогичен механизмам, описанным в работе [5].

2. Изложенные выше результаты не противоречат представлениям, изложенным в работах [6–19].

ЛИТЕРАТУРА

1. Киричек, А. В. Классификация способов поверхностного динамического упрочнения / А. В. Киричек, А. Г. Лазуткин, Д. Л. Соловьев // Информационные и социально-экономические аспекты создания современных технологий: межвуз. сборник науч. трудов. – Набережные Челны: КПИ, 1997. – С. 22-27.
2. Киричек, А. В. Статико-импульсная обработка и оснастка для её реализации / А. В. Киричек, А. Г. Лазуткин, Д. Л. Соловьев // СТИН. – 1999. – № 6. – С. 20-24.
3. Мокрицкий, Б. Я. Проблемы эффективной обработки труднообрабатываемых материалов: моногр. / Б. Я. Мокрицкий // Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – 163 с.
4. Мокрицкий, Б. Я. Лезвийная обработка упрочнённых материалов. Ч. 3. Обработка заготовок деталей, упрочнённых наплавками высокой твёрдости / Б. Я. Мокрицкий, Е. Б. Мокрицкая // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – № 11. – С. 493-497.
5. Анализ механизма износа абразивных кругов при шлифовании рельсов / В. Г. Рахчеев, И. С. Максимов, С. А. Галанский, А. Г. Мустафин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I-1 (57). – С. 68-75.
6. Верещака, А. А. Повышение износостойкости твёрдосплавных режущих инструментов путём управления параметрами функциональных слоёв наноструктурированных покрытий: автореф. дис. ... доктора наук: 05.02.07 / Верещака Алексей Анатольевич. – Москва, 2021. – 36 с.
7. Верещака, А. С. Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путём комплексного применения наноструктурированного износостойкого покрытия и твёрдого сплава оптимального состава / А. С. Верещака, А. В. Дацаева, А. И. Аникеев // Известия МГТУ «МАМИ». – 2010. – № 1 (9). – С. 99-106.
8. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента / С. Н. Григорьев. – Москва: Машиностроение, 2011. – 368 с.
9. Horlin H. A. TiC coated cemented carbides – their introduction and impact on metal cutting / H. A. Horlin // Product Engineering. 1971. V. 50. № 4,5. P. 153-159.

10. Grigoriev S. Investigation of multicomponentnanolayer coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb and Al / S. Grigoriev, A. Vereschaka, F. Milovich, V. Tabakov, N. Sitnikov, N. Andreev, T. Sviridova, B. Jublikov // Surface and Coating Technology. 2020. V. 401. Art. No. 126258.
11. Lin Z. Nanocrystalline tungsten carbide: As incompressible as diamond / Z. Lin, L. Wang, J. Zhan, H. K. Mao, Y. Zhao // Applied Physics Letters. 2009. 95. 211906.
12. Colding B. Wear characteristics of coated carbide / B. Colding // International Cutting Tool Bay Sandviken, Lecture. 11980. – 1969. – № 5. – P. 1.
13. Vereschaka A. A. Nanoscale multilayered composite coating – applications for ecomashining / A. A. Vereschaka, S. N. Grigoriev, A. G. Naumov, E. S. Sotova, A. K. Kirilov, J. I. Bublikov // In: Handbook of modern Coating Technologies: Applications and Development. Editors: Mahmood Aliofkhazraei Ali Nasaan ChiparaNadhiraBensaadaLaidani Jeff Th.M / De Hosson. Elsevier: 1st edition. 2021.
14. Vereschaka A. A. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nano-structured coating and their influence on cutting tool life / A. A. Vereschaka, S. N. Grigoriev, N. N. Sitnikov, A. Bataka // Wear. 2017. Vol. 390-391. P. 209-219.

Башков О. В., Брянский А. А., Башков И. О., Ефимов Т. А., Ромашко Р. В.
O. V. Bashkov, A. A. Bryansky, I. O. Bashkov, T. A. Efimov, R. V. Romashko

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ АДАПТИВНЫМИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ НА ПЛАСТИНЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16

CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS RECORDED BY ADAPTIVE HOLOGRAPHIC FIBER-OPTICAL SENSORS ON A D16 ALUMINUM ALLOY PLATE

Башков Олег Викторович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bashkov_ov@mail.ru.
Oleg V. Bashkov – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bashkov_ov@mail.ru.

Брянский Антон Александрович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Anton A. Bryansky – PhD, Junior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Башков Илья Олегович – младший научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Пуя О. Bashkov – Junior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Ефимов Тимофей Александрович – научный сотрудник Института автоматики и процессов управления ДВО РАН (Россия, Владивосток).

Timofei A. Efimov – Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Russia, Vladivostok).

Ромашко Роман Владимирович – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор Института автоматики и процессов управления ДВО РАН (Россия, Владивосток).

Roman V. Romashko – Corresponding Member RAS, Ph.D. n., Director, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Russia, Vladivostok).

Аннотация. Приведены результаты исследований сигналов и спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных волоконно-оптическими датчиками акустической эмиссии на основе адаптивных голограммических интерферометров. Оптические волокна датчиков были размещены на поверхности пластины из алюминиевого сплава Д16 и залиты тонким слоем эпоксидной смолы. Акустические волны возбуждали источником Су-Нильсена (изломом грифеля карандаша твёрдостью HB). Одновременно сигналы регистрировали пьезоэлектрическим датчиками, также установленными на пластине. Сравнительный анализ показал различие в параметрах сигналов, регистрируемых различными типами датчиков, что связано не только с их амплитудно-частотными характеристиками, но и распределённым характером размещения датчиков на объекте исследования.

Summary. The results of studies of signals and spectral characteristics of acoustic emission signals recorded by fiber-optic acoustic emission sensors based on adaptive holographic interferometers are presented. The optical fibers of the sensors were placed on the surface of a D16 aluminum alloy plate and covered with a thin layer of epoxy resin. Acoustic waves were excited by a Su-Nielsen source (a break in the lead of a pencil with hardness HB). Simultaneously, the signals were recorded by piezoelectric sensors also mounted on the plate. A comparative analysis showed a difference in the parameters of the signals recorded by different types of sensors, which is associated not only with their amplitude-frequency characteristics, but also with the distributed nature of the location of the sensors on the object of study.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, акустическая эмиссия, интерферометр, Су-Нильсен.

Key words: fiber-optic sensor, acoustic emission interferometer, Hsu-Nielsen.

УДК 539.422.52

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-452.2022.4).

Введение. В настоящее время оптические волокна широко применяются не только в качестве информационного канала высокоскоростной передачи данных, но и в качестве датчиков благодаря изменению их оптических свойств при деформации [1; 2]. Широкое применение волоконно-оптических датчиков на решетках Брэгга в качестве датчиков деформаций стало возможным при внедрении технологии нанесения на оптические волокна дифракционных решёток [3; 4]. Принцип действия основан на регистрации смещения спектра лазерного излучения, пропускаемого через датчик. Датчики позволяют регистрировать упругие деформации материала в пределах чувствительности приборов изменения спектра, пропускаемого через волокно излучения. Есть работы, в которых приведены результаты исследований регистрации волоконно-оптическими датчиками сигналов, вызванных акустической эмиссией (АЭ) [5; 6]. Однако пока широкого распространения данные типы датчиков не получили ввиду ограниченной чувствительности к регистрации волн низкой амплитуды и высокой стоимости многоканального анализатора спектра лазерного излучения. Дело в том, что для расширения числа каналов при использовании одного волокна необходимо разносить спектры излучения по частоте, что удорожает измерительную систему. Для регистрации колебаний с низкой амплитудой эффективно могут быть использованы интерференционные измерительные системы, основанные на регистрации изменений фазы лазерного излучения. Широко распространены системы с двухлучевым взаимодействием, построенные по типу интерферометров Майкельсона и Маха-Цендера. При использовании оптического волокна в качестве сенсора чувствительность распределённого волоконно-оптического датчика (ВОД) будет зависеть от длины волокна и способа укладки на объекте исследования. Поэтому в настоящее время ведутся активные исследования по использованию многовитковых катушек с намотанными оптическими волокнами [7]. Однако для использования в системах мониторинга состояния крупногабаритных объектов такие датчики не будут существенно отличаться от широко применяемых локальных высокочувствительных пьезоэлектрических преобразователей. Развитие систем мониторинга в настоящее время является актуальной задачей в связи с применение новых материалов с недостаточно изученными свойствами и поведением в сложных условиях эксплуатации и в связи с этим с необходимостью постоянного контроля состояния конструкции или сооружения для обеспечения безопасности её использования [2; 8].

Второй проблемой, ограничивающей применение интерферометров в качестве измерительных систем регистрации колебаний волоконно-оптическими датчиками, является необходимость стабилизации рабочей точки. Для этого применяются различные схемы электронных гомодинных и других стабилизаторов. Однако при использовании многоканальной системы для этого потребуется применение электронного стабилизатора на каждый канал. Кроме того, электронные системы не защищены от электромагнитных помех, что в случае применения волн радиодиапазона может сделать невозможным применение систем акустической эмиссии, функционирующих на пьезоэлектрических датчиках, и систем с электромагнитной стабилизацией. Одним из решений данной проблемы может быть применение адаптивного лазерного голограммического интерферометра, позволяющего подавлять низкочастотные температурные флуктуации и механические шумы [9; 10]. Принцип действия адаптивного интерферометра основан на том, что двухлучевое взаимодействие объектного и опорного лазерных лучей происходит в фотопрекурсивном кристалле (ФПК), в котором происходит постоянная перезапись динамической голограммы, выполняемая с задержкой, зависящей от типа ФПК. Таким образом, интерферометр работает как фильтр верхних частот (ФВЧ). Это позволяет стабилизировать рабочую точку интерферометра. Проведённые ранее исследования показали возможность регистрации АЭ в полимерном композиционном материале

(ПКМ) с помощью ВОД, размещённых в его структуре в процессе изготовления изделия ПКМ [11, 135; 6; 7].

Методика проведения эксперимента. Исследования проводили на пластине алюминиевого сплава Д16 размерами 500×600 мм и толщиной 2 мм (см. рис. 1). На пластину были наклеены многомодовые оптические волокна диаметром 62,5 мкм без защитной оболочки. Интерферометр был собран по схеме, приведённой в [11]. Имитация волн АЭ выполнялась имитатором Су-Нильсена путём излома на поверхности пластины грифеля карандаша. В исследованиях использовался грифель 0,5 мм твёрдостью HB.

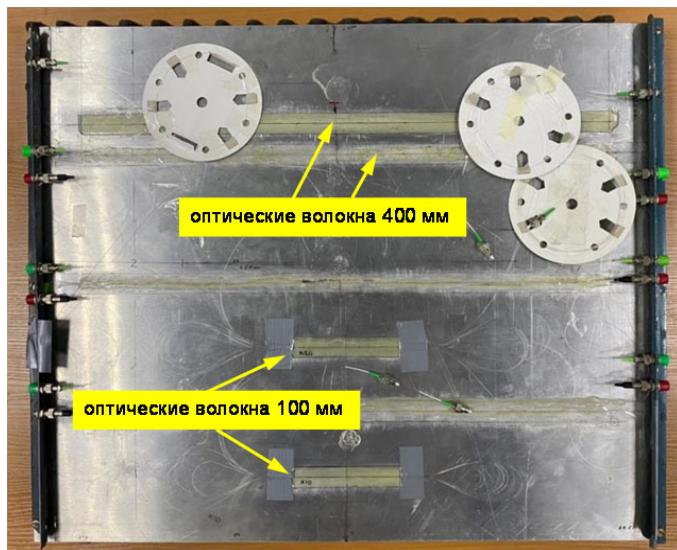


Рис. 1. Пластина дюоралюминия Д16 с наклеенными на поверхность ВОД

При выполнении исследования решалась задача по установлению влияния укладки оптических волокон на пластину. Предварительные исследования показали, что наклеенное на поверхность одно оптическое волокно уверенно регистрирует акустическую волну, возбуждённую источником Су-Нильсена, на расстоянии несколько десятков сантиметров. Однако хоть и является имитатор Су-Нильсена одним из эффективных инструментов калибровки АЭ-аппаратуры, реальные разрушения на объекте могут иметь и меньшие значения амплитуды. А более полная картина накопления повреждений, что связано с чувствительностью датчиков, может повысить информативность контроля или проводимого мониторинга.

Поэтому были проведены исследования разработанных ВОД с оптическими волокнами, наклеенными на пластину в несколько проходов. На пластину были наклеены участки оптического волокна длиной 100 мм и числом проходов 10 и 20, а также длиной 400 мм и числом проходов 10. За пределами наклеенных участков волокна образовывали свободные ненаклеенные на пластину петли, как видно на рис. 1.

С целью сравнительного анализа параметров сигналов, регистрируемых ВОД, с сигналами широко используемых пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) вблизи ВОД на пластину устанавливался ПЭП. В проводимых исследованиях применяли широкополосный ПЭП модели GT301 с диапазоном 50...550 кГц. Это широко распространённый ПЭП, применяемый для регистрации АЭ при исследовании деформации и разрушения материалов, а также на объектах диагностики.

Результаты и их обсуждение. Оптические волокна являются распределёнными датчиками и, в отличие от локальных ПЭП, сигналы, регистрируемые ВОД, достаточно протяжённые. На рис. 2 приведены сигналы и спектры сигналов, зарегистрированные ПЭП и ВОД с 10-кратной укладкой на длине 100 мм. Сигнал, полученный ВОД, приведён без фильтрации. Видно длительное послезвучание. Спустя 20 мс в сигнале не наблюдается затухание, что предполагает длитель-

ную регистрацию низкочастотных компонент волны. Это подтверждает Фурье-спектр волны, магнитуда которого на низкой частоте до 1 кГц превышает 8000 ед. и значительно превышает максимальную магнитуду спектра сигнала, зарегистрированного ПЭП (около 3000 ед.).

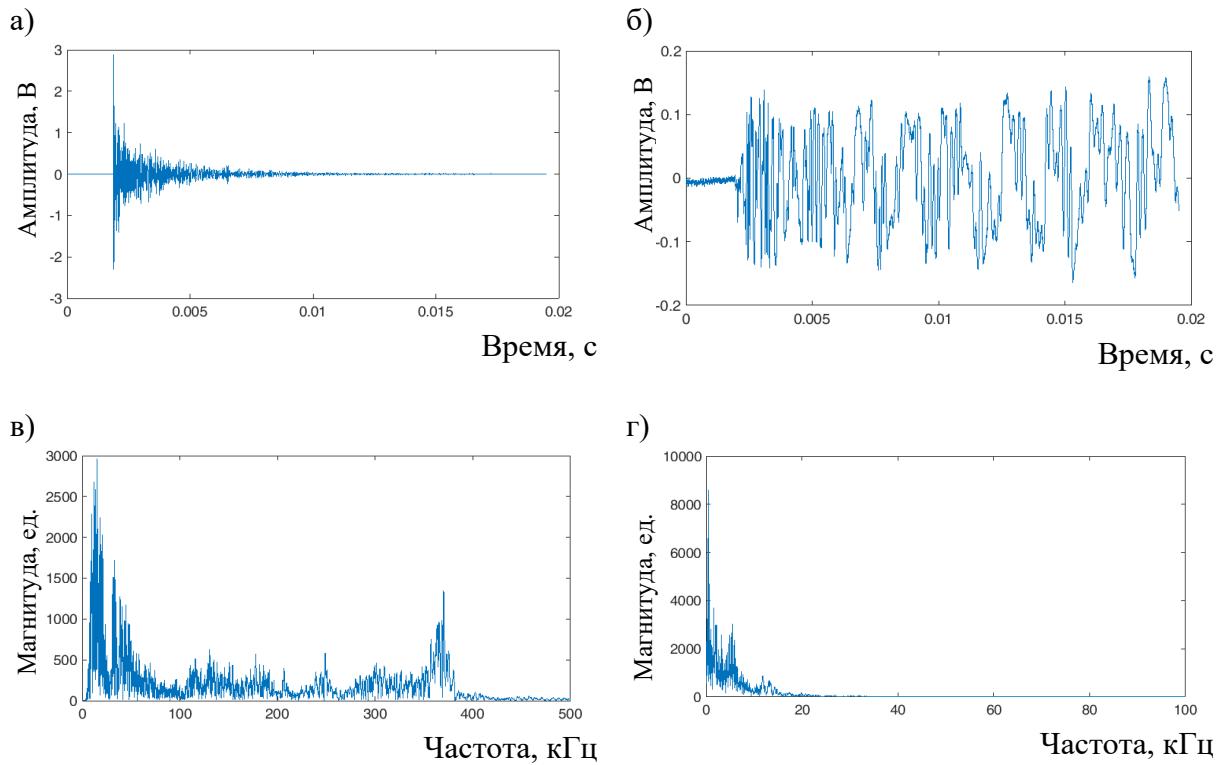


Рис. 2. Сигналы АЭ (а, б) и их спектры Фурье (в, г),
зарегистрированные ПЭП (а, в) и ВОД (б, г)

Однако длительность сигнала более 5...10 мс характеризует не само повреждение, а резонансные свойства объекта, в котором распространяется волна. Для улучшения формы сигнала и качества анализа на регистрируемые сигналы был наложен полосовой фильтр с полосой 10...150 кГц. На рис. 3 приведён тот же сигнал, зарегистрированный ВОД, и его спектр с наложенным на него фильтром высокого порядка.

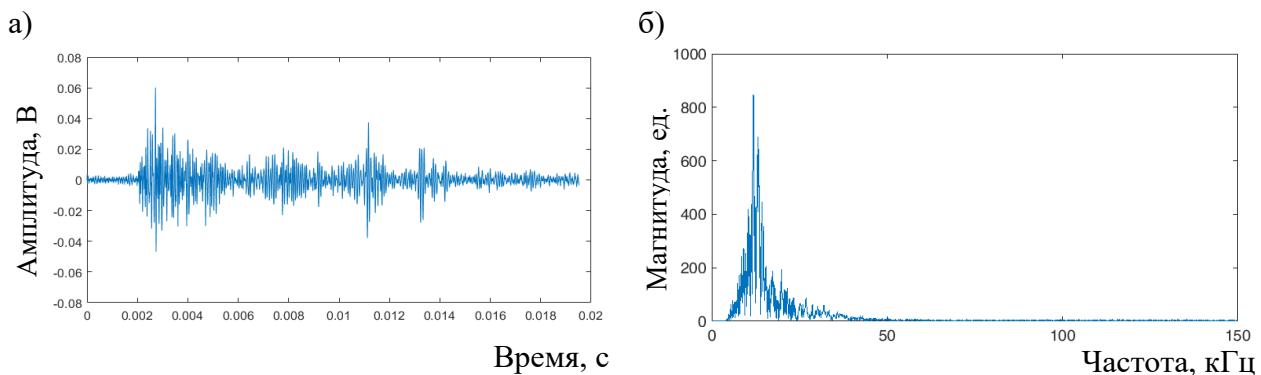


Рис. 3. Сигнал АЭ (а), зарегистрированный ВОД, и его спектр Фурье (б)

Сигнал, зарегистрированный ВОД, после фильтрации приобрёл затухающий вид. На спектре сигнала были подавлены низкочастотные компоненты. Информативная для анализа часть спектра теперь находится в диапазоне до 50 кГц.

Одним из информативных параметров, выбранных для анализа сигналов АЭ, зарегистрированных ВОД и ПЭП, являлось отношение сигнал-шум (SNR). Это отношение, как правило, определяется в частотном диапазоне аппаратуры. SNR для ПЭП был выбран в диапазоне 10...450 кГц, для ВОД – в диапазоне 10...150 кГц. Сигналы АЭ, зарегистрированные различными типами датчиков при разном числе проходов и длине укладки оптических сенсоров, представлены на рис. 4.

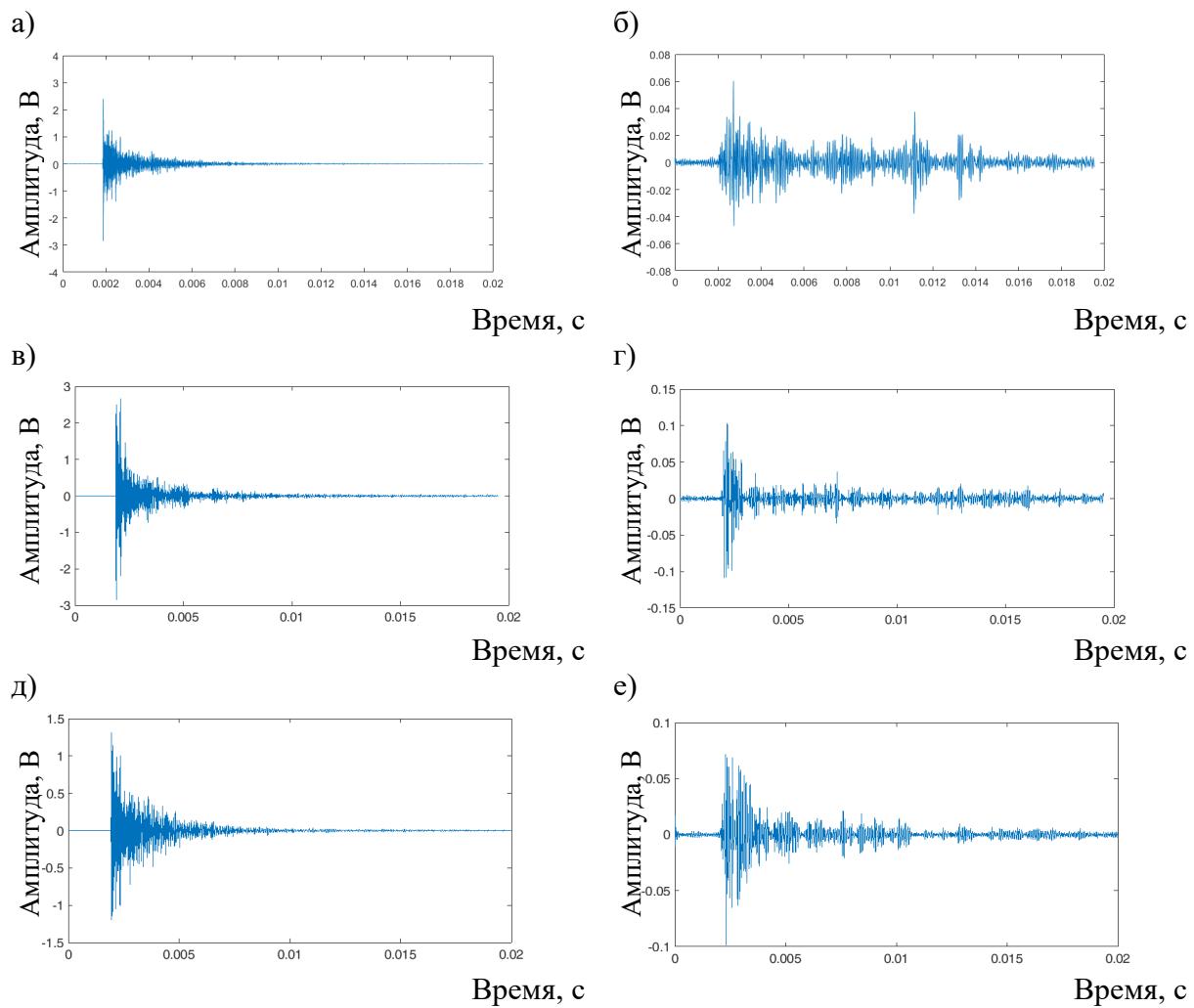


Рис. 4. Сигналы АЭ, зарегистрированные одновременно на пластине ПЭП (а, в, д) и ВОД (б, г, е) при 10-проходной укладке 100 мм волокна (а, б), 20-проходной укладке 100 мм волокна (в, г), 10-проходной укладке 400 мм волокна (д, е)

Места возбуждения сигналов различались, однако датчики ВОД и ПЭП в моменты возбуждения находились вблизи друг друга. Поэтому сигналы, зарегистрированные различными типами волокон, могут быть адекватно сравнимы с сигналами, регистрируемыми ПЭП.

Параметры сигналов, зарегистрированных датчиками ВОД и ПЭП, размещенными на поверхности пластины, приведены в табл. 1.

По результатам анализа численных параметров сигналов было установлено, что при увеличении числа проходов сенсора с 10 до 20 амплитуда сигналов увеличилась, отношение сигнал-шум (SNR) в частотном диапазоне до 150 кГц увеличилось на 14 %. При увеличении длины укладки

сенсора от 100 до 400 мм при 10-кратном числе проходов амплитуда АЭ-сигнала возросла незначительно, SNR увеличилось на 60 %.

Монотонности изменения отношения двух величин $SNR_{ВОД}/SNR_{ПЭП}$ при изменении параметров укладки не наблюдается. При этом необходимо отметить, что наблюдается возрастающая зависимость отношения двух величин $RMS_{ВОД}/RMS_{ПЭП}$, являющихся среднеквадратичным значением (root mean square) сигнала (см. рис. 5). Величина RMS является некоторым аналогом энергии сигнала во временном интервале.

Таблица 1
Параметры сигналов АЭ, зарегистрированных ВОД и ПЭП

Длина сенсора ВОД, мм	Кол-во проходов сенсора ВОД	SNR _{ВОД}	SNR _{ПЭП}	SNR _{ВОД} /SNR _{ПЭП}	RMS _{ВОД}	RMS _{ПЭП}	RMS _{ВОД} /RMS _{ПЭП}
100	10	9,023	47,77	0,1888	0,0109	0,1479	0,0735
	20	10,07	81,48	0,1195	0,0129	0,1573	0,0817
400	10	15,65	82,27	0,2195	0,0118	0,1076	0,1092

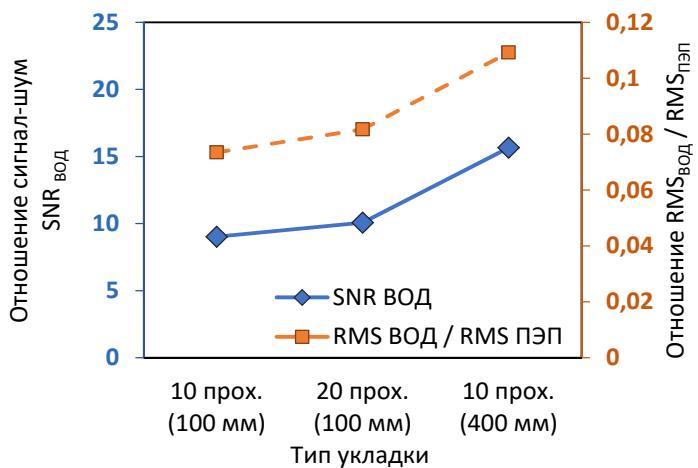


Рис. 5. Диаграмма зависимости $SNR_{ВОД}$ и $RMS_{ВОД}/RMS_{ПЭП}$ от типа укладки оптических волокон на пластине

На диаграмме наблюдается монотонная и пропорциональная зависимость отношения сигнала-шум $SNR_{ВОД}$ и отношения $RMS_{ВОД}/RMS_{ПЭП}$ среднеквадратичного значения между сигналами, полученными ВОД и ПЭП. Учитывая, что это отношение не зависит от амплитуды возбуждения, можно считать, что монотонная зависимость наблюдается у самого среднеквадратичного значения сигнала $RMS_{ВОД}$.

Заключение. В результате проведённых исследований установлено, что чувствительность ВОД зависит от способа укладки. Чувствительность может быть увеличена различными путями. Установлено, что среднеквадратичное значение $RMS_{ВОД}$ и отношение сигнал-шум $SNR_{ВОД}$ возрастают при увеличении числа проходов. Наибольший рост чувствительности наблюдался при увеличении протяжённости укладки в 4 раза. Исследования по оптимизации укладки оптических волокон при использовании ВОД можно считать только начатыми. Способы и характер укладки для повышения эффективности работы ВОД ещё требуют дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ginu Rajan, B. Gangadhara Prusty, Eds. Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods / CRC Press. 2017. – 491 p.



2. Speckmann H. Structural Health Monitoring: a contribution to the intelligent aircraft structure/ H. Speckmann, H. Roesner // Proc. 9th European NDT Confer. (ECNDT). 25-29 Sept., 2006, Berlin, Germany.
3. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах / Е. Н. Каблов, Д. В. Сиваков, И. Н. Гуляев [и др.] // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2010. – № 3. – С. 10-15.
4. Измерение деформаций в композиционных баллонах высокого давления с использованием оптоволоконных решеток Брэгга / О. Н. Будадин, В. Ю. Кутюрин, Т. А. Муханова, И. С. Гранев // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 06. – С. 34-39.
5. Беловолов, М. И. Распределённые волоконно-оптические датчики и системы для непрерывного мониторинга важных объектов / М. И. Беловолов // Фотон-экспресс. – 2013. – № 6. – С. 40-41.
6. Perez I., Cui H. L., Udd E. Acoustic emission detection using fiber Bragg gratings // Proc. SPIE. 2001. V. 4328. P. 209.
7. Liu K., Ferguson S. M., Measures R. M. Fiber-optic interferometric sensor for the detection of acoustic emission within composite materials // Optics Letter. 1990. V. 15, No 22. P. 1255-1257.
8. Сысоев, Е. О. Численные исследования колебаний композитных тонкостенных цилиндрических разомкнутых оболочек / Е. О. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, О. Е. Сысоев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III-1 (59). – С. 85-90.
9. Kamshilin A. A., Romashko R. V., Kulchin Yu. N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. 2009. – V. 105. – P. 031101.
10. Romashko, R. V.; Bezruk, M. N.; Kamshilin, A. A.; Kulchin, Y. N. Six-channel adaptive fibre-optic interferometer // Quantum Electronics. 2012. – V. 42. – No. 6. – P. 551.
11. Bashkov, O. V., Romashko, R. V., Zaikov, V. I., Panin, S. V., Bezruk, M. N., Khun, K., Bashkov, I. O. Detecting acoustic-emission signals with fiber-optic interference transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. – V. 53. – No. 6. – P. 415-421.
12. Bashkov O. V., Romashko R. V., Khon H., Bezruk M. N., Zaikov V. I., Bashkov I. O. Registration of acoustic emission waves in anisotropic composite plates by fiber-optic sensors // Proc. SPIE 11024, Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics. 2017. 110240O (4 January 2019).
13. Bashkov, O. V., Romashko, R. V., Baskov, I. O., Zaikov, V. I., Khon, H., Solovev, D. B. Sensitivity Analysis of Adaptive Holographic Fiber-Optic Acoustic Emission Sensors during the Registration of Acoustic Waves in a Plate // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. – V. 459. – No 6. – P. 062104.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА EARTH SCIENCES AND LIFE SAFETY

Коротеева Л. И., Корянова Л. А.
L. I. Koroteeva, L. A. Koryanova

К ВОПРОСУ О РЕГУЛИРОВАНИИ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ЗАСТРОЙКИ НА ТЕРРИТОРИИ Г. КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ

ON THE REGULATION OF LAND USE AND DEVELOPMENT ON THE KOMSOMOLSK-ON-AMUR TERRITORY

Коротеева Любовь Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и техносферной безопасности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)187-87-14. E-mail: Lkoroteewa@yandex.ru.

Lubov I. Koroteyeva – PhD in Engineering, Senior Lecturer, Cadastral Register and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)187-87-14. E-mail: Lkoroteewa@yandex.ru.

Корянова Любовь Александровна – начальник земельного отдела Управления архитектуры и градостроительства (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Кирова, 41; тел. +7(4217)522-825. E-mail: l.koryanova87@mail.ru.

Lyubov A. Koryanova – Head of the Land Sector of the Department of Architecture and Urban Planning (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681000, 41, Kirov St., Komsomolsk-on-Amur; tel. +7(4217)522-825. E-mail: l.koryanova87@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены цели Правил землепользования и застройки для г. Комсомольска-на-Амуре и обоснованы внесённые в данный документ изменения, регламентирующие градостроительное зонирование города с использованием конкретных ситуаций, влекущих данные изменения.

Summary. The article considers the purpose of the Rules of land use and development for Komsomolsk-on-Amur and substantiates the changes made in this document, regulating urban zoning of the city with the use of specific situations, resulting in these changes.

Ключевые слова: Правила землепользования и застройки, земельный участок, территориальные зоны, выкуп, объект капитального строительства.

Key words: Rules of land use and development, land plot, territorial zones, redemption, object of capital construction.

УДК 332.3

Главными документами, регулирующими застройку города Комсомольска-на-Амуре, являются Генеральный план города Комсомольска-на-Амуре, который формирует картину нашего города на перспективу, и Правила землепользования и застройки, первостепенной задачей которых является соблюдение интересов всех жителей г. Комсомольска-на-Амуре.

Цели разработанных для города Комсомольска-на-Амуре Правил землепользования и застройки, устанавливающих регламенты в вопросах градостроительного зонирования и утверждённых решением Городской Думы от 14 октября 2009 года № 72, представлены на рис. 1.

Данные Правила подлежат применению на всей территории города Комсомольска-на-Амуре и являются обязательными для всех субъектов – участников градостроительных отношений.

Территория города Комсомольска-на-Амуре имеет в своих границах следующие виды территориальных зон (см. рис. 2).

Наиболее востребованными с точки зрения вовлечения в хозяйственный оборот являются производственные зоны, зоны транспортной инфраструктуры, общественно-деловые зоны.

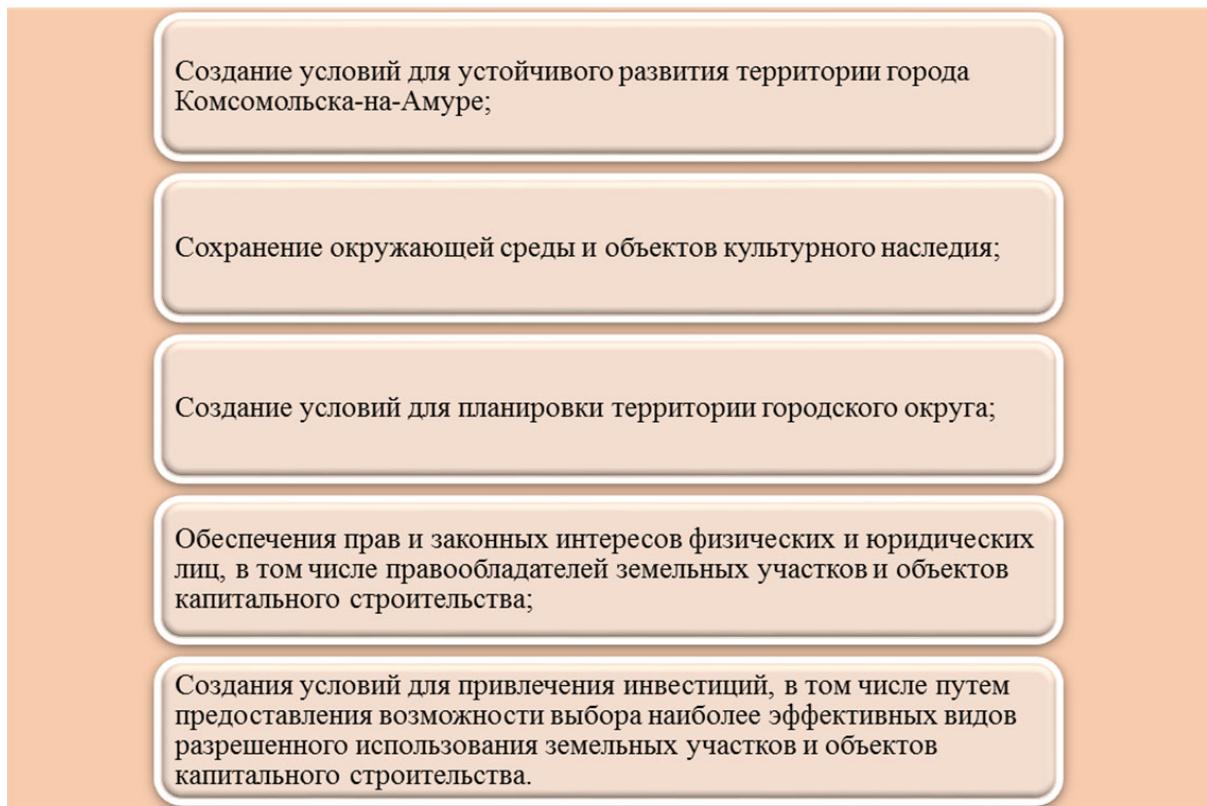


Рис. 1. Цели Правил землепользования и застройки

Изменения в Земельном кодексе Российской Федерации, вступившие в действие с 01 марта 2015 года, определили предоставление земельных участков для строительства капитальных объектов на территории города Комсомольска-на-Амуре исключительно на торгах, за исключением определённых случаев.



Рис. 2. Территориальные зоны г. Комсомольска-на-Амуре

Результатом торгов является заключённый между администрацией города Комсомольска-на-Амуре и субъектом градостроительной деятельности договор аренды земельного участка с целью строительства капитальных объектов.

Учитывая, что в Правилах землепользования и застройки на территории города Комсомольска-на-Амуре не был установлен минимальный процент застройки, город Комсомольск-на-Амуре столкнулся с проблемой застройки земельных участков объектами площадью, несоразмерной площади предоставленного земельного участка, и дальнейшим выкупом земельных участков (например, площадь участка 3000 м^2 , а площадь объекта, построенного на участке, 30 м^2). В подтверждение вышеизложенного проанализируем подобные ситуации на конкретных примерах.

1. Заявитель обратился с просьбой о предоставлении ему в собственность земельного участка площадью 3712 м^2 с кадастровым номером 27:22:0040502:9, занимаемого нежилым зданием гаража с кадастровым номером 27:22:0040502:541, расположенного в г. Комсомольске-на-Амуре, в зоне пересечения ул. Калинина и ул. Уральской, с целью эксплуатации нежилого здания гаража (см. рис. 3).

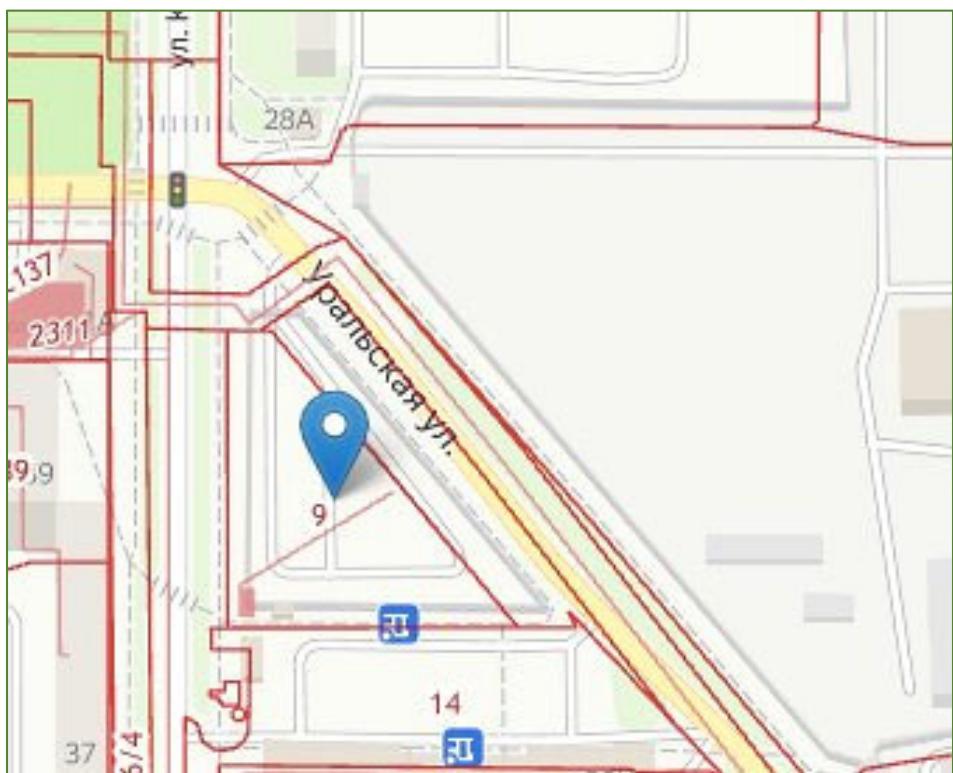


Рис. 3. Местоположение испрашиваемого земельного участка

Согласно предоставленной информации, которая подтверждается выпиской из ЕГРН, на данном земельном участке действительно находится объект капитального строительства, подпадающий под классификацию нежилое здание «Гараж» с кадастровым номером 27:22:0040502:541, площадью $41,8\text{ м}^2$.

Земельный участок, согласно Правилам, расположен в зоне автомобильного транспорта (ТР-4), в которой на сегодняшний день не установлен минимальный процент застройки.

Площадь испрашиваемого земельного участка (3712 м^2) несоразмерна размещённому на нём объекту недвижимости – гаражу площадью $41,8\text{ м}^2$. На основании этого на сегодняшний день администрацией г. Комсомольска-на-Амуре было отказано в предоставлении в собственность испрашиваемого земельного участка в связи с несоразмерностью площади выстроенного объекта.



2. Заявитель обратился с заявлением о предоставлении в собственность земельного участка площадью 1291 м² с кадастровым номером 27:22:0011403:591, занимаемого административным зданием с кадастровым номером 27:22:0011403:624 площадью 12 м², расположенного по Северному шоссе, южнее земельного участка с кадастровым номером 27:22:0011403:132.

Площадь административного здания с кадастровым номером 27:22:0011403:624, расположенного на испрашиваемом земельном участке с кадастровым номером 27:22:0011403:591, составляет 12 м². Соответственно, на настоящий момент площадь застройки испрашиваемого земельного участка составляет 0,93 %.

Земельный участок, согласно Правилам, расположен в зоне размещения объектов производственного и коммунально-складского назначения (ПК-1), в которой на сегодняшний день не установлен минимальный процент застройки.

На сегодняшний день администрация города Комсомольска-на-Амуре отказалась в предоставлении в собственность испрашиваемого земельного участка в связи с несоразмерностью площади выстроенного объекта.

Но если учесть, что на сегодняшний день в Правилах отсутствует минимальный процент застройки, данный случай может быть признан судом неправомерным. С целью исключения таких случаев в настоящее время вносятся изменения в Правила в части добавления параметров застройки минимальным процентом застройки, т. к. местоположение границ испрашиваемого земельного участка, его площадь и площадь застройки должны определяться с учётом фактического использования и в соответствии с требованиями земельного и градостроительного законодательства.

Также минимальный процент застройки будет установлен для зон индивидуальной жилой застройки, для производственных зон, зон городского озеленения, зон сельскохозяйственного производства.

Вывод. В случае если проектной документацией будет предусмотрена застройка меньше 25 % от площади участка, при наличии проектных решений возможно уменьшение минимального процента застройки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Земельный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 25 октября 2001 г. № 136-ФЗ (ред. от 10.01.2021) // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/ (дата обращения: 12.10.2021). – Режим доступа: по подписке. – Текст: электронный.
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ (ред. от 30.12.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (дата обращения: 12.10.2021). – Режим доступа: по подписке. – Текст: электронный.
3. Материалы правил землепользования и застройки // Комсомольск-на-Амуре, официальный сайт органов местного самоуправления. – Раздел сайта «Деятельность», подраздел «Управление городом». – URL: <https://www.kmscity.ru/activity/city/land-use/rules/docs> (дата обращения: 06.06.2022). – Текст: электронный.

ПАМЯТИ ВАСИЛИЯ ИЛЛАРИОНОВИЧА МУРАВЬЁВА

Из мира дальневосточных учёных на 85-м году жизни ушёл замечательный человек Василий Илларионович Муравьёв (27.10.1937–15.08.2020). Заслуженный деятель науки, теоретик и практик, доктор технических наук, профессор, учитель и старший друг многих молодых учёных. Василий Илларионович – известный специалист материаловедения конструкционных материалов в области литья, штамповки, сварки и термообработки изделий для изготовления деталей летательных аппаратов, судостроения, других отраслей машиностроительного производства как в нашей стране, так и за рубежом. Основными направлениями его научной работы являлись разработка теории, создание новых и усовершенствование существующих технологических процессов изготовления изделий путём упорядочения структурной неоднородности конструкционных материалов и их объёмное наноструктурирование.

Его труды являются настольными книгами многих учёных-материаловедов. Он является автором более 450 научных работ, в том числе 15 монографий, 5 авторских свидетельств и 80 патентов, удостоен диплома на научную идею Международной ассоциации авторов научных открытий. Им подготовлено и издано 11 учебных пособий. В течение многих лет он являлся членом диссертационных советов по защите докторских и кандидатских диссертаций в Комсомольском-на-Амуре государственном университете. Свой научный и педагогический опыт он передавал студентам и молодым учёным, отличаясь чрезвычайным дружелюбием и мудростью. В качестве научного руководителя он подготовил 3 докторов наук, 15 кандидатов наук.

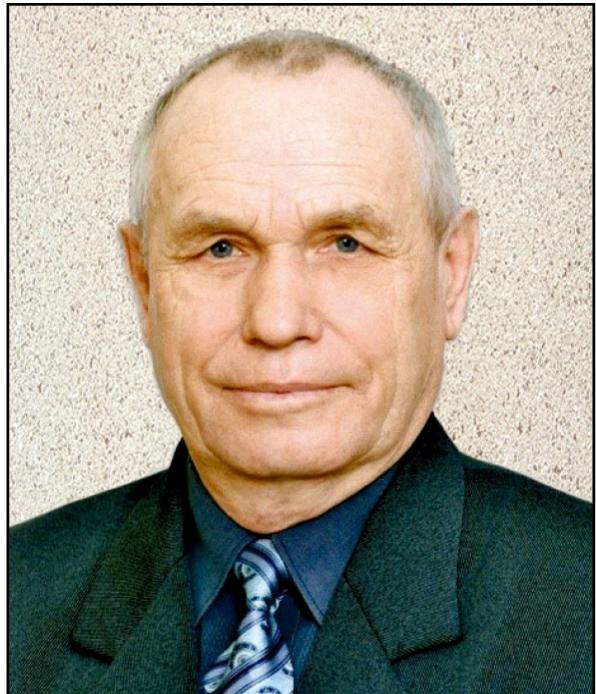
Василий Илларионович имеет награды: «Медаль А. Нобеля» – за развитие изобретательства, награду Российской Академии Естествознания «Основатель научной школы» – за заслуги в разработке приоритетных направлений науки и техники, создании научной школы, воспитании и подготовке научных кадров.

Признанием вклада В. И. Муравьёва в научную и педагогическую деятельность является включение его данных в книгу «Доктора наук Хабаровского края» и энциклопедию «Лучшие люди России. Открытия, научные разработки».

Сведения о нём вошли в список выдающихся учёных-металловедов, опубликовавших за 50 лет в журнале «Металловедение и термическая обработка материалов» наибольшее количество оригинальных статей и показавших максимальную интенсивность работы. Многие его научные разработки удостоены золотых, серебряных и бронзовых медалей в Брюсселе, Париже, Женеве, Сеуле и Москве. Василий Илларионович награждён знаком «Почётный авиастроитель», медалями «Ветеран труда», «100 лет со дня рождения Лавочкина».

За время преподавательской деятельности в Комсомольском-на-Амуре государственном университете он подготовил ряд впервые читаемых лекционных курсов по дисциплинам «Технология производства сварных конструкций», «Технология производства новых материалов», «Технология изготовления деталей самолётов» и других.

Земной путь Василия Илларионовича начался 27 октября 1937 г. Он родился в с. Кособоково Белоглазовского района Алтайского края. В 18 лет он осознанно выбрал себе направление будущей деятельности, связав судьбу с созданием материалов и технических средств деятельности из них, поступив в Сибирский металлургический институт по специальности «Металловедение, оборудование и технология термической обработки металлов» в г. Новокузнецке. После успешно-





го окончания института в 1960 г. Василий Илларионович поехал на Дальний Восток в легендарный город Юности – Комсомольск-на-Амуре. В тот год отмечалось 100-летие с. Пермского, заложенного на месте города в 1860 г., когда под руководством подполковника Я. В. Дьяченко прибывшие пермяки начали рубить лес и ставить первые срубы поселения. В этом же 1960 году отмечалось 28-летие города, получившего в 1932 г. имя города Юности – Комсомольска-на-Амуре. Василий Илларионович был принят на завод «Дальреммаш», где был назначен начальником лаборатории металловедения и термообработки, а затем перешёл на Комсомольский-на-Амуре авиационный завод № 126, будущий КнААПО им. Ю. А. Гагарина, где стал начальником Центральной заводской лаборатории.

Имея за плечами производственную школу, в 1968 г. он поступил в заочную аспирантуру Сибирского металлургического института г. Новокузнецка, в 1973 г. защитил кандидатскую, а затем с участием выездной комиссии докторской диссертационного совета Комсомольского-на-Амуре политехнического института в 1999 г. в АмГУ (г. Благовещенск) – докторскую диссертацию по теме «Разработка и исследование ресурсосберегающих технологий изготовления штампосварных конструкций из титановых сплавов». Работал деканом, затем ректором общественного университета «Затехнический прогресс», с 1993 г. – старшим преподавателем, с 1994 г. – доцентом кафедры «Материаловедение и технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре политехнического института; с 1999 г. – профессором кафедры «Технология сварочного производства» КнАГТУ; с 2007 г. – главным научным сотрудником лаборатории композиционных материалов и покрытий.

Василий Илларионович даже в почтенные годы обладал высокой научной активностью, что сделало его заметным учёным, добрым и мудрым человеком. Наибольшее количество научных трудов, более 20 печатных изданий, им опубликовано в соавторстве с докторами наук Б. Н. Марьиным, Ю. Л. Ивановым, С. З. Лончаковым, Б. И. Долотовым, К. А. Макаровым, Э. А. Дмитриевым и кандидатами наук А. Ф. Фроловым, В. С. Пицьком, Р. А. Физулаковым; более 10 печатных изданий – с докторами наук В. А. Кимом, О. В. Башковым, А. И. Евстигнеевым, В. И. Якимовым, В. А. Меркуловым, Н. А. Семашко, В. И. Шпортом и кандидатами наук В. Н. Войтовым, А. А. Дебеляком, А. М. Мартынуком, А. Ф. Мельничуком, А. В. Кириковым, К. А. Мелкоступовым, В. В. Григорьевым, П. А. Саблиным.

До последних дней В. И. Муравьёв активно участвовал в научной жизни Комсомольского-на-Амуре государственного университета. И уход из жизни Василия Илларионовича для учёных КнАГУ является невосполнимой потерей.

Общий трудовой стаж Василия Илларионовича – 62 года. Самоотверженный труд Василия Илларионовича Муравьёва является ярким примером жизненного пути большого человека, учёного, доброго и мудрого старшего друга.

Скорбим по утрате доброго, мудрого, замечательного человека и выражаем глубокое соболезнование родным и близким Василия Илларионовича.

Ректорат, кафедра «Технология сварочного и металлургического производства», коллеги

18 октября 2022 г. ушёл из жизни выдающийся человек и личность, учёный, доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета

САРИЛОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

(15.06.1965–18.10.2022)

Михаил Юрьевич был не только великолепным учёным, признанным корифеем в области машиностроения, но и образцом человеческой и научной этики для тысяч людей, которым посчастливилось у него учиться и с ним работать.

Родился Михаил Юрьевич 15 июня 1965 г. в г. Саратове. Окончил Комсомольский-на-Амуре политехнический институт в 1987 г. по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», в 1993 г. – аспирантуру. В 1994 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Повышение эффективности механообработки в автоматизированном производстве за счёт диагностики износа резущего инструмента и его упрочнения». В 2008 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Повышение эффективности электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта».

Трудовую деятельность начал ассистентом кафедры «Технология машиностроения» в августе 1987 г. В 1989 г. поступил в аспирантуру. С 1991 г. работал старшим преподавателем на кафедре «Технология машиностроения». С 1994 г., после защиты кандидатской диссертации, стал доцентом этой же кафедры. Был заместителем декана, руководителем центра дополнительного образования при факультете. С января 2004 г. обучался в докторантуре ГОУВПО «КнАГТУ». С 2008 г., после защиты докторской диссертации, стал профессором кафедры «Технология машиностроения».

С 2009 г. – заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств». С 2020 г. – заведующий кафедрой «Машиностроение». Общий трудовой стаж в Комсомольском-на-Амуре государственном университете – 34 года.

Основные направления научной деятельности:

- повышение эффективности и качества электроэрозионной обработки металлов;
- диагностика и контроль металлорежущего инструмента в автоматизированном производстве;
- исследование износа и коррозии трубопроводов.

Возглавлял научные коллективы кафедры «Машины и аппараты химических производств» и кафедры «Машиностроение». Руководил научно-исследовательскими хоздоговорами. Создал лабораторию диагностики станков с ЧПУ, лабораторию электрофизических и электрохимических методов обработки.

За свою научную деятельность подготовил 2 аспирантов, 4 соискателей.

Автор более 250 научных публикаций, в том числе 2 монографий, более 15 учебных пособий. Имеет 5 авторских свидетельств на изобретения, 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Подготовил 105 публикаций, одобренных ВАК.

Был награждён нагрудным знаком «Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации». Являлся заслуженным деятелем науки и образования Российской Академии Естествознания.

При его непосредственном участии опубликовано более 250 научных трудов, он являлся членом кандидатского и докторского диссертационных советов, руководил магистерской программой.

Наименование основных научных публикаций:



1. Shabalin, Y. A. Demercaptanization of straight-run kerosene fraction according to «demerus jet» technology / Y. A. Shabalin, M. Y. Sarilov, O. G. Shakirova // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 310-318. – DOI 10.1007/978-3-030-69421-0_33.
2. Сарилов, М. Ю. Исследование влияния параметров электроэррозионной обработки на шероховатость обработанной поверхности / М. Ю. Сарилов, А. И. Копылов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 110-116.
3. Сарилов, М. Ю. К вопросу исследования пробоя при электроэррозионной обработке алюминиевых и титановых сплавов / М. Ю. Сарилов, Д. А. Палкин, М. В. Минаков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 83-92.
4. Sarilov, M. Y. Efficient Methods of Reducing Losses of Petroleum Products from Tanks / M. Y. Sarilov, P. A. Liskov, M. D. Zhmak // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – Vol. 55. – No 3-4. – P. 230-238. – DOI 10.1007/s10556-019-00610-z.
5. Сарилов, М. Ю. Исследование процессов электроэррозионной обработки / М. Ю. Сарилов, В. В. Мыльников // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – № 6. – С. 887-892. – DOI 10.21883/JTF.2019.06.47636.66-18.
6. Сарилов, М. Ю. Исследование процессов в межэлектродном промежутке при электроэррозионной обработке алюминиевых и титановых сплавов / М. Ю. Сарилов, У. Е. Решетник // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15. – № 12 (180). – С. 550-554.
7. Диагностика линейной части нефтепровода, находящегося в эксплуатации / Л. А. Михалькова, В. С. Щетинин, А. В. Ступин, М. Ю. Сарилов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1 (37). – С. 46-51.
8. Сарилов, М. Ю. Повышение эффективности электроэррозионной обработки алюминиевых и титановых сплавов на основе исследований процессов в межэлектродном промежутке / М. Ю. Сарилов, О. А. Сарилова, С. В. Будниц // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 6. – С. 74-79.
9. Erenkov, O. Y. Adaptive Control System of the Electric Discharge Machining Process / O. Y. Erenkov, M. Y. Sarilov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – Vol. 52. – No 3. – P. 182-186. – DOI 10.1007/s10556-016-0172-y.
10. Линев, А. С. Повышение эффективности электроэррозионной обработки алюминиевых и титановых сплавов / А. С. Линев, М. Ю. Сарилов // Металлургия машиностроения. – 2016. – № 3. – С. 29-31.
11. Сарилов, М. Ю. Исследование процессов электроэррозионной обработки / М. Ю. Сарилов // Наука и образование. – 2016. – № 3 (83). – С. 76-82.
12. Сарилов, М. Ю. Машины и аппараты массообменных процессов / М. Ю. Сарилов, П. М. Тягущев // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 6-1. – С. 122-124.

Сложно перечислить все научные достижения Михаила Юрьевича в области технологии и оборудования механической и физико-технической обработки. Передовые методики и технологии ложились в основу образовательных программ кафедры. Он внёс огромный вклад в подготовку научных и научно-педагогических кадров университета.

Михаил Юрьевич был замечательным учёным и педагогом, великодушным, добрым, порядочным и отзывчивым человеком. Светлая память о Михаиле Юрьевиче Сарилове навсегда останется в наших сердцах!

Ректорат, факультет машиностроительных и химических технологий, коллеги

**УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ:
НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ 2022**

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Лю Б., Лозовский И. В., Марьин С. Б.

БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЗЛЁТА И ПОСАДКИ

Марьин С. Б., Жабаров А. В., Якимец А. А., Тарасов Н. Е.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖЁСТКОСТИ КОНЦЕВОЙ ЧАСТИ ПЕРЕДНЕГО ЛОНЖЕРОНА

ПРИ СБОРКЕ КЕССОНА ОТЪЁМНОЙ ЧАСТИ КРЫЛА SSJ-100

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Климан В. С., Табаров Б. Д.

РАЗРАБОТКА КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК И СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ

РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л., Канашин И. В., Петрова А. Н., Хромов А. И.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ,

ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Марченко Н. М.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В ПАКЕТЕ MATLAB

Стельмащук С. В., Черепанов Н. И.

СИСТЕМА ПОДЧИНЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Урасов Д. В., Черный С. П.

ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ

РЕГУЛЯТОРОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДА КЛАПАНА В ДУГОВОЙ

СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Хрульков В. Н., Черный С. П.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЧЁТКИХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ

ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ

Феоктистов С. И., Андрианов И. К., Лин Х.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ПРИ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБ

С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

Феоктистов С. И., Андрианов И. К., Лин Х.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С УЧЁТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ

НЕЛИНЕЙНОСТИ МАТЕРИАЛА

Кобылицкий А. Н., Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пухова А. И., Казакул А. А.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЁТА

АВАРИЙНО ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ



Горьковый М. А., Егорова В. П., Горьковый А. И., Мельниченко М. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИМИТАЦИОННЫХ
МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССА

Краснояров Н. А., Дмитриева Т. Л.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

Колесник М. Б.

ПОЛУЧЕНИЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ДЛЯ УЧЁТА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ким К. К., Иванов С. Н., Колесова А. В.

МЕТОД УЧЁТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНТАКТНОГО
ПРОВОДА С ПАНТОГРАФОМ

Марущенко С. Г., Ненюк В. В.

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПИКОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ

Младова Т. А., Муллер Н. В.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
И УПРАВЛЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМИ РИСКАМИ

Поляков И. А., Сысоев О. Е., Сысоев Е. О.

К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЁТОВ ПРОГРЕВА МОНОЛИТНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ
В УСЛОВИЯХ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Стельмащук С. В., Демин С. Д.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА
ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕТИ С УЧЁТОМ ИНЕРЦИОННОЙ
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Сысоев Е. О., Добрышкін А. Ю., Сысоев О. Е.

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ КОМПОЗИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РАЗОМКНУТЫХ ОБОЛОЧЕК

Ковтаник Л. В., Панченко Г. Л.

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПЛОСКОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ
ПОЛЗУЧЕСТИ И ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ

Соловьев И. А., Шитикова М. В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХТОЧЕЧНОГО ИЗГИБА
АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННЫХ ТРЁХСЛОЙНЫХ
КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН С ТЕТРАКИРАЛЬНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Канашин И. В., Хромов А. И., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ОБРАЗЦА ПРИ УСЛОВИИ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ



Алексеев Г. В., Лобанов А. В., Терлецкий И. А.

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИАЛЬНО АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАДАЧАХ СТАТИЧЕСКОЙ
МАСКИРОВКИ

Бормотин К. С., Потянихин Д. А., Синельщиков А. А., Мин Ко Хлайнг, Журбина И. Н.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАЗДАЧИ СРЕДНЕЙ ЧАСТИ ТРУБЫ
ДЛЯ РАСЧЁТА ФОРМЫ ШТАМПА

Герасименко Е. А.

К ПРОБЛЕМЕ ВЫДЕЛЕНИЯ РАЗРЫВОВ В ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТАХ
ДИНАМИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Бегун А. С.

ВРАЩЕНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДИСКА С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ

Ткачева А. В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПОСАДКИ МУФТЫ НА ВАЛ

Богословский А. В., Разиньков С. Н., Сёмка Э. В.

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ БЕСПИЛОТНОГО СВОБОДНОНЕСУЩЕГО
ВЫСОКОПЛАНА С РАДИОПОГЛОЩАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ

Феоктистов С. И., Андрианов И. К., Лин Х.

АППРОКСИМАЦИЯ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА В ОБЛАСТИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ
ДЕФОРМАЦИЙ С НЕЛИНЕЙНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

Бабич М. В., Добрынин Н. В., Змеу К. В.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА
ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ

Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю.

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Жарикова Е. П., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Н.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА
МИРОВОГО ОКЕАНА И КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

Гринкруг М. С., Пухов А. А.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ
ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Колесник М. Б., Гудим А. С.

ИМИТАЦИОННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ГЕРМЕТИЧНОЙ ЗАДВИЖКИ

Ким К. К., Иванов С. Н., Колесова А. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОВОЛНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВО ВЗАИМНО
ПЕРЕМЕЩАЮЩЕЙСЯ КОНТАКТНОЙ ПАРЕ

Ларченко Ю. Г., Котляров В. П.

ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ



Марченко О. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Черняго А. Б.

ТЕХНОЛОГИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОИСКА ДАННЫХ

В ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА ЭТАПЕ СТРОИТЕЛЬСТВА

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Иванов С. Н., Ким К. К., Коколевский М. А., Колесник М. Б., Плотников Д. В.

УЧЁТ ОСЕВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

Рахчеев В. Г., Максимов И. С., Галанский С. А., Мустафин А. Г.

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ИЗНОСА АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ

ПРИ ШЛИФОВАНИИ РЕЛЬСОВ

Самар Е. В., Мокрицкий Б. Я.

НОВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ

СИСТЕМЫ РЕЗАНИЯ

Отряскина Т. А., Павловская Д. А.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

НА ОСНОВАНИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕЗАНИИ

Усанов Г. И., Усанов М. Г., Усанов И. Г.

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ: МЕТОДОЛОГИЯ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

Кравченко Е. Г., Афанасьева С. А., Кравченко А. К., Пачурина С. Б.

РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРТАТИВНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ

ТВЁРДОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Максимов И. С., Галанский С. А., Мустафин А. Г.

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА

ШЛИФОВАНИЯ РЕЛЬСОВ В ПУТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ

АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Стельмаков В. А., Давыдов В. М., Никитенко А. В., Ли А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ

ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ЧИСТОВОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Андианов И. К., Феоктистов С. И., Попов А. В.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИКАРБОНАТА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

Матлыгин Г. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ПРИ ТОЧЕНИИ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ



Муравьев В. И., Бахматов П. В., Григорьев В. В., Солнцева А. В.

ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТИТАНОВОГО
СПЛАВА ВТ20, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ НАДЁЖНОСТЬ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Потянихин Д. А., Квашнин А. Е.

НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ
СОВМЕЩЁННЫХ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ

Жилин С. Г., Богданова Н. А., Комаров О. Н.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО
И ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМОВ УПЛОТНЕНИЯ ВОСКООБРАЗНЫХ ПОРОШКОВЫХ СРЕД

Ким К. К., Иванов С. Н., Горбунов А. В.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ СКОЛЬЖЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Старцев Е. А., Бахматов П. В., Михайлов К. А.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРОЧНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ,
ПОЛУЧЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕРАБОТАННЫХ ОТХОДОВ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Чернышова Д. В., Иванкова Е. П., Евстигнеева А. А., Тарануха Н. А.

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ СИЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОПОРНОГО
НАПОЛНИТЕЛЯ НА КЕРАМИЧЕСКУЮ ОБОЛОЧКОВУЮ ФОРМУ
ПРИ ПРОКАЛИВАНИИ И ЗАЛИВКЕ МЕТАЛЛА

Окулов Р. А., Семенова Н. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ
С ОПРАВКОЙ И БЕЗ НЕЁ

Федорченко С. К., Давыдов В. М., Гимадеев М. Р., Иванищев Ю. Г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСКАТНОГО ИНСТРУМЕНТА В УСЛОВИЯХ
МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Мокрицкий Б. Я., Скрипилев А. А.

ФРЕЗЕРОВАНИЕ ВЫСОКОТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ СБОРНОЙ ТОРЦЕВОЙ ФРЕЗОЙ

Башков О. В., Брянский А. А., Башков И. О., Ефимов Т. А., Ромашко Р. В.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ
АДАПТИВНЫМИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ
ДАТЧИКАМИ НА ПЛАСТИНЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16

МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

Ри Хосен, Живетьев А. С., Ким Е. Д., Дорошенко К. В., Попова В. С.

ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ
ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ АЛЮМИНИДОМ НИКЕЛЯ



НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Коротеева Л. И., Ливицина Л. О.

АНАЛИЗ НЕГАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОСТОЯНИЕ ЗЕМЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ НА ТЕРРИТОРИИ КОМСОМОЛЬСКОГО РАЙОНА ХАБАРОВСКОГО КРАЯ

Ким К. К., Иванов С. Н., Спичкин Г. Л.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОКЛИМАТА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ОФИСНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ НА ТРАНСПОРТЕ

Коротеева Л. И., Корянова Л. А.

К ВОПРОСУ О РЕГУЛИРОВАНИИ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ЗАСТРОЙКИ НА ТЕРРИТОРИИ Г. КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Сохацкая Д. Г., Ефимова К. С.

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ АРХИТЕКТУРНО-ХУДОЖЕСТВЕННОГО ОБЛИКА ПЕШЕХОДНОЙ УЛИЦЫ

Гринкруг Н. В., Михайлова Т. М.

ГЕОПЛАСТИКА КАК СПОСОБ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТСКИХ ПЛОЩАДОК (НА ПРИМЕРЕ Г. КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ)

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

ПОСВЯЩАЕТСЯ СВЕТЛОЙ ПАМЯТИ УЧЁНОГО И ПЕДАГОГА ЭДУАРДА ГАВРИЛОВИЧА БАБЕНКО

ПОСВЯЩАЕТСЯ СВЕТЛОЙ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ УЧЁНОГО АНАТОЛИЯ МИХАЙЛОВИЧА ШПИЛЕВА

ПОСВЯЩАЕТСЯ СВЕТЛОЙ ПАМЯТИ УЧЁНОГО ВЛАДИМИРА СТЕПАНОВИЧА КЛИМАША

Комаров О. Н., Жилин С. Г.

ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЁНЫЙ-МЕХАНИК БУРЕНИН АНАТОЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ (К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

К 70-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ЕВСТИГНЕЕВА АЛЕКСЕЯ ИВАНОВИЧА

ПАМЯТИ ВАСИЛИЯ ИЛЛАРИОНОВИЧА МУРАВЬЁВА

ПАМЯТИ МИХАИЛА ЮРЬЕВИЧА САРИЛОВА

Содержание

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Марын С. Б., Жабаров А. В., Якимец А. А., Тарасов Н. Е.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖЁСТКОСТИ КОНЦЕВОЙ ЧАСТИ ПЕРЕДНЕГО ЛОНЖЕРОНА

ПРИ СБОРКЕ КЕССОНА ОТЪЁМНОЙ ЧАСТИ КРЫЛА SSJ-100 4

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Феоктистов С. И., Андрианов И. К., Лин Х.

АППРОКСИМАЦИЯ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА В ОБЛАСТИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ С НЕЛИНЕЙНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ 8

Бабич М. В., Добрынин Н. В., Змеев К. В.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ 14

Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю.

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ

ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА 23

Жарикова Е. П., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Н.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА

МИРОВОГО ОКЕАНА И КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД 33

Гринкруг М. С., Пухов А. А.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ

ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ 41

Колесник М. Б., Гудим А. С.

ИМИТАЦИОННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ГЕРМЕТИЧНОЙ ЗАДВИЖКИ 52

Ким К. К., Иванов С. Н., Колесова А. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОВОЛНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВО ВЗАИМНО

ПЕРЕМЕЩАЮЩЕЙСЯ КОНТАКТНОЙ ПАРЕ 59

Ларченко Ю. Г., Котляров В. П.

ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ 69

Марченко О. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 77

Черняго А. Б.

ТЕХНОЛОГИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОИСКА ДАННЫХ

В ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

НА ЭТАПЕ СТРОИТЕЛЬСТВА 86

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Федорченко С. К., Давыдов В. М., Гимадеев М. Р., Иванищев Ю. Г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСКАТНОГО ИНСТРУМЕНТА В УСЛОВИЯХ

МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА 92

Мокрицкий Б. Я., Скрипилев А. А.

ФРЕЗЕРОВАНИЕ ВЫСОКОТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

СБОРНОЙ ТОРЦЕВОЙ ФРЕЗОЙ 98

Башков О. В., Брянский А. А., Башков И. О., Ефимов Т. А., Ромашко Р. В.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ,

ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ АДАПТИВНЫМИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМИ

ВОЛКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ НА ПЛАСТИНЕ

АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 102

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Коротеева Л. И., Корянова Л. А.

К ВОПРОСУ О РЕГУЛИРОВАНИИ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ЗАСТРОЙКИ

НА ТЕРРИТОРИИ Г. КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ 109

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

ПАМЯТИ ВАСИЛИЯ ИЛЛАРИОНОВИЧА МУРАВЬЁВА 113

ПАМЯТИ МИХАИЛА ЮРЬЕВИЧА САРИЛОВА 115

УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ: НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ 2022 117

Научное издание

Учёные записки КнАГТУ

2022 № VII (63)

Науки о природе и технике

Выпускающий редактор

С. Н. Иванов

Подписано в печать 23.12.2022

Дата выхода в свет 28.12.2022

Формат А4.

Бумага офисная 80 г/м².

Усл. печ. л. 13,63.

Уч.-изд. л. 17,18.

Тираж 200. Заказ 30719

Отпечатано в типографии

КнАГУ

681013,

г. Комсомольск-на-Амуре,

пр. Ленина, д. 27.

