

ВЕСТНИК

Липецкого государственного технического университета
(Вестник ЛГТУ)

№ 3 (46) 2021.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-57003.
Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор) 25.02.2014г.

ISSN 2304-9235

ВЕСТНИК

Липецкого государственного технического университета
(Вестник ЛГТУ)

№ 3 (46) 2021.

Научно-технический журнал

Регистрационный номер ПИ № ФС77-57003

Главный редактор

д-р техн. наук, проф.

Шмырин Анатолий Михайлович

Зам. главного редактора

д-р техн. наук, профессор

Ризаева Юлия Николаевна

Редакционная коллегия:

Информатика, вычислительная техника и управление

д-р техн. наук, проф. Погодаев А.К. (Россия)

д-р техн. наук, доц. Сараев П.В. (Россия)

д-р физ.-мат. наук, проф. Блюмин С.Л. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Кудинов Ю.И. (Россия)

д-р физ.-мат. наук, проф. Пеньков В.Б. (Россия)

Машиностроение

д-р техн. наук, доц. Амбросимов С.К. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Козлов А.М. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Мазур И.П. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Сосенушкин Е.Н. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Хейфец М.Л. (Беларусь)

Металлургия

д-р техн. наук, проф. Кнапински М. (Польша)

д-р техн. наук, проф. Коршиков В.Д. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Михайлов Е. (Болгария)

д-р техн. наук, проф. Найзабеков А.Б. (Казахстан)

д-р техн. наук, проф. Шкатов В.В. (Россия)

Транспорт и логистика

д-р техн. наук, проф. Корчагин В.А. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Клявин В.Э. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Ли Р.И. (Россия)

д-р техн. наук, доц. Ляпин С.А. (Россия)

д-р техн. наук, доц. Ризаева Ю.Н. (Россия)

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Учредитель: © ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Адрес: 398055, Липецк, ул. Московская, 30. E-mail: kaf-vm@stu.lipetsk.ru

ВЕСТНИК ЛИПЕЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА (ВЕСТНИК ЛГТУ)

СОДЕРЖАНИЕ		CONTENTS	
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ		COMPUTER SCIENCES, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL	
СТР.	Е.В. Кузнецова, И.В. Стругов Способы применения 5 математических и статистических методов в условиях исследования объектов психолого-педагогической предметной области	E.V. Kuznetsova, I.V. Strugov Application of mathematical and statistical methods in researching objects of the psychological and pedagogical subject area	
15	Ю.И. Кудинов, Е.С. Дуванов, Е.В. Ларина, Д.С. Бестиков Синтез компенсатора в дискретной системе управления методом корневого годографа	Yu. I. Kudinov, E.S. Duvanov, E.V. Larina, D.S. Bestikov Compensator synthesis by the root locus method in a discrete control system	
23	Ю.М. Крылов, А.А. Агапов, А.М. Литвиненко, Н.С. Антонов Исследование и математическое моделирование следящих электроприводов с учетом конструктивных особенностей исполнительного механизма	Yu. M. Krylov, A.A. Agapov, A.M. Litvinenko, N.S. Antonov Research and mathematical modeling of servo drives with account of the actuator design features	
31	Ю.И. Кудинов, Р.В. Батищев, Е.С. Дуванов, А.А. Пономарев Программное определение настроек ПИ регулятора методом расширенных частотных характеристик	Yu.I. Kudinov, R.V. Batishchev, E.S. Duvanov, A.A. Ponomarev Extended frequency response analysis in determining pi controller characteristics	
ТРАНСПОРТ И ЛОГИСТИКА		TRANSPORT AND LOGISTICS	
38	А.С. Сысоев, В.Э. Клявин, А.В. Двуреченская, А.Э. Мамедов Кластеризация наборов данных о дорожно-транспортных происшествиях для определения маркетинговых кампаний по повышению уровня транспортной безопасности	A.S. Sysoev, V.E. Klyavin, A.V. Dvurechenskaya, A.E. Mamedov Clustering road accident data sets to outline marketing campaigns on increasing road safety level	

- 46 **Д.А. Кадасев, А.И. Петросянц**
Повышение скорости движения
автотранспортных потоков при
оптимизации работы светофорной
сигнализации методами
имитационного моделирования
- 54 **Ю.Н. Ризаева, В.А. Логинов,
А.Ю. Кузнецов**
Планирование поставок продукции
при изменяющемся во времени
спросе потребителя
- 60 **А.В. Гринченко, Е.К. Погодина**
Имитационное моделирование
обслуживания автомобилей
в автосервисе
- 74 **И.В. Жилин, О.В. Ананьев**
К вопросу о технологическом
проектировании автосервисных
предприятий
- 79 **Б.А. Бондарев, А.Б. Бондарев,
В.К. Жидков, П.В. Борков**
Современные разметочные
материалы автомобильных дорог
- D.A. Kadasev, A.I. Petrosyants**
Increasing the road traffic flow speed
as a result of optimizing the traffic
light signaling operation by
simulation methods
- Yu.N. Rizaeva, V.A. Loginov,
A.Yu. Kuznetsov**
Supply planning at time-varying
consumer demand
- A.V. Grinchenko, E.K. Pogodina**
Car maintenance simulation modeling
in a car service center
- I.V. Zhilin, O.V. Ananyev**
On technological design of car service
enterprises
- B.A. Bondarev, A.B. Bondarev,
V.K. Zhidkov, P.V. Borkov**
Modern road marking materials
- METALLURGY**
- 86 **А. П. Жильцов, Д.А. Власенко,
А.А. Харитоненко,
А.В. Бочаров, Н.Е. Козенко**
Анализ и совершенствование
конструктивно-технологических
параметров дробилок
агломерационной шихты и
агломерата
- 93 **В.Н. Титов, И.В. Куприянова,
Т.В. Кравченко, А.Д. Коневзерова**
Влияние содержания щелочей в
железрудном сырье на удельный
расход кокса
- 97 **А.Н. Роговский,
А.А. Шипельников, Н.А. Бобылева**
Особенности конструкции
промежуточных ковшей современных
сортовых МНЛЗ
- A. P. Zhiltsov, D. A. Vlasenko,
A. A. Kharitonenko,
A.V. Bocharov, N.E. Kozenko**
Analysis and improvement of
structural and technological
parameters of sintering mixture and
sinter crushers
- V. N. Titov, I.V. Kupriyanova,
T.V. Kravchenko,
A.D. Konevzerova**
Influence of alkali content in iron ore
raw materials on specific coke
consumption
- A.N. Rogotovskiy, A.A. Shipelnikov,
N.A. Bobyleva**
Design features of modern billet ccm
tundishes

DOI 10.53015/23049235_2021_3_5

УДК 656.078:338.2

Е.В. КУЗНЕЦОВА, И.В. СТРУГОВ

**СПОСОБЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ В УСЛОВИЯХ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ
ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В статье рассматривается применение статистических методов, в частности, методов корреляционного, факторного и регрессионного анализа для исследования набора показателей, относящихся к социально-психологической сфере, на примере численных значений уровня развитости критического мышления у студентов. Описан метод сбора статистических данных и их дальнейшей интерпретации с целью приведения к форме, пригодной для использования в расчётах. Приведён пример использования кластеризации для подтверждения корректности интерпретации значений, полученных на промежуточных этапах обработки собранной статистики. Протестирован вариант использования задачи классификации для выявления факторов, оказывающих влияние на исследуемое значение, а также произведено сравнение с ранее полученными иными методами результатами. Предпринята попытка прогнозирования исследуемого показателя на основе выделенного набора факторов и оценена точность полученного прогноза. Оценена возможность применения методов машинного обучения как альтернативного и промежуточного наборов инструментов в ходе проведения подобного исследования. Представлены примеры интерпретации полученных численных результатов в контексте психолого-педагогической значимости и отмечены особенности, требующие учёта при оценке результатов исследования социологического характера.

Ключевые слова: статистический анализ, корреляционный анализ, факторный анализ, регрессионный анализ, кластеризация, задача классификации, сбор данных, методы машинного обучения, язык R, критическое мышление.

E.V. KUZNETSOVA, I.V. STRUGOV

**APPLICATION OF MATHEMATICAL AND STATISTICAL METHODS
IN RESEARCHING OBJECTS OF THE PSYCHOLOGICAL AND PEDAGOGICAL
SUBJECT AREA**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The article considers the application of statistical methods, viz. methods of correlation, factor and regression analysis, to research a number of indicators of the social and psychological sphere based on numerical values of students' critical thinking development level. The method is described of collecting statistical data and their further interpretation to put them to the form applicable in calculations. An example is given of using clustering to confirm the correctness of interpreting the values obtained at the intermediate stages of processing the collected

statistics. A variant is tested of using the classification problem to identify factors influencing the researched value, and a comparison is made with the results previously obtained by other methods. An attempt is made to forecast the researched indicator based on the selected set of factors and the accuracy of the obtained forecast is estimated. The possibility of using machine learning methods as alternative and intermediate toolsets in such a research is estimated. Examples are given of interpreting the obtained numerical results concerning their psychological and pedagogical significance, and features to be taken into account when estimating sociological study results are noted.

Keywords: statistical analysis, correlation analysis, factor analysis, regression analysis, clustering, classification problem, data collection, machine learning methods, R language, critical thinking.

ВВЕДЕНИЕ

Статистические методы – незаменимый инструмент, давно ставший неотъемлемой частью практически любых социологических исследований. Однако область его применения, конечно, не ограничивается исследованиями социологов, математические методы и статистический анализ играют важную роль также в психологии и педагогике, позволяя более детально изучить природу тех или иных процессов, провести декомпозицию, выявить закономерности и зависимости, рационально структурировать исследовательскую деятельность или построение алгоритма действий, реализации, внедрения программ и практик. При этом стоит отметить, что важным аспектом, зачастую сильно осложняющим их применение, является многогранность исследуемой области. Большой проблемой может стать чёткое определение объекта исследования, выбор характеризующих его параметров, оценка значимости и влияния отобранных факторов. Это оказывает влияние как на выбор используемых методов, так и на подход к анализу полученных в результате значений. Немаловажную роль играет интерпретация результатов всего исследования, так как задачей нередко является оценка не столько полученных численных показателей, сколько их значение в контексте исследуемого процесса или явление и взаимосвязь с другими характеризующими его параметрами.

Объектом проводимого исследования было выбрано критическое мышление, как одна из ключевых компетенций [1] практики, в наши дни активно внедряемой

[2] на всех уровнях образования, так называемого компетентного подхода [3] – системы требований к организации образовательного процесса. Такая методика определяет результаты образовательной деятельности в виде компетенций и способствует практико-ориентированному характеру подготовки учащихся, укреплению значения их самостоятельной работы по решению задач и преодолению ситуаций, имитирующих социально-профессиональные проблемы, метод определения итогов образовательного процесса, как норм его качества.

В общем смысле критическое мышление – система суждений, которая используется для анализа вещей и событий с формулированием обоснованных выводов и позволяет выносить обоснованные оценки, интерпретации, а также применять полученные результаты к ситуациям и проблемам [4]. Это вовсе не новое понятие, однако большинство его исследований ранее носило преимущественно философский характер, давая интерпретацию скорее с точки зрения психологии, или же, в иных случаях, с точки зрения биологии и физиологии, тогда как значимые и признанные статистические исследования его влияния, зависимостей и расчёты численных показателей и их значений практически отсутствуют как в зарубежных, так и отечественных источниках.

Целями исследования были обозначены: выбор методов численного выражения и оценки значения развитости критического мышления, группой исследования были выбраны студенты высшего звена

образования; определение факторов, влияющих на уровень развития критического мышления во время обучения; проверка влияния показателя критического мышления, как одной из ключевых компетенций, на некоторые показатели, характеризующие учебный процесс.

В качестве изучаемых параметров были отобраны девять показателей, выделенных ранее в рамках проведения иных исследований [5]. Ими стали:

посещаемость, обучаемость (индивидуальные способности и предрасположенность к освоению учебного материала), сложность учёбы (индивидуальная оценка сложности получаемого материала), достигаемые результаты, желание в дальнейшем работать по осваиваемой специальности, уровень преподавания (оценка качества получаемого образования, предполагаемая студентом), объективность преподавателей, важность учёбы (по личному мнению студента), удовлетворённость выбранной специальностью.

В качестве инструмента по сбору данных было выбрано анкетирование, которое было представлено в виде тестирования, составленного и используемого в рамках курса оценки и развития критического мышления в работах Л. Старки [6], в переводе и редакции Е. Волкова [7]. Данный тест, однако, всё ещё содержал вопросы, трудно воспринимаемые для использования в России, так как они были ориентированы на зарубежную аудиторию, знающую особенности локальной культуры и истории, не свойственные исследуемой группе и не изучаемые в рамках образовательных программ. Поэтому были внесены коррективы для адаптации содержания тестирования под актуальную среду и удаления дублирующихся по смыслу или содержанию. В итоге в анкету вошли двадцать вопросов. Восемнадцать моделировали некоторые ситуации и предлагали выбрать ответ из четырёх возможных, один из которых заведомо признавался верным, оценивающих рациональность реакции на предложенную

ситуацию. Два вопроса содержали отрывки текста, нацеленные на умение анализировать полученную информацию. Ответом для них также являлся один верный ответ из четырёх возможных. Верный ответ засчитывался одним баллом, тогда как неверный давал ноль, затем показатель критического мышления рассчитывался отношением набранного количества баллов к максимально возможному. Также в тест были включены 9 вопросов, предлагающих оценить вышеперечисленные параметры по школе от одного до десяти. Далее эти оценки принимались как процентное значение соответствующего параметра.

Итого в опросе принял участие шестьдесят один человек, результаты оценок уровня развитости критического мышления которых были поделены на три группы: отсутствие хорошо развитого критического ума (значение менее 0,55) – четырнадцать человек; средний уровень (от 0,55 до 0,8) – тридцать семь человек; обладание развитым критическим мышлением (значение 0,8 и более) – десять человек. Исследование и дальнейшие расчёты производились при помощи программного пакета для статистического анализа STATISTICA.

В первую очередь, были применены методы корреляционного анализа [8], для установления зависимостей между исследуемыми параметрами была построена матрица корреляций и произведена интерпретация полученных значений зависимости параметров. Стоит заметить, что значения корреляции при этом могут получиться не слишком высокими, что наблюдалось и в данном случае, так как набор используемых параметров в подобном исследовании носит достаточно условный характер, не охватывает полного спектра зависимостей (по причине слишком большого количества потенциальных влияющих факторов и условий). Поэтому имеет смысл принимать значимыми связи с численным показателем ниже стандартно рекомендуемого в зависимости от конкретной ситуации, в частности,

учитывая наблюдаемые максимальные и минимальные полученные значения.

Затем при помощи методов факторного анализа [9], одним из предназначений которого является выявление скрытых факторов, отвечающих за наличие линейных статистических корреляций между наблюдаемыми переменными, с целью сокращения числа переменных, необходимых для описания исследуемого набора данных. В данном случае использовался метод главных компонент – технология многомерного статистического анализа, используемая для сокращения размерности пространства признаков с минимальной потерей полезной информации. С математической точки

F1	Критическое мышление
F2	Посещаемость
F3	Обучаемость
F4	Сложность учёбы
F5	Результаты
F6	Желание работать по специальности
F7	Уровень преподавания
F8	Объективность преподавателей
F9	Важность учёбы
F10	Удовлетворённость выбранной специальностью

Рис. 1. Обозначения переменных и факторные нагрузки

Было рассмотрено несколько вариантов разбиения на новые факторы с использованием разных типов вращения, после чего оптимальным был выбран набор из трёх факторов, интерпретированных следующим образом: Factor 1 – фактор профессии, для которого значимыми являются удовлетворённость специальностью, желание работать и обучаемость; Factor 2 – фактор преподавания, характеризующийся значимыми показателями объективности преподавателей, уровня преподавания и оценки важности получения образования; Factor 3 – фактор сложности учебного процесса. При этом из набора переменных были удалены показатели критического мышления и достигаемых результатов, так как далее они должны будут использоваться на следующем шаге.

зрения данный метод представляет собой ортогональное линейное преобразование, которое отображает данные из исходного пространства признаков в новое пространство меньшей размерности. Задача метода главных компонент в том, чтобы построить новое пространство признаков меньшей размерности, дисперсия между осями которой будет перераспределена так, чтобы максимизировать дисперсию по каждой из них. На рис. 1 представлены обозначения для исследуемых параметров, используемых во время расчёта и факторные нагрузки переменных, объединённых в набор новых факторов.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
F2	0,43	0,162	0,516
F3	0,525	0,078	-0,285
F4	-0,008	0,041	0,887
F6	0,823	0,174	0,144
F7	0,153	0,874	0,045
F8	0,142	0,873	0,031
F9	0,342	0,513	0,166
F10	0,882	0,187	-0,022
Expl.Var	2,076	1,89	1,186
Prp.Totl	0,259	0,236	0,148

После чего исходный набор параметров и новые, выделенные на его основе факторы, были исследованы при помощи одного из методов регрессионного анализа [10], исследующего влияния одной или нескольких независимых переменных на зависимую переменную (независимые переменные иначе называют регрессорами или предикторами, а зависимые переменные – критериальными), а именно метода пошаговой регрессии. Метод состоит в отборе из большого количества предикатов небольшой подгруппы переменных, которые вносят наибольший вклад в вариацию зависимой переменной. Подробнее с результатами этих этапов и общими выводами первой части работы можно ознакомиться в одном из источников [11].

Кроме того, в ходе работы были применены методы кластерного анализа

для проверки смысловой интерпретации как изначального разделения результатов на три группы в зависимости от уровня развитости критического мышления, так и выделенных факторов, влияющих на него, путём оценки состава кластеров, полученных на основе набора исходных данных. Первая реализация также была выполнена при помощи STATISTICA. В качестве реализуемого метода был выбран метод К-средних, основная идея которого заключается в том, что на каждой итерации происходит перерасчёт центра

масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем векторы разбиваются на кластеры в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике. Алгоритм завершается, когда на какой-то итерации не происходит изменения внутрикластерного расстояния. В итоге оптимальным было принято разбиение на три кластера, подтверждающее смысловую нагрузку интерпретации полученных ранее выводов. Результат представлен на рис. 2.

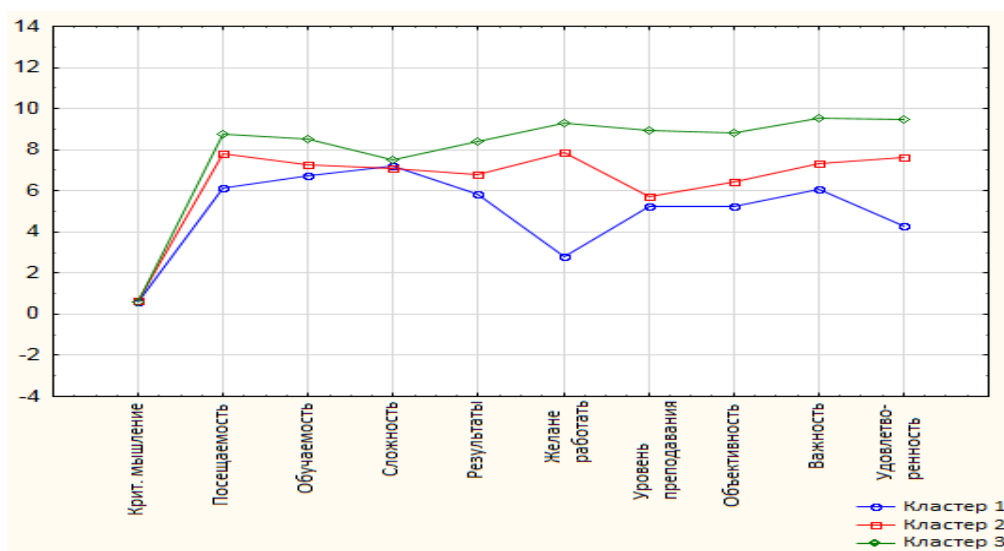


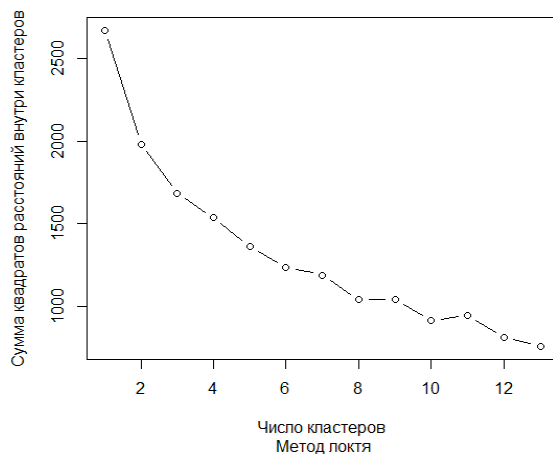
Рис. 2. Кластеризация. STATISTICA. Метод К-средних

Можно обратить внимание, что полученные значения сходятся в позиции, обозначающей параметр критического мышления, что может быть интерпретировано как свидетельство его низкого влияния на данную модель. Однако стоит предположить, что в данной ситуации это может быть обусловлено некоторой степенью однородности данных по этому показателю. Необходимо принять во внимание, что наибольшее число опрошенных имеют схожие результаты, оказывающие влияние на распределение их в одну из категорий. Тридцать семь из шестидесяти одного человек имеют средний результат показателя развитости критического мышления, тогда как низкими показателями обладают только четырнадцать человек, а высокими лишь десять. В данном случае это могло оказать влияние на общую модель, так как

параметр критического мышления определённо не является определяющим для разделения общей выборки на кластеры. Также схождение наблюдается и по параметру сложности обучения, слабое влияние которого на исследуемые значения было отмечено на одном из предыдущих этапов. Анализ состава полученных кластеров по другим параметрам также не противоречит выводам, полученных на предыдущих этапах, следовательно, принятое разделение исходных данных на три условные группы было корректным.

Позже был произведён эксперимент, включающий повторное проведение кластеризации, но при помощи иных инструментов, а именно программных средств языка R. Его целями были проверка возможности использования методов машинного обучения, в частности,

кластеризации как метода обучения без учителя, для выполнения данной задачи, а также проверка смысловой устойчивости данного разбиения на группы, так как это было важным условием для следующего этапа работы. В ходе эксперимента были применены библиотеки `stats`, `cluster`, `ggplot2`, `factoextra` для визуализации частоты полученных значений и состава выделенных групп, упрощающей их



изучение, реализации процедуры кластеризации, а также вывода её результатов в графическом виде.

Для оценки оптимального количества кластеров были использованы две различные реализации метода локтя, давшие схожий результат, подтверждающий корректность разделения исходных данных на три кластера. Результаты представлены на рис. 3.

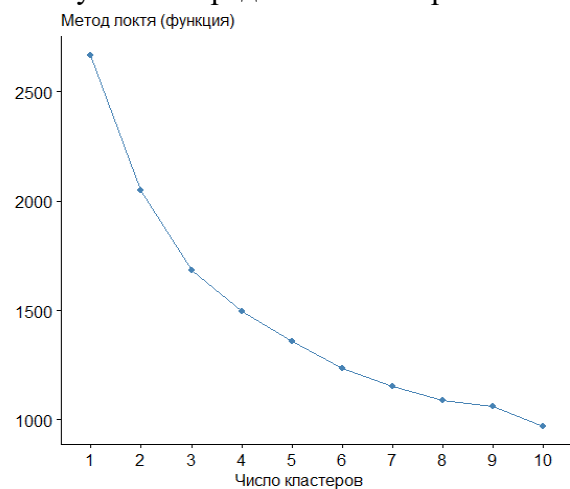


Рис. 3. Метод локтя

После чего при помощи функции `kmeans` была выполнена кластеризация по методу К-средних. Графическое

представление результата приведено на рис. 4.

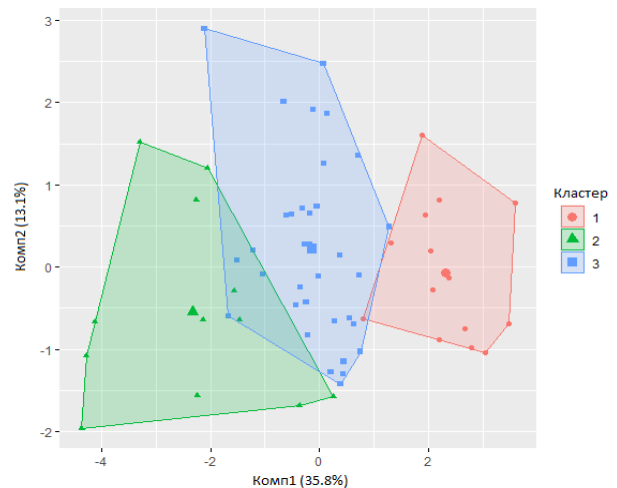
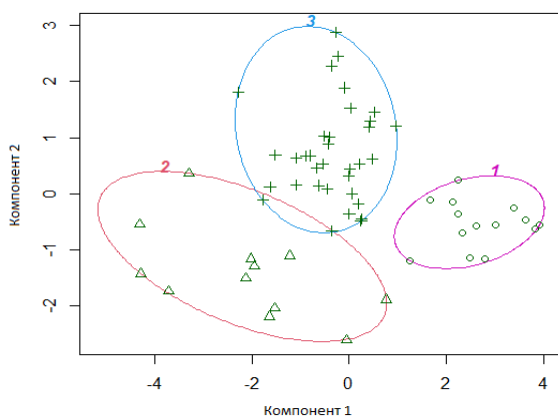


Рис. 4. Кластеризация. R. Метод К-средних

Также был проверен вариант использования 4 кластеров, который показал неудовлетворительный результат, так как в таком случае происходило многократное пересечение полученных наборов, один из которых в итоге практически полностью оказывался в

составе других кластеров, что означает отсутствие смысла в выделении его значений в обособленную группу. В остальном полученный результат не противоречит сделанным ранее выводам, что говорит о подтверждении возможности использования данного метода.

Далее, также при помощи R был реализован другой метод кластеризации с целью проверки устойчивости результата. Использован был метод иерархической кластеризации – метод Уорда, в которой критерий выбора пары кластеров для слияния на каждом этапе основан на оптимальном значении целевой функции. Для визуального представления результатов кластеризации используется дендрограмма – дерево, построенное по матрице мер близости между кластерами. В узлах дерева находятся подмножества объектов из обучающей выборки. При этом на каждом ярусе дерева множество объектов из всех узлов составляет исходное множество объектов. Объединение узлов между ярусами

соответствует слиянию двух кластеров. При этом длина ребра соответствует расстоянию между кластерами. Дерево строится от листьев к корню. В начальный момент времени каждый объект содержится в собственном кластере. Далее происходит итеративный процесс слияния двух ближайших кластеров до тех пор, пока все кластеры не объединятся в один или не будет найдено необходимое число кластеров. На каждом шаге необходимо уметь вычислять расстояние между кластерами и пересчитывать расстояние между новыми кластерами [12]. Реализация осуществлялась при помощи функции `hclust`. Полученная дендрограмма изображена на рис. 5.

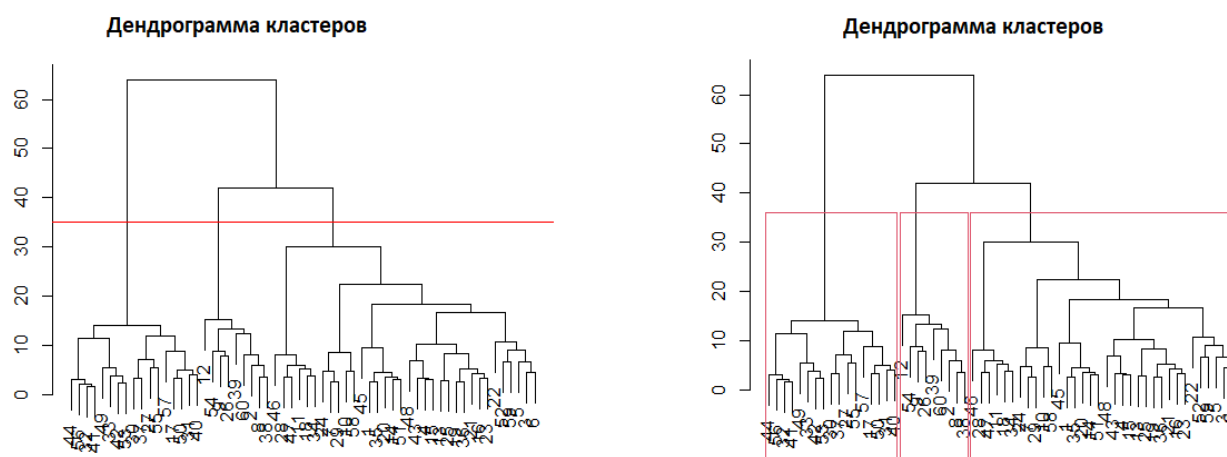


Рис. 5. Кластеризация. R. Метод Уорда

Это подтверждает полученные ранее результаты, что свидетельствует об устойчивости и корректности сделанных выводов. Подробности о ходе и выводах данного этапа представлены в источнике [13].

На заключительном на данный момент этапе на основе имеющегося набора данных была составлена задача классификации [14]. Это задача, в которой имеется множество объектов, разделённых некоторым образом на классы. Задано конечное множество объектов, для которых известно, к каким классам они относятся. Это множество называется выборкой. Классовая принадлежность остальных объектов неизвестна. В математической статистике задачи

классификации называются также задачами дискриминантного анализа. В машинном обучении задача классификации решается, в частности, с помощью методов искусственных нейронных сетей при постановке эксперимента в виде обучения с учителем. Обучение с учителем – один из способов машинного обучения, в ходе которого испытуемая система принудительно обучается с помощью примеров «стимул-реакция». С точки зрения кибернетики, является одним из видов кибернетического эксперимента. Между входами и эталонными выходами может существовать некоторая зависимость, но она неизвестна. Известна только конечная совокупность прецедентов – пар «стимул-

реакция», называемая обучающей выборкой. На основе этих данных требуется восстановить зависимость, то есть построить алгоритм, способный для любого объекта выдать достаточно точный ответ [12]. Дерево решений [15] для классификации – когда предсказываемый результат является классом, к которому принадлежат данные. Возможность применения данного метода обусловлена результатами предыдущего этапа, в котором была подтверждена устойчивость и корректность разделения исходных данных на три группы, что и позволяет применить алгоритм обучения с учителем. Реализация аналогично выполнялась на базе языка R, при этом были использованы библиотеки `rpart`, `e1071`, `stats` для операций классификации и предсказания.

В качестве реализуемых методов были выбраны деревья решений и метод опорных векторов. Дерево принятия решений [16] – средство поддержки принятия решений, использующееся в машинном обучении, анализе данных и статистике. Структура дерева представляет собой «листья» и «ветки». На рёбрах («ветках») дерева решения записаны атрибуты, от которых зависит целевая функция, в «листьях» записаны значения целевой функции, а в остальных узлах – атрибуты, по которым различаются случаи. Чтобы классифицировать новый случай, надо спуститься по дереву до листа и выдать соответствующее значение. Подобные деревья решений широко используются в интеллектуальном анализе данных. Цель состоит в том, чтобы создать модель, которая предсказывает значение целевой переменной на основе нескольких переменных на входе. Метод опорных векторов (SVM – Support Vector Machine) – набор схожих алгоритмов обучения с учителем, использующихся для задач классификации и регрессионного анализа. Принадлежит семейству линейных классификаторов и может также рассматриваться как специальный случай регуляризации по Тихонову. Особым свойством метода опорных векторов является непрерывное уменьшение эмпирической ошибки классификации и

увеличение зазора, поэтому метод также известен как метод классификатора с максимальным зазором. Основная идея метода – перевод исходных векторов в пространство более высокой размерности и поиск разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором в этом пространстве. Две параллельных гиперплоскости строятся по обеим сторонам гиперплоскости, разделяющей классы. Разделяющей гиперплоскостью будет гиперплоскость, максимизирующая расстояние до двух параллельных гиперплоскостей. Алгоритм работает в предположении, что чем больше разница или расстояние между этими параллельными гиперплоскостями, тем меньше будет средняя ошибка классификатора [17].

Размерность исходной выборки была сокращена на одну единицу из группы среднего значения развития критического мышления, после чего составила тридцать шесть человек в обозначенной группе и ровно шестьдесят человек суммарно. Затем исходные данные были разбиты на две выборки: обучающую, состоящую из сорока пяти единиц строк (единиц исходного множества), и тестовую, состоящую из пятнадцати строк. После этого была произведена серия из пятнадцати экспериментов по выполнению классификации при помощи функции `rpart` для деревьев решений и функции `svm` для метода опорных векторов, а затем выполнено предсказание для значения критического мышления на основе полученных параметров при помощи функции `predict`, а также рассчитана точность. Подробное описание результатов на примере трёх экспериментов из серии представлено в источнике [18].

Целью данного этапа была проверка возможности применения задачи классификации для оценки значимости параметров, выбираемых для оценки переменной, отражающей критическое мышление, а также возможности предсказания этого параметра на базе отобранных факторных критериев, основываясь на оценке точности прогнозов, полученных применением двух

различных методов. В ходе работы было установлено, что отбираемые алгоритмом параметры действительно соответствуют по смысловой нагрузке выведенным ранее факторам и не противоречат полученным результатам, что говорит о подтверждении

возможности использования задачи классификации для таких целей и ещё раз подтверждает корректность сделанных выводов. Примеры выбора параметров, полученные по методу деревьев решений, представлены на рис. 6.

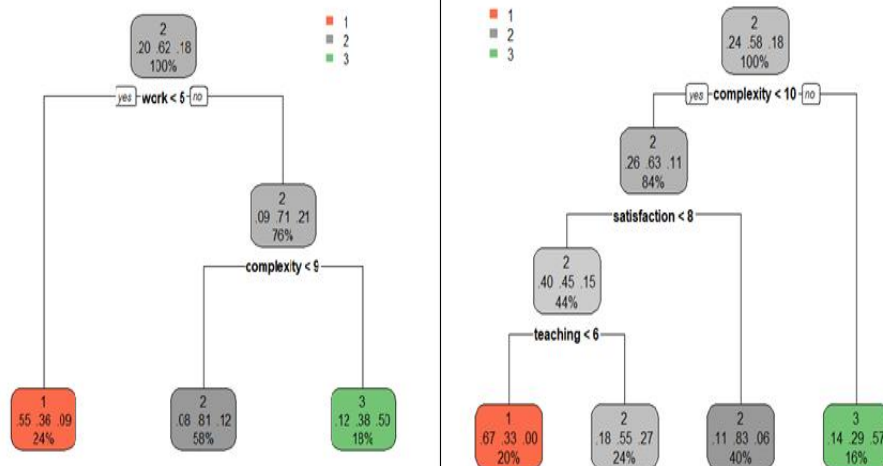


Рис. 6. Классификация. R. Деревья решений

В то же время, полученные значения точности прогноза оказались достаточно низкими, что также может быть обосновано сложностью и многогранностью исследуемого понятия, которые не позволяют однозначно выбрать и трактовать воздействующие на него факторы, а также влиянием на отобранные для исследования параметры большого количества условностей, обусловленных перечнем индивидуальных показателей студентов. Тем не менее, было принято решение проверить это путём использования альтернативного способа оценки значения развитости критического мышления, а также добавлением в выборку некоторых новых параметров. И, кроме того, провести испытание пригодности применения в таком случае испытанных методов и устойчивости их результатов, что позволит в дальнейшем говорить о корректности обоснованного применения данных методов в аналогичных либо близких по смыслу исследованиях схожих областей. Это и определяет ход дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

В ходе проведённого исследования были рассмотрены способы применения математических методов и статистического анализа для изучения объекта психолого-педагогической предметной области в контексте изучения критического мышления студентов, на примере частных случаев отмечены особенности интерпретации полученных при этом результатов, представлен способ сбора и обработки данных соответствующей области, проверены альтернативные методы использования задач классификации и кластеризации, подтверждена возможность использования методов машинного обучения, продемонстрирован пример проверки устойчивости и достоверности результатов, полученных на разных этапах исследования, оценена возможность прогнозирования исследуемого параметра при помощи программных средств языка

R, представлено итоговое заключение по нескольким этапам проделанной работы, а также обозначены перспективы и направление дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Болотов, В.А.** Компетентностная модель: от идеи к образовательной программе / В.А. Болотов, В.В. Сериков, – Текст: непосредственный // – Педагогика. 2003. – № 10. – С. 26.
2. **Троянская, С.Л.** Основы компетентностного подхода в высшем образовании: учебное пособие / С.Л. Троянская. – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет». 2016. – 176 с. – Текст : непосредственный
3. **Байденко, В.И.** Компетенции: к освоению компетентностного подхода / В.И. Байденко. – Текст : непосредственный // Россия в Болонском процессе: проблемы, задачи, перспективы: труды методологического семинара. – Москва: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2004. С. 25–30.
4. **Facione, P.A.** A statement of expert consensus for purposes of educational assessment and instruction. Executive summary / P.A. Facione. The California Academic Press, 1990. – 19 p. – Text : immediate.
5. **Kuznetsova, E.V.** Evaluation and interpretation of student satisfaction with the quality of the university educational program in applied mathematics / E. V. Kuznetsova, – Text : immediate// Teaching Mathematics and its Applications. – 2019. – № 2. – P. 107 – 119.
6. **Starkey, L.** Critical Thinking Skills Success in 20 Minutes a Day / L. Starkey. – New York: Learning Express, 2004. – 169 p. – Text : immediate.
7. **Волков, Е.Н.** Тесты критического мышления: вводный обзор / Е.Н. Волков. – Текст : непосредственный // Психологическая диагностика. – 2015. – № 3. – С. 5–23.
8. **Шмойлова, Р.А.** Общая теория статистики: учебник/ Р.А. Шмойлова. – 3-е изд., переработанное. – Москва: Финансы и Статистика, 2002. – 560 с. – Текст : непосредственный.
9. **Ким, Д.-О.** Факторный, дискриминантный и кластерный анализ/ Д.О. Ким, Ч.У. Мьюллер. – Факторный анализ: статистические методы и практические вопросы. – Москва: Финансы и статистика, 1989. – 215 с. – Текст: непосредственный.
10. **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия / Н. Дрейпер, Г. Смит, – Москва: Диалектика, 2007. – 912 с. – Текст : непосредственный.
11. **Кузнецова, Е.В.** Анализ критического мышления студентов посредством применения статистических методов/ Е.В. Кузнецова, И.В. Стругов. – Текст : непосредственный // Общество, образование, наука в современных парадигмах развития: сборник трудов по материалам Национальной научно-практической конференции. Ч. 2. – Керчь: КГМТУ. 2020. – С. 208– 213.
12. **Загоруйко, Н.Г.** Прикладные методы анализа данных и знаний / Н.Г. Загоруйко. – Новосибирск: Изд-во Института математики, 1999. – 212 с. – Текст: непосредственный.
13. **Кузнецова, Е.В.** Анализ кластеризации показателей развитости критического мышления у студентов/ Е.В. Кузнецова, И.В. Стругов. – Текст непосредственный // Наука, образование, молодежь: горизонты развития: сборник трудов по материалам Национальной научно-практической конференции. – Керчь: КГМТУ, 2021.– С. 215–219.
14. **Левитин, А. В.** Алгоритмы. Введение в разработку и анализ/ А.В. Левитин, – Москва: Вильямс, 2006. – 576 с. – Текст : непосредственный.
15. **Дюк, В.А.** Data Mining: учебный курс/ В.А. Дюк, А.П. Самойленко – Санкт-Петербург: Питер, 2001. – Текст : непосредственный.
16. **Вьюгин, В.В.** Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования / В.В. Вьюгин. – Москва: МЦМНО, 2013. – 390 с. – Текст : непосредственный.

17. **Lantz, B.** Machine Learning with R. Birmingham / B. Lantz. Packt Publishing, 2013. – 375 p. – Text : immediate.

18. **Кузнецова, Е.В.** Использование задачи классификации для исследования показателей критического мышления у студентов/ Е.В. Кузнецова, И.В. Стругов.

– Текст : непосредственный // Наука и общество: актуальные проблемы и решения: сборник трудов по материалам Национальной научно-практической конференции. – Керчь: КГМТУ, 2021. – С. 709–716.

Сведения об авторах:

Кузнецова Елена Васильевна

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

eva351@yandex.ru

Стругов Илья Владимирович

магистрант кафедры прикладной математики, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

Information about authors:

Elena V. Kuznetsova

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics Lipetsk State Technical University Moskovskaya st., 30, Lipetsk, Russia, 398055.

eva351@yandex.ru

Ilya V. Strugov

master's student of the Department of Applied Mathematics

Lipetsk State Technical University Moskovskaya st., 30, Lipetsk, Russia, 398055.

DOI 10.53015/23049235_2021_3_15

УДК 621.313.1

Ю.И. КУДИНОВ, Е.С.ДУВАНОВ, Е.В. ЛАРИНА, Д.С. БЕСТИКОВ

СИНТЕЗ КОМПЕНСАТОРА В ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ КОРНЕВОГО ГОДОГРАФА

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В работе методом корневого годографа определяются параметры ведущего компенсатора с использованием процедуры удаления одинаковых нулей и полюсов передаточной функции замкнутой системы управления [1].

Ключевые слова: компенсатор, нули и полюса, метод корневого годографа, дискретная система управления, передаточная функция.

YU. I. KUDINOV, E.S. DUVANOV, E. V. LARINA, D.S. BESTIKOV

COMPENSATOR SYNTHESIS BY THE ROOT LOCUS METHOD IN A DISCRETE CONTROL SYSTEM

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: In the paper, the parameters of the main compensator are determined by the root locus method using the procedure for removing identical zeros and poles of the closed control system transfer function.

Keywords: compensator, zeros and poles, root locus method, discrete control system, transfer function.

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с пропорционально – интегрально – дифференциальными (ПИД) регуляторами для улучшения динамических характеристик систем управления (повышения устойчивости и качества последних) [2-4] довольно часто используется компенсатор фазового опережения, имеющий дискретную передаточную функцию (ДПФ) вида [5, 6]

$$G_D(z) = K \frac{z+a}{z+b}. \quad (1)$$

Будем рассматривать ведущий компенсатор, у которого нуль a находится справа от полюса b .

Довольно частой процедурой при синтезе регуляторов в s -плоскости или z -плоскости является удаление или компенсация нежелательных полюсов или нулей передаточной функции объекта

управления с помощью нулей и полюсов компенсатора (регулятора). Новые полюсы и нули могут иметь удачное расположение и тем самым обеспечить удовлетворительное качество управления. Однако следует учитывать, что процедура удаления полюса-нуля не всегда обеспечивает удовлетворительное решение [7,8]. Более того, если нежелательные полюса находятся вблизи оси $j\omega$, неточное удаление, которое почти неизбежно на практике, может привести к получению неустойчивой замкнутой системы. По этой причине никогда не следует пытаться удалить неустойчивые полюса. Теперь более подробно опишем пошаговую процедуру синтеза системы управления, изображенной на рис. 1, с исходными данными, рассчитанными по методике [9].

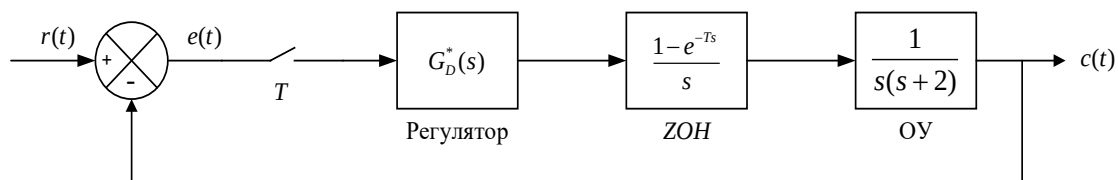


Рис. 1. Дискретная система управления

Примем, что доминирующие полюса замкнутого контура имеют степень затухания $\xi = 0.5$, время переходного процесса $t_s = 3$ с при статической ошибке не более 2 % и период дискретизации $T = 0.3$ с. Доминирующая пара полюсов в непрерывной области равна $-\xi \omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1-\xi^2}$, где ω_n – собственная частота.

Если время переходного процесса $t_s = \frac{4}{\xi \omega_n} = \frac{4}{0.5\omega_n} = 3$ с, то собственная частота $\omega_n = 2.7$. Таким образом получаем: частоту затухания

$$\omega_d = 2.7\sqrt{1-0.5^2} = 2.3,$$

частоту дискретизации

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.3} = 20.93.$$

1. Рассчитаем желаемые пары полюсов замкнутого контура на основе критериев синтеза. Доминирующие полюса замкнутой системы в s -плоскости равны [10–12]:

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} = -1.35 \pm j2.3.$$

2. Преобразуем полюса s -плоскости в полюса z -плоскости.

Таким образом, полюса замкнутой системы в z -плоскости равны:

$$z_{1,2} = \exp(T(-1.35 \pm j2.3)),$$

$$|z| = e^{-T\xi\omega_n} = \exp(-0.405) = 0.67,$$

$$\angle z = T\omega_n = 0.3 \times 2.3 = 0.69 \text{ rad} = 39.53^\circ,$$

$$z_{1,2} = |z| \cdot (\cos T\omega_n \pm j \sin T\omega_n) =$$

$$0.67(\cos 39.53 \pm j \sin 39.53) \cong 0.52 \pm j0.43.$$

3. Проверим, не превышает ли частота дискретизации в 8-10 раз желаемую частоту затухания колебаний.

$$\text{Так как } \frac{\omega_s}{\omega_d} = \frac{20.93}{2.3} = 9.1 \text{ и частота}$$

дискретизации $\omega_s = (8 - 10)\omega_d$, следовательно, период дискретизации $T = 0,3$ с выбран правильно.

4. Рассчитаем вклад углов всех полюсов и нулей разомкнутого контура или некомпенсированной системы (без регулятора) в полюса заданной замкнутой системы. Теперь с помощью программы пр.1 определим ДПФ некомпенсированной системы (без регулятора) $G_p(z)$, содержащей фиксатор нулевого уровня ZOH и объект управления ОУ (см. рис. 1)

clear (Пр. 1)

$$\begin{aligned} s &= \text{tf}('s'); \\ G &= 1/(s*(s+2)); \\ G_p &= \text{c2d}(G, 0.3, 'zoh') \\ &= \frac{0.0372z + 0.03048}{z^2 - 1.549z + 0.5488} \end{aligned}$$

Запишем найденную передаточную функцию некомпенсированной системы в более привычном виде

$$G_p(z) = \frac{0.0372z + 0.3048}{(z^2 - 1.549z - 0.5488)} = \frac{0.0372(z + 0.8192)}{(z - 1)(z - 0.5488)}.$$

Корневой годограф некомпенсированной системы показан на рис. 2 [13–15].

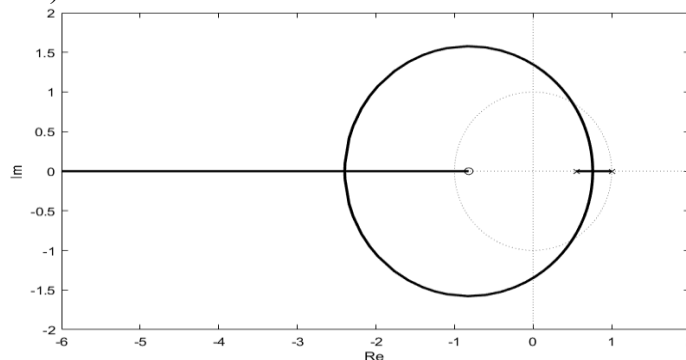


Рис. 2. Корневой годограф некомпенсированной системы

Из графика корневого годографа видно, что некомпенсированная система устойчива для очень малого диапазона K . Диаграмма полюсов некомпенсированной системы показана на рис. 3.

Сумма угловых вкладов при заданном полюсе $A = \theta_1 - \theta_2 - \theta_3$, где θ_1 –

угол, порожденный нулем – 0.8192; θ_2 и θ_3 – углы, порожденные двумя полюсами, 0.5488 и 1 соответственно.

Из диаграммы полюсов некомпенсированной системы, показанной на рис. 3, углы могут быть рассчитаны таким образом $\theta_1 = 17.8^\circ$, $\theta_2 = 93.83^\circ$, $\theta_3 = 138.14^\circ$.

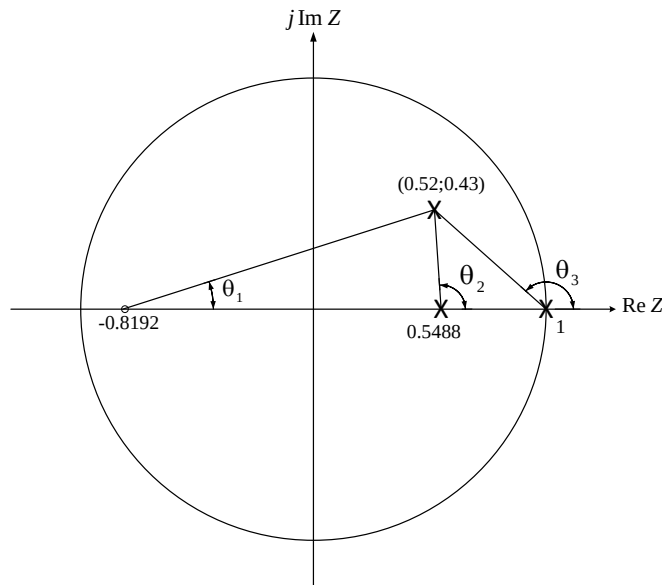


Рис. 3. Диаграмма полюсов некомпенсированной системы

Суть углового вклада ДПФ регулятора заключается в следующем:

$A = 17.8^\circ - 93.83^\circ - 138.14^\circ = -214.17^\circ$. Исходя из углового критерия, точка будет находиться на корневом годографе, если полный угловой вклад в этой точке составит $\pm 180^\circ$. Угловая разница $-214.17^\circ + 180^\circ = -34.17^\circ$. ДПФ регулятора должна обеспечить угол -34.17° . Таким образом, требуется ведущий регулятор.

5. Определим требуемый угловой вклад для выполнения углового критерия.

6. Установим требуемое значение нуля и вычислим соответствующий угловой вклад полюса регулятора (компенсатора) с ДПФ (1). Если установить нуль регулятора $z = 0.52$, то можно удалить полюс $p_2 = 0.5488$, и его угловой вклад $\theta_2 = 93.83^\circ$, тем самым исключить некоторые вычисления, участвующие в синтезе. Тогда полюс регулятора должен обеспечивать угол $93.83^\circ - 34.17^\circ = 59.21^\circ$.

7. Положение полюса предполагается в $z = -b$. Поскольку требуемый угол больше,

чем $\arctg(0.43/0.52) = 39.59^\circ$, можно легко показать, что полюс должен лежать на правой половине единичного круга. Таким образом, величина b должна быть отрицательной. Для выполнения углового критерия,

$$\arctg = \frac{0.43}{0.52 - |b|} = 59.21^\circ,$$

или

$$\arctg = \frac{0.43}{0.52 - |b|} = \arctg(59.21^\circ) = 1.678,$$

$$\text{или } \arctg = 0.52 - |b| = \frac{0.43}{1.678} = 0.256,$$

$$\text{или } |b| = 0.52 - 0.256 = 0.264, \text{ таким}$$

образом $b = -0.264$.

ДПФ компенсатора имеет следующий промежуточный вид:

$$G_D(z) = K \frac{z - 0.5488}{z - 0.264}.$$

Корневой годограф компенсированной системы (с регулятором) показан на рис. 4.

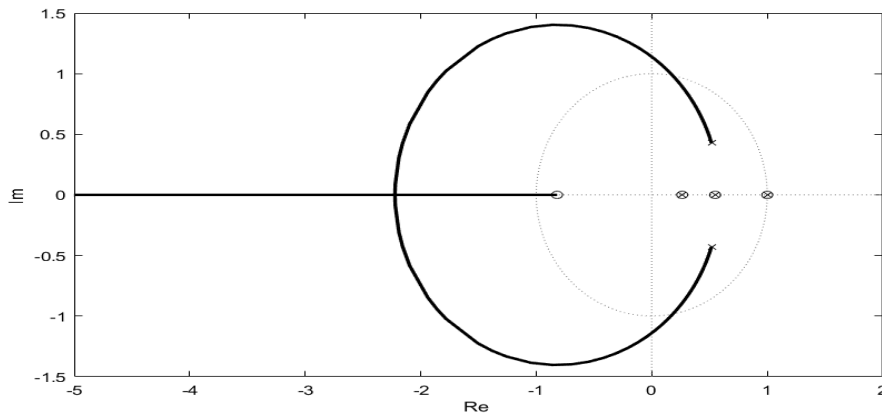


Рис. 4. Корневой годограф компенсированной системы

Если сравнить рис. 2 с рис. 4, то видно, что устойчивая область K для компенсированной системы значительно больше, чем для некомпенсированной.

8. Далее вычислим K по амплитудному критерию, представленному ниже

$$\left| \frac{0.0372K(z + 0.8192)}{(z - 0.264)(z - 1)} \right|_{z=0.52+j0.43} = 1,$$

откуда находим

величину коэффициента K

$$K = \left| \frac{(z - 0.264)(z - 1)}{0.0372(z + 0.8192)} \right|_{z=0.52+j0.43} = \frac{|(0.52 + j0.43 - 0.264)|(0.52 + j0.43 - 1)|}{0.0372|(0.52 + j0.43 + 0.8192)|} = 6.16$$

Доминирующие полюса замкнутой системы в s -плоскости равны:

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} = -1.35 \pm j2.3$$

Таким образом, полюса замкнутой системы в z -плоскости равны:

$$\begin{aligned} z_{1,2} &= \exp(T(-1.35 \pm j2.3)), \\ |z| &= e^{-T\xi\omega_n} = \exp(-0.405) = 0.67, \\ \angle z &= T\omega_n = 0.3 \times 2.3 = 0.69 \text{ rad} = 39.53^\circ, \\ z_{1,2} &= 0.67 \angle 39.53^\circ \cong 0.52 \pm j0.43, \end{aligned}$$

Сумма угловых вкладов при заданном полюсе $A = \theta_1 - \theta_2 - \theta_3$, где θ_1 – угол, порожденный нулем -0.8192 ; θ_2 и θ_3 – углы, порожденные двумя полюсами 0.5488 и 1 , соответственно.

Из диаграммы полюсов некомпенсированной системы, показанной на рис. 3, углы могут быть рассчитаны

следующим образом: $\theta_1 = 17.8^\circ$, $\theta_2 = 93.83^\circ$, $\theta_3 = 138.14^\circ$.

Суть углового вклада ДПФ регулятора заключается в следующем: $A = 17.8^\circ - 93.83^\circ - 138.14^\circ = -214.17^\circ$. Исходя из углового критерия, точка будет находиться на корневом годографе, если полный угловой вклад в этой точке составит $\pm 180^\circ$. Угловая разность $-214.17^\circ + 180^\circ = -34.17^\circ$.

ДПФ регулятора должна обеспечить угол -34.17° . Таким образом, требуется ведущий регулятор. Рассмотрим следующий регулятор

$$G_D = K \frac{z+a}{z+b}.$$

Если установить нуль регулятора $z = 0.52$, то можно удалить полюс $p_2 = 0.5488$ и его угловой вклад $\theta_2 = 93.83^\circ$, тем самым исключить некоторые вычисления, участвующие в синтезе. Тогда полюс регулятора должен обеспечить угол $93.83^\circ - 34.17^\circ = 59.21^\circ$.

Положение полюса предполагается в $z = -b$. Поскольку требуемый угол больше, чем $\arctg(0.43/0.52) = 39.59$, можно легко показать, что полюс должен лежать на правой половине единичного круга. Таким образом, b должно быть отрицательным. Для удовлетворения углового критерия,

$$\arctg = \frac{0.43}{0.52 - |b|} = 59.21^\circ,$$

или

$$\arctg = \frac{0.43}{0.52 - |b|} = \arctg(59.21^\circ) = 1.678,$$

$$\text{или } \arctg = 0.52 - |b| = \frac{0.43}{1.678} = 0.256,$$

или $|b| = 0.52 - 0.256 = 0.264$, таким образом $b = -0.264$.

В результате получим промежуточную передаточную функцию компенсатора

$$G_D(z) = K \frac{z - 0.5488}{z - 0.264}.$$

В результате регулятор имеет ДПФ

$$G_D(z) = 6.16 \frac{z - 0.5488}{z - 0.264} = \frac{6.16z - 3.381}{z - 0.264}.$$

Схема *Simulink* для вычисления и вывода выходного сигнала – переходной функции показана на рис. 5. Все дискретные блоки в модели *Simulink* должны иметь один и тот же период дискретизации, который составляет 0,3 с.

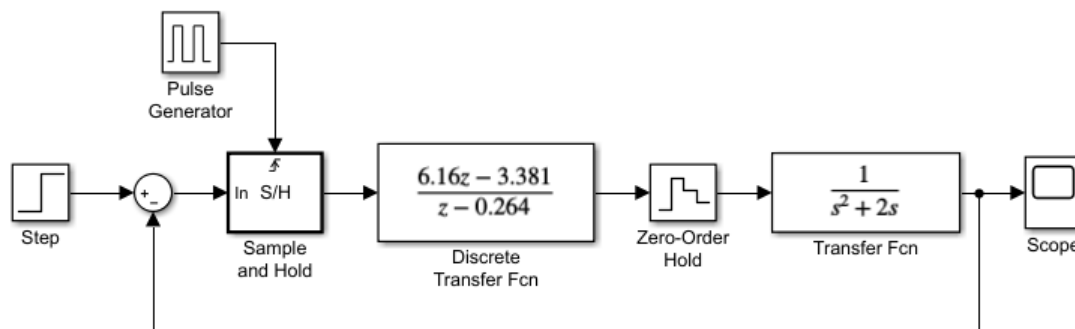


Рис. 5. Схема системы управления с компенсатором

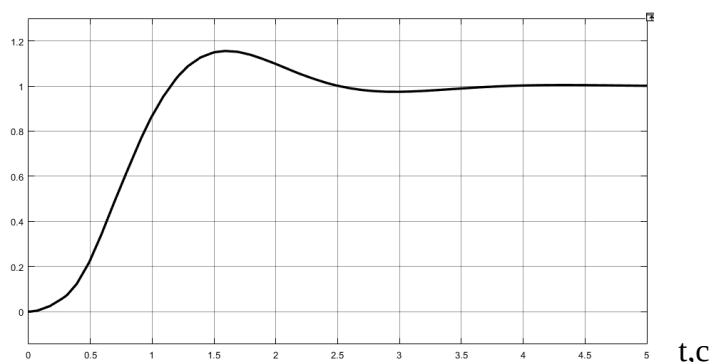


Рис. 6. Переходная функция замкнутой системы управления

ВЫВОДЫ

Переходная функция отобразится на экране осциллографа Scope в виде графика, показанного на рис. 6. Из рис. 6 видно, что переходная функция замкнутой

системы управления с оптимальным дискретным компенсатором обладает удовлетворительными показателями качества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гайдук, А. Р.** Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. – 464 с. – Текст : непосредственный.
2. **Кудинов, Ю. И.** Практическая работа в MATLAB : учебное пособие / Ю.И. Кудинов. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2013. – 60 с. – Текст : непосредственный.
3. **Кудинов, Ю. И.** Теория автоматического управления (с использованием MATLAB – SIMULINK). Практикум : учебное пособие / Ю.И. Кудинов, Ф.Ф. Пашенко, А.Ю. Келина. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 280 с. – Текст : непосредственный.
4. Теория автоматического управления: учебник / под ред. В.Б. Яковлева. — Москва : Высшая школа, 2003. – 567 с. – Текст : непосредственный.
5. **Кудинов, Ю.И.** Теория автоматического управления с использованием MATLAB-SIMULINK : учебное пособие для вузов / Ю.И. Кудинов, Ф.Ф. Пашенко. – Санкт-Петербург : Лань, 2018. – 312 с. – Текст : непосредственный.
6. **Изерман, Р.** Цифровые системы управления /Р. Изерман. – Москва : Мир, 1984. – 541 с. – Текст : непосредственный.
7. **Фельдбаум, А. А.** Методы теории автоматического управления / А.А. Фельдбаум, К. Г. Бутковский. – Москва : Наука, 1971. – 744 с. – Текст : непосредственный.
8. **Востриков, А.С.** Теория автоматического регулирования : учебное пособие / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – Москва : Высшая школа, 2004. – 364 с. – Текст : непосредственный.
9. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – Москва : Наука, 1987. – 712 с. – Текст: непосредственный.
10. **Xue, D.** Linear feedback control : analysis and design with MATLAB / D. Xue, Y. Q. Chen, D. P. Atherton. – Philadelphia, USA : Market Street, 2007. – 354 p. – Text : immediate.
11. **Tewari, A.** Modern Control Design With MATLAB and SIMULINK / A. Tewari – John Wiley & Sons Ltd, 2002. – 518 p. – Text : immediate.
12. **Ogata, K.** Modern Control Engineering / K. Ogata. – 5 th edition. – Prentice Hall : New Jersey, 2010. – 905 p. – Text : immediate.
13. **Ziegler, J. G.** Optimum settings for automatic controllers / J. G. Ziegler, N. B. Nichols. – Text : immediate // Transactions on ASME, 1942. – Vol. 65. – P. 433–444.
14. **Ogata, K.** Discrete Time Control Systems / K. Ogata. – 2 th edition. – Prentice Hall : New Jersey, 1995. – 745 p. – Text : immediate.
15. **Fadali, M. S.** Digital Control Engineering : Analysis and Design. M. S.Fadali, A.Visioli. – Second edition / – Elsevier : Academic Press, 2013. – 582 p. –Text : immediate.

Сведения об авторах:

Кудинов Юрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информатики,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

E-mail: kudinov.yi@mail.ru

Дуванов Евгений Сергеевич

аспирант кафедры информатики ,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

Ларина Екатерина Владимировна

студентка группы УТ-18 кафедры
информатики,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

Бестиков Дмитрий Семенович

студент группы УТ-18 кафедры
информатики.
Липецкий государственный технический
университет,

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

Information about the authors:

Kudinov Yuri Ivanovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Computer Science
of Lipetsk State Technical University.

Lipetsk State Technical University
398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

E-mail: kudinov.yi@mail.ru

Duванov Evgeny Sergeevich

postgraduate student of the Department of
Computer Science of Lipetsk State Technical
University.

Lipetsk State Technical University
398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

Larina Ekaterina Vladimirovna

student of the UT-18 group of the Department
of Computer Science of Lipetsk State
Technical University.

Lipetsk State Technical University
398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

Bestikov Dmitry Semenovich

student of group UT-18 of the Department of
Computer Science of Lipetsk State Technical
University.

Lipetsk State Technical University
398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

Ю.М. КРЫЛОВ, А.А. АГАПОВ, А.М. ЛИТВИНЕНКО, Н.С. АНТОНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Аннотация: Рассматривается влияние свойств редукторного механизма на динамические свойства следящего электропривода, с целью определения воздействия тех или иных параметров исполнительного элемента на работу электропривода в целом, и для компенсации данных неопределенностей при разработке алгоритмов управления программными или аппаратными средствами.

Ключевые слова: математическое моделирование, исполнительный механизм, динамические характеристики

Y. M. KRYLOV, A. A. AGAPOV, A. M. LITVINENKO, N. S. ANTONOV

RESEARCH AND MATHEMATICAL MODELING OF SERVO DRIVES WITH ACCOUNT OF THE ACTUATOR DESIGN FEATURES

Voronezh State Technical University, Voronezh

Abstract: The paper considers the influence of the gear mechanism properties on the servo drive dynamic properties to determine the effect of certain actuator parameters on the electric drive operation as a whole and to compensate for these uncertainties when developing software or hardware control algorithms.

Keywords: mathematical modeling, actuator, dynamic characteristics

ВВЕДЕНИЕ

Современные следящие электроприводы представляют собой довольно сложные динамические системы, включающие целые группы различных устройств, которые, несмотря на различные характеристики (линейные или нелинейные) должны стабильно работать в составе единого объекта.

К наиболее важным характеристикам исполнительных электроприводов можно отнести динамические показатели, которые определяют, в конечном счете, точность и эффективность применения следящего электропривода. Динамические характеристики чаще всего характеризуются параметрами амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик (АЧХ и ФЧХ).

В результате влияния внешних воздействующих факторов и случайных процессов, возникающих при работе, в электроприводах могут образовываться дополнительные стохастические составляющие различного амплитудно-частотного спектра с недетерминированностью процессов, нарушающих работу основного контура системы. В таких случаях для повышения эффективности системы по факторам функционирования необходимо обеспечивать нечувствительность структуры к различного рода флуктуациям [1, 2].

Одним из источников помех является исполнительный орган электропривода, что обусловлено точностью изготовления деталей, трением, моментом зубцовых пульсаций и т.д.

Современные средства микроконтроллерной техники, учитывая достигнутые ими уровни быстродействия (например, 80 МГц у микроконтроллера 1986BE92У или 144 МГц – у 1986BE1Т), позволяют компенсировать данные флуктуации различными программными методами, например, введением адаптивного контура. Однако для оценки возможностей компенсации указанных возмущений программным способом необходимо провести комплексный анализ влияния исполнительного органа на динамические характеристики электропривода [3, 4].

Целью данной статьи является анализ влияния различных параметров исполнительного механизма, а также их сочетание на динамические характеристики следящих электроприводов, а также формирование основных рекомендаций по построению стабильной системы управления с учетом исследованных особенностей работы исполнительного механизма [5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выходной величиной следящего привода является угол поворота выходного

вала, а входной величиной, определяющей требуемое значение выходной координаты привода, может быть любая физическая величина. Отклонение действительного значения угла поворота выходного вала от требуемого измеряется с помощью датчиков рассогласования. Электрический сигнал, содержащий в себе информацию о величине и знаке угла рассогласования, подается на вход усилительно-преобразовательного устройства, управляющего исполнительным элементом привода. В качестве последнего обычно используются двигатели, а также неуправляемые электродвигатели в сочетании с управляемыми электромагнитными муфтами. Под действием управляющего сигнала, снимаемого с усилительно-преобразовательного устройства, исполнительный элемент перемещает выходной вал привода так, чтобы уменьшить угол рассогласования [6 – 9].

С учетом вышеизложенного для дальнейшего исследования принята следующая схема исполнительного следящего рулевого электропривода, которая представлена на рис. 1.

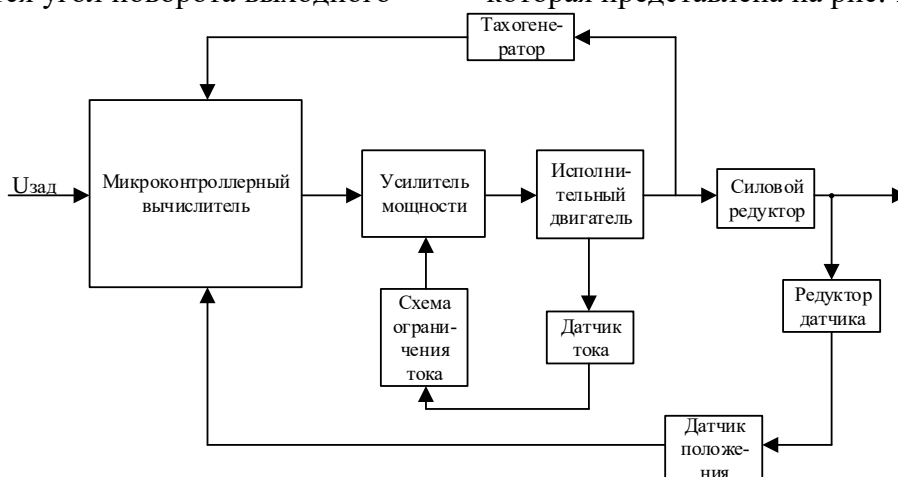


Рис. 1. Схема следящего рулевого электропривода

В составе объекта управления исполнительный элемент – это редуктор на базе прямозубых цилиндрических зубчатых колес с выходным звеном по схеме планетарной передачи, кинематическая схема которого приведена на рис. 2.

где 1-7 – порядковый номер ступеней редуктора, ЭД – электродвигатель, Д – датчик угла поворота входного звена 6.

влиянии различных параметрических возмущений. Входным управляющим воздействием при моделировании данной системы является сигнал различной частоты, амплитуды и формы.

Напряжение питания лежит в пределах от 47 до 68 В, при этом за базовое принято напряжение питания – 57 В, в свою очередь граничные значения 47 В и 68 В определяют рабочий диапазон системы и также допустимы при ее работе [12].

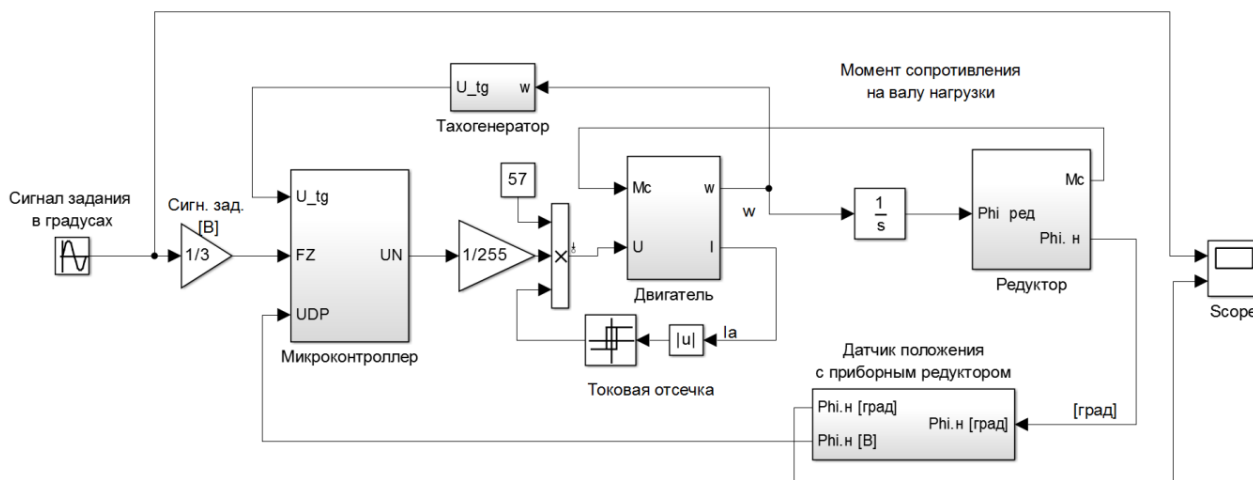


Рис. 3. Математическая модель исполнительных звеньев электропривода

В процессе работы электропривод должен выполнять перемещение выходного звена с заданной точностью и скоростью, не зависимо от различных параметрических неопределенностей.

Одним из источников таких неопределенностей является исполнительный орган электропривода, в данном случае представляющий планетарный редуктор. В данном исследовании рассматривалось влияние на

динамические характеристики неопределенностей в виде вариации коэффициента шарнирного момента, температурных воздействий, амплитуды входного сигнала, момента инерции нагрузки, изменения зазора в редукторе [13 - 16].

На рис. 4 показана математическая модель редуктора на базе прямозубых цилиндрических колес.

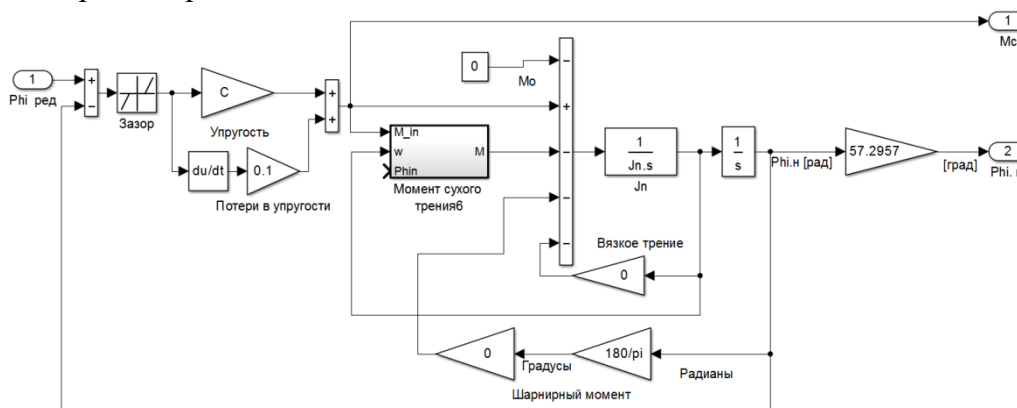


Рис. 4. Математическая модель редуктора на базе прямозубых цилиндрических зубчатых колес

В ходе моделирования были сняты осциллограммы отработки синусоидальных воздействий на частотах 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 Гц.

На основе полученных осциллограмм построены амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные (ФЧХ) характеристики, служащие для определения реакции

системы на внешние параметрические возмущения и определения запасов устойчивости электропривода [17, 18].

В качестве примера на рис. 5 и 6 приведены АЧХ и ФЧХ электропривода

при изменении момента инерции и вариации зазора механической передачи соответственно.

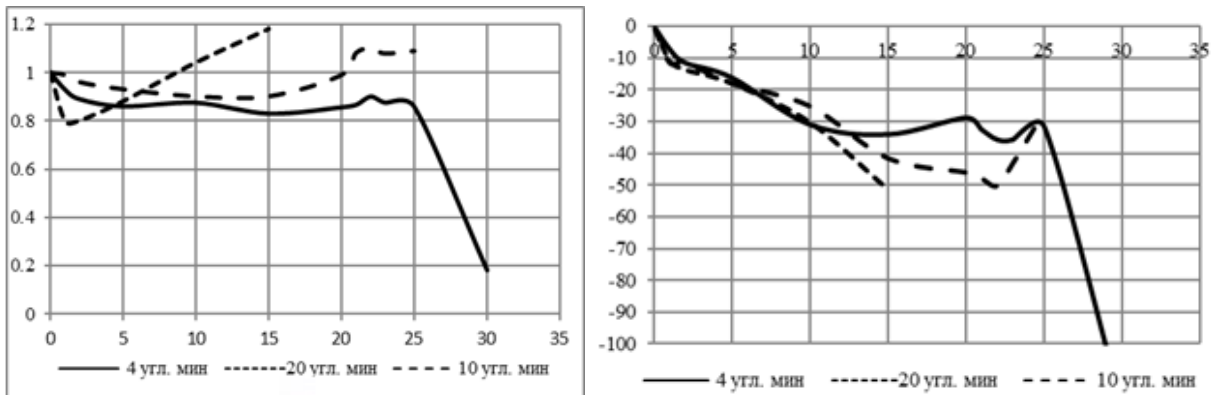


Рис. 5. Характеристики электропривода с влиянием зазора механической передачи:
а – АЧХ; б – ФЧХ

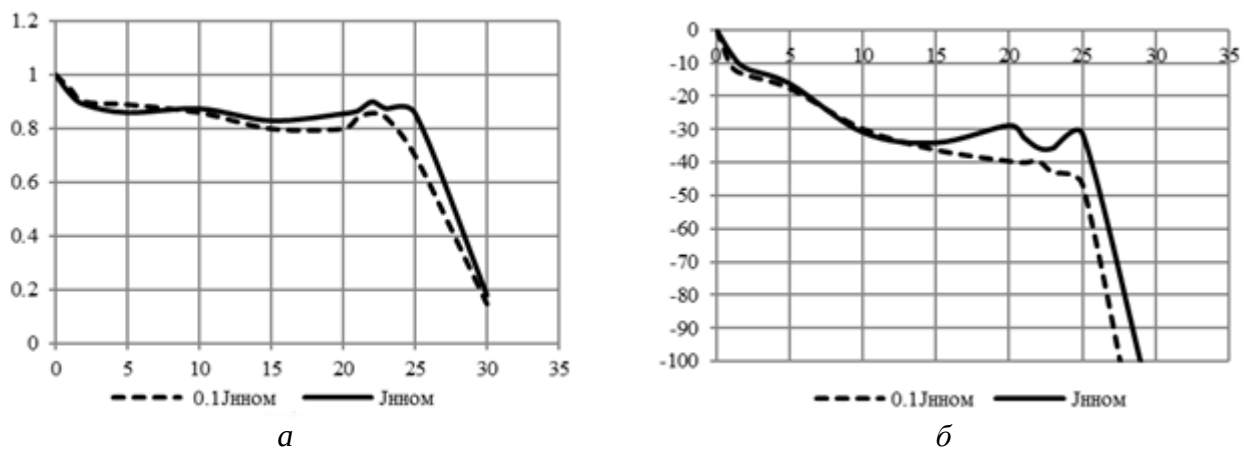


Рис. 6. Характеристики электропривода с влиянием уменьшенного момента нагрузки:
а – АЧХ; б – ФЧХ

Сплошной линией на рисунках показана система с расчетными значениями исполнительного механизма, а пунктирной линией – система с измененными параметрами.

Для системы с изменением зазора механической передачи АЧХ с зазором механической передачи 20 угл. мин. не работоспособна на участке частот после 15 Гц, а система с зазором 10 угл. мин. не работоспособна на участке после 25 Гц, так как обе системы не отрабатывают заданное воздействие. ФЧХ системы с зазором механической передачи 20 угл. мин и 10 угл. мин не отрабатывают входное воздействие на участках от 15 и от 25 Гц до конца измеряемого участка соответственно.

Для системы с изменением момента инерции АЧХ на всем диапазоне измерения имеют небольшой разброс ($\pm 0,05$, что соответствует около $\pm 2,4$ дБ). Полоса пропускания по уровню – 3 дБ составляет 24 Гц для характеристики $0,1J_{\text{ном}}$ и 26 Гц для характеристики $J_{\text{ном}}$. ФЧХ в диапазоне частот от 0 до 14 Гц практически совпадают. Фазовое запаздывание для $0,1J_{\text{ном}}$ на частоте 25 Гц составляет – 46 и – 31 градусов соответственно для характеристики $J_{\text{ном}}$ на частоте 25 Гц. Фазовое запаздывание на частоте пропускания составило для характеристики $J_{\text{ном}}$ – 45 градусов, для характеристики $0,1J_{\text{ном}}$ – 55 градусов.

ВЫВОДЫ

Исполнительный элемент электропривода имеет крайне важное значение, так как в большинстве случаев именно он определяет массогабаритные показатели всего электропривода. В данной работе проводилось исследование влияния свойств исполнительного механизма на динамические характеристики электропривода, с целью определения воздействия тех или иных параметров исполнительного элемента на работу электропривода в целом, и для

компенсации данных неопределенностей при разработке алгоритмов управления программными или аппаратными средствами.

Рассматривалось влияние следующих параметров: жесткость, зазор и трение механической передачи, изменение момента инерции исполнительного звена и влияние момента зубцовых пульсаций.

Сравнение результатов моделирования систем с расчетными и изменяемыми параметрами показало, что для синтеза САР аналитическими методами можно использовать аппроксимацию динамики объекта управления линейными динамическими звеньями, без трения, пульсаций, момента двигателя и варьированием (уменьшением) коэффициента упругости механической передачи. При этом при больших сигналах управления следует использовать номинальные значения жесткости механической передачи и момента инерции нагрузки, а также компенсировать влияние зазора механической передачи путем увеличения качества изготовления частей редуктора и введением дополнительных корректирующих звеньев в систему управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Борцов, Ю. А.** Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю.А. Борцов, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1984. – 216 с. – Текст : непосредственный.
2. **Лакота, Н. А.** Основы проектирования следящих систем / Н.А. Лакота; под общ. ред. Е.П. Попова. – Москва : Машиностроение, 1978. – 391 с. – Текст : непосредственный.
3. **Изерман, Р.** Цифровые системы управления / Р. Изерман; [перевод с

английского]. – Москва : Мир, 1984. – 541 с. – Текст : непосредственный.

4. Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации / Н.Т. Кузовков [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1978. – 222 с. – Текст : непосредственный.

5. Леондес, К. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / К. Леондес. – Москва: Мир, 1980. – 407 с. – Текст : непосредственный.

6. Чемоданова, Б.К. Следящие приводы / Б.К. Чемоданова – Текст: непосредственный. Москва: Энергия, 1976. – 386 с. – Текст : непосредственный.

7. Башарин, А.В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1982. – 392 с. – Текст : непосредственный.

8. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления. П. Эйкхофф; [перевод с английского]; под ред. В.А. Лотоцкого и А.С. Манделя. Москва: Мир, 1975. – 685 с. – Текст : непосредственный.

9. Зайцев, Г.Ф. Синтез следящих систем высокой точности / Г.Ф. Зайцев. Киев: Техника, 1971. – 191 с. – Текст : непосредственный.

10. Справочник конструктора точного приборостроения / Г.А. Верховин, Е.Н. Головешкин, В.А. Голубков [и др.]; под общ. ред. К.Н. Явленного, Б.П.Тимофеева, Е.Е. Чаадаевой. – Ленинград : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. – С. 5–35. – Текст : непосредственный.

11. Тимофеев, Б.П. Передаточные механизмы приводов / Б.П. Тимофеев,

М. Ю. Сачков. – Университет ИТМО, 2015. – 103 с. – Текст : непосредственный.

12. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB6.0: учебное пособие / С.Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2001. – 320 с. – Текст : непосредственный.

13. Патент РФ № 2399017 МПК⁷ F 42В 15/01 «Следящий рулевой электропривод» (ЗАО «НИИ МЕХАНОТРОНИКИ-АЛЬФА-НЦ», г. Воронеж) / А.В. Булатов, А.С. Гончаров, В.В. Романов, С.М. Миронов, А.И. Попов // Бюл. 25. 10.09.2010 . – Текст : непосредственный.

14. Хлыпало, Е.И. Расчет и проектирование нелинейных корректирующих устройств в автоматических системах / Е.И. Хлыпало. – Ленинград: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982. – 272 с. – Текст : непосредственный.

15. Теория систем с переменной структурой / под ред. С.В. Емельянова. – Москва: Наука, 1970. – 592 с. – Текст : непосредственный.

16. Квакернаак, Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван – Москва: Мир, 1977. – 650 с. – Текст : непосредственный.

17. Проектирование следящих систем / Б.И. Петров, В.Г. Терсков, С.А. Сушков [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1969. – 498 с. – Текст : непосредственный.

18. Электропривод систем управления летательных аппаратов / под. ред. Б.И. Петрова. – Москва: Машиностроение, 1973. – 360 с. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

Крылов Юрий Михайлович

аспирант кафедры электропривода,
автоматики и управления в технических
системах,

Воронежский государственный
университет.

г. Воронеж, пр. Труда 72.

E-mail: cryloff.yury2018@yandex.ru

Агапов Александр Александрович

аспирант кафедры электропривода,
автоматики и управления в технических
системах,

Воронежский государственный
университет.

г. Воронеж, пр. Труда, 72.

Литвиненко Александр Михайлович

доктор технических наук, профессор
кафедры электропривода, автоматики и
управления в технических системах
Воронежский государственный
университет.

г. Воронеж, пр. Труда, 72.

Антонов Николай Сергеевич

магистр кафедры электропривода,
автоматики и управления в технических
системах,

Воронежский государственный
университет.

г. Воронеж, пр. Труда, 72.

Information about the authors:

Krylov Yuri Mikhailovich

Postgraduate student of Voronezh State
Technical University

Voronezh State Technical University

Voronezh, 72 Truda Ave.

E-mail: cryloff.yury2018@yandex.ru

Agapov Alexander Alexandrovich

Postgraduate student of Voronezh State
Technical University.

Voronezh State Technical University

Voronezh, 72 Truda Ave.

Litvinenko Alexander Mikhailovich

Doctor of Technical Sciences, Professor of
the Department of Electric Drive, Automation
and Control in Technical Systems of the
Voronezh State Technical University.

Voronezh State Technical University

Voronezh, 72 Truda Ave.

Antonov Nikolay Sergeevich

Master of Voronezh State Technical
University

Voronezh State Technical University,
Voronezh, 72 Truda Ave.

Ю.И. КУДИНОВ, Р.В. БАТИЩЕВ, Е.С. ДУВАНОВ, А.А. ПОНОМАРЕВ

ПРОГРАММНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАСТРОЕК ПИ РЕГУЛЯТОРА МЕТОДОМ РАСШИРЕННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В работе рассматриваются теоретические основы метода расширенных частотных характеристик (РЧХ) и его применение для расчета оптимальных настроек пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора. В этом методе на плоскости корней выделяют область, содержащую корни и степень устойчивости, при которых обеспечиваются степень затухания не ниже заданной, а время переходного процесса не выше заданного. С использованием метода РЧХ были проведены в Matlab вычислительные эксперименты в системах автоматического управления, содержащих ПИ регуляторы и объекты первого и второго порядка и позволивших подтвердить довольно высокое качество переходного процесса.

Ключевые слова: объект управления, регулятор, переходный процесс, закон регулирования.

YU.I. KUDINOV, R.V. BATISHCHEV, E.S. DUVANOV, A.A. PONOMAREV

EXTENDED FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS IN DETERMINING PI CONTROLLER CHARACTERISTICS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The paper discusses the theoretical foundations of the extended frequency response analysis and its application for calculating the optimal settings of the proportional integral (PI) controller. In this method, an area is allocated on the root plane containing the stability roots and degree, the latter providing for a degree of attenuation not lower than the preset one and for the transition time not higher than the preset one. The method was used to perform Matlab computational experiments in automatic control systems containing PI controllers and objects of the first and second order thus providing for a fairly high quality of the transient process.

Keywords: control object, controller, transient process, law of regulation.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение для целей автоматизации технологических процессов получили пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы в составе одноконтурных систем управления [1-5]. Для оптимальной настройки ПИ регуляторов в СССР и РФ довольно часто использовались точные методы, к которым относятся

графоаналитический метод Ротача В.Я. [6-8] и метод расширенных частотных характеристик (РЧХ), предложенный Дудниковым Е.Г. в работах [9-13] и рассмотренный в настоящей статье. Метод опирается на понятие устойчивости по Найквисту, согласно которому замкнутая система управления (рис.1) находится на границе устойчивости, если амплитудно-

фазовая характеристика (АФХ) разомкнутой системы проходит через точку $(-1, j0)$, а корни характеристического уравнения замкнутой системы должны располагаться слева от мнимой оси. Для обеспечения запаса устойчивости эти корни должны определяться отношением действительной α и мнимой ω частями ближайшей к мнимой оси пары корней, называемым степенью колебательности $m = \alpha/\omega$ [14,15].

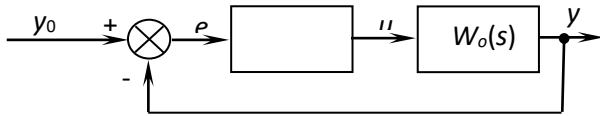


Рис. 1. Структурная схема САУ

Степень колебательности процесса m характеризует затухание (рис. 2)

$$m = \min |\alpha_i / \beta_i|, i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Существует связь между степенью колебательности m и степенью затухания

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1} = 1 - \exp(-2\pi m), \quad (2)$$

где A_1 , A_3 – первая и третья амплитуды колебания (см. рис. 2).

МЕТОДЫ

В дальнейшем будем использовать степени колебательности $m = 0.221, 0.366, 0.5$, которым соответствуют значения степеней затухания $\psi = 0.75, 0.9, 0.96$. Расширенные частотные характеристики получают заменой s на $-m\omega + j\omega$. Корни

$s_i = -m\omega + j\omega$ порождают колебательные составляющие переходного процесса

$$x_i = A_i e^{-m\omega t} \cos \omega t,$$

где A_i , ω – амплитуда и частота колебаний.

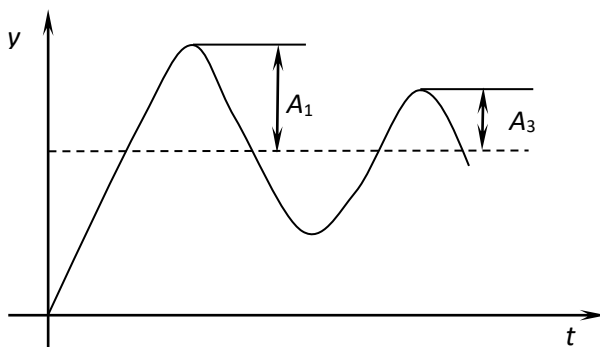


Рис. 2. Параметры колебательного процесса

На корни s_i накладываются ограничения, которые геометрически можно интерпретировать следующим образом (рис. 3). На плоскости корней выделяют область AOB , содержащую корни, при которых степень затухания не ниже заданной. Степень устойчивости η образует область $AA'B'B$, корни в которой обеспечивают время переходного процесса не выше заданного.

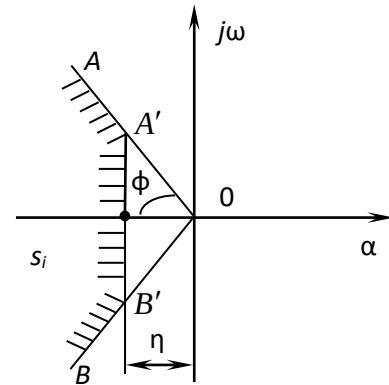


Рис. 3. Область оптимальных корней

Критерий Найквиста для РЧХ можно сформулировать следующим образом: график расширенной АФХ (РАФХ) разомкнутой системы должен проходить через точку $(1, j0)$. Обозначая $W_{pc}(m, j\omega)$, получим выражение для РЧХ разомкнутой системы на границе устойчивости с заданным запасом в виде [10]

$$W_{pc}(m, j\omega) = W_{pi}(m, j\omega) \cdot W_o(m, j\omega) = -1$$

или

$$W_{pi}(m, j\omega) = \frac{-1}{W_o(m, j\omega)} = \text{Re}_o^{-1}(m, \omega) + j \text{Im}_o^{-1}(m, \omega) \quad (3)$$

Рассмотрим случай ПИ регулятора. Его РЧХ получим из обычной передаточной функции

$$W_{pi}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

посредством подстановки $s = -m\omega + j\omega$

$$W_{pi}(m, j\omega) = K_p + \frac{K_i}{j\omega - m\omega}, \quad (4)$$

где K_p , K_i – пропорциональный, интегральный коэффициенты.

Удаляя мнимое число из знаменателя интегральной составляющей, найдем РЧХ регулятора

$$W_{pi}(m, j\omega) = K_p - \frac{mK_i}{(m^2 + 1)\omega} - \frac{jK_i}{(m^2 + 1)\omega} \cdot \quad (5)$$

Тогда учитывая формулы (1) – (5), получим

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}_o^{-1}(m, \omega) &= K_p - \frac{mK_i}{(m^2 + 1)\omega}, \\ \operatorname{Im}_o^{-1}(m, \omega) &= \frac{K_i}{(m^2 + 1)\omega} \end{aligned} \quad (6)$$

Разрешая систему уравнений (6) относительно параметров настройки регулятора, находим их зависимости от частоты

$$K_p = m\operatorname{Im}_o^{-1}(m, \omega) - \operatorname{Re}_o^{-1}(m, \omega) \quad (7)$$

$$K_i = \operatorname{Im}_o^{-1}(m, \omega) (m^2 + 1)\omega. \quad (8)$$

Необходимые для расчета настроек ПИ регулятора расширенные мнимую $\operatorname{Im}_o^{-1}(m, \omega)$ и вещественную $\operatorname{Re}_o^{-1}(m, \omega)$ составляющие объекта управления первого и второго порядка получим из соответствующих передаточных функций

$$W_o(s) = \frac{Ke^{-s\tau}}{Ts + 1}, \quad (9)$$

$$W_o(s) = \frac{Ke^{-s\tau}}{as^2 + bs + c} \quad (10)$$

посредством их инверсии и подстановки $s = -m\omega + j\omega$.

Далее для передаточной функции объекта первого порядка (9) при подстановке $s = -m\omega + j\omega$ получим инверсную РАФХ объекта

$$\begin{aligned} W_o^{-1}(m, j\omega) &= \frac{((1 - m\omega T)\cos\omega\tau - \omega T \sin\omega\tau)}{Ke^{m\omega\tau}} + \\ &+ \frac{j((1 - m\omega T)\sin\omega\tau + \omega T \cos(\omega\tau))}{Ke^{m\omega\tau}} \end{aligned}$$

а затем расширенные вещественную

$$\operatorname{Re}_o^{-1}(m, \omega) = \frac{(1 - m\omega T)\cos\omega\tau - \omega T \sin\omega\tau}{Ke^{m\omega\tau}} \quad (11)$$

и мнимую

$$\operatorname{Im}_o^{-1}(m, \omega) = \frac{(1 - m\omega T)\sin\omega\tau - \omega T \cos\omega\tau}{Ke^{m\omega\tau}} \quad (12)$$

инверсные характеристики.

Аналогичным образом для передаточной функции второго порядка (10) найдем расширенные вещественную

$$\operatorname{Re}_o^{-1}(m, \omega) = (am^2\omega^2 \cos\omega\tau - a\omega^2 \cos\omega\tau - bm\omega \cos\omega\tau + c \cos\omega\tau + 2am\omega^2 \sin\omega\tau - b\omega \sin\omega\tau) / Ke^{m\omega\tau} \quad (13)$$

и мнимую

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}_o^{-1}(m, \omega) &= (b \cos\omega\tau - 2am\omega^2 \cos\omega\tau + am^2\omega^2 \sin\omega\tau - a\omega^2 \sin\omega\tau - bm\omega \sin\omega\tau + c \sin\omega\tau) / Ke^{m\omega\tau} \quad (14) \end{aligned}$$

характеристики инверсной РАФХ.

В качестве примера рассмотрим расчёт настроек ПИ регуляторов в САУ с объектами управления, имеющими передаточные функции апериодического звена первого

$$W_o(s) = \frac{1.5e^{-1s}}{6s + 1} \quad (15)$$

где $K = 1.5$, $\tau = 1$, $T = 6$;

и второго порядков с запаздываниями

$$W_o(s) = \frac{2e^{0.2s}}{s^2 + 2s + 2}, \quad (16)$$

где $K = 2$, $\tau = 0.2$, $a = 1$, $b = 1$, $c = 2$.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПИ РЕГУЛЯТОРА В САУ С ОБЪЕКТОМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

В пр.1 осуществляется расчёт и вывод параметров настройки K_p и K в САУ с ПИ регулятором и объектом с передаточной функцией (15). В качестве входных данных задаются: степень колебательности

$m = 0.36$, коэффициент усиления $K = 1.5$, время запаздывания $\tau = 1$, постоянная времени $T = 6$ и пределы изменения частот (минимальный $\omega_{min} = 0.6$ и максимальный $\omega_{max} = 1.2$).

Следует отметить, что максимальный предел частоты определяется опытным путем в ходе её увеличения до величины, при которой зависимость K_i от K_p станет экстремальной, подобной той, что приведена на рис. 4.

clear

(Пр.1)

$m = 0.36$; $K = 1.5$; $\tau = 1$; $T = 6$;

$\omega_{min} = 0.6$; $\omega_{max} = 1.2$; $\omega = \omega_{min}$;

$d\omega = 0.02$;

while $\omega < \omega_{max}$

```

Reo1 = ((1-m*w*T)*cos(w*tau)-
T*w*sin(w*tau))/(K*exp(m*w*tau));
Imo1=((1-m*w*T)*sin(w*tau)+T*w*
cos(w*tau))/(K*exp(m*w*tau));
Kp=m*Imo1-Reo1; Ki=w*(1+m*m)*Imo1;
w=w+dw
IT=['w=', num2str(w)];
disp(IT)
disp('Kp')
disp(Kp)
disp('Ki')
disp(Ki)
hold on;
grid on;
xlabel('Kp');
ylabel('Ki');
plot(Kp, Ki, '*');
drawnow;
end

```

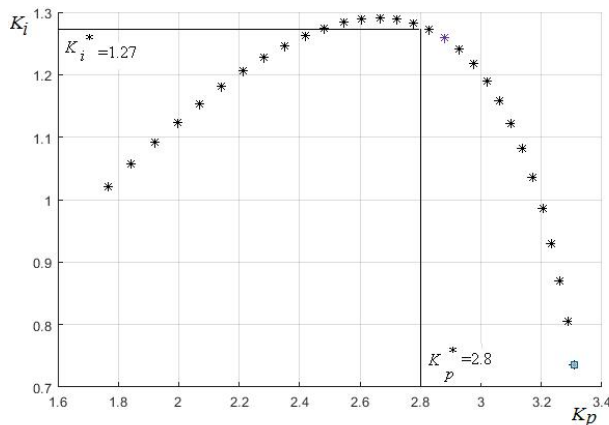


Рис. 4. График настроек ПИ регулятора с объектом (15)

Результатом работы пр. 1 является график зависимости K_i от K_p , изображенный на рис. 4. На этом графике выбирается крайняя правая точка $K_i^* = 1.27$, находящаяся несколько правее точки с максимальным значением $K_i^{\max} = 1.29$, при этом $K_p^* = 2.8$.

Далее проанализируем с помощью пр. 2 качество переходного процесса (кривой разгона) замкнутой системы управления с ПИ регулятором, имеющим оптимальные настройки $K_p^* = 2.8$ и $K_i^* = 1.27$.

```

clear
(Пр.2)
Kp = 2.8; Ki = 1.27; K = 1.5;
tau = 1; T = 6;
s = tf('s');
Wo = exp(-tau*s)*K/(T*s+1);
Wpi = (Kp*s+Ki)/s;
W1 = feedback(Wo*Wpi,1)
Step(W1);

```

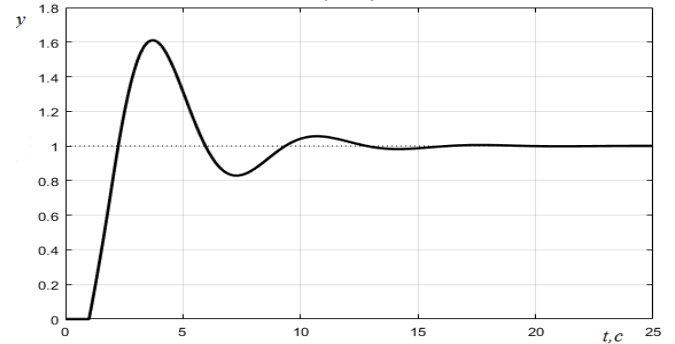


Рис. 5. Переходная функция САУ с объектом (15)

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПИ РЕГУЛЯТОРА В САУ С ОБЪЕКТОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Теперь для объекта с передаточной функцией (16) по программе пр.3 рассчитаем и построим для ПИ регулятора зависимость настроек K_i от K_p . Здесь задаются степень колебательности $m = 0.5$, коэффициент усиления $K = 2$, время запаздывания $\tau = 0.2$, параметры $a = 1$, $b = 2$, $c = 2$ в (16) и пределы изменения частоты (минимальный $\omega_{\min} = 0.84$ и максимальный $\omega_{\max} = 1.2$).

```

clear
(Пр.3)
m = 0.5; K = 2; tau = 0.2; a = 1; b = 2; c = 2
wmin = 0.84; wmax = 1.2; w = wmin;
dw = 0.02;
while w < wmax
Reo1 = a*m*m*w*w*cos(w*tau)-a*w*w*cos(w*tau)-
b*m*w*cos(w*tau)+c*cos(w*tau);
Reo1 = (Reo1+2*a*m*w*w*sin(w*tau)-
b*w*sin(w*tau))/(K*exp(m*w*tau));
Imo1 = b*w*cos(w*tau)-2*a*m*w*w*cos(w*tau)+a*m*m*w*w*sin(w*tau);
Imo1 = (Imo1-a*w*w*sin(w*tau)-b*m*w*sin(w

```

```

*tau)+c*sin(w*tau))/(K*exp(m*w*tau));
Kp = m*Imo1-Reo1; Ki = w*(1+m*m)*Imo1;
w = w+dw; IT = ['Частота w=', num2str(w)];
disp(IT)
disp('Kp')
disp(Kp)
disp('Ki')
disp(Ki)
hold on;grid on;xlabel('Kp');
ylabel('Ki');plot(Kp, Ki, '*');
drawnow;end

```

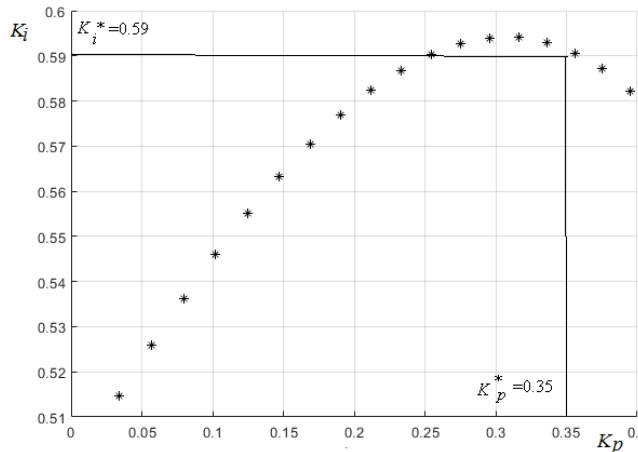


Рис. 6. График настройки ПИ регулятора с объектом (16)

На рис. 6 можно определить оптимальные настройки ПИ регулятора, равные $K_p^* = 0.35$ и $K_i^* = 0.59$. Для САУ с найденными оптимальными параметрами настройками

```

clear
K=2;
tau=0.2;
a=1; b=2; c=2;
Kp=0.35; Ki=0.59;
s=tf('s');
Wo=exp(-s*tau)*K/((a*s^2+b*s+c));
Wpi=(Kp*s+Ki)/s;
W1=feedback(Wo*Wpi,1);
step(W1);

```

РЕЗУЛЬТАТЫ

ПИ регулятором и объектом с передаточной функцией (16) с помощью пр. 4 была рассчитана и построена на рис. 7 кривая разгона

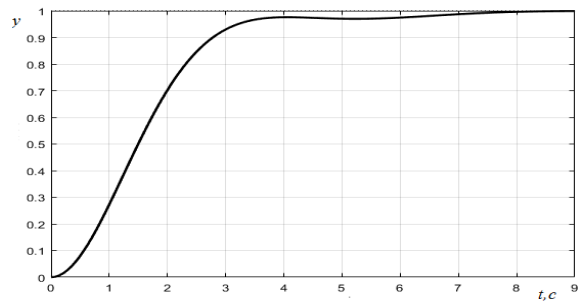


Рис. 7. Переходная функция САУ с объектом (16)

Из рис. 7 видно, что полученная САУ обладает высоким качеством управления: достаточно высокое быстродействие при отсутствии перерегулирования.

ВЫВОДЫ

В работе средствами MATLAB выполнена программная реализация метода расширенных частотных характеристик определения оптимальных параметров ПИ регулятора в САУ с объектами первого и второго порядка, имеющими запаздывание. Переходные процессы в этих САУ обладают удовлетворительными показателями качества. Следует отметить, что параметры ПИ регулятора с объектом первого порядка можно рассчитать и по пр.3, приняв $K = 1,5$, $a = 0$, $b = 6$, $c = 1$; $\tau = 1$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Astrom, K.J.** Advanced PID control / K.J. Astrom, T. Hagglund. – ISA (The instrumentation, Systems and Automation Society), 2006. – 460 p. – Text : immediate.
2. **Денисенко, В.** ПИД-регуляторы : принципы построения и модификации. Ч. 1 / В. Денисенко. – Текст : непосредственный. // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66–743.
3. **Денисенко, В.** ПИД-регуляторы : принципы построения и модификации. Ч. 2. / В. Денисенко. – Текст : непосредственный // Современные

технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 78-88.

4. **Денисенко, В.** ПИД-регуляторы : вопросы реализации. Ч. 1 / В. Денисенко. – Текст : непосредственный // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 86-97.

5. **Денисенко, В.** ПИД-регуляторы : вопросы реализации. Ч. 2 / В. Денисенко. – Текст : непосредственный // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 1. – С. 86-97.

6. **Ротач, В.Я.** Расчет настройки промышленных систем регулирования / В.Я. Ротач. – Москва : Госэнергоиздат, 1961. – 214 с. – Текст : непосредственный.

7. **Ротач, В.Я.** Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования / В.Я. Ротач. – Москва : Энергия, 1973. – 344 с. – Текст : непосредственный.

8. **Ротач, В.Я.** Теория автоматического управления : учебник для вузов / В.Я. Ротач. – 3-е изд. – Москва : Издательство МЭИ, 2005. – 400 с. – Текст : непосредственный.

9. **Дудников, Е. Г.** Определение настройки регулятора по динамическим характеристикам регулируемого объекта и регулятора, полученным из опыта / Е.Г. Дудников. – Текст : непосредственный // АиТ. – 1953. – Т. XIV, № 3. – С. 294–307.

10. **Дудников, Е. Г.** Основы автоматического регулирования тепловых

процессов / Е.Г. Дудников. – Москва : Госэнергоиздат, 1956. – 264 с. – Текст : непосредственный.

11. **Стефани, Е.П.** Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. / Е.П. Стефани. – Москва-Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. – 327 с. – Текст : непосредственный.

12. Автоматическое управление в химической промышленности / Е.Г. Дудников, А.В. Казаков, Ю.Н. Софиева [и др.] – Москва : Химия, 1987. – 368 с. – Текст : непосредственный.

13. **Марголис, Б.И.** Синтез настроек регуляторов в системах автоматического управления методом расширенных частотных характеристик / Б.И. Марголис, И.С. Мешков // Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова. – 2014. – №3. – С. 31–33. – Текст : непосредственный.

14. **Кудинов, Ю.И.** Теория автоматического управления (с использованием (MATLAB – SIMULINK) : учебное пособие / Ю.И. Кудинов, Ф.Ф. Пашенко. – Санкт-Петербург : Лань, 2018. – 312 с. – Текст : непосредственный.

15. **Кудинов, Ю.И.** Теория автоматического управления (с использованием (MATLAB – SIMULINK) : Практикум. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 280 с. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

Кудинов Юрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информатики,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

kudinov.yi@mail.ru

Батищев Роман Вячеславович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информатики,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

gav_1989@bk.ru

Дуванов Евгений Сергеевич

аспирант кафедры информатики,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

evgenyduvanov@yandex.ru

Пономарев Александр Александрович

магистрант кафедры информатики,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

ut16fai@yandex.ru

Information about the authors:

Kudinov Yuri Ivanovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Computer Science
Lipetsk State Technical University Lipetsk.

398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

kudinov.yi@mail.ru

Batishchev Roman Vyatcheslavovich

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Associate Professor of the
Department of Computer Science Lipetsk,
Lipetsk State Technical University.

398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

gav_1989@bk.ru

Duvanov Evgeny .Sefgeevich

Postgraduate student of the Department of
Computer Science Lipetsk State Technical
University Lipetsk.

398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

evgenyduvanov@yandex.ru

Ponomarev Aleksandr .Alexsandrovich

Master's student of the Department of
Computer Science Lipetsk State Technical
University Lipetsk.

398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

ut16fai@yandex.ru

DOI 10.53015/23049235_2021_3_38

УДК 004.622:656.08

А.С. СЫСОЕВ, В.Э. КЛЯВИН, А.В. ДВУРЕЧЕНСКАЯ, А.Э. МАМЕДОВ

**КЛАСТЕРИЗАЦИЯ НАБОРОВ ДАННЫХ О ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ
ПРОИСШЕСТВИЯХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАРКЕТИНГОВЫХ КАМПАНИЙ ПО
ПОВЫШЕНИЮ УРОВНЯ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: Исследование посвящено описанию методов статистической обработки информации на примере массива данных о дорожно-транспортных происшествиях без пострадавших в Липецкой области. В результате анализа было выделено 7 однородных кластеров. Полученные данные позволили сформировать типичные «портреты» водителя, инициировавшего ДТП. Результаты анализа могут быть использованы для повышения эффективности социальных и маркетинговых кампаний по безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: кластеризация, дорожно-транспортные происшествия, безопасность дорожного движения, маркетинговая кампания.

A.S. SYSOEV, V.E. KLYAVIN, A.V. DVURECHENSKAYA, A.E. MAMEDOV

**CLUSTERING ROAD ACCIDENT DATA SETS TO OUTLINE MARKETING
CAMPAIGNS ON INCREASING ROAD SAFETY LEVEL**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The study describes statistical data processing methods on the basis of a data set on road accidents without victims in the Lipetsk region. As a result of the analysis 7 homogeneous clusters were distinguished. The data obtained made it possible to form typical driver portraits for accident initiators. The analysis results can be used to improve the effectiveness of social and marketing road safety campaigns.

Keywords: clustering, road accidents, road safety, marketing campaign.

ВВЕДЕНИЕ

Генеральная Ассамблея Организации Объединенных Наций поставила амбициозную цель - вдвое сократить к 2030 году число смертей и травм в результате дорожно-транспортных происшествий в мире (A/RES/74/299). Это решение принято в связи с растущим

числом смертей в результате дорожно-транспортных происшествий (примерно 1,3 миллиона человеческих жизней ежегодно). Еще от 20 до 50 миллионов человек получают травмы, причем многие в результате травм становятся инвалидами [1]. Одной из причин этого является недостаточно высокий уровень подготовки

водителей в автошколах, а также плохо организованные маркетинговые кампании по пропаганде соблюдения правил дорожного движения. В 2021 году в России вступили в силу новые правила сдачи экзамена на право управления транспортными средствами в ГИБДД, они заключаются в исключении практических испытаний на площадке, также был изменен перечень грубых ошибок, из-за которых кандидатов в водители будут отправлять на пересдачу экзаменов. Для оценки успешности автошкол будет использоваться процент выпускников, сдавших теоретический и практический экзамен с первой попытки. Будет учитываться доля теоретических и практических экзаменов, сданных выпускниками школ, а также количество аварий и жертв по вине начинающих водителей. Ежегодно на федеральном и региональном уровнях в России проводятся различные проекты (акции, кампании). Повышение культуры поведения и формирование правосознания участников дорожного движения является приоритетным направлением в сфере информационно-пропагандистского обеспечения деятельности ГИБДД. Проведение мероприятий невозможно без применения телекоммуникаций, информационных технологий, в том числе Интернет-ресурсов. Возможности их использования разнообразны, начиная от специализированных веб-ресурсов, видеохостингов, использования популярных хэштегов до качественной инфографики, мобильных приложений, приложений для осуществления массовых тематических рассылок, социальной рекламы и т.д. Планирование маркетинговых кампаний невозможно без учета региональной составляющей, которая может быть выявлена путем анализа ретроспективных наборов данных о дорожно-транспортных происшествиях.

Целью данного исследования является применение методов кластеризации к наборам данных, описанных ниже, для анализа ДТП в Липецкой области и формирования типичных портретов нарушителей ПДД для планирования эффективных маркетинговых кампаний.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПЛАНИРОВАНИЮ ЭФФЕКТИВНОЙ МАРКЕТИНГОВОЙ КАМПАНИИ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ДОРОЖНО- ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

Кампании по безопасности дорожного движения играют важную роль в повышении безопасности поведения водителей на дорогах. Одно из главных направлений основано на использовании устрашающих фактов о возможных последствиях аварий [2], в то время как другое – использование кампаний безопасности, не основанных на страхе [3]. Эффективная кампания должна учитывать личные, социальные и культурные особенности, чтобы обеспечить более высокий уровень ее качества [4]. Проведение акций должно учитывать особые аспекты при подготовке водителей в зависимости от их социального положения, пола, возраста или возможных комбинаций этих факторов [5].

В исследовании [6] подчеркивается, что девиантное поведение водителей считается основной причиной дорожно-транспортных происшествий в Пакистане. Авторы используют кластерный анализ для разделения водительского населения на четыре относительно гомогенные группы водителей. Результаты показывают взаимодействие между отношением, поведением и социально-демографическими характеристиками водителей. Полученные результаты используются для того, чтобы рекомендовать целевые информационные решения по безопасности дорожного

движения с акцентом на различные характеристики каждого из выявленных сегментов. Сценарии кластеризации также используются для определения регионов, где показатели дорожно-транспортных происшествий схожи [7, 8]. В исследовании [9] предлагается сравнение подходов к кластеризации, также используется полученная информация для определения факторов, влияющих на дорожно-транспортные происшествия. Обсуждаемые алгоритмы также могут быть применены для классификации сегментов дорог, вызывающих дорожно-транспортные происшествия [10].

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Алгоритм k -средних [11] предполагает разделение наборов данных на однородные подмножества и, являясь методом обучения без учителя, обычно используется при поиске данных и распознавании образов. Основой этого алгоритма является минимизация показателя эффективности кластера, квадратичная ошибка и критерий ошибки. Идея подхода заключается в поиске оптимального разделения экземпляров по k различным кластерам, чтобы удовлетворить выполнимость определенного критерия. Обычно этим критерием является евклидово расстояние как показатель сходства, а цель кластеризации состоит в минимизации суммы квадратов внутрикластерных расстояний. Цель состоит в том, чтобы минимизировать

$$d = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \|(x_i - u_k)\|^2,$$

где k соответствует K центрам кластеров, u_k представляет центр k -го кластера, $x_i - i$ -я точка в наборе данных.

Идея алгоритма состоит в следующей последовательности шагов:

1. Определение числа k кластеров. Также необходимо ограничить количество возможных итераций.
2. Инициализация начальных приближений центроидов кластеров.
3. Отнесение наблюдаемых данных к ближайшему кластеру с пересчетом расстояния между ними.
4. Изменение центров кластеров в случае необоснованной классификации.

Описанная процедура носит итерационный характер и прекращается при достижении заданного критерия качества.

Существуют некоторые метрики для поиска оптимального числа k , такие как метод elbow и метод silhouette. Наиболее известный метод «локтя» [12] предполагает вычисление суммы квадратов ошибок в пределах кластера (WSS) для различных значений k и выбор k , при котором WSS начинает уменьшаться. На графике WSS-versus- k это представляется в виде ломаной, похожей на локоть, что и определяет название метода. Метод «силуэта» [13] предполагает расчет коэффициента с использованием среднего внутри кластерного расстояния (a) и среднего ближайшего кластерного расстояния (b) для каждой выборки. Коэффициент для наблюдения вычисляется как

$$\frac{b - a}{\max(a, b)}.$$

Наилучшее значение равно 1, а наихудшее -1. Значения, близкие к 0, указывают на перекрывающиеся кластеры. Отрицательные значения обычно указывают на то, что образец был отнесен к неправильному кластеру, так как другой кластер более схож.

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описанные выше подходы были применены к массиву данных о ДТП без пострадавших в Липецкой области в период с 2014 по 2019 год. Он содержит 24 244 случая со следующей информацией о каждом ДТП: его тип, пол водителя, его социальные характеристики, прямые и сопутствующие нарушения правил

дорожного движения, возраст водителя и его водительский стаж. На рис. 1 представлены наиболее распространенные случаи в статистике ДТП: столкновение двух или более транспортных средств, наезд на стоящее транспортное средство, наезд на препятствие и другие 10 редких типов (например, опрокидывание транспортного средства и т.д.).

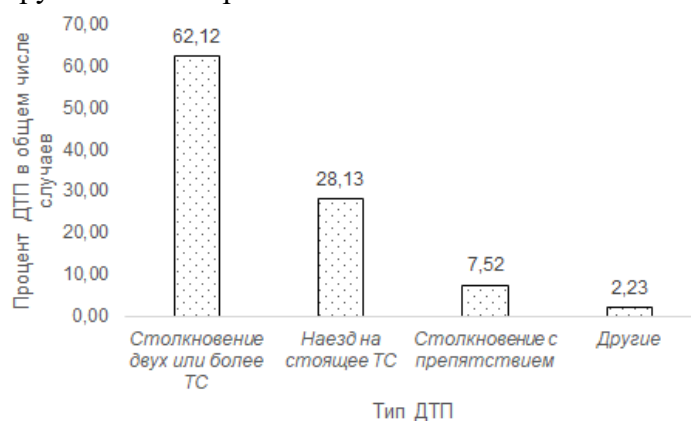


Рис. 1. Распределение типов дорожно-транспортных происшествий в исследуемом наборе данных

На практике наиболее эффективными являются социальные и маркетинговые исследования, основанные на статистических данных [14]. Возможности социально-маркетинговых кампаний на территории России продемонстрированы в ходе международного проекта «Безопасность дорожного движения в 10 странах (RS-10)» [15]. Представленные характеристики позволяют сформировать типичные «портреты» водителей, которые необходимы для проведения социально-маркетинговых исследований. Данные типичных «портретов» позволяют использовать методы фокус-групп [16]. С одной стороны, имеется информация о типичном представителе группы (пол

водителя, его социальные характеристики, возраст водителя и его опыт вождения). С другой стороны, описывается причина аварии (непосредственные и сопутствующие нарушения правил дорожного движения) и последствия (тип аварии).

Описанные методы были реализованы с помощью свободного программного обеспечения R. График, полученный в результате применения метода «локтя», приведен на рис. 2. Согласно ему, оптимальное количество кластеров равно 7. Этот результат подтверждается рассчитанными коэффициентами метода «силуэта» и использованием агломеративных методов.

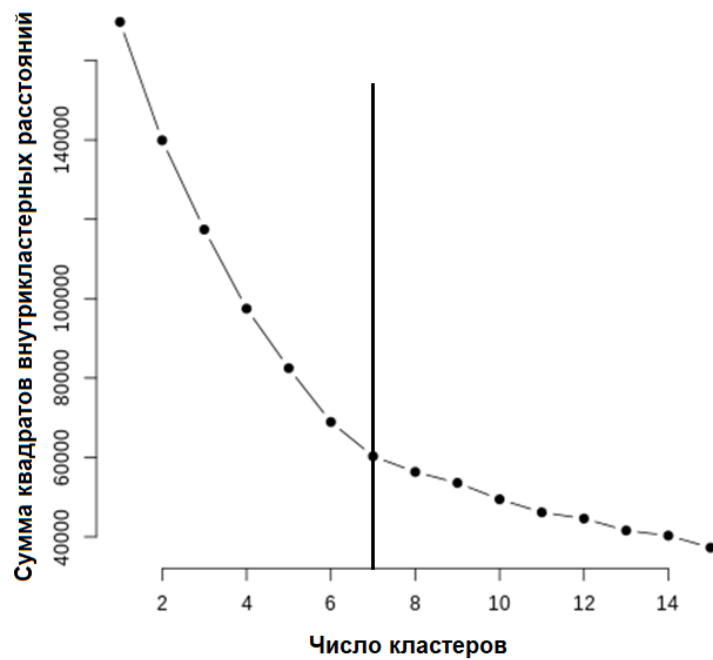


Рис. 2. Результаты применения метода «локтя» для поиска оптимального числа кластеров

На рис. 3 представлено распределение случаев по 7 однородным кластерам.

Анализируя кластеры, можно составить типичный «портрет» водителя, совершившего наезд, используя медианные значения его признаков.

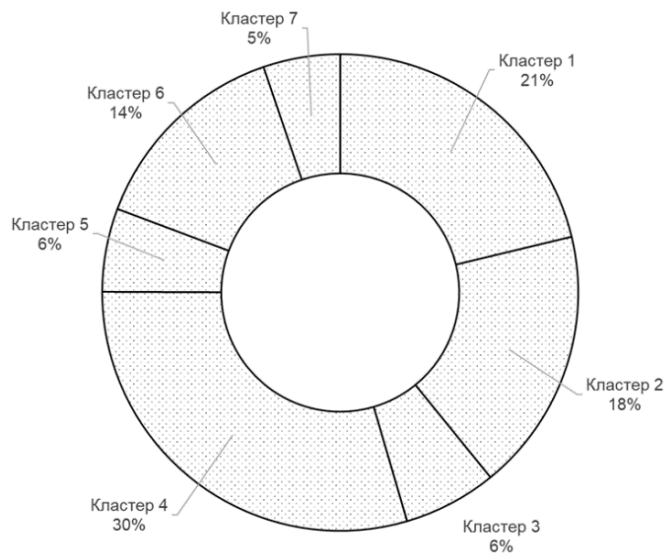


Рис. 3. Распределение случаев среди найденных кластеров

В табл. 1 представлено 7 целевых групп водителей, совершивших ДТП в Липецкой области. Сформированные кластеры соответствуют группам по наиболее частым видам ДТП: столкновение (62,12%), наезд на стоящее транспортное средство (28,13 %), наезд на препятствие (7,52 %).

Наиболее частыми инициаторами ДТП являются мужчины в возрасте от 30 до 40 лет со стажем от 1 до 13 лет. По три группы составляют работники коммерческой сферы и официально безработные. В отдельную группу входят руководители и чиновники, среди которых нарушение правил встречается часто.

Таблица 1

Результаты кластеризации набора данных по ДТП

	Характеристики						
	Вид ДТП	Пол	Социальная характеристика	Непосредственное нарушение ПДД	Сопутствующее нарушение ПДД	Стаж	Возрастная группа
Кластер 1	Наезд на стоящее ТС	м	Официально неработающий	Несоответствие скорости условиям движения	-	10	30-35
Кластер 2	Столкновение	м	Служащий коммерческой сферы	Нарушение предписаний	-	29	50-55
Кластер 3	Наезд на препятствие	м	Служащий коммерческой сферы	Несоответствие скорости условиям движения	-	13	35-40
Кластер 4	Столкновение	м	Официально неработающий	Ошибки маневрирования	-	8	25-30
Кластер 5	Столкновение	м	Руководитель / чиновник	Нарушение предписаний	-	10	30-35
Кластер 6	Столкновение	ж	Служащий коммерческой сферы	Другие нарушения	-	6	30-35
Кластер 7	Столкновение	м	Официально неработающий	Другие нарушения	Отягчающие сопутствующие нарушения	11	35-40

Дополнительный интерес представляют кластеры 6 (14,07 %) и 7 (5,22 %). Кластер 6 представлен женщинами, для которых не характерны наиболее распространенные прямые нарушения ПДД (см. табл. I). В кластере 7 особый интерес представляют сопутствующие нарушения: управление автомобилем в состоянии алкогольного или наркотического (токсического) опьянения, управление автомобилем лицом, не имеющим права управления транспортным средством, отказ от прохождения медицинского освидетельствования на состояние опьянения, покинул место ДТП и т.д. При формировании целевых групп кластеры 1 и 3 могут быть объединены для расширения целевой аудитории. Типичные «портреты» в этих группах близки: прямое нарушение правил дорожного движения, пол, водительский стаж, возрастная группа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. World Health Organization. Road traffic injuries. Accessed on: Sept. 3, 2021. [Online]. Available: URL: <https://www.who.int/health-topics/road-safety>. Accessed 12.20.2021 - Text : electronic.
2. **Faulks, I.** Road safety advertising and social marketing / I. Faulks. – Text: immediate. // J. Australas. Coll. Road Saf. – 2011. – Vol. 22(4). – P. 34–40.
3. **Das, S.** Non-fear-based road safety campaign as a community service: Contexts from social media / S. Das, A. Dutta, A. Mudgal. – Text: immediate // Datta in Communications in Computer and Information Science. – 2020. – Vol. 1139.
4. Designing and evaluating road safety advertising campaigns / I. Lewis, S. Forward, B. Elliot [et al.]. – Text: immediate // Traffic Safety Culture: Definition, Foundation, and Application. – 2019. – P. 297-319.
5. **Nwadinigwe, Ikechukwu P.** Impact of road safety education on commercial drivers' knowledge and behaviour towards road traffic codes and safety driving in Delta State /

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Описанные методы могут значительно повысить эффективность кампаний социального маркетинга. Использование типичных «портретов» определяет целевые группы.

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение возможностей описанных методов. В число пользователей предложенных методов обработки статистической информации планируется включить организации, отвечающие за безопасность дорожного движения, и образовательные организации, обучающие вождению.

- Ikechukwu P. Nwadinigwe, Ngozi A. Osarenren, Friday A. Otuagoma. – Text: immediate // International Journal of Educational Research. – 2018. Vol. 5 (1).
6. **Batool, Z.** Attitudinal segmentaion of drivers in Pakistan: The potential for effective road safety campaigns / Z. Batool, O. Carsten. – Text: immediate // Accid. Anal. Prev. – 2018. – Vol. 118. – P. 48-54.
7. Analysis on Characteristics of Traffic Accidents in Nagano (Second Report) / Y. Maruyama, H. Kuniyuki, H. Suganuma, [et al.] – Text: immediate. // Int. J. Automot. Eng. – 2019. – Vol. 10(2). – P. 219-225.
8. Clustering Algorithms to Analyze the Road Traffic Crashes / M. R. Islam, I. J. Jenny, M. Nayon. [et al.]. – Text: immediate // arXiv preprint arXiv:2108.03490. – 2021.
9. **Nafie Ali, F. M.** Usage Apriori and clustering algorithms in WEKA tools to mining dataset of traffic accidents / F. M. Nafie Ali, A. A. Mohamed Hamed. – Text: immediate // Journal of Information and Telecommunication. – 2018. – Vol. 2(3). – P. 231-245.
10. **Костин, А. В.** Алгоритм кластеризации и анализа мест дорожно-транспортных

происшествий / А. В. Костин. – Текст: непосредственный // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. – 2021. – Т.10, № 2(54). – С. 25–29.

11. **Sinaga, K. P.** Unsupervised K-means clustering algorithm / K.P. Sinaga, M. S. Yang. – Text: immediate // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 80716-80727.

12. Integration k-means clustering method and elbow method for identification of the best customer profile cluster / M.A. Syakur, B.K. Khotimah, E.M.S. Rochman, B.D. Satoto. – Text: immediate. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 336, №. 1. – P. 12–17.

13. **Rousseeuw, P. J.** Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis / P. J. Rousseeuw. – Text: immediate // J. Comput. Appl. Math. – 1987. – Vol. 20. – P. 53–65.

Сведения об авторах:

Сысоев Антон Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г.Липецк, ул. Московская, д. 30.

sysoev_as@stu.lipetsk.ru

Клявин Владимир Эрнстович

доктор технических наук, профессор кафедры управления автотранспортом, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г.Липецк, ул. Московская, д. 30.

Двуреченская Александра Викторовна

Управление ГИБДД по Липецкой области 398000, Россия, г. Липецк, ул. М.И. Неделина, д. 2.

Мамедов Альберт Эдуардович

студент кафедры прикладной математики, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г.Липецк, ул. Московская, д. 30.

14. **Delhomme, P.** Manual for designing, implementing and evaluating road safety communication campaigns / P. Delhomme. Brussels: IBSR-BIVV.– 2009. P. 23-239. – Text: immediate

15. WHO. Practical steps in enhancing road safety Lessons from the Road safety in 10 countries project in the Russian Federation. – Copenhagen. – 2014. – Text: immediate

16. **Browell, S.** Moderating Focus Groups: A Practical Guide for Group Facilitation / S. Browell. – Management Learning. – 2000. – Text: immediate

Information about authors:

Anton S. Sysoev

Lipetsk State Technical University
Moskovskaya st., 30, Lipetsk, Russia, 398055
sysoev_as@stu.lipetsk.ru

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics

Vladimir E. Klyavin

Lipetsk State Technical University
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Traffic Control
Moskovskaya st., 30, Lipetsk, Russia, 398055

Alexandra V. Dvurechenskaya

State Traffic Safety Inspectorate of Lipetsk Region

M.I. Nedelina str., 2, Lipetsk, Russia, 398000

Albert E. Mamedov

Lipetsk State Technical University
Moskovskaya st., 30, Lipetsk, Russia, 398055
Student of the Department of Applied Mathematics

Д.А. КАДАСЕВ, А.И. ПЕТРОСЯНЦ

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ СВЕТОФОРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В работе рассмотрен механизм повышения скорости движения транспортных потоков методами имитационного моделирования. При создании имитационной модели транспортного потока учитываются характеристики проезжей части, параметры транспортного потока, транзитность потока и отсутствие левого поворота на дороге. Оптимизация светофорного управления на городских дорогах и улицах позволит повысить скорость сообщения на дорожной сети городских агломераций, уменьшить задержки транспортных потоков и снизить выбросы в атмосферу вредных веществ.

Ключевые слова: светофорное управление, имитационное моделирование, транспортный поток.

D.A. KADASEV, A.I. PETROSYANTS

INCREASING THE ROAD TRAFFIC FLOW SPEED AS A RESULT OF OPTIMIZING THE TRAFFIC LIGHT SIGNALING OPERATION BY SIMULATION METHODS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The paper considers the mechanism of increasing the traffic flow speed by simulation methods. When creating a traffic flow simulation model, the road characteristics, the traffic flow parameters, the transit flow and the absence of a left turn on the road are taken into account. The optimization of traffic light control on city roads and streets will increase the traffic speed in the urban agglomeration road network, reduce transport delays and reduce emissions of harmful substances into the atmosphere.

Keywords: traffic light control, simulation, traffic flow.

ВВЕДЕНИЕ

Применение инновационных технологий на транспорте, развитие компьютеризации моделирования транспортных процессов требуют кардинальных изменений в практике решений при интеллектуализации транспортно-логистических систем. Имитационное транспортное моделирование движения автотранспортных потоков достаточно адекватно описывает поведение транспортных потоков на дорожной сети и используется для проверки предлагаемых организационных и управленческих решений, позволяя оценить эффективность работы транспортно-логистической системы на

основе параметров эффективности, учитывающих не только развитие транспортно-логистической инфраструктуры субъекта РФ, его социально-экономическое развитие, но и развитие транспортно-логистической инфраструктуры и социально-экономическое развитие граничащих с ним субъектов [1].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Интеллектуальные транспортно-логистические системы (ИТЛС) являются одним из средств высокоэффективных инновационных транспортных технологий, обеспечивающих обработку объемного и сложного массива данных, содержащего

необходимую информацию об условиях движения, о параметрах транспортного потока, а также о характеристиках и маршрутах перемещаемых грузов [2]. Одним из компонентов ИТЛС является адаптивное светофорное регулирование на основе имитационного моделирования, обеспечивающее пропускную способность пересечения и безопасный пропуск транспортных и пешеходных потоков в соответствии с текущими условиями дорожного движения с высокой скоростью сообщения [3]. Адаптивное светофорное регулирование позволяет изменять длительность фаз регулирования и очередность их работы в зависимости от интенсивности движения транспортных средств на подходах к пересечениям [4]. Стоит отметить, что чем больше светофорных объектов взаимосвязаны, соподчинены и включены в имитационную транспортную модель, тем больше информации поступает о дорожных условиях, таким образом обеспечивается принятие наиболее оптимального режима работы светофорной сигнализации, способствующего беспрепятственному движению транспортных средств по улично-дорожной сети города [5].

Объектом анализа условий и организации движения выбран участок

магистральной улицы Катукова (рис. 1). Улица Катукова является магистральной улицей общегородского значения третьего класса регулируемого движения в Октябрьском округе города Липецк [6]. Общая протяженность улицы – 2,7 км. Проходит от площади Танкистов до улицы Московской, пересекается с улицами Стаханова, Кривенкова, Меркулова, Проспект Победы, Московская. Параллельно проходят улица Белана и проспект 60 лет СССР. Улица Катукова разбита на 2 проезжие части, движение транспортных средств осуществляется по трем полосам в каждом направлении по односторонней дороге. Ширина проезжей части составляет 25 м. Ширина каждой полосы 3,75 метра. Встречные транспортные потоки разделены разделительной полосой с дорожным ограждением. Проезжая часть оборудована островками безопасности. По улице Катукова проходит большое количество маршрутов общественного транспорта общего пользования. Средства организации дорожного движения на данном участке улично-дорожной сети (УДС) представлены в виде дорожной разметки, светофоров и различных знаков [7].

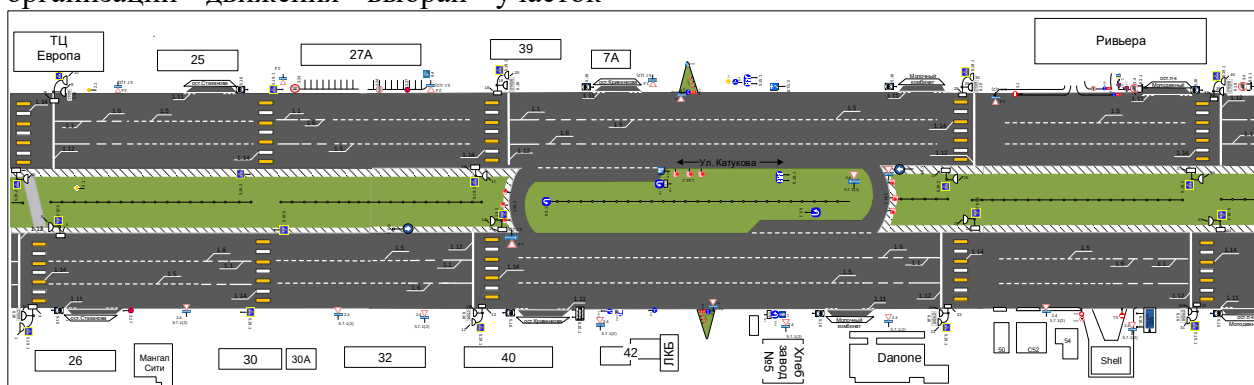


Рис. 1. Схема организации дорожного движения и характеристики транспортного потока

Данные распределения интенсивности движения по дням недели представлены на диаграмме (рис.2)

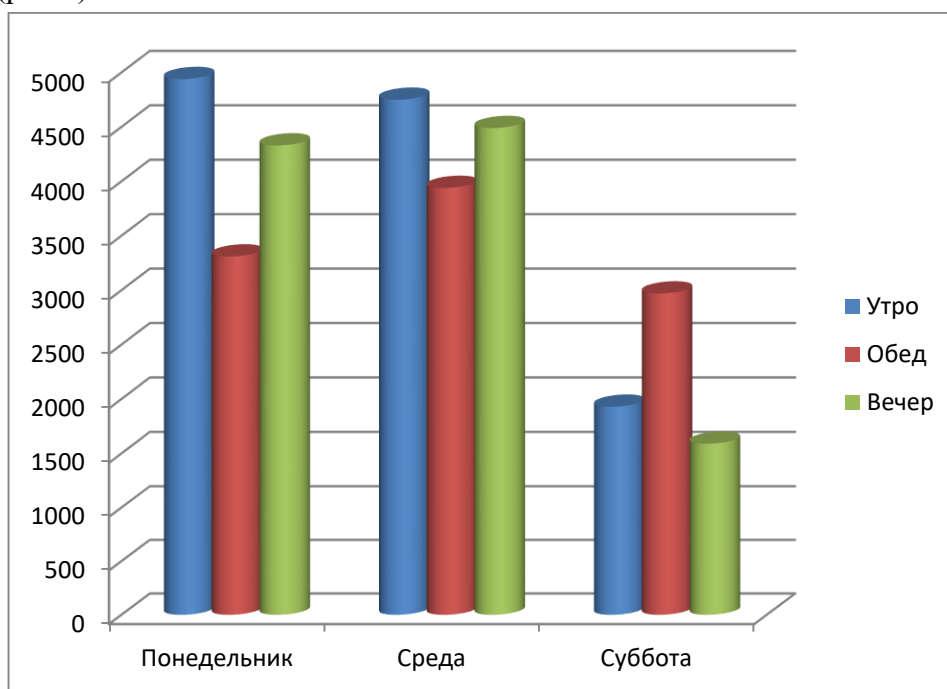


Рис. 2. Распределение интенсивности движения на участке ул. Катукова по дням недели

Проанализировав данный график, можно сделать вывод о том, что интенсивность движения транспортного потока в утреннее и вечернее время суток по будним дням недели значительно выше, чем в выходные. Наибольшая интенсивность транспортных потоков зафиксирована в утреннее время и составляет 4940 ед/ч.

ТЕОРИЯ / РАСЧЕТ

На основе собранных исходных данных о характеристиках проезжей части и транспортном потоке проведем моделирование транспортных потоков в программе AnyLogic, используя библиотеку дорожного движения [8–9]. Выбор пути и характер поведения автомобилей задается с учетом ограничений скорости, логики смены полос, выбора менее загруженной полосы. Моделирование участка дорожной сети приведено на рис. 3.

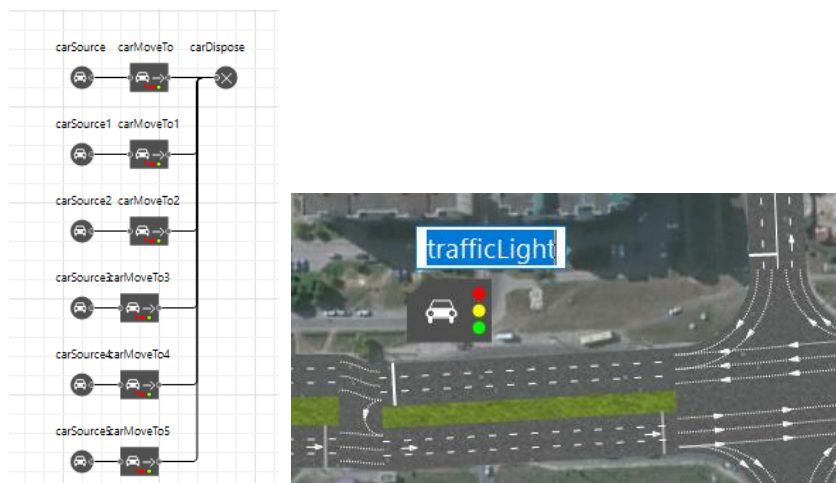


Рис. 3. Моделирование участка улично-дорожной сети

Задание светофорного регулирования на установленном элементе улично-дорожной сети осуществляется посредством введения в экспериментальную модель элемента «Traffic Light» [10]. Данная опция контролирует движение транспортных средств на указанных перекрестках или стоп-линиях [11].

На рис. 4 представлены режимы работы светофорной сигнализации для заданных стоп-линий. Заданные стоп-линии используются, если моделируемые данным блоком светофоры регулируют движение машин на одном или нескольких пешеходных переходах, заданных стоп-линиями [12].

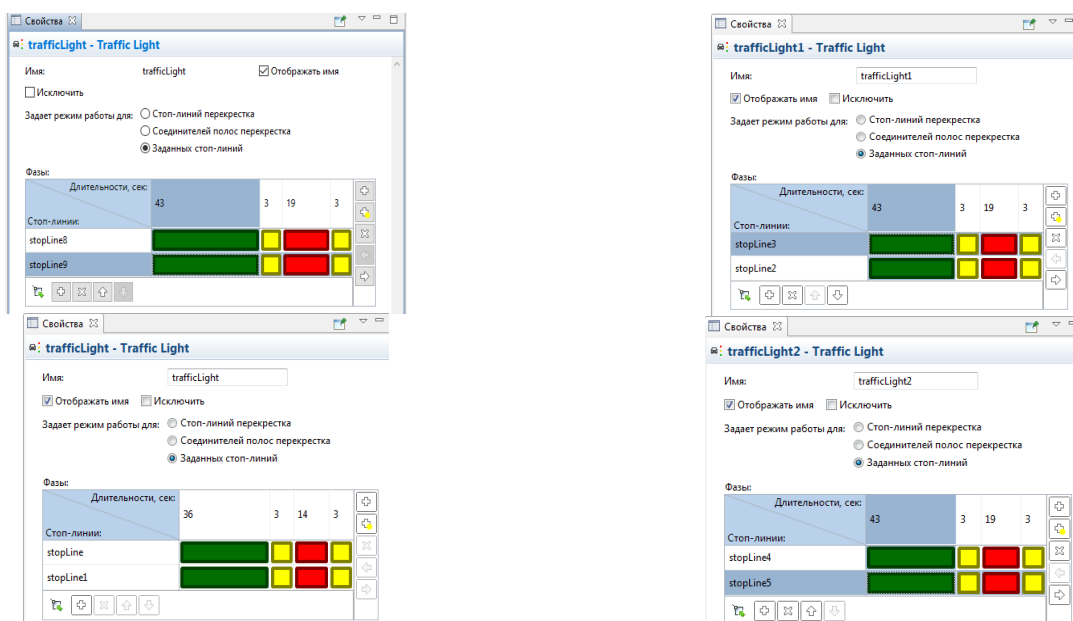


Рис. 4. Настройка режимов работы светофорной сигнализации

Моделирование дорожной ситуации показало места с заторами и низкой скоростью сообщения. Проведение мероприятий по повышению эффективности работы светофорной сигнализации на участке улично-дорожной сети необходимо с целью повышения безопасности дорожного движения, а также снижения транспортной задержки управлением. В качестве целевой функции мы будем использовать среднее время проезда транспортными средствами участка улично-дорожной сети [13]. Смоделировав ситуацию на ул. Катукова от ул. Стаханова до ул. Московская в программе AnyLogic, при помощи параметра «Статистика» можно проследить динамическое отображение

изменения среднего времени на отдельных участках улично-дорожной сети. Динамическое отображение изменения среднего времени на отдельных участках улично-дорожной сети позволяет реализовать палитра «Статистика», а точнее блок «Данные гистограммы», добавлением данного блока в проектируемую модель [14]. Просмотр среднего времени проезда участка улично-дорожной сети возможен при проведении эксперимента. Результаты моделирования в утреннее время суток представлены на рис. 5.

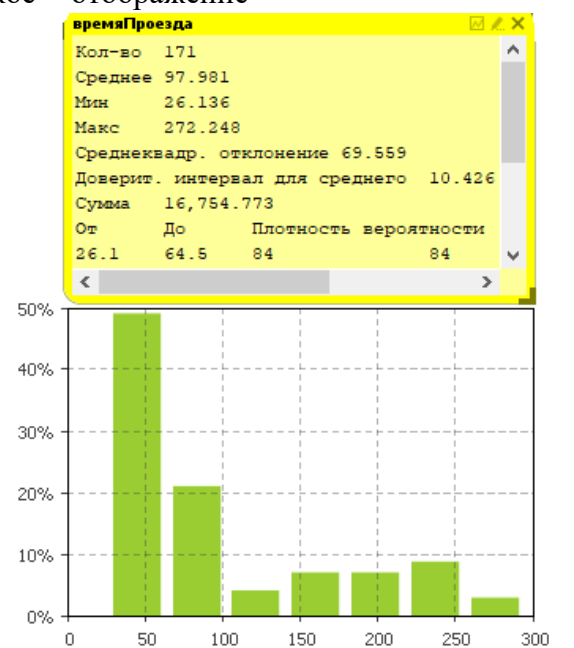


Рис. 5. Среднее время проезда участка улично-дорожной сети

При анализе значения полученных параметров существующего состояния транспортного потока видно, что среднее время проезда данного участка улично-

дорожной сети варьируется в пределах 97–99 с. Результаты сравнения времени проезда магистрали в различное время суток приведено на рис. 6.

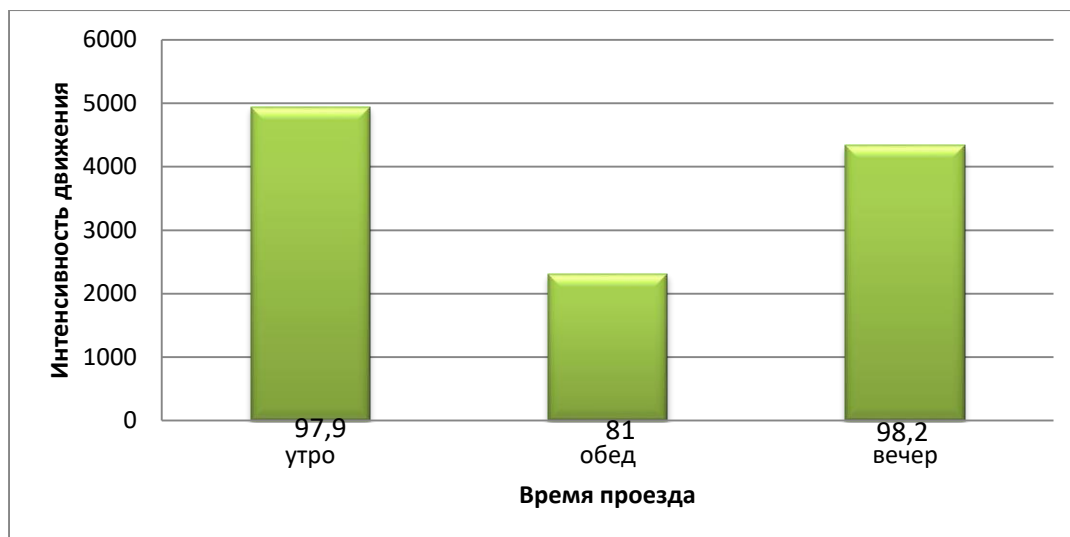


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования в различные пиковые периоды

Из данных рис. 6 видно, что время проезда улично-дорожной сети в утренние и вечерние часы пик значительно выше, чем в обеденное время суток, что связано с ростом интенсивности движения.

Создадим эксперимент-оптимизацию. Параметр «Оптимизация» показывает изменение графика режима работы

светофорной сигнализации при разных значениях интенсивности движения транспортного потока. В качестве целевой функции будем использовать время проезда транспортными средствами участка улично-дорожной сети. Результаты проведения эксперимента представлены на рис. 7.

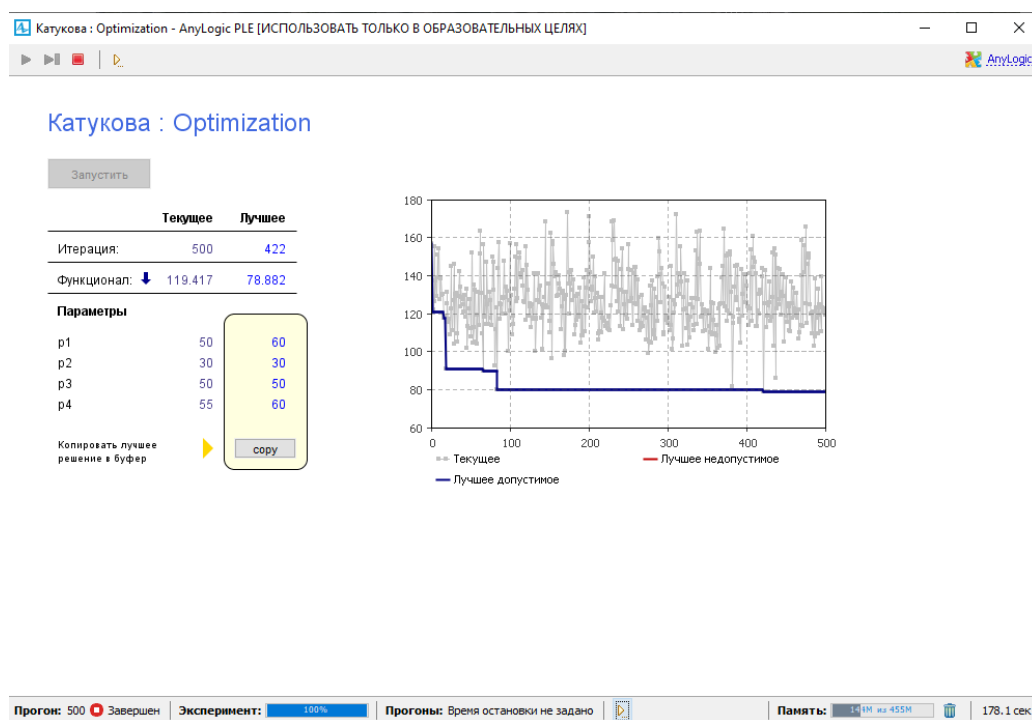


Рис. 7. Проведение эксперимента-оптимизации

В результате проведения эксперимента-оптимизации получены оптимальные параметры светофорной сигнализации. Полученные значения достоверны для заданных параметров транспортного потока. Изменение характеристик проезжей части и параметров транспортного потока необходимо учитывать при оптимизации в имитационной транспортной модели [15–16].

ВЫВОДЫ

Проведение мероприятий по повышению эффективности работы светофорной сигнализации на участке улично-дорожной сети необходимо с целью повышения безопасности дорожного движения, а также снижения транспортной задержки. Уменьшение выбросов вредных веществ в окружающую среду, повышение эколого-экономической эффективности эксплуатации автомобильного транспорта, улучшение качества транспортных услуг, являются главными направлениями деятельности по совершенствованию функционирования транспортной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Pell, A.** Trends in real-time traffic simulation / A. Pell, A. Meingast, O. Schauer. – Text : immediate // *Transportation Research Procedia*, – 2017. – T. 25. – P. 1477 – 1484.
2. Intelligent Traffic Light Management System. / S. Jahnavi, G. Prasanth, D. Priyanka [et al.] *Proceedings of International Conference on Advances in Computer Engineering and Communication Systems. Learning and Analytics in Intelligent Systems. Vol 20.* Springer, Singapore. – 2021. – P. 489–498. – Text : immediate.
3. Motor transport related harmful PM2.5 and PM10: from on road measurements to the modelling of air pollution by neural network approach on street and urban level. / O. Lozhkina, V. Lozhkin, N. Nevmerzhitsky [et al.] – Text : immediate // *Journal of Physics: Conference Series*, 772, – 2016. P. 1–7.
4. **Ляпин, С.А.** Моделирование и оптимизация светофорного регулирования при транспортных заторах в программе Anylogic / С.А. Ляпин, Д.А. Кадасев, И.М. Кадасева // *Организация и безопасность дорожного движения. Материалы XII Национальной научно-практической конференции с международным участием.* – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2019. – С. 268 – 272. – Текст : непосредственный.
5. Application of simulation modeling to improve the functioning of the module of intelligent transport and logistics system / S. Lyapin, Y. Rizaeva, D. Kadasev, N. Voronin. – Text : immediate. 2020, 2019 *XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)* P. 143 – 147.
6. **Аземша, С. А.** Повышение эффективности дорожного движения на перекрестках внедрением адаптивного регулирования / С.А. Аземша, П.И. Капитанов, В.И. Евланов. – Текст : непосредственный // *Наука и транспорт. Вестник Белорус. гос. ун. трансп.* – 2020. – № 2 (41).
7. **Kapitanau, P.I.** Development of measures to reduce losses on controlled junctions / P. I. Kapitanau. – Text : immediate // *Proceedings of the Twelfth Student International Scientific and Practical Conference: Collection of scientific works / For general. ed. O. Voznyak; LB of DNURT; Lviv*, 2020. – 136 p.
8. On Information Technology Development for Monitoring of Air Pollution by Road and Water Transport in Large Port Cities (St. Petersburg, Vladivostok and Sevastopol). / V. Lozhkin, O. Lozhkina, G. Rogozinsky, I. Malygin. – Text : immediate // *Modern Information Technology and IT Education. SITITO 2018. Communications in Computer and Information Science*, Vol – 1201. – 2018, – P. 384 – 396, Springer, Cham.
9. **Кадасев, Д.А.** Реализация согласованного светофорного адаптивного управления при интеллектуализации транспортно-логистических систем / Д.А. Кадасев, Н.В. Воронин. – Текст : непосредственный // *Организация и безопасность дорожного движения: материалы XII Национальной научно-*

практической конференции с международным участием. В 2 томах. Т. 1. – Тюмень: Изд-во ТИУ, 2019. – С. 312–316. – Текст : непосредственный.

10. Имитационное моделирование в проектах ИТС: учебное пособие / С.В. Жанказиев, А.И. Воробьев, А.В. Шадрин, М.В. Гаврилюк. – Москва : МАДИ, 2016 – 92 с. – Текст : непосредственный.

11. **Баротова, А.Ж.** Имитационная модель перекрёстка с возможностью оптимизации светофорного регулирования / А.Ж. Баротова. – Текст : непосредственный // Творческий потенциал. – 2017. – сборник статей / под редакцией С.А. Пиявского, З.Ф. Камальдиновой. – Самара. Изд-во Самарского государственного университета, 2018. – С. 26–35.

12. **Zhang, J.** Virtual traffic simulation with neural network learned mobility model / J. Zhang, A. El Kamel. – Text : immediate. // Advances in Engineering Software. – 2018. – V. 115. P. 103– 111.

13. **Зырянов, В.В.** Динамическая маршрутизация транспортных потоков как метод снижения транспортной нагрузки на элементы УДС / В.В. Зырянов, А.А. Феофилова, Н.Н. Чуклинов. – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – № 1(60). – С. 74 – 80.

Сведения об авторах:

Кадасев Дмитрий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры управления
автотранспортом,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

kadasev@mail.ru

Петросянц Артем Игоревич

студент кафедры управления
автотранспортом,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

kafedrauat@mail.ru

14. **Жанказиев, С.В.** Анализ состояния дорожного движения методом экспертных оценок / С.В. Жанказиев, С.Х. Нгуен. – Текст : непосредственный // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2019. – № 1(87). – С. 7–10.

15. **Сильянов, В.В.** О совершенствовании сетевого управления транспортными потоками в интеллектуальных транспортных системах / В.В. Сильянов, В.Т. Капитанов, О.Ю. Моница; под общей редакцией А.Н. Новикова. – Текст : непосредственный // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы 5-й Международной научно-практической конференции. – Орел: Изд-во Орловского государственного университета, 2020. – С. 108-113.

16. **Парсаев, Е.В.** Оценка загрязнения атмосферного воздуха транспортными потоками на перегонах улиц (на примере г. Омска) / Е.В. Парсаев, И.А. Тетерина, А.С. Кашталинский. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 8 (139). – С. 181–188.

Information about the authors:

Kadasev Dmitry Anatolyevich

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of Motor
Transport Management of the Lipetsk State
Technical University.

Lipetsk State Technical University

398055 Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

Petrosyants Artem Igorevich

student of the Department of Motor Transport
Management of the Lipetsk State Technical
University.

Lipetsk State Technical University

398055 Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

Ю.Н. РИЗАЕВА, В.А. ЛОГИНОВ, А.Ю. КУЗНЕЦОВ

ПЛАНИРОВАНИЕ ПОСТАВОК ПРОДУКЦИИ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ ВО ВРЕМЕНИ СПРОСЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В статье рассматриваются подходы к планированию поставок продукции. Предложен алгоритм сокращения потерь у потребителя и производителя при изменяющемся во времени спросе потребителя. Акцент сделан на современные требования в развитии отрасли за счет совершенствования планирования деятельности предприятий по показателям, которые являются функцией от спроса. Применение нового подхода к планированию поставок продукции заключается в учете изменяющегося во времени спросе потребителя. Математическое моделирование выполняется применительно к реальным эксплуатационным условиям. Планирование реализуется за счет разработанной математической модели и методики, направленных на сокращение общесистемных потерь. Применение разработанного подхода в практике работы предприятий позволит формировать общесистемные потери и использовать новое программное обеспечение для разработки и принятия управленческих решений.

Ключевые слова: поставка продукции, спрос, потери потребителя, потери производителя, планирование поставок продукции.

YU.N. RIZAEVA, V.A. LOGINOV, A.YU. KUZNETSOV

SUPPLY PLANNING AT TIME-VARYING CONSUMER DEMAND

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The article discusses approaches to product supply planning. An algorithm is proposed for reducing consumer and producer losses at time-varying consumer demand. Modern requirements are emphasized in the industry development by improving production planning according to indicators that are a function of demand. The new approach to supply planning is manifested in taking into account the time-varying consumer demand. Mathematical modeling is performed with respect to real operating conditions. Planning is implemented through the developed mathematical model and methodology aimed at reducing system-wide losses. The practical application of the developed approach will form system-wide losses and use new software to develop and make managerial decisions.

Keywords: product supply, demand, consumer losses, producer losses, product supply planning.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим процесс производства и поставки продукции в дискретные моменты времени $t=0,1, \dots, T$,

где T – период планирования [1, 2].

Спрос потребителя на продукцию в эти моменты времени задан и определяется функцией $q(t)$. Обозначим неизвестный размер поставки в момент времени как $x(t)$. При несовпадении поставки $x(t)$ и спроса $q(t)$ возникают общесистемные потери. При дефиците, то есть когда

$$d(t)=x(t)-q(t)<0,$$

общесистемные потери обуславливаются неудовлетворенностью спроса [3–5]. При превышении поставки над спросом, когда $d(t)>0$, потери вызваны дополнительными затратами на хранение избытка продукции. Так как потери от превышения объема поставки продукции над спросом $d(t)>0$ меньше, чем потери от дефицита $d(t)<0$, то при одинаковом значении разности (в абсолютном значении) d , график функции потерь $f_1(d)$ будет иметь вид, как на рис. 1 (потери прямо пропорциональны разности d).

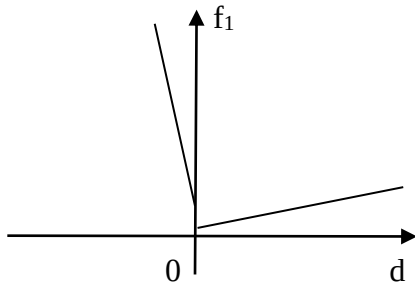


Рис. 1. График функции потерь потребителя

Функциональную зависимость, представленную на рис.1, аппроксимируем:

$$f_1(d)=\begin{cases} a_1 d, & \text{если } d \geq 0 \\ b_1 d, & \text{если } d \leq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где a_1 и b_1 – удельные потери потребителя на единицу продукции. При этом $b_1>a_1>0$.

Для поставщика продукции желательна постоянная интенсивность производства, то есть $x(t) = \text{const}$, когда

$$u(t)=x(t+1)-x(t)=0.$$

В случае $u(t)>0$ или $u(t)<0$ производитель несет потери из-за перестройки производства. Функция потерь производителя имеет вид, показанный на рис. 2.

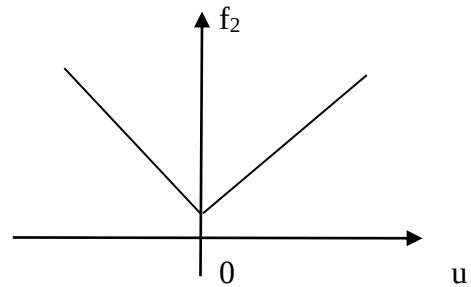


Рис. 2. График функции потерь производителя

В аналитическом виде аппроксимируем эту функцию в виде

$$f_2(u)=\begin{cases} a_2 u, & \text{если } u \geq 0 \\ b_2 u, & \text{если } u \leq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где a_2 и b_2 – удельные потери производителя на единицу продукции. Величины коэффициентов зависят от конкретных условий производства. Ясно только, что $a_1>0$, $b_1>0$ [6, 7].

Сформулируем задачу планирования поставки продукции при изменяющемся во времени спросе потребителя: найти функцию поставки продукции $x(t)$, $t=1,2, \dots, T$, и динамику изменения этого объема поставки

$$u(t)=x(t+1)-x(t), \quad t=1,2, \dots, T-1,$$

чтобы минимизировать суммарные потери потребителя в течение планового периода T .

Составим целевой функционал

$$F = \sum_{t=0}^{T-1} [f_1(x(t)-q(t)) + f_2(u(t))] + f_1(x(T)-q(T)) \rightarrow \min$$

при начальном условии $x(0) = x_0$.

Уравнение процесса в канонической форме

$$\dot{x}(t) = x(t) + u(t). \quad (3)$$

Очевидным условием является $x(t) \geq 0$. Поставка продукции не может быть отрицательной [8–10].

Получили общую постановку задачи оптимального управления для многошаговых процессов: $x(t)$ определяет состояние системы, $u(t)$ – управление системой.

Чтобы решить задачу методом Лагранжа, необходимо освободиться от ограничения $x(t) \geq 0$, $t = 0, 1, \dots, T$ [11, 12]. Это потребует включения в целевой функционал штрафной функции за нарушение условий $x(t) \geq 0$, что значительно усложняет решение. Поэтому вместо явного учета ограничений $x(t) \geq 0$, $t = 0, 1, \dots, T$ будем использовать метод прямой прогонки при решении краевой задачи [13, 14].

На каждой итерации, если окажется, что $x(t) < 0$ на этом t , вычисления прекращаются и осуществляется переход к новой итерации. Неучтенные ограничения $x(t) \geq 0$, таким образом, будут учитываться непосредственно в процессе вычислений. Используя принцип максимума Понтрягина, составим функцию Гамильтона

$$H(t, \psi, x, u) = \psi(x+u) - f_1(x) - q(t) - f_2(u).$$

Необходимые условия оптимальности имеют вид

$$\left. \frac{\partial H(t, \psi(t+1), \bar{x}(t), u)}{\partial u} \right|_{u=\bar{u}(t)} = 0; \quad (4)$$

$$\psi(t) = \left. \frac{\partial H(t, \psi(t+1), x, \bar{u}(t))}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}(t)} = 0; \quad (5)$$

$$\bar{x}(t+1) = f(t, \bar{x}(t), \bar{u}(t)); \quad (6)$$

$$\bar{x}(0) = x_0;$$

$$\psi(T) = - \left. \frac{\partial F(T, x)}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}(T)} = 0. \quad (7)$$

Из условия (4) получаем

$$\psi(t+1) - \left. \frac{\partial f_2(u)}{\partial u} \right|_{u=\bar{u}(t)} = 0.$$

Подставляя значение $f_2(u)$ в формулу (2), получим

$$\psi(t+1) = \begin{cases} a_2, & \text{если } \bar{u}(t) \geq 0 \\ b_2, & \text{если } \bar{u}(t) \leq 0 \end{cases}. \quad (8)$$

Из условия (5) получаем

$$\psi(t) = \psi(t+1) - \left. \frac{\partial f_1(d)}{\partial d} \right|_{d=\bar{x}(t)-q(t)} = 0.$$

Подставляя значения $f_1(d)$, получим

$$\psi(t) = \psi(t+1) - f(x) = \begin{cases} a_1, & \text{если } \bar{x}(t) \geq q(t) \\ b_1, & \text{если } \bar{x}(t) < q(t) \end{cases}. \quad (9)$$

Условие (6) задается непосредственно уравнением процесса (5). Так как $a_2 > 0$, $b_2 > 0$, то знак $\psi(t+1)$ в выражении (8) будет совпадать со знаком $\bar{u}(t)$ [15].

Тогда из формулы (8) следует

$$\bar{u}(t) = f(x) = \begin{cases} \frac{\psi(t+1)}{a_2}, & \text{если } \psi(t+1) \geq 0 \\ \frac{\psi(t+1)}{b_2}, & \text{если } \psi(t+1) \leq 0 \end{cases}. \quad (10)$$

Подставим значение $\bar{u}(t)$ в уравнение процесса (5):

$$\bar{x}(t) = \bar{x}(t+1) = \begin{cases} \frac{\psi(t+1)}{a_2}, & \text{если } \psi(t+1) \geq 0 \\ \frac{\psi(t+1)}{b_2}, & \text{если } \psi(t+1) \leq 0 \end{cases}. \quad (11)$$

Если заданы значения $\bar{x}(t+1)$ и $\psi(t+1)$, и $\psi(t+1)$, то по формулам (9) – (11) можно найти значения $\bar{x}(t)$, $\bar{u}(t)$, $\psi(t)$. Следовательно, продолжая итеративный процесс, можно найти значения $x(t)$, $\bar{u}(t)$, $\psi(t)$ и т.д. Расчеты продолжаются до тех пор, пока не найдем значение $x(0)$. По условию должно быть $x(0) = x_0$.

Воспользуемся условием трансверсальности – формулой (7).

В соответствии с формулой (1) и с учетом $d(T)=x(T)-q(T)$ получаем

$$\psi(T) = - \left. \frac{\partial f_1(d)}{\partial d} \right|_{x=\bar{x}(t)} = - \begin{cases} a_1(\bar{x}(T)-q(T), \text{если } \bar{x}(T) \geq q(T) \\ b_1(\bar{x}(T)-q(T), \text{если } \bar{x}(T) \leq q(T) \end{cases} \quad (12)$$

Положим $t+1=T$. Зададим $\bar{x}(T)$ равным q_t и по формуле (12) определим $\psi(T)$. Тогда можно вычислить $\bar{x}(t)=\bar{x}(T-1)$, $\bar{u}(t)=\bar{u}(T-1)$, $\psi(t)=\psi(T-1)$. Продолжая итерационный процесс, дойдем до $\bar{x}(0)$, который будет зависеть от заданного значения $x(T)$.

Придется подбирать значение $\bar{x}(T)$ и повторять расчеты до тех пор, пока значение $\bar{x}(0)$ не совпадет с начальным значением x_0 с заданной точностью α

$$|\bar{x}(0, \bar{x}(T)) - x_0| \leq \alpha.$$

Если на некотором шаге t при принятом значении $\bar{x}(T)$ окажется $\bar{x}(T) < 0$, то итерация прекращается. Изменяем значение $\bar{x}(T)$ и приступаем к новой итерации. И так до тех пор, пока не достигнем заданной точности.

ВЫВОДЫ

Исходя из проведенного исследования можно сделать вывод о возможности применения данного алгоритма в планировании поставок продукции при изменяющемся во времени спросе потребителя. При этом общесистемные потери сокращаются. Результаты исследования предназначены для практики работы предприятий на этапе определения показателя общесистемных потерь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Логинов, В.А.** Устойчивость развития транспортных систем / В.А. Логинов, А.К. Карташова. – Текст : непосредственный // Тенденции развития современной науки : сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета: в 2-х частях. Ч. 1. Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2017. – С. 538–541.
2. **Логинов, В.А.** Снижение себестоимости грузовых автомобильных перевозок / В.А. Логинов, Ю.О. Шапошников. – Текст : непосредственный // Тенденции развития современной науки: сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета: в 2-х частях. Ч.1. Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2017. – С. 683–685.
3. **Логинов, В.А.** Квазипроизводственная функция грузового автотранспортного предприятия с переменной технологической структурой перевозок / В.А. Логинов, В.А. Суворов, А.С. Ляхов. – Текст : непосредственный // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте: материалы I международной научно-практической конференции: в 2 томах. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2018. – Т. 1. – С. 101–104.
4. **Логинов, В.А.** Модель влияния научно-технического прогресса на производственно-экономическую деятельность грузового автотранспортного предприятия / В.А. Логинов, В.А. Суворов, А.С. Ляхов. – Текст : непосредственный. // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте: материалы I международной научно-практической конференции: в 2 томах. Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2018. – Т.1. – С. 105–108.
5. **Корчагин, В.А.** Теоретико-прикладные методы доставки сельскохозяйственной продукции В.А. Корчагин, Ю.Н. Ризаева, С.Н. Сухатерина. – Текст : непосредственный // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 2. – С. 92–96.

6. Stages to create and develop module of regional intelligent transportation and logistics system / Lyapin S., Rizaeva Y., Sysoev A. [et al.] – Text : immediate // Transportation Research Procedia. "Transport Infrastructure and Systems in a Changing World. Towards a more Sustainable, Reliable and Smarter Mobility, TIS Roma 2019 - Conference Proceedings. – 2020. – P. 939–946.
7. Разработка интеллектуальной транспортно-экологистической системы и выбор оптимальных параметров ее функционирования / Ю.Н. Ризаева, С.А. Ляпин, А.С. Сысоев [и др.] – Текст : непосредственный // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы 4-й Международной научно-практической конференции. под редакцией А.Н. Новикова. – Орел: Изд-во Орловского государственного университета, 2019. – С. 13–20.
8. **Ризаева, Ю.Н.** Прикладные методы совершенствования доставки грузов / Ю.Н. Ризаева, С.Н. Сухатерина. – Текст : непосредственный // Матрица научного познания. – 2019. – № 5. – С. 51–54.
9. **Ризаева, Ю.Н.** Государственная политика в области автомобильного транспорта / Ю.Н. Ризаева, С.Н. Сухатерина, А.Ю. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2021. – № 1 (44). – С. 39–42.
10. **Ляпин, С.А.** Проактивное управление транспортными потоками городов, выходящими на автомагистрали международных транспортных коридоров / С.А. Ляпин, Ю.Н. Ризаева, Д.А. Кадасев. – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2021. – № 2 (73). – С. 81–91.
11. Интеллектуальные методы управления транспортными системами/ А.С. Сысоев, С.А. Ляпин, А.В. Галкин [и др.]. – Москва : Дашков и К. – 2021. – 192 с. – Текст : непосредственный.
12. **Корчагин, В.А.** Биосферно-совместимый критерий выбора подвижного состава / В.А. Корчагин, Ю.Н. Ризаева, С.Н. Сухатерина. – Текст : непосредственный // Статистические методы исследования социально-экономических и экологических систем региона: материалы III международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 244–247.
13. **Михалевич, В.С.** Методы последовательной оптимизации / В.С. Михалевич, А.И. Кукса. – Москва: Наука, 1983. – 208 с. – Текст: непосредственный.
14. **Финкельштейн, Ю.Ю.** Приближенные методы и прикладные задачи дискретного программирования / Ю.Ю. Финкельштейн. – Москва : Наука, 1976. – 265 с. – Текст: непосредственный.
15. **Сухатерина, С.Н.** Логико-графическая модель работы областного интеллектуального транспортно-логистического центра перевозок сельскохозяйственных культур / С.Н. Сухатерина, В.А. Корчагин, Ю.Н. Ризаева. – Текст : непосредственный // Информационные технологии и инновации на транспорте : материалы 5-й Международной научно-практической конференции / под общей редакцией А.Н. Новикова. – Орел: Изд-во Орловского государственного университета. – 2020. – С. 113–117.

Сведения об авторах:

Ризаева Юлия Николаевна

доктор технических наук, заведующий
кафедрой управления автотранспортом,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

rizaeva.u.n@yandex.ru

Логинов Владимир Анатольевич

кандидат экономических наук, доцент
кафедры управления автотранспортом,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

v_loginov@lipetsk.ru

Кузнецов Андрей Юрьевич

студент кафедры управления
автотранспортом,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

Information about authors:

Yulia N. Rizaeva

Doctor of Technical Sciences, Head of the
Department of
Vehicle Management

rizaeva.u.n@yandex.ru

Lipetsk State Technical University

Moskovskaya st., 30, Lipetsk, Russia, 398055

Vladimir A. Loginov

Candidate of Economic Sciences, Associate
Professor of the Department of Vehicle
Management

Lipetsk State Technical University

Moskovskaya st., 30, Lipetsk, Russia, 398055

v_loginov@lipetsk.ru

Andrey Yu. Kuznetsov

student of the Department of Vehicle
Management

Lipetsk State Technical University

Moskovskaya st., 30, Lipetsk, Russia, 398055

А.В. ГРИНЧЕНКО, Е.К. ПОГОДИНА

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ В АВТОСЕРВИСЕ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: Рассматриваются вопросы имитационного моделирования процесса оказания услуг по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей в автосервисном предприятии. Получены результаты экспериментов на разработанной модели в базовом варианте и предложены мероприятия для повышения экономической эффективности функционирования автосервиса в новом варианте.

Ключевые слова: автосервис, имитационное моделирование, обслуживание автомобилей, Anylogic.

A.V. GRINCHENKO, E.K. POGODINA

CAR MAINTENANCE SIMULATION MODELING IN A CAR SERVICE CENTER

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: Problems of car repair and maintenance simulation modeling in a car service center are considered. The baseline developed model experiments results were obtained and measures are proposed to increase the economic efficiency of car service centers in the new version.

Keywords: car service, simulation modeling, car maintenance, Anylogic.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время имитационное моделирование различных процессов и систем позволяет избежать необоснованных рисков при запуске новых проектов, а также повысить эффективность функционирования существующих технико-экономических систем. Современные инструменты имитационного моделирования, в частности Anylogic, позволяют создавать адекватные реальным процессам и системам модели с необходимым уровнем детализации. Проведение экспериментов на моделях позволяет увидеть, как будет функционировать объект или система при изменении значений входных управляемых параметров. Результаты проведенных экспериментов могут быть основой для принятия эффективных управленческих решений по

оптимизации различных процессов и систем с минимизацией экономических, экологических и других рисков.

В настоящей статье представлены результаты разработки имитационной модели процесса обслуживания автомобилей в автосервисном предприятии в программе Anylogic. Использовались дискретно-событийное моделирование и библиотека моделирования процессов программы Anylogic. Предпосылки создания имитационной модели изложены в работах [1–3]. Процесс обслуживания автомобилей в автосервисе осуществляется в следующей последовательности:

1. Прием заявки на выполнение ТО (технический осмотр) или ремонта автомобиля от клиента.

2. Ожидание освобождения ресурсов в автосервисе (подъемники, автослесари), если все ресурсы заняты. Если необходимые для ТО и ремонта автомобиля ресурсы свободны, то выполняется прием автомобиля и занятие автомобилем нужных свободных ресурсов.

3. Выявление конкретных неисправностей, необходимости в ремонте или ТО. Выбор набора необходимых работ по ТО или ремонту автомобиля.

3.1. Если необходимы ТО или ремонт двигателя, то проводится его компьютерная диагностика.

3.1.1. Затем определяется, какую конкретную работу нужно выполнять с двигателем автомобиля (замена моторного масла, замена ГРМ, регулировка клапанов, ремонт головки блока цилиндров (ГБЦ) или другой ремонт двигателя). Здесь используются данные статистики а автосервисе.

3.1.2. Выполнение соответствующих работ по ТО или ремонту двигателя автомобиля.

3.1.3. Окончание обслуживания, осуществление расчетов с клиентом и возврат автомобиля клиенту.

3.2. – 3.6. Подобно операциям 3.1.1 – 3.1.3, проводимым в случае необходимости ТО или ремонта двигателя, выполняются операции по ТО и ремонту выхлопной системы, КПП и трансмиссии, тормозной системы, ходовой части и автоэлектрики.

Исходя из вышеизложенного, разработана структурная схема процесса обслуживания автомобилей в автосервисе (рис. 1). Разработка алгоритма функционирования имитационной модели выполнена на основе разработанной структурной схемы. Разработанный в системе Anylogic алгоритм показан на рис. 2.

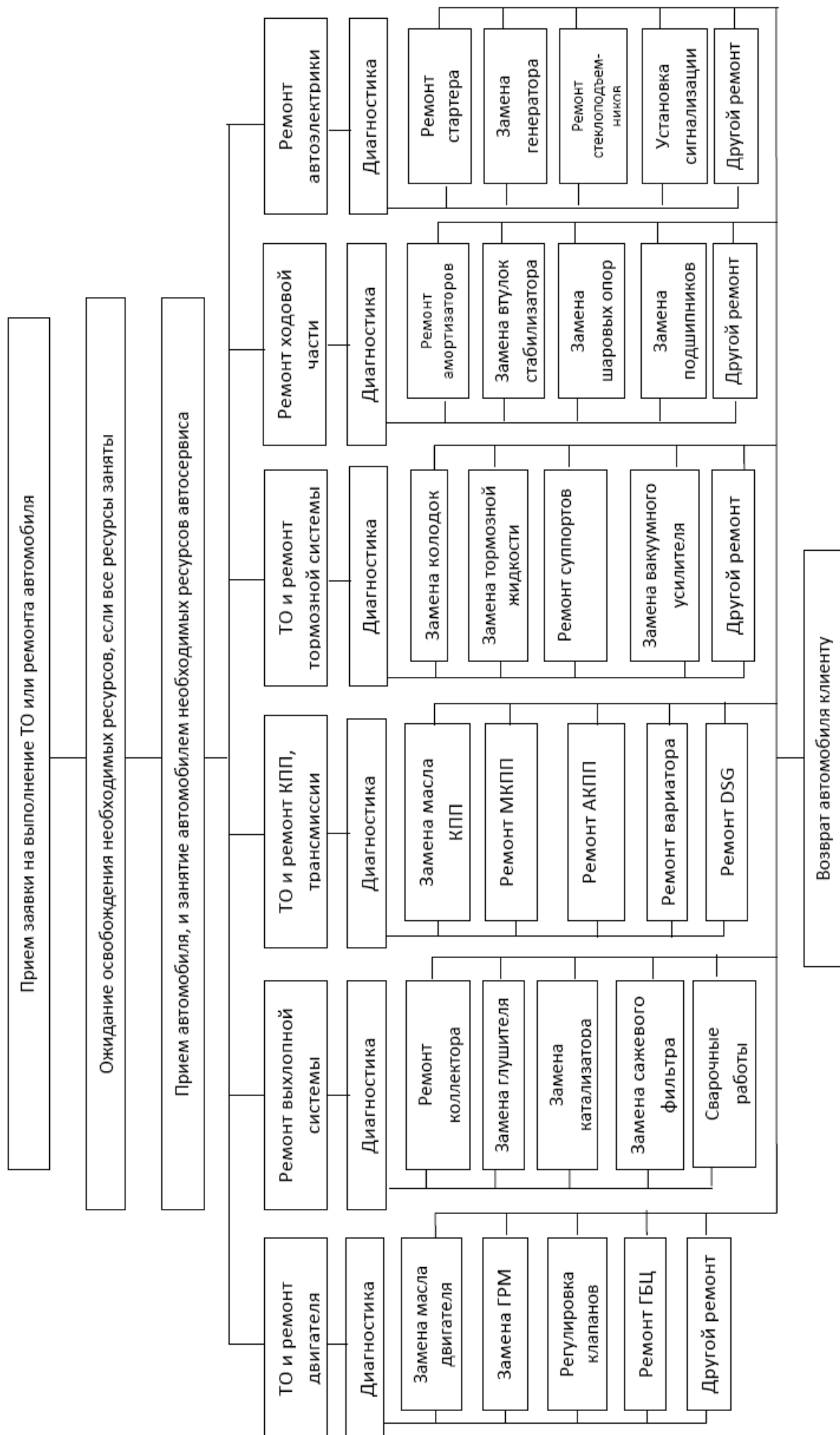


Рис. 1. Структурная схема процесса обслуживания автомобилей в автосервисе

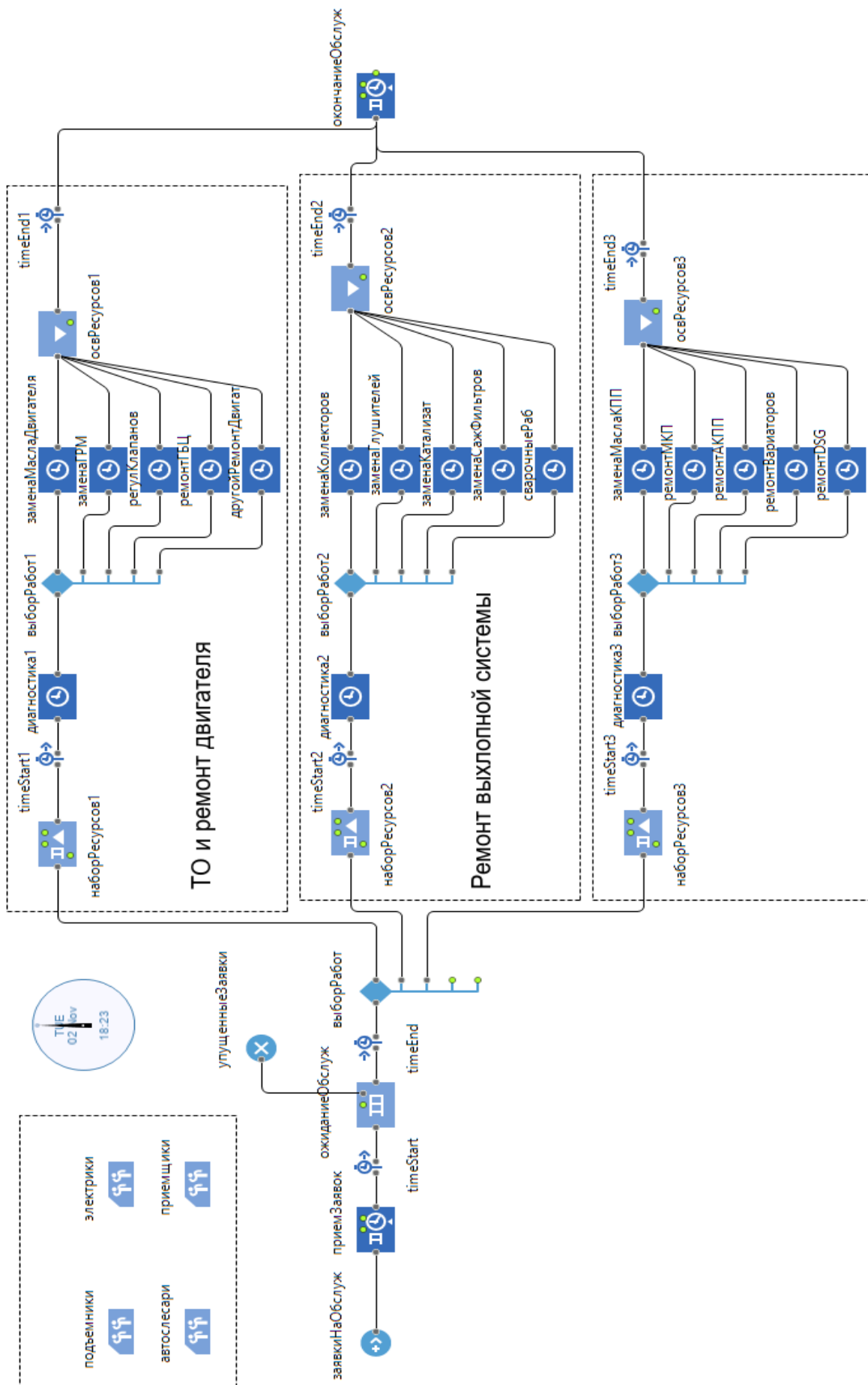


Рис. 2. Алгоритм процесса обслуживания автомобилей в AnyLogic (фрагмент)

В модели блок, названный «заявкиНаОбслуж», является блоком «Source», который генерирует агентов, в данном случае заявки на ТО или ремонт автомобилей. Этот блок используется в качестве начальной точки потока агентов-автомобилей. Блок, названный «приемЗаявок», является блоком «Service», который моделирует прием заявки на выполнение технологических операций с автомобилем от клиента и обработку этой заявки приемщиком. Далее идет блок «ожиданиеОбслуж», являющийся блоком «Queue», который моделирует ожидание выполнения принятой заявки на ТО или ремонт в случае, если все ресурсы автосервиса заняты. Если время ожидания превышает заданное по условию, то клиент отказывается от услуг этого автосервиса и обращается в другой автосервис. Это моделируется блоком «упущенныеЗаказы», являющимся блоком «Sink».

Блоком «TimeMeasureStart» определяется начальная точка, через которую проходит агент. В этот момент запоминается время прохождения агентом объекта. В блоке «TimeMeasureEnd» вычисляется время, которое потребовалось агенту для прохождения между блоками «TimeMeasureStart» и «TimeMeasureEnd».

Блок «выборРабот» моделируется блоком «SelectOutput5», который направляет входящих агентов-автомобилей в один из пяти выходных портов в зависимости от того, каким технологическим операциям ТО или ремонта будет подвергаться автомобиль. Этот выбор задается соответствующими вероятностями, полученными по статистике из автосервиса.

Далее, в зависимости от необходимых работ ТО или ремонта, производится захват необходимых ресурсов, что моделируется блоками «наборРесурсов», являющимися блоками «Seize».

Далее стоит блок «Delay», моделирующий диагностирование соответствующей системы, узла или агрегата автомобиля. После диагностирования блоком «выборРабот» моделируется выбор необходимой работы по ТО или ремонту автомобиля. Этот выбор задается соответствующими вероятностями, полученными по статистике из автосервиса.

Блоки, которые моделируют выполнение необходимой работы по ремонту или ТО соответствующей системы, узла или агрегата автомобиля, заданы блоками «Delay».

Далее, после выполнения необходимой работы ТО или ремонта происходит освобождение захваченных ресурсов, что моделируется блоками «освРесурсов», являющимися блоками «Release».

Процесс оплаты оказанных автосервисных услуг и возврат автомобиля клиенту моделируется блоком «Service» («окончаниеОбслуж»), который захватывает ресурсы (приемщика) для выполнения операций.

Заканчивается диаграмма процесса блоком «sink» («удалениеЗаявки»), который моделирует выезд автомобиля с территории автосервиса, т.е. выход его из диаграммы процесса.

Разработанный алгоритм достаточно точно описывает процесс обслуживания автомобилей в автосервисе, что позволяет проводить численные эксперименты и исследовать процессы его работы. Для более точного функционирования имитационной модели необходима настройка каждого блока в соответствии с реальными данными работы автосервиса.

Основными параметрами для настройки имитационной модели являются следующие данные.

1. Интенсивность поступления заявок на ТО или ремонт автомобилей.

2. Количество подъемников в автосервисе.

3. Вероятность выполнения определенной работы по ТО или ремонту автомобиля.

4. График работы автосервиса.

5. Статистическое распределение и минимальное, среднее и максимальное время выполнения определенной работы по диагностированию, ТО и ремонту автомобиля.

6. Сведения о работающем персонале.

Интенсивность поступления заявок на ремонт автомобилей распределена по экспоненциальному закону с матожиданием 10 заявок/день. Время работы автосервиса ежедневно с 8:00 до 20:00, перерыв с 13 до 14. В автосервисе 2 подъемника.

В табл. 1 представлены значения вероятности возникновения необходимости в выполнении работ по ТО и ремонту автомобиля.

Таблица 1

Вероятности возникновения необходимости в ТО и ремонте автомобиля

Вид работ	Вероятность
ТО и ремонт двигателя	0,17
Замена моторного масла	0,56
Замена ГРМ	0,14
Регулировка клапанов	0,07
Ремонт головки блока цилиндров (ГБЦ)	0,05
Другой ремонт двигателя	0,18
Ремонт выхлопной системы	0,1
Замена впускных/выпускных коллекторов	0,11
Замена глушителя	0,18
Замена каталитического нейтрализатора	0,26
Замена сажевого фильтра	0,23
Сварочные работы	0,22
ТО и ремонт КПП, трансмиссии	0,15
Замена масла КПП	0,33
Ремонт МКПП	0,09
Ремонт АКПП	0,2
Ремонт вариатора	0,2
Ремонт DSG	0,18
ТО и ремонт тормозной системы	0,18
Замена тормозных колодок, дисков	0,31

Окончание табл. 1

Замена тормозной жидкости	0,38
Ремонт тормозных суппортов	0,15
Замена вакуумного усилителя тормозов	0,05
Другой ремонт	0,11
Ремонт ходовой части	0,22
Замена амортизаторов	0,15
Замена втулок стабилизатора	0,28
Замена шаровых опор, сайлентблоков	0,22
Замена ступичных подшипников	0,17
Другой ремонт	0,18
Ремонт автоэлектрики	0,18
Ремонт стартера	0,23
Ремонт генератора	0,23
Ремонт стеклоподъемников	0,11
Установка автосигнализации	0,25
Другой ремонт	0,18

Количество персонала, работающего в автосервисе, приведено в табл. 2. Время приема и обработки приемщиком заявки на ТО или ремонт задано

треугольным распределением в минутах triangular(5, 7, 15). Время на оказание услуг по возврату автомобиля задано таким же треугольным распределением.

Таблица 2

Количество персонала, работающего в автосервисе

Персонал	Кол-во, чел.
Приемщик	1
Автослесари	2
Электрики	1
ВСЕГО	4

Среднее время поиска неисправности (диагностирования) задано треугольным распределением и указано в табл. 3.

Таблица 3

Среднее время проведения диагностирования

Вид работ	Среднее значение, ч	Минимальное значение, ч	Максимальное значение, ч
Диагностирование двигателя	25	20	30
Диагностирование выхлопной системы	12	10	15
Диагностирование КПП, трансмиссии	22	20	30
Диагностирование тормозной системы	15	10	17
Диагностирование ходовой части	18	15	20
Диагностирование автоэлектрики	22	15	30

Среднее время выполнения необходимых операций по ТО и ремонту также задано треугольным распределением и указано в табл. 4.

Таблица 4

Среднее время выполнения необходимых работ по ТО и ремонту

Вид работ	Среднее значение, ч	Минимальное значение, ч	Максимальное значение, ч
ТО и ремонт двигателя			
Замена моторного масла	0,6	0,5	0,8
Замена ГРМ	1,5	1,0	2,0
Регулировка клапанов	1,0	0,8	1,5
Ремонт головки блока цилиндров (ГБЦ)	4,6	3,8	8,0
Другой ремонт двигателя	12,0	1,0	22,0
Ремонт выхлопной системы			
Замена впускных/выпускных коллекторов	1,6	0,8	2,0
Замена глушителя	0,8	0,5	1,3
Замена каталитического нейтрализатора	0,4	0,3	0,5

Замена сажевого фильтра	0,5	0,4	0,6
Сварочные работы	1,3	1,0	2,5
ТО и ремонт КПП, трансмиссии			
Замена масла КПП	0,5	0,4	0,6
Ремонт МКПП	6,8	5,5	9,0
Ремонт АКПП	7,6	5,5	12,0
Ремонт вариатора	8,2	5,5	13,0
Ремонт DSG	9,5	6,5	18,0
ТО и ремонт тормозной системы			
Замена тормозных колодок, дисков	0,9	0,6	1,5
Замена тормозной жидкости	0,6	0,5	0,8
Ремонт тормозных суппортов	1,6	1,4	2,2
Замена вакуумного усилителя тормозов	1,3	1,2	1,5
Другой ремонт	1,5	0,5	3,5
Ремонт ходовой части			
Замена амортизаторов	2,6	1,8	4,0
Замена втулок стабилизатора	0,8	0,4	1,0
Замена шаровых опор, сайлентблоков	0,8	0,4	1,1
Замена ступичных подшипников	1,4	1,2	2,0
Другой ремонт	3,5	0,4	6,0
Ремонт автоэлектрики			
Ремонт стартера	1,5	1,0	2,5
Ремонт генератора	1,7	1,0	2,5
Ремонт стеклоподъемников	1,2	1,0	1,3
Установка автосигнализации	2,8	2,0	3,5
Другой ремонт	2,3	1,0	3,0

Полученная имитационная модель позволяет, изменяя варьируемые параметры, например количество приемщиков, автомехаников и других работников, время выполнения различных операций, исследовать процесс обслуживания автомобилей в автосервисе, оптимизировать режимы работы автосервиса и рассчитывать другие характеристики.

Для исследований задана работа имитационной модели в течение года.

Полученные в результате эксперимента данные приведены в табл. 5–6.

По результатам анализа полученных данных можно отметить высокую загруженность автослесарей и подъемников в автосервисе: 79 %. Высокая загруженность автослесарей и подъемников вызывает большое количество упущенных заказов (78 за год), а также большую максимальную длину очереди ожидания выполнения заказа (15 ед.) за год имитации работы автосервиса.

Таблица 5

Загруженность персонала в базовом варианте

Персонал	Кол-во, чел.	Загруженность, %
Приемщик	1	25
Автослесари	2	79
Электрики	1	37
ВСЕГО	4	

Таблица 6

Данные статистики в базовом варианте

Параметр	Значение
Среднее время ожидания выполнения заказа, ч	1,2
Максимальное время ожидания выполнения заказа, ч	18
Максимальная длина очереди ожидания выполнения заказа, ед.	15
Количество упущенных заказов, ед.	78
Загруженность подъемников, %	79

Для оптимизации процесса обслуживания автомобилей в автосервисе предлагается следующий вариант: увеличить количество автослесарей с 2 чел. до 3 чел. и увеличить количество подъемников в

автосервисе с 2 ед. до 3 ед. Как и в базовом варианте, в ускоренном режиме задана имитация работы автосервиса в течение года. Полученные в результате имитационного эксперимента данные приведены в табл. 7–8 и на рис. 3–4.

Таблица 7

Загруженность персонала в новом варианте

Персонал	Кол-во, чел.	Загруженность, %	Снижение загруженности, %
Приемщик	1	26	-1
Автослесари	3	59	20
Электрики	1	37	0
ВСЕГО	5		

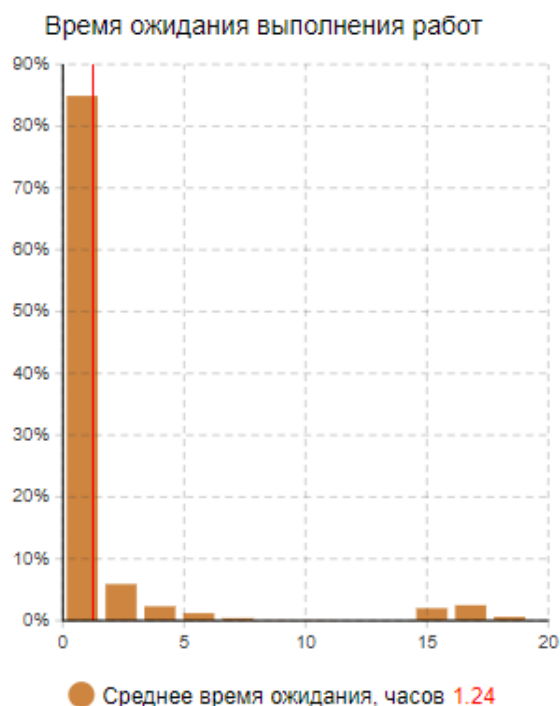
Таблица 8

Данные статистики в новом варианте

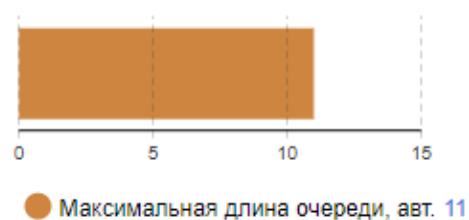
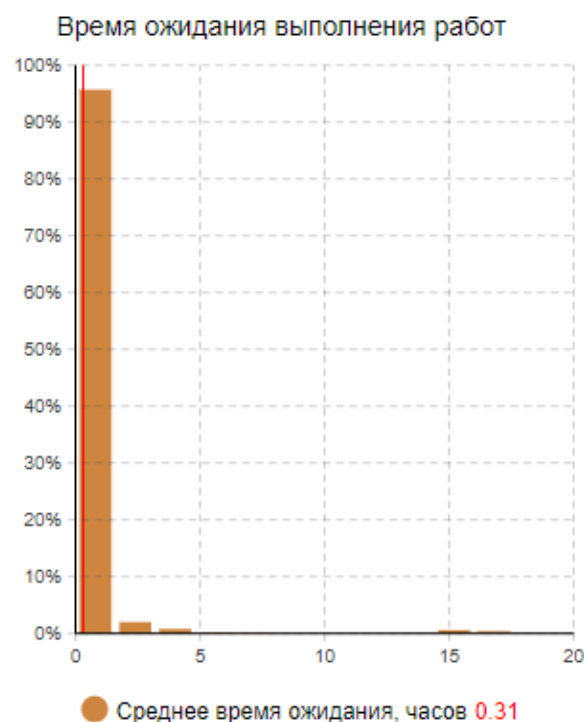
Параметр	Значение	Улучшение показателя, %
Среднее время ожидания выполнения заказа, ч	0,3	75,0
Максимальное время ожидания выполнения заказа, ч	18	0,0
Максимальная длина очереди ожидания выполнения заказа, ед.	11	26,7
Количество упущенных заказов, ед.	5	93,6
Загруженность подъемников, %	59	20,0



Рис. 3. Загруженность ресурсов автосервиса: *а* – базовый вариант;
б – новый вариант



a



б

Рис. 4. Статистика по времени ожидания выполнения ТО и ремонта автомобилей: *a* – базовый вариант; *б* – новый вариант

Анализ сравнения результатов моделирования в базовом и новом вариантах показывает, что при увеличении количества автослесарей с 2 чел. до 3 чел. и при увеличении количества подъемников с 2 ед. до 3 ед. их загруженность снизится на 20 %; среднее время ожидания выполнения заказа сократится на 75 %; максимальная длина очереди ожидания выполнения заказа сократится на 26,7 %; количество упущенных заказов сократится на 93,6 %.

ВЫВОДЫ

Таким образом, имитационное моделирование обслуживания автомобилей в автосервисе позволяет оптимизировать его работу. На основе статистических данных за определенный период с использованием имитационной модели можно спрогнозировать загруженность ресурсов автосервиса, время обслуживания клиентов, количество упущенных заявок на ТО и ремонт. Полученные результаты позволят принять управленческие решения и повысить экономическую эффективность функционирования автосервисного предприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Математическое моделирование дистрибьюторских сетей автосервиса / А.А. Алексеев, С.А. Ширяев, В.А. Гудков, Д.П. Гранин. – Текст : непосредственный // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. – 2013. – Т. 6, № 10 (113). – С. 47–50.
2. **Боев, В.Д.** Компьютерное моделирование: пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в Anylogic / В.Д. Боев. – Санкт-Петербург: ВАС, 2014. – 432 с. – Текст : непосредственный.
3. **Бугримов, В. А.** Оценка адекватности имитационной модели системы управления предприятия автосервиса / В.А. Бугримов, А.В. Кондратьев, В.И. Сарбаев. – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – № 2 (61). – С. 124–131.
4. Статистическая основа имитационного моделирования системы управления запасами предприятия автосервиса / В.А. Бугримов, А.В. Кондратьев, В.И. Сарбаев, В.В. Бородулин. – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2017. – № 1 (56). – С. 132–138.
5. **Гринченко, А.В.** Разработка модели обслуживания автомобилей на автозаправочной станции города Липецка в среде Anylogic / А.В. Гринченко, А.А. Коростелев. – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2021. – № 1 (72). – С. 111–116.
6. **Гринченко, А.В.** Моделирование городского автобусного маршрута в Anylogic / А.В. Гринченко, Т.Р. Антонова. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2019. – № 2 (40). – С. 58–64.
7. **Гринченко, А. В.** Разработка модели автозаправочной станции в Липецке в среде Anylogic / А.В. Гринченко, А.А. Коростелев. – Текст : непосредственный // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2019: материалы Международной научно-практической конференции: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН. – Санкт-Петербург: Изд-во Института проблем транспорта. – 2019. – С. 270–274.
8. **Данилов, И.Д.** Программные продукты для имитационного моделирования в логистике / И.Д. Данилов. – Текст : непосредственный // Вопросы студенческой науки. – 2017. – № 16 (16). – С. 134–139.
9. **Зими́на, Л. В.** Имитационное моделирование как инструмент поддержки принятия управленческих решений / Л.В. Зими́на. – Текст : непосредственный // Образование и наука без границ: фундаментальные и прикладные исследования. – 2018. – № 7. – С. 156–162.
10. **Исраилова, С.Т.** Основные аспекты имитационного моделирования бизнес-процессов предприятия с помощью сетей Петри и агентного моделирования / С.Т. Исраилова, А.А. Муханова, А.А. Исмаилова. – Текст : непосредственный // Новости науки Казахстана. – 2021. – № 1 (148). – С. 1–8.
11. Имитационное моделирование работы дорожно-эксплуатационной службы / В.А. Корчагин, С.А. Ляпин, В.Э. Клявин, В.В. Ситников. – Текст : непосредственный // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. – № 3 (49). – С. 43–49.
12. **Попова, К.В.** Применение имитационных моделей для совершенствования процессов автосервиса / К.В. Попова, И.В. Макарова. – Текст : непосредственный // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального

использования. – 2016. – Т. 3, № 1 (4). – С. 110–114.

13. **Тимченко, В.С.** Имитационная модель автосервиса / В.С. Тимченко. – Текст : непосредственный // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2015. – Т. 1. – С. 138 –141.

14. **Фялковский, Е.Е.** Использование имитационного моделирования для решения задач реинжиниринга бизнес-процессов в среде моделирования Anylogic / Е.Е. Фялковский. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 67 – 75.

Сведения об авторах:

Гринченко Александр Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры управления автотранспортом, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

E-mail: grinchav@mail.ru

Погодина Елена Константиновна
студентка 4 курса факультета инженеров транспорта Липецкого государственного технического университета,

Липецкий государственный технический университет.
398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

15. **Хабибуллин, Р.Г.** Имитационное моделирование автосервиса / Р.Г. Хабибуллин, И.В. Макарова. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2008. – Т. 6, № 3 (23). – С. 110 – 115.

Information about the authors:

Grinchenko Alexander Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Motor Transport Management of Lipetsk State Technical University.

Lipetsk State Technical University
398055 Lipetsk, Moskovskaya str., 30

E-mail: grinchav@mail.ru

Pogodina Elena Konstantinovna

4th year student of the Faculty of Transport Engineers of Lipetsk State Technical University.

Lipetsk State Technical University
398055 Lipetsk, Moskovskaya str., 30

И.В. ЖИЛИН, О.В. АНАНЬЕВ

**К ВОПРОСУ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ
АВТОСЕРВИСНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В работе сформулированы назначение и особенности функционирования автосервисных предприятий в части выполнения ими работ по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей. Представлены особенности текущего состояния и развития рынка автосервисных услуг. Анализ рынка затрагивает региональный аспект. Рассмотрены особенности методики технологического проектирования автосервисных предприятий. Исследованы необходимые для проектирования исходные данные. Показана неточность некоторых исходных данных, приводящая к расхождению с другими данными. Предложены варианты решения этой проблемы.

Ключевые слова: автосервис, технологическое проектирование, процессы технического обслуживания и ремонта, моделирование.

I.V. ZHILIN, O.V. ANANYEV

ON TECHNOLOGICAL DESIGN OF CAR SERVICE ENTERPRISES

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The paper formulates the purpose and peculiarities of car service enterprise operation in terms of car maintenance and repair work. The current state and dynamics of the car service market are presented. Market analysis concerns the regional aspect. The features of methods for car service enterprise technological design are considered. The initial data necessary for the design are considered. The inaccuracy of some initial data leading to discrepancies with other data is shown. Solutions to this problem are proposed.

Keywords: car service, technological design, maintenance and repair processes, modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Автосервисные предприятия являются важной частью автотранспортного комплекса страны. Их назначение – обеспечение работоспособного технического состояния автомобильной техники. В первую очередь это происходит за счет эффективного для предприятия и приемлемого для пользователя выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей.

Можно считать, что в нашей стране сформирована целая автосервисная отрасль, оказывающая услуги технического свойства по запросам автовладельцев и действующая на основе

рыночных экономических принципов. Естественно, что система автотехобслуживания развивается в соответствии с состоянием автомобильного парка. Чем больше по численности парк автомобилей, технически сложнее автомобили, быстрее необходимо вернуть автомобиль в работоспособное состояние, тем больше спрос на автосервисные услуги.

В соответствии с развитием парка автомобилей развивается и автосервисная отрасль, в ней появляются, обновляются и действуют разнообразные автосервисные предприятия. Как известно, они могут отличаться следующими признаками: количество оказываемых услуг

(комплексные, специализированные); широта охвата техники по типам, маркам и моделям (универсальные, фирменные); место расположения (городские, дорожные, передвижные); мощность (количество рабочих постов или годовым объемом работ) и пр.

Рынок автосервисных услуг отличается наличием большого числа игроков. Так, в настоящее время (июнь 2021 года) в г. Липецке и ближайшей округе насчитывается несколько сотен автосервисных предприятий. Сайты-агрегаторы выдают от 250 до 340 автосервисных предприятий. Скорее всего, это не полный список предприятий. Среди них вряд ли есть те, которые обладают рыночной властью и диктуют остальным свои условия, рынок автосервисных услуг характеризуется совершенной конкуренцией. Увеличение прибыли предприятия в этих условиях возможно только на основе снижения издержек производства.

С точки зрения развития автосервисной отрасли также естественен уход из нее части автосервисных предприятий. Это характерно для предприятий, которые не отвечают требованиям рынка, не в состоянии удовлетворить потребности потребителей автосервисных услуг, проигрывают в жесткой конкурентной борьбе. Тогда на их место приходят существующие или новые предприятия. В этом случае актуальность приобретает технологическое проектирование.

Технологическое проектирование автосервисных предприятий является важной частью работы специалиста при их создании и совершенствовании. В результате определяется структура и мощность создаваемого автосервисного предприятия. Кроме этого, технологическое проектирование важно при обучении студентов. В ходе его проведения студенты получают углубленное представление о строении и функционировании автосервисного предприятия.

Основным методическим и нормативным документом при

технологическом проектировании на сегодня является ОНТП-01-91 [10]. Как видно, этот документ достаточно устарел (1991 год), когда парк автомобилей и автосервисная отрасль находились совершенно в другом, чем сегодня, состоянии. В первой части ОНТП-01-91 приводится методика технологического проектирования технической службы автотранспортных предприятий (АТП). Для этих предприятий процедура проектирования характеризуется достаточной системностью и непротиворечивостью. Вторая часть ОНТП-01-91 посвящена технологическому проектированию станций технического обслуживания автомобилей. Разница между функционированием этих двух типов предприятий в первую очередь заключается в том, что на автомобилях АТП воздействия технического обслуживания (ТО) делятся на ТО-1, ТО-2, ЕО (ежедневное) и СО (сезонное), причем эти работы в большей степени являются обязательными. Для автомобилей граждан нет единой системы ТО и ремонта. И эти работы касательно ТО не являются обязательными.

Технологическое проектирование автосервисных предприятий – это, как известно, комплекс последовательных и взаимосвязанных этапов, которые подробно описаны в учебной и методической литературе:

- 1) Определение годового объема основных производственных работ.
- 2) Распределение работ по видам и месту выполнения.
- 3) Определение числа рабочих постов.
- 4) Определение численности персонала.
- 5) Принятие решения по производственной структуре предприятия (подразделения, участки, отделения), а также формирование вспомогательных и обслуживающих служб.
- 6) Принятие планировочных решений по производственным корпусам и территории предприятия в целом.
- 7) Формирование структуры управления предприятием.

Одним из самых важных этапов является первый, связанный с определением годового объема работ предприятия по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей. От него зависят все последующие результаты и общий итог проектирования. И уже на этом этапе возникают сложности и неточности.

Так, объем основных производственных работ определяется произведением количества обслуживаемых автомобилей, среднегодового пробега автомобиля и нормативной удельной трудоемкости совокупно ТО и ремонта на единицу пробега.

Обычно в качестве исходных данных в учебном процессе задается количество автомобилей, условно прикрепленных (т.е. обслуживаемых и ремонтируемых) на автосервисном предприятии за год. В противном случае его можно определить. В учебной литературе предлагается следующий способ. Берется общее количество автомобилей в соответствующей агломерации. Так, для г. Липецка с населением 500 тыс. жителей и уровнем автомобилизации 310 автомобилей на тысячу жителей получается 155 тыс. автомобилей.

Далее определяется количество автомобилей, владельцы которых пользуются услугами автосервисов. По разным источникам – это 60 %, 75 % или что-то подобное. Здесь виден большой разброс значений и эти данные никак не обосновываются. За рамками рекомендаций этих источников остается вопрос о том, сколько раз за год заезжает автомобиль в автосервис, хотя в ОНТП-01-91 говорится о том, что два раза в год. Приняв долю, равную 75 %, получим примерно 116 тыс. автомобилей, пользующихся услугами автосервиса.

И кроме того, рыночная доля, которую займет проектируемое предприятие на рынке автосервисных услуг. А вот здесь вообще отсутствуют всякие рекомендации. Если принять от 1 до 2 % (а это вполне реально в условиях совершенной конкуренции на рынке автосервисных

услуг), то получим примерно от 1,2 до 2,3 тысяч автомобилей для проектируемого предприятия. Как видно разброс очень большой. Однако и процент вхождения в рынок может быть совсем другим, поскольку на него воздействует очень большое количество факторов, трудно поддающихся формализации.

Средний годовой пробег автомобилей – величина достаточно точная. Имеется множество соответствующих исследований и статистических данных. Так, для легковых автомобилей значение среднего годового пробега составляет 16 – 17 тыс. км.

И, наконец, норматив удельной трудоемкости ТО и ремонта. Для легковых автомобилей в эталонных условиях работы автосервисного предприятия можно принять 2,5 человеко-часа на тысячу км пробега автомобиля.

Тогда в соответствии с ОНТП-01-91 в год среднему легковому автомобилю суммарно потребуется работ по ТО и ремонту в автосервисе в объеме $16 \times 2,5 = 40$ чел.·ч. Приняв число заездов в год равное двум, получим $40/2 = 20$ чел.·ч на один заезд. И это достаточно крупные трудозатраты, которые характерны для серьезной поломки.

Рассмотрим эту ситуацию с другой стороны. Так, Г.М. Напольский [9] характеризует входящий поток требований (автомобиле-заездов), разделяя его на четыре группы:

- 1 группа: трудоемкость не более 2 чел.·ч с долей 60 %;
- 2 группа: трудоемкость не более 4 чел.·ч с долей 20 %;
- 3 группа: трудоемкость не более 8 чел.·ч с долей 13 %;
- 4 группа: трудоемкость более 8 чел.·ч с долей 7 %.

Представим эти данные как табличное распределение случайной величины (табл. 1), соответствующей трудозатратам одного автомобиле-заезда в автосервис. Трудоемкость в каждой группе, кроме четвертой, соответствует срединному значению интервала

Таблица 1

Распределение трудоёмкости автосервисных работ в потоке требований

Группа	1	2	3	4
Трудоёмкость, чел.·ч	1	3	6	30
Доля	0,6	0,2	0,13	0,07

Исходя из этих данных, получим 4,08 чел.·ч. на один автомобиле-заезд. А это сильно не сочетается с определенным выше значением в 20 чел.·ч.

По другим сведениям, распределение можно представить следующим образом.

Таблица 2

Распределение трудоёмкости автосервисных работ в потоке требований

Группа	1	2	3
Трудоёмкость, чел.·ч	1,5	10	30
Доля	0,6	0,25	0,15

ВЫВОДЫ

Исходя из этих данных, получим 7,9 чел.·ч. на один автомобиле-заезд. Это также сильно не сочетается с определенным выше значением в 20 чел.·ч, хотя и ближе к нему, чем предыдущее значение.

В любом случае мы имеем явное несовпадение результатов расчетов, проведенных разными способами, для автосервисного предприятия. Поэтому необходима коррекция способа и скорее всего того, что является классическим и нормативно закрепленным в ОНТП-01-91. Скорее всего его данные устарели и не соответствуют изменившейся ситуации как по парку автомобилей, так и по системе автотехобслуживания. Как минимум, норматив удельной трудоёмкости работ по ТО и ремонту автомобилей должен быть сокращен в два раза. Тогда результаты расчета годового объема работ будут соответствовать при разных способах задания исходных данных. Тем не менее точность этих результатов оставляет

желать лучшего. Причина – это отсутствие точности некоторых исходных данных и широкий разброс других исходных данных. Все это понижает прогностическую ценность проектной модели будущего автосервиса. Кроме того, можно предложить другую методику технологического проектирования. В первую очередь можно задать число рабочих постов, т.е. определиться с мощностью будущего автосервисного предприятия. Затем на основе числа постов и показателей режима их работы можно определить годовой объем работ. Оставшиеся этапы технологического проектирования выполняются в рассмотренном выше порядке.

Такая методика хороша также тем, что инвестор, как правило, располагает ограниченными финансовыми ресурсами и заранее, хотя бы приблизительно, оценивает размер будущего автосервисного предприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Аванесова, Г.А.** Сервисная деятельность: Историческая и современная практика, предпринимательство, менеджмент: учебное пособие / Г.А. Аванесова. – Москва: Аспект Пресс, 2012. – 320 с. – Текст : непосредственный.
2. **Виноградова, М. В.** Организация и планирование предприятия в сфере сервиса: учебное пособие /

М.В. Виноградова. – 4-е издание, перераб. и доп. – Москва: Дашков и Ко, 2007. – 448 с. – Текст : непосредственный.

3. **Грибут, И.Э.** Автосервис: станции технического обслуживания автомобилей : учебник / И.Э. Грибут, В.М. Артющенко, Н.П. Мазаева. – Москва: Альфа-М, 2008. – 480 с. – Текст : непосредственный.

4. **Жилин, И.В.** Имитационное моделирование функционирования автосервисного предприятия / И.В. Жилин

– Текст : непосредственный // Вестник ЛГТУ. – № 2(40). – 2019. – С. 51–58.

– Текст : непосредственный.

5. **Долгополов, Н.В.** Учет случайных факторов при исследовании производственных процессов / Н.В. Долгополов, И.В. Жилин – Текст : непосредственный // Транспорт. Тенденции развития современной науки: материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. В 2 частях. Ч. 1. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2018. – 199 с.

6. **Жилин, И.В.** Программирование элементов случайных процессов при имитационном моделировании / И.В. Жилин. – Текст : непосредственный // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте ИТТ'2018 : материалы I международной научно-практической конференции, 12-13 декабря 2018 г. В 2 т. Т. 1. – Липецк: ЛГТУ, 2018. – С. 39–43.

7. Случайные процессы на транспорте: учебное пособие с грифом Министерства образования РФ / В.А. Корчагин, В.И. Сорокин, П.Г. Коваленко, И.В. Жилин. – Липецк: ЛГТУ, 1999. – 192 с. – Текст : непосредственный.

8. Транспортная логистика: учебник для транспортных вузов / Л.Б. Миротин, Ы.Э. Ташбаев, В.А. Гудков [и др.]. – Москва : Экзамен, 2007. – 512 с. – Текст : непосредственный.

9. **Напольский, Г.М.** Курсовое проектирование по дисциплине «Производственно-техническая инфраструктура предприятий автомобильного сервиса»: учебное пособие / Г.М. Напольский, Г.Ш. Муравкина, А.А. Солнцев. – Москва: МАДИ. 2010. – 43 с. – Текст : непосредственный.

10. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий автомобильного транспорта (ОНТП-01-91). – Москва. Гипроавтотранс, 1991. – 184 с. – Текст : непосредственный.

11. **Ряховский, А.А.** Основные принципы формирования рынка автосервисных услуг в крупном городе А.А. Ряховский. – Текст : непосредственный // Наука – индустрии сервиса: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Москва : МГУ сервиса, 2002. – 212 с.

12. Системы, технологии и организация услуг в автомобильном сервисе : учебник для студенческих учреждений высшего профессионального образования / А.Н. Ременцов, Ю.Н. Фролов, В.П. Воронов [и др.]; под ред. А.Н. Ременцова, Ю.Н. Фролова. – 2-е изд., стер. – Москва : Академия, 2014. – 480 с. – Текст : непосредственный.

13. **Терентьев, А.В.** Определение производственной программы по техническому обслуживанию и текущему ремонту для подвижного состава иностранного производства А.В. Терентьев – Текст : электронный // Бюллетень транспортной информации: интернет-журнал. – № 6 (156) – Москва: ИТАР-ТАСС, 2008. – Режим доступа: URL: http://www.natrans.ru/upload/news/Terentjev_bti_june_2008.pdf, свободный (дата обращения: 14.05.2016).

14. **Капустин, Н.М.** Технологическое проектирование станций технического обслуживания автомобилей : учебное пособие для вузов по специальности «Эксплуатация транспортных средств» / Н.М. Капустин; Белорусский национальный технический университет. – Минск : БНТУ, 2003. – 117 с. – Текст : непосредственный.

15. **Ткаченко, М.С.** Особенности применения моделирования в автотранспортном комплексе / М.С. Ткаченко, И.В. Жилин. – Текст : непосредственный // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов ЛГТУ. Ч.2. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2016. – С. 316–318.

Сведения об авторах:

Жилин Игорь Викторович

кандидат технических наук,
доцент кафедры управления
автотранспортом,
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

e-mail: zhilininiv@mail.ru

Ананьев Олег Владимирович

студент гр. А-п-18-1.
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская,
д. 30.

e-mail: oleg.ananьев.00@mail.ru

Information about the authors:

Zhilin Igor Viktorovich

Lipetsk State Technical University.
Candidate of Technical Sciences.
Associate Professor of the Department of
Motor Transport Management
Address: Lipetsk, Moskovskaya str., 30.
e-mail: zhilininiv@mail.ru

Ananyev Oleg Vladimirovich

Lipetsk State Technical University
Candidate of Technical Sciences.
Address: Lipetsk, Moskovskaya str., 30.
Student gr. A-p-18-1.
e-mail: oleg.ananьев.00@mail.ru

DOI 10.53015/23049235_2021_3_79

УДК 625.7

Б.А. БОНДАРЕВ, А.Б. БОНДАРЕВ, В.К. ЖИДКОВ, П.В. БОРКОВ

СОВРЕМЕННЫЕ РАЗМЕТОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: Исследование посвящено изучению проблемы использования эффективных разметочных материалов, обеспечивающих высокие технологические и функциональные качества. В настоящей статье освещаются вопросы повышения видимости дорожной разметки, а также применение современных наиболее безопасных разметочных материалов. Исходя из наблюдений, был сделан вывод, что увеличить световозвращающую способность дорожной разметки можно исключив пустоты на границе отражающей полусферы. Чтобы предотвратить образование пустот между шариком и материалом, необходимо предварительно окрашивать стеклошарики аппрет-краской, а при нанесении разметки – удалять с верхней ее области часть материала, чтобы позволить лучам света проходить сквозь стекло и без препятствий отражаться. В таком случае коэффициент световозвращения будет максимальным сразу после удаления краски.

Ключевые слова: разметочный материал, стеклошарик, термопластик, автомобильная дорога.

MODERN ROAD MARKING MATERIALS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The research is devoted to the problem of using effective marking materials with high technological and functional qualities. This article highlights the issues of increasing the visibility of road marking, as well as the application of modern non-hazardous marking materials. Observation data make it possible to conclude that the retroreflective ability of road marking can be increased by eliminating voids at the border of the reflecting hemisphere. In order to prevent the formation of voids between the bead and the material, it is necessary to pre-paint the glass beads with appret paint, and when applying the marking, it is necessary to remove some material from its upper part to allow light rays to pass through the glass and be reflected without obstacles. In this case, the retroreflection coefficient will be maximum immediately after removing the paint.

Keywords: marking material, glass bead, thermoplastic, automobile road.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших вопросов обеспечения безопасности на автомобильных дорогах является транспортно-эксплуатационное состояние различных дорожных объектов и сооружений [1-5]. При этом особого внимания заслуживает проблема использования эффективных разметочных материалов, обеспечивающих высокие технологические и функциональные качества в течении длительного периода эксплуатации [6-9].

Проблема улучшения видимости горизонтальной разметки на проезжей части автомобильной дороги на сегодняшний день является наиболее актуальной. Не так давно существовало лишь два подхода к увеличению видимости: первый – увеличение яркости и контрастности разметки увеличением содержания TiO_2 ; второй – увеличение количества стеклошариков верхней посыпки. Однако эти способы являются крайне затратными и не столь эффективными.

ТЕОРИЯ

Опираясь на исследования, приведенные в [11,15], обратим внимание на схему прохождения света через стеклошарик (рис. 1), обнаружим, что направленный в стеклошарик луч света должен отражаться с явной поляризацией, но этого не происходит. Из чего делаем вывод, что, между погруженными в

разметку стеклошариками и самой разметкой образуются пустоты, в которых луч света и рассеивается.

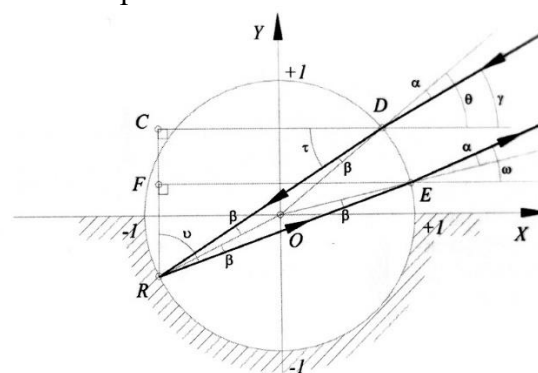


Рис. 1. Схема прохождения луча света через стеклошарик

Исходя из наблюдений, был сделан вывод, что увеличить световозвращающую способность можно исключив пустоты на границе отражающей полусферы. Учитывая требования ГОСТ 32953-2014 при сухом покрытии для класса R5 световозвращение должно быть не менее $300 \text{ мкд} \times \text{лк}^{-1} \times \text{м}^2$.

Высокие показатели световозвращения должны сохраняться весь период эксплуатации разметки, особенно это касается толстослойных покрытий (холодный пластик). Пигментированные аппреты – краски различных цветов с хорошей укрывистостью – являются наиболее актуальными материалами при устройстве дорожной разметки. Требования же по укрывистости и световозвращению являются наиболее

существенными, так как окраску листового стекла можно производить за несколько проходов, а вот стеклошарики более требовательны – их необходимо укрывать за один проход и за один слой, добиваясь лучшего сцепления шариков с материалом.

Стеклошарики производят из обычного стекла с содержанием SiO_2 до 73 %. На поверхности стекла находятся гидроксильные группы OH- , а также влага, удаляемая под воздействием высоких температур.

Для того чтобы предотвратить образование пустот между шариком и материалом, было решено предварительно окрашивать стеклошарики аппрет-краской, а при нанесении разметки – удалять с верхней ее поверхности часть материала, чтобы позволить лучам света проходить сквозь стекло и без препятствий отражаться. В таком случае коэффициент световозвращения будет максимальным сразу после удаления краски.

Для удаления краски наиболее рационально использовать струю воды, подающуюся под давлением. Вода не будет разрушать верхние слои разметки. Окраску стеклошариков и их сушку проводят в один проход. При экспериментальном подтверждении данных наблюдений использовались шарики, окрашенные в желтый и белый цвета.

Стеклошарики белого цвета ручным способом рассыпали на поверхность пластика толщиной 3 мм. После этого образцы обрабатывали струей воды и сушили. Световозвращение для таких образцов достигало значения в $943 \text{ мкд} \times \text{лк}^{-1} \times \text{м}^2$. Для светлых покрытий возможно окрашивание стеклошариков в черный цвет для увеличения контрастности разметки.

Данная технология также может применяться при укладке щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА) или обычного асфальтобетона. Рассыпая некоторое количество шариков на

поверхности еще не остывшего покрытия, можно добиться эффекта, описанного выше. Покрытие будет отражать свет от фар. Таким образом очень удобно размечать краевые полосы, либо осуществлять разметку на дорогах низших категорий или улицы местного значения. Также данную технологию можно применять при устройстве дублирующих знаков на покрытии (рис. 2).

Удачным применением также стало бы нанесение таких шариков на поверхность покрытия после пешеходного перехода, чтобы идущий по «зебре» человек контрастировал на фоне отраженного света.

Говоря о разметочных материалах в целом, следует упомянуть, что в России за последние 15 лет качество применяемых материалов и изделий значительно выросло. Исходя из имеющегося опыта использования и большого количества лабораторных исследований, появилась возможность наиболее рационального подбора того или иного материала для разных условий эксплуатации. В качестве эксперимента в России на добровольной основе в некоторых регионах применяется документ ТР ТС 014/2011 [10], который отражает в себе европейские особенности нанесения разметки.



Рис. 2. Дублирующий знак на проезжей части автомобильной дороги

Дорожная разметка, как правило, применяется на дорогах с усовершенствованным покрытием. После ее нанесения и высыхания материал

подвергается физическому и химическому воздействию с целью определения его эксплуатационных свойств.

Наиболее распространены такие типы разметочного материала:

- краски (эмали);
- термопластики;
- холодные пластики;
- штучные формы и полимерные ленты.

Из перечисленных выше материалов наибольшее распространение получили краски (эмали) благодаря своей невысокой стоимости. Однако их низкая продолжительность функциональной долговечности и низкая световозвращающая способность заставляет от данного материала отказываться.

Термопластики же – более долговечный материал, состоящий из гранул, порошка, расплавленного и нанесенного на слой асфальтобетона. Для нанесения термопластиков необходимо «вываривание» материала, перемещение его в горячем состоянии с помощью специальных машин на объект и последующее нанесение на поверхность покрытия. Данная особенность термопластиков увеличивает время на нанесение разметки и повышает опасность производства работ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Наиболее рациональным на наш взгляд является применение холодного пластика, который представляет собой материал на основе реакционноспособных полимеров, содержащий пигменты и наполнители, отверждаемые в результате химической реакции. Для нанесения этого материала часто используют универсальные машины, применяемые при работе с эмалями [12].

Для холодных пластиков минимальное значение плотности составляет $1,65 \text{ г/см}^3$. Массовая доля нелетучих веществ должна составлять не менее 92% во избежание попадания взвеси в дыхательные пути.

Холодные пластики универсальны. Их применяют как для разметки асфальтобетонных, так и

цементобетонных покрытий. Для холодных пластиков характерно «время живучести» – тот отрезок времени, за который возможно нанесение пластика и добавление в него стеклошариков.

Стеклошарики добавляют как во время приготовления, так и во время нанесения пластика на покрытие. Исходя из вышеизложенных выводов с увеличением светоотражающей способности шариков, этот параметр является крайне важным.

Холодные пластики наносят гравитационным, экструдерным методом распыления. Первый метод заключается в стекании материала под собственным весом через отверстия каретки при движении разметочной машины. Второй предполагает подачу материала под давлением, создаваемым шнековым механизмом. Методы же распыления и спрей-метод заключаются в нанесении разметки путем пневматического или гидравлического напыления. Однако нанесение холодных пластиков также возможно и ручным методом с использованием специальных шаблонов в случае поломки машины или оборудования.

Также неоспоримым преимуществом холодных пластиков является возможность использования их в качестве тактильной разметки на тротуарах и проезжей части (рис. 3). Такое применение холодного пластика значительно упрощает жизнь незрячим и слабовидящим людям, что в несколько раз повышает безопасность движения.

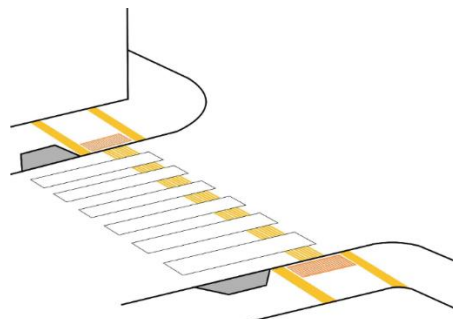


Рис. 3. Тактильная разметка пешеходного перехода

Для разметки проезжей части и пешеходных переходов также возможно применять различные полимерные ленты – заводские изделия, содержащие в себе световозвращающие элементы (рис. 4). Основным методом укладки подобных лент является их втапливание в свежееуложенное покрытие или слой износа при их температуре 50-70 °С. Наряду с холодными пластиками, полимерные ленты обладают высокой адгезией с материалом покрытия и схожим с асфальтобетоном коэффициентом сцепления, что существенно снижает аварийность на дорогах [13,14].



Рис. 4. Устройство временной разметки с помощью полимерных лент

Для ускорения нанесения разметки возможно применение штучных форм. Они обладают повышенной заметностью на дороге и позволяют сохранять движение по дороге в период укладки готовых форм. Но, к сожалению, из-за плохого сцепления с поверхностью покрытия используются в основном в качестве временной разметки.

Таким образом, можно уверенно утверждать, что использование композиционных разметочных материалов в сравнении с традиционными лакокрасочными материалами позволяет значительно повышать срок их службы и существенно экономить на ремонтно-восстановительных мероприятиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бондарев, Б.А.** Повышение транспортно-эксплуатационного состояния элементов мостовых сооружений / Б.А. Бондарев, А.Б. Бондарев, П.В. Борков. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2017. – № 5 (73). – С. 81 – 85.
2. **Бондарев, Б.А.** Оценка транспортно-эксплуатационного состояния мостовых сооружений на основе теории риска / Б.А. Бондарев, А.Б. Бондарев, П.В. Борков – Текст: непосредственный // Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (ТРАНСЭНЕРГОКОМ-2018): сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции. – 2018. – С. 269 – 273.
3. Повышение транспортно-эксплуатационного состояния мостовых сооружений при реконструкции и ремонте / Б.А. Бондарев, П.В. Борков, А.Б. Бондарев, А.В. Ключков. – Текст: непосредственный // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2017. – № 3 (23). – С. 13 – 17.
4. ОДН 218.0.006-2002. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог / Росавтодор. – Москва: Информавтодор, 2002. – 140с. – Текст : непосредственный.
5. **Новик, В.А.** Эксплуатационные свойства автомобильных дорог / В.А. Новик, Е.И. Бельский. – Текст: непосредственный // Alfabuild. – 2018. – №1 (3). – С. 65–75.
6. Computer vision-guided intelligent traffic signaling for isolated intersections / S.K. Kumaran, S. Mohapatra, D.P. Dogra [et al.] – Expert Systems with Applications, 134, С. 267–278, 2019. – Text: immediate.
7. Simulation study of vehicle travel time on route with signals considering comprehensive influencing factors / W. Lv, X. Zhou, Z. Fang [et al.] –

Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019. – Text : immediate.

8. **Fricker, J.D.** Modeling Pedestrian and Motorist Interaction at SemiControlled Crosswalks: The Effects of a Change from One-Way to Two-Way Street Operation / J.D. Fricker, Y. Zhang. – // Transportation Research Record. – 2019. – Text : immediate.

9. **Arker, Paul.** Les nouvelles caracteristiques et performances de la signalization routiere horizontale / Arker Paul. – Revue Generate des Routes et Aerodromes. – 2000. – № 782. – P. 34–36. – Text : immediate.

10. ТР ТС 014/2011. Технический регламент Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог». Утвержден Решением Комиссии Таможенного Союза от 18 октября 2011 года № 827. – Текст : непосредственный.

11. **Филиппов, Ф.В.** Повышение видимости дорожной разметки / Ф.В. Филиппов, Л.Т. Вяльченков. – Текст : непосредственный // Мир дорог. – 2018. – №107. – С. 53–55.

12. **Свежинский, В.Н.** Материалы и изделия для дорожной разметки / В.Н. Свежинский. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – №7. – 2011. – С. 47–50.

13. **Федотов, Г.А.** Изыскания и проектирование автомобильных дорог. Книга 1 / Г.А. Федотов, П.И. Поспелов. – Москва: Высшая школа, 2009. – 640 с. – Текст : непосредственный.

14. Технология и организация строительства автомобильных дорог. Дорожные покрытия / В. П. Подольский, П. И. Поспелов, А. В. Глагольев, А. В. Смирнов. – Москва: Издательский центр «Академия», 2012. – 304 с. – Текст: непосредственный.

15. **Neis, H.** Die Nachtsichtbarkeit von profilierten Fahrbahnmarkierungen bei Nässe und ihre Beurteilung / H. Neis.- Hamburg: Baumaschinen technik, 1986. – Text : immediate.

.

Сведения об авторах:

Бондарев Борис Александрович

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры строительного
материаловедения и дорожных
технологий,

Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская
д. 30.

lnsp-48@mail.ru

Бондарев Александр Борисович

кандидат технических наук, доцент
кафедры строительного
материаловедения и дорожных
технологий,

Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская
д. 30.

lnsp-48@mail.ru

Жидков Владимир Константинович

студент кафедры строительного
материаловедения и дорожных
технологий,

Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская
д. 30.

gidkov_vova_1999@mail.ru

Борков Павел Валерьевич

кандидат технических наук, доцент, декан
инженерно-строительного факультета,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская
д. 30.

borkovpv@@mail.ru

Information about authors:

Bondarev Boris Alexandrovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of "Building
Materials Science and Road Technologies"

Lipetsk State Technical University

398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30,

lnsp-48@mail.ru

Bondarev Alexander Borisovich

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of "Building
Materials Science and Road Technologies"

Lipetsk State Technical University

398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30

lnsp-48@mail.ru

Zhidkov Vladimir Konstantinovich

Student

Lipetsk State Technical University

398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30

gidkov_vova_1999@mail.ru

Borkov Pavel Valerievich

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Dean of the Faculty of Civil
Engineering

Lipetsk State Technical University

398055, Lipetsk, Moskovskaya str., 30

borkovpv@mail.ru

DOI 10.53015/23049235_2021_3_86

УДК 621.926.9

А. П. ЖИЛЬЦОВ¹, Д.А. ВЛАСЕНКО², А.А. ХАРИТОНЕНКО¹,
А.В. БОЧАРОВ¹, Н.Е. КОЗЕНКО¹

АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДРОБИЛОК АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ И АГЛОМЕРАТА

¹Липецкий государственный технический университет, Липецк

²Донбасский государственный технический университет, Алчевск

Аннотация: Повышение эффективности доменного процесса производства чугуна во многом определяется качеством подготовки шихты и, прежде всего, агломерата. Также существенным фактором является обеспечение требуемого состава по гранулометрии и снижение агломерационной мелочи в доменной шихте. Практический опыт применения дробилок при фракционной подготовке исходной шихты – флюсов, коксика в агломерационном производстве оказывает существенное влияние как на производительность процесса спекания шихтовых материалов, так и на газодинамику и скорость спекания, т.е. на физико-металлургические свойства агломерата. Поэтому совершенствование конструктивно-технологических параметров дробилок агломерационной шихты и агломерата является актуальной задачей. С этой целью проведены исследования и разработаны конструкции рабочих элементов дробилок. Разработана усовершенствованная конструкция ротора молотковой дробилки флюсов с комбинированным способом крепления молотков на оси подвеса ротора, направленная на повышение выхода годного продукта, а также разработана конструкция вала валковой дробилки кокса с наплавленными продольными и поперечными валиками. Это позволяет повысить эффективность захвата и дробления кокса. Наличие сетки из наплавленных поперечных и продольных валиков на бандаже вала снижает износ бандажей и увеличивает межремонтный период. Установлено, что типовые зубчатые дробилки горячего агломерата имеют существенные недостатки, связанные с несоответствием величин зазоров между колосниками производительности процесса дробления. Это приводит к низкой эффективности дробления и лишним энергетическим затратам. Разработана конструкция ротора с шевронным расположением зубьев звездочек и различным углом поворота относительно оси, что обеспечивает повышение эффективности дробления, снижение энергозатрат и содержания мелочи агломерата.

Ключевые слова: агломерационная шихта, агломерат, дробилка, конструктивные решения.

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF SINTERING MIXTURE AND SINTER CRUSHERS

1 Lipetsk State Technical University, Lipetsk
2 Donbass State Technical University, Alchevsk

Abstract: Increasing the blast furnace process efficiency is largely determined by charge preparation quality and, above all, sinter preparation quality. Another significant factor is for the mixture to meet the granulometric requirements and to reduce the sinter fine content in the blast furnace charge. The practical application of crushers in the fractional preparation of the initial charge – fluxes, fine coke – in sinter production has a significant impact both on the productivity of the charge sintering process and on the gas dynamics and sintering speed, i.e. on the physical and metallurgical properties of sinter. Therefore, an urgent task is to improve the structural and technological parameters of sintering mixture and sinter crushers. For this purpose, designs of crusher working elements have been researched and developed. An improved design has been developed of the flux hammer crusher rotor with a combined way of fixing hammers on the rotor suspension axis to increase the yield. A design of the coke roller crusher roller with fused longitudinal and transverse rollers has been developed. This increases the efficiency of coke capture and crushing. The presence of a grid of fused transverse and longitudinal rollers on the roll shell reduces the shell wear and increases the repair period. It is established that typical hot sinter gear crushers have significant disadvantages due to a misfit between the grate gaps values and the crushing process productivity. This leads to low crushing efficiency and unnecessary energy costs. A rotor design with a chevron sprocket teeth arrangement and a different rotation angle has been developed. This ensures an increase in crushing efficiency, a reduction in energy consumption and in fine sinter content.

Keywords: sintering mixture, sinter, crusher, design solutions.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение эффективности и качества подготовки шихты для производства агломерата доменного процесса обусловлено возрастающими требованиями производителей чугуна к качеству готового агломерата [1]. Также существенным фактором при этом является обеспечение требуемого состава по гранулометрии и снижение агломерационной мелочи (возврата) в доменной шихте [2 – 9].

Газодинамика спекания агломерата и процесс теплообмена в слоях спекаемой шихты в значительной мере определяется фракционным составом аглошихты, в т.ч. флюсов и топлива (кокса). Так, размер (крупность) флюсов в аглошихте определённым образом влияет на

производительность процесса спекания и физико-механические свойства агломерата. Снижение размера частиц известняка, добавляемого в шихту, требует меньшего времени на полное его разложение, и в этом случае показатели прочности и стойкости агломерата, полученного с использованием флюсов крупностью 0 – 1 и 0 – 3 мм, значительно выше по сравнению с показателями аглоспека, полученного с применением фракции 0 – 5 мм [10 – 13].

Не менее существенное влияние на показатели газодинамики и скорости спекания оказывает фракционный состав кокса в качестве топлива в аглошихте. Так, наличие более 15 % в топливной смеси фракции кокса более 3 мм ведёт к увеличению газодинамического сопротивления в слое горения и снижению скорости спекания. Это влияет на

уменьшение удельной производительности агломашины и увеличение мелких фракций агломерата (возврата). Также установлено, что уменьшение содержания фракции $-0,5$ мм в агломерационной шихте приводит к снижению расхода кокса в доменном процессе за счет повышения прочностных характеристик агломерата.

Поэтому обеспечение необходимой фракционности флюсов, топлива (кокса) и готового агломерата с целью получения агломерата с требуемыми показателями качества является актуальной задачей.

Для обеспечения требуемого фракционного состава агломерационной шихты и готового агломерата могут быть использованы различные технологические

способы и конструктивные решения, которые рассмотрены в данной статье.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДРОБИЛОК

В отличие от типовых конструкций для повышения эффективности дробления флюсов за счёт более жёсткого соударения молотков и дробимого материала разработана конструкция ротора молотковой дробилки [14]. Данная конструкция показана на рис. 1. Молотки 2 устанавливаются с помощью осей 3 в дисках ротора 1 и неподвижно крепятся с помощью дополнительных втулок 4.

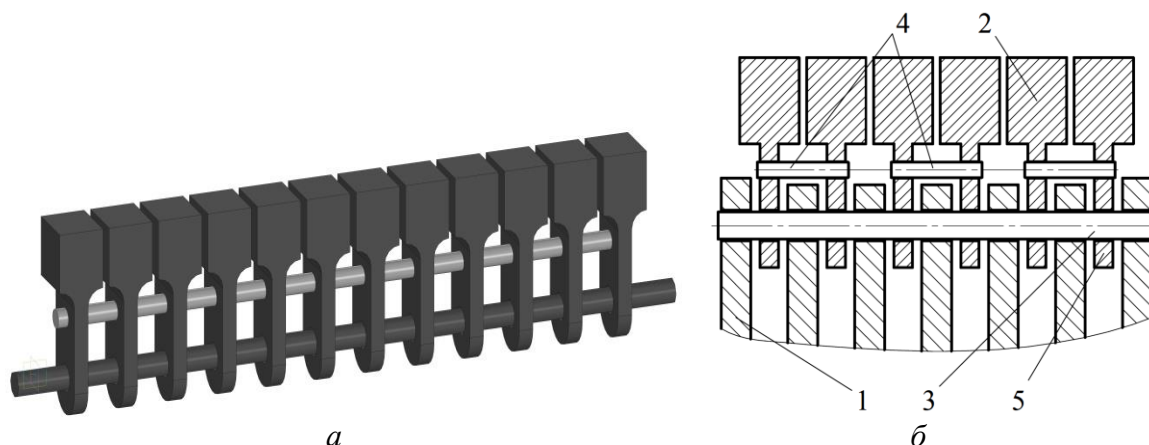


Рис. 1. Усовершенствованная конструкция ротора молотковой дробилки: *а* – общий вид навески с комбинированным креплением всех молотков на оси ротора; *б* – схема навески с комбинированным креплением пар молотков
1 – диски ротора, 2 – молотки, 3 – шарниры, 4 – дополнительные втулки, 5 – ножка молотка

Чем больше энергии требуется для разрушения кусков, тем большее количество молотков жёстко крепится между собой. При этом суммарное ударное воздействие увеличивается пропорционально количеству молотков. Особенно это важно при одновременном дроблении флюсов в виде известняка и доломита, обладающих различной прочностью.

При проектировании молотка произведён анализ прочностных

характеристик, в том числе напряжений, возникающих в теле молотка при соударении с куском материала с помощью программного комплекса Ansys Workbench (рис. 2) [15]. Было установлено, что конструкция ударного элемента и оси подвеса обеспечивает условие прочности при ударном контакте с куском материала (коэффициент запаса прочности в условиях многоциклового нагружения составил 3,9).

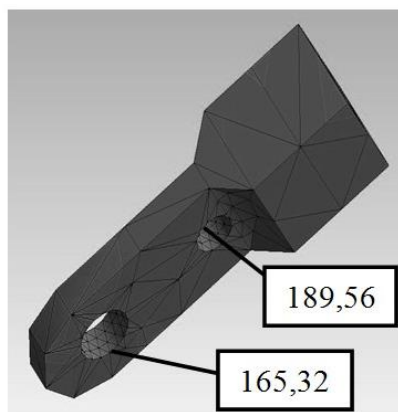


Рис. 2. Анализ максимальных напряжений, возникающих в молотке при воздействии ударной нагрузки в программном комплексе Ansys Workbench

Обеспечение требуемой фракции твердого топлива в качестве компонента агломерационной шихты (0 – 3 мм) позволяет улучшить показатели газодинамики в процессе спекания агломерата. Подготовка (дробление) кокса осуществляется в валковых (четырёхвалковых) дробилках. Типовая конструкция четырехвалковой дробилки с

гладкими бочками валков имеет определённые недостатки, связанные с недостаточной эффективностью захвата дробимых кусков материала валками, лишних затрат энергии и повышенным износом рабочей поверхности вследствие возможного проскальзывания кусков материала по поверхности бандажа.

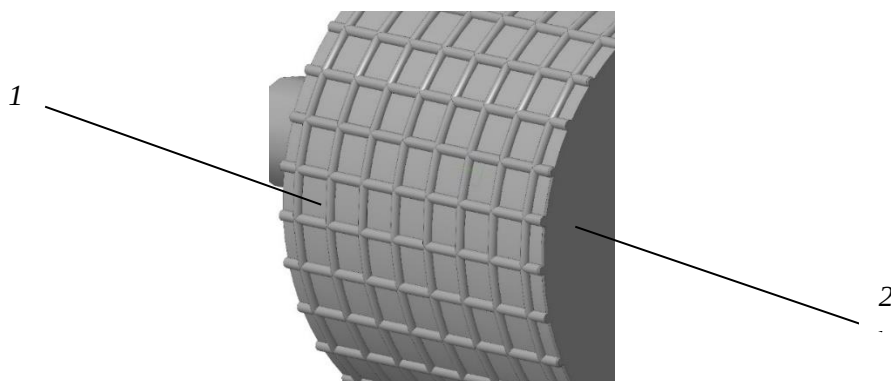


Рис. 3. Усовершенствованный бандаж вала четырёхвалковой дробилки кокса
1 – поперечные валики, 2 – продольные валики

В предлагаемой конструкции вала (рис.3), в отличие от типовой, на рабочей поверхности бандажа нанесена сетка, образованная поперечными 1 и продольными 2 валиками, наплавленными с помощью непрерывной дуговой наплавки износостойким материалом [15]. Сетка представляет собой квадратные ячейки определённого размера. Наличие поперечных валиков обеспечивает повышение эффективности захвата и дробления, а наличие сетки из валиков

позволяет снизить износ бандажей и увеличить межремонтный период.

При дроблении пирога агломерата используются типовые одновалковые зубчатые дробилки, например, ДО-1200х2100, ДО-1300х2700, ДО-1300х4200. Для данных дробилок величины зазоров между колосниками, обеспечивающие выход готового продукта из дробилки, не соответствуют производительности процесса дробления. Также характерным является достаточно низкая эффективность дробления и лишние энергетические

затраты, так как в процессе дробления происходит одновременное контактное взаимодействие всех зубьев ротора с пирогаом дробимого агломерата. При этом основным способом дробления является раздавливание, что приводит к увеличению мелкой фракции (возврата). С целью повышения эффективности процесса дробления и снижения доли

мелкой фракции в дробимом агломерате предложена конструкция ротора с шевронным расположением зубьев звёздочек [16].

На рис. 4 приведена усовершенствованная конструкция ротора с шевронным расположением зубьев звёздочек с различным углом поворота относительно оси.

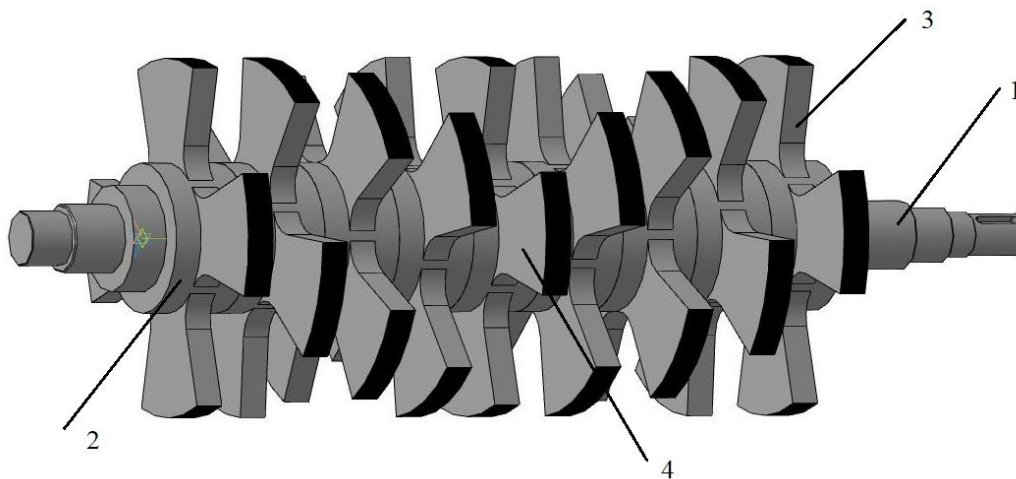


Рис. 4. Ротор с шевронным расположением зубьев звёздочек
1 – ось, 2,3,4 – зубья звездочек

Зубья звёздочек 2,3,4 с различным углом поворота расположены на оси 1 так, чтобы при вращении ротора в контакт с дробимым материалом вступали два симметрично расположенных зуба, например, 2 и 3 относительно центральной звёздочки 4 (см. рис. 4). При этом агломерат, подлежащий дроблению, поступает в рабочее пространство зубьев ротора дробилки, где вступает в одновременное контактное взаимодействие с зубьями звёздочек в количестве не более трёх, из-за чего площадь контакта зубьев с материалом уменьшается. При таком способе контактного нагружения материал разрушается в основном за счёт излома относительно консольной грани приемного стола, а не раздавливания об его рабочую поверхность [16].

Предложенный принцип дробления и конструкция ротора с шевронным расположением звёздочек с различным углом поворота относительно оси ротора позволяет повысить эффективность

дробления вследствие преимущественно излома дробильных кусков агломерата, а не раздавливания, что приводит к снижению энергозатрат и уменьшению содержания мелочи (возврата).

ВЫВОДЫ

1. Проведён анализ проблематики процессов дробления агломерационной шихты (флюсов и кокса) и готового агломерата.
2. Разработаны и предложены конструктивно-технологические решения по совершенствованию конструкций роторов молотковой дробилки флюсов, четырёхвалковой дробилки кокса и одновалковой зубчатой дробилки агломерата.
3. Предложенные конструктивно-технологические решения позволяют повысить эффективность и качество дробления агломерационной шихты и агломерата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The research of autohesion properties of sintering burden/ K. K. Turgunova, N. R. Timirbaeva, E. Kobegen [et al.] // CIS Iron and Steel Review. – 2018. – № 1. – P. 4–10. – Text : immediate.

2. Treatise on Process Metallurgy, Vol. 3: Industrial Processes / Editor-in-Chief S. Seetharaman. – Elsevier, 2014. – 1751 p. – Text : immediate.

3. Iron Ore Sintering: Raw Materials and Granulation / D. Fernández-González, I. Ruiz-Bustanza, J. Mochón [et al.] – Text : electronic // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review – 2017. Vol. 38, № 1. – P. 36–46. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08827508.2016.1244059>. – Accessed 12.03.21.

4. **Вайсберг, Л.А.** Совершенствование систем шихтоподготовки в доменном производстве / Л.А. Вайсберг, А.Н. Коровников, Г.С. Подгородецкий. – Текст : непосредственный. // Черные металлы. – 2017. – № 8. – С. 24–27.

5. **Шаповалов, А.Н.** Влияние вида магнезиальных материалов на показатели агломерационного процесса в условиях АО «Уральская сталь» / А.Н. Шаповалов, Е.В. Овчинникова, А.Н. Майстренко – Текст : непосредственный // Черные металлы. – 2018. – № 11. – С. 38–42.

6. **Титов, В.Н.** Использование мелких фракций агломерата и кокса в условиях интенсивной работы доменных печей / В.Н. Титов, Л.С. Ивлева, А.А. Пишкин. – Текст : непосредственный // Бюллетень «Черная металлургия». – 2017. – № 5. – С. 28–33.

7. **Беккер, М.** Перемешивание и гранулирование агломерата в металлургической промышленности / М. Беккер. – Текст : непосредственный // Черные металлы. – 2016. – № 4. – С. 25–27.

8. Influence of limestone particle size on iron ore sinter properties and productivity / T. Umadevi [et al.] – Text : immediate // Steel Research International. WILEY–VCH

Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim – 2010. – Vol. 81, Iss. 6 – P. 419–425.

9. **Higuchi, K.** Reaction Behavior of Dolomite Accompanied with Formation of Magnetite Solid Solution in Iron Ore Sintering Process / K. Higuchi, T. Tanaka, T. Tsuyoshi, S. Takehiko. – Text : immediate // ISIJ INT. 2007. Vol. 5 (47). – P. 669–678. – Text : immediate.

10. **Коротич, В.И.** Агломерация рудных материалов. Научное издание / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Т.Н. Бездежский. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2003. – 400 с. – Текст : непосредственный.

11. **Жильцов А.П.** Исследование и обоснование конструктивно-технологических параметров процесса измельчения агломерационных флюсов в молотковой дробилке / А.П. Жильцов, Д.А. Власенко, Э.П. Левченко. – Текст : непосредственный // Черные металлы. – №10 (1054). – 2019. – С. 4–9.

12. **Subba Rao D.V.** Minerals and Coal Process Calculations / D.V. Subba Rao. – London: Taylor & Francis Group, 2016. – 354 p. – Text : immediate.

13. **Lakshmi Shamvardhini Sydanna, T.R.** Manufacturing with design and analysis of rotor shaft of hammer mill crusher / T.R. Lakshmi Shamvardhini Sydanna. – Text : immediate. // International Journal of Science. Engineering and Technology Research (IJSETR). – 2017 – No 5. – P. 877–881.

14. Патент № 189059U1 Российская Федерация, МПК В02С 13/16 (2006.01). Ротор молотковой дробилки: № 2018143765: заявл. 10.12.18: опубл. 07.05.19 / Д.А. Власенко, А.П. Жильцов, Э.П. Левченко [и др.]. – 4 с. : – Текст : непосредственный.

15. **Власенко, Д.А.** Исследование прочностных характеристик рабочих органов роторной молотковой дробилки / Д.А. Власенко, В.П. Долгих // Сталь. – 2021. – № 10. – С. 35–39. – Текст : непосредственный.

16. Патент № 188107U1 Российская Федерация, МПК В02С 4/30 (2006.01).

Валок четырёхвалковой дробилки: № 2018134232: заявл. 27.09.18: опубл. 28.03.19 / А.П. Жильцов, Г.А. Билан, В.А. Власенко [и др.]. – 2 с. : ил.. – Текст : непосредственный.

17. Патент № 196194U1 Российская Федерация, МПК В02С 4/30 (2006.01). Ротор одновалковой зубчатой дробилки:

Сведения об авторах:

Жильцов Александр Павлович

кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлургического оборудования,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская д. 30.

E-mail: kaf-mo@stu.lipetsk.ru

Власенко Дмитрий Алексеевич

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры металлургии Донбасского государственного технического университета.

94204, ЛНР, Алчевск, пр. Ленина, 16.

Харитonenko Анатолий Анатольевич

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры металлургического оборудования,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская д. 30.

Бочаров Александр Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры металлургического оборудования,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская д. 30.

Козенко Наталья Евгеньевна

магистрант кафедры металлургического оборудования,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская д. 30.

№ 2019137708: заявл. 21.11.19: опубл. 19.02.20 / В.А. Власенко, А.П. Жильцов, Э.П. Левченко [и др.]. – 3 с. : ил.. – Текст : непосредственный.

Information about the authors:

Alexander Pavlovich Zhiltsov

Lipetsk State Technical University

398055 Lipetsk, Moskovskaya str., 30

E-mail: kaf-mo@stu.lipetsk.ru

Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metallurgical Equipment of Lipetsk State Technical University.

Vlasenko Dmitry Alekseevich

94204, LNR, Alchevsk, Lenin Ave., 16

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Metallurgy of the Donbass State Technical University

Kharitonenko Anatoly Anatolyevich

Lipetsk State Technical University

398055 Lipetsk, Moskovskaya str., 30

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgical Equipment of Lipetsk State Technical University

Bocharov Alexander Viktorovich

Lipetsk State Technical University

398055 Lipetsk, Moskovskaya str., 30

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgical Equipment of Lipetsk State Technical University

Kozenko Natalia Evgenievna

Lipetsk State Technical University

398055 Lipetsk, Moskovskaya str., 30

Master's student of the Department of Metallurgical Equipment of Lipetsk State Technical University.

В.Н. ТИТОВ, И.В. КУПРИЯНОВА, Т.В. КРАВЧЕНКО, А.Д. КОНЕВЗЕРОВА

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЩЕЛОЧЕЙ В ЖЕЛЕЗОРУДНОМ СЫРЬЕ НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД КОКСА

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: Приведены результаты аналитической оценки влияния содержания оксидов щелочных металлов в железорудном сырье (концентрат) на удельный расход кокса в доменной печи. Отмечено разное влияние оксидов калия и натрия на расход кокса, что обусловлено различной степенью их перехода в агломерат в процессе спекания.

Ключевые слова: щелочи, оксиды, концентрат, кокс, доменная печь.

V.N. TITOV, I.V. KUPRIYANOVA, T.V. KRAVCHENKO, A.D. KONEVZEROVA

INFLUENCE OF ALKALI CONTENT IN IRON ORE RAW MATERIALS ON SPECIFIC COKE CONSUMPTION

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The results are given of an analytical assessment of the effect of the alkali metal oxide content in iron ore raw materials (concentrate) on the specific coke consumption in the blast furnace. It is noted that the effect of potassium and sodium oxides on the coke rate is different, which is due to the different degree of their transition to sinter during the sintering process.

Keywords: alkalis, oxides, concentrate, coke, blast furnace.

ВВЕДЕНИЕ

В технической литературе [1–8] широко освещены проблемы, связанные с поступлением щелочей в доменную печь. Основные виды:

1) накопление в объеме печи различных летучих соединений щелочных металлов (пары K и Na, цианидов и др.);

2) существенное ухудшение условий доменной плавки;

3) появление различного рода расстройств газодинамического и теплового режимов печей;

4) снижение форсировки хода печи из-за усиления процесса разрушения кокса и растягивания по высоте зоны вязкопластичного состояния;

5) ухудшение качества чугуна и технико-экономических показателей доменной плавки.

В соответствии с работой [9] увеличение прихода щелочей в доменную

печь на 1 кг/т чугуна приводит к увеличению расхода кокса на 9-11 кг/т чугуна. По данным работы [10] каждый 1 кг щелочей на тонну чугуна, циркулирующий в доменной печи, приводит к увеличению расхода кокса в среднем на 33 кг/т чугуна.

Одним из направлений по снижению негативного воздействия щелочей на работу доменной печи является ограничение их количества, поступающего в доменную печь, в том числе за счет оптимизации структуры агломерационной шихты [11, 12]. Другим направлением является оптимизация состава доменного шлака [13-16]. Так в работе [15] авторами отмечено, что увеличение основности шлака (CaO/SiO_2) на 0,1 способствует росту циркулирующих щелочей на 5,3 и 1,6 кг/т чугуна для K и Na соответственно. Поэтому основной целью оптимизации

шлакового режима является повышение щелочной емкости шлака и максимальное удаление щелочей из доменной печи вместе с ним.

С учетом того, что шлаковый режим доменной плавки оказывает влияние не только на количество удаляемых щелочей, но и на качество чугуна (в первую очередь на содержание серы), то оптимизация шлакового режима имеет определенные ограничения.

В связи с изложенным выше актуальным является вопрос контроля количества щелочей, поступающих в доменную печь в том числе с железорудным сырьем с оценкой возможного их негативного влияния на расход кокса.

В рамках поставленной задачи проведен анализ содержания оксидов щелочных металлов в железорудном концентрате, оценено их поведение в агломерационном

процессе и влияние их содержания в концентрате на расход кокса в доменном процессе.

Анализ содержания щелочей в железорудном концентрате показал, что содержание оксида натрия (Na_2O) изменяется в диапазоне от 0,03 до 0,07 % при среднем значении 0,05 %. Относительно оксида калия (K_2O) можно отметить, что в среднем его содержание также составляет 0,05 %, однако его изменение находится в более узком диапазоне (от 0,044 до 0,059 %).

Поведение оксидов щелочных металлов в процессе агломерации изучали путем оценки степени перехода их в агломерат на основе баланса данных элементов для условий спекания агломерата с основностью (CaO/SiO_2) в диапазоне 1,7-1,9 отн. ед. Результаты оценки представлены в табл.

Таблица

Степень перехода Na_2O и K_2O в агломерат

	Основность (CaO/SiO_2) агломерата		
	1,7	1,8	1,9
Степень перехода Na_2O в агломерат, %	42,7	43,7	44,4
Степень перехода K_2O в агломерат, %	88,2	92,7	93,7

Анализ полученных данных показывает, что повышение основности агломерата способствует росту степени перехода оксидов щелочных металлов в агломерат. При этом следует отметить, что абсолютный уровень степени перехода для оксида натрия фактически в 2 раза ниже по сравнению с оксидом калия. Для Na_2O степень перехода в среднем находится на уровне 43,5 %, а для K_2O – 91,5 %.

Дополнительная обработка данных, представленных в таблице, показала, что влияние основности агломерата на степень перехода оксидов щелочных металлов в агломерат также отличается. Для оксида натрия данное влияние заключается в увеличении степени перехода на 0,85 % на каждые 0,1 отн. ед. роста основности агломерата. Для оксида калия влияние основности выше более чем в три раза и

составляет 2,75 % роста степени перехода на каждые 0,1 отн. ед. роста основности агломерата.

Оценку влияния изменения содержания оксидов щелочных металлов в железорудном концентрате на расход кокса производили путем расчета изменения поступления щелочей в доменную печь с шихтой при изменении содержания оксидов щелочных металлов на 0,01 %. При расчете принято, что расход агломерата составляет 1000 кг/т чугуна, а расход окатышей 600 кг/т чугуна. Расход концентрата принят равным 0,7 кг/кг агломерата и 0,99 кг/кг окатышей. В связи с отсутствием информации коэффициенты перехода щелочных металлов из концентрата в окатыши приняты равным единице. Исходя из заданных условий, увеличение содержания

данных оксидов на 0,01 % приведет к следующему изменению поступления щелочей в доменную печь:

Оксид натрия – $(0,7 \cdot 0,01 \cdot 0,435 \cdot 1000 + 0,99 \cdot 0,01 \cdot 1 \cdot 600) = 0,09$ кг/т чугуна

Оксид калия – $(0,7 \cdot 0,01 \cdot 0,915 \cdot 1000 + 0,99 \cdot 0,01 \cdot 1 \cdot 600) = 0,12$ кг/т чугуна

С учетом коэффициента влияния количества поступающих щелочей на расход кокса в количестве 10 кг/кг [9] получаем, что повышение количества оксида натрия в концентрате на 0,01 % приводит к увеличению расхода кокса на $0,09 \cdot 10 = 0,9$ кг/т чугуна, тогда как аналогичное изменение содержания оксида калия вызывает необходимость увеличения расхода кокса на 1,2 кг/т чугуна. Таким образом можно отметить неравнозначное влияние изменения содержания оксидов калия и натрия на расход кокса в доменной плавке, что обусловлено разной величиной коэффициентов их перехода в агломерат.

ВЫВОДЫ

1. Среднее содержание оксидов калия и натрия в железорудном концентрате составляет 0,05 %. При этом оксид калия изменяется в более узком диапазоне (0,044 – 0,059 % против 0,03 – 0,07 % для Na_2O).
2. Коэффициент перехода оксидов щелочных металлов в агломерат зависит от его основности и увеличивается с ее ростом. Абсолютные значения коэффициента перехода в агломерат для оксида натрия в 2 раза ниже по сравнению с оксидом калия.
3. Одинаковое изменение содержания оксидов щелочных металлов в концентрате оказывают неравнозначное влияние на расход кокса в доменной плавке, что связано с разницей в коэффициентах перехода их в агломерат.
4. Повышение содержания оксида натрия в концентрате на 0,01 % приводит к увеличению расхода кокса на 0,9 кг/т чугуна, тогда как аналогичное изменение содержания оксида калия вызывает необходимость увеличения расхода кокса на 1,2 кг/т чугуна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Циватая, Н. А. Анализ поведения щелочей в доменной печи / Н. А. Циватая. – Текст: непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2014. – Вып. 29. – С. 90–101.
2. Гладков, Н.А. Влияние щелочей на процесс доменной плавки. / Н.А. Гладков, С.А. Николаев, Л.Г. Будник // Металлург. – 1986. – № 2. – С.12–14. – Текст: непосредственный.
3. Корякова О.Ф. Совершенствование технологии доменной плавки с целью уменьшения отрицательного влияния щелочей и цинка/ О.Ф. Корякова, В.В. Щепанский, А.А. Парцевский. – Текст: непосредственный // Чёрная металлургия. – 1980. – Вып. 15. С.13 – 33. – Текст: непосредственный
4. Гуденау, Г.В. Удаление щелочей в доменной плавке. / Г.В. Гуденау, Г.П. Йохан, Ш. Маймет // Черные металлы. – 1997. – №2. – С. 14-22. – Текст: непосредственный
5. Alkali in the blast furnace – influence of modified ash composition in coke and charging. Amanda Gullberg, Jenny Olofsson, Anton Andersson, Lena Sundqvist, Bo Bjorkman, Anna Dahlstedt. Practice 8th International Congress on Science and Technology of Ironmaking - ICSTI 2018 p. 449-454.
6. Effect of alkali on different iron making processes. Dastidar MG, Sarkar BK, Mitra MK, [et al.]. Material Sci & Eng. 2018;2(6):304–313
7. J. Olofsson, Alkali Circulation in the Blast Furnace Process Correlations and Counter Measures. Master, Lulea University of Technology, – 2018. – P. 61
8. Maharshi GhoshDastidar, Anrin Bhattacharyya, Bitan Kumar Sarkar, Rajib Dey, Manoj Kumar Mitra, JohannesSchenk The effect of alkali on the reaction kinetics and strength of blast furnace coke Fuel Volume 268, 15 May 2020, 117388 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117388>
9. Анализ поведения щелочей в доменной печи / И.Ф. Курунов, В.Н. Титов, В.Л. Емельянов [и др.] // Металлург. – № 9. – 2009 г. – С. 34 – 39.

10. **Янц, Й.** Использование в промышленной доменной печи кокса с различным содержанием щелочей. / Й. Янц, Х. Монкерн // Черные металлы. – 1995. – № 2. – С.23–30. – Текст : непосредственный.

11. Srijith Mohanan, Arcun Kumar C, Prajna Mohapatra, Vipul Mohan Koranne, A.S. Reddy, Rakesh Ambastha Key technical challenges in sinter making at TATA STEEL Kalinganagar – use of high alkali ores and control of high temperature properties 8th International Congress on Science and Technology of Ironmaking – ICSTI 2018. P. 107–113

12. Fuming Zhang, Minge Zhao, Chaozhen Cao, Yanyong Guo **New Technological Progress of Ironmaking in Shougang AISTech 2017 Association of Iron and Steel Technology Proceedings.** – 2017. P. 439–453, May 2017.

13. Cameron I. A., Optimum Blast Furnace Slag Composition for Hot Metal Production, Slag Granulation and Cement Use AISTech 2017 Association of Iron and Steel Technology Proceedings. – 2017. – P. 401–412, May 2017.

14. **Тогобицкая, Д.Н.** Проблема щелочной агрессии в доменной печи и способы эвакуации щелочных соединений со шлаком. / Д.Н. Тогобицкая, Н.А. Цюпа, П.И. Оторвин [и др.] – Текст: непосредственный // Сталь №5. – 2018. – с. 2–7.

15. Shaopeng Chen, Wei Wang, Runsheng Xu, Shuliang Deng & Heng Zheng (2020) Influence of multiple factors on the alkali metal enrichment in blast furnaces by a thermodynamic model, Ironmaking & Steelmaking, 47:3, 2020. P. 219–227.

Сведения об авторах:

Титов Владимир Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий, Липецкий государственный технический университет.

3980055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

e-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

Куприянова Ирина Вячеславовна

старший преподаватель кафедры металлургических технологий, Липецкий государственный технический университет.

3980055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

Кравченко Татьяна Викторовна

старший преподаватель кафедры металлургических технологий, Липецкий государственный технический университет.

3980055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

Коневзерова Анастасия Дмитриевна

студент кафедры металлургических технологий,

Липецкий государственный технический университет.

3980055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

Information about the authors:

Titov Vladimir Nikolaevich

PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies Lipetsk State Technical University

Lipetsk, Moskovskaya str., 30.,

e-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

Kupriyanova Irina Vyacheslavovna

Senior lecturer of the Department of Metallurgical Technologies,

Lipetsk State Technical University

Lipetsk, Moskovskaya str., 30.,

e-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

Kravchenko Tatiana Viktorovna senior lecturer of the Department of Metallurgical Technologies,

Lipetsk State Technical University,

Lipetsk, Moskovskaya str., 30.,

e-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

Konevzerova Anastasia Dmitrievna

student of the Department of Metallurgical Technologies

Lipetsk State Technical University

Lipetsk, Moskovskaya str., 30.,

e-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

А.Н. РОГотовский, А.А. ШИпельников, Н.А. БОбылева

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ СОВРЕМЕННЫХ СОРТОВЫХ МНЛЗ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В статье рассмотрены особенности конструкции промежуточных ковшей сортовых МНЛЗ, а также технические решения в части футеровки промежуточных ковшей и применения дополнительных элементов.

Ключевые слова: непрерывная разливка сортовой заготовки, конструкция промежуточного ковша, движение потоков расплава, сортовая МНЛЗ.

A.N. ROGOTOVSKIY, A.A. SHIPELNIKOV, N.A. BOBYLEVA

DESIGN FEATURES OF MODERN BILLET CCM TUNDISHES

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The article discusses the design features of tundishes for billet continuous casting machines, as well as technical solutions in terms of tundish lining and the use of additional elements.

Keywords: billet continuous casting, tundish design, liquid metal flows, billet CCM.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается значительный прогресс в оснащении и технологическом оформлении машин непрерывного литья сортовых заготовок. Это позволило адаптировать процесс непрерывного литья к различным технологическим построениям и видам продукции, которые в максимальной степени учитывают конъюнктуру рынка [1, 2]. За последнее время номинальная производительность типовых сортовых МНЛЗ возросла по крайней мере в два - два с половиной раза. Это создало предпосылки для расширения сортамента разливаемых марок стали, снижения удельных затрат на разливку и сокращения обслуживающей инфраструктуры. При этом объем капитальных вложений при строительстве МНЛЗ возрос в значительно меньшей степени, чем ее производительность, что обеспечивает уменьшение реальных инвестиций на тонну разливаемой стали.

В стандартах большинства стран мира под сортовой заготовкой подразумевается квадратная или близкая к квадрату в поперечном сечении заготовка, полученная при разливке на МНЛЗ или путем прокатки из слитка на блюминге с сечением, как правило, от 100×100 мм до 160-180×160-180 мм. Кроме того, к сортовым заготовкам относится круглая заготовка диаметром от 100 до 180 мм и специальные фасонные профили малого сечения.

Машины непрерывного литья заготовки для разливки сортовой заготовки имеют от 1 до 8 ручьев. В настоящее время в мире производится свыше 360-380 млн т непрерывнолитой сортовой заготовки в год [3]. Современная высокопроизводительная сортовая машина непрерывного литья заготовки является сложным металлургическим агрегатом, который состоит из множества узлов и механизмов, работа которых совмещена между собой.

Наибольшее распространение при разливке стали получили сортовые МНЛЗ радиального типа. Основными разработчиками высокопроизводительных сортовых МНЛЗ являются фирмы «Concast Standard», «SMS-Demag», «Danieli», «Siemens-VAI». Некоторые другие крупные машиностроительные фирмы также занимаются разработкой и изготовлением сортовых МНЛЗ. Так, на ряде металлургических предприятий стран СНГ хорошо зарекомендовали себя сортовые МНЛЗ, например, в условиях производства ЧАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (Украина).

Обобщая известные подходы в области технологии разливки сортовой заготовки, следует отметить, что технологические переливы стали осуществляются как открытой или незащищенной, так и закрытой (специальная огнеупорная проводка) струей (см. рис. 1).

Наиболее широкое промышленное распространение в мире для сортовых

МНЛЗ получила разливка стали открытой струей (см. рисунок 1 *г, е*) через стакан-дозатор строго регламентированного диаметра [4-8]. Открытой струей обычно разливают стали, не подвергающиеся строгому контролю макроструктуры при дальнейшей прокатке и предназначенные для получения металлопродукции в виде периодического профиля, уголков, двутавров, проволоки, арматуры и пр. [9].

Основной стратегической задачей разливки стали открытой струей на сортовых МНЛЗ является минимизация производственных издержек, которая в наибольшей степени может быть реализована при работе длинными и сверхдлинными сериями из одного промковша [10]. В настоящее время длительность серии на современных сортовых МНЛЗ достигает 70–100 ковшей и более.

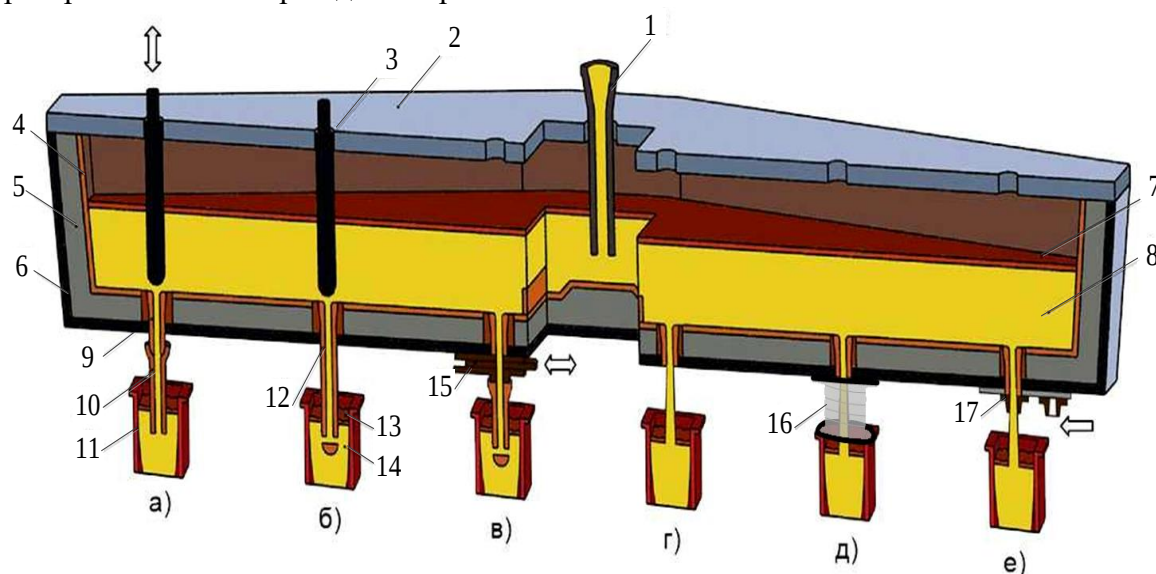


Рис. 1. Схема разливки стали на сортовой МНЛЗ закрытой (*а, б, в, д*) и открытой (*г, е*) струей
1 – защитная труба; 2 – крышка промковша; 3 – стопор-моноблок; 4, 5, 6 – рабочий, теплоизоляционный и арматурный слой футеровки; 7 – ТИС; 8 – жидкий металл в промковше; 9 – стакан-дозатор; 10 – погружной стакан; 11 – кристаллизатор; 12 – погружной стакан, совмещенный со стаканом дозатора; 13 – ШОС; 14 – жидкий металл в кристаллизаторе; 15 – трехплитный шиберный затвор; 16 – сильфон; 17 – устройство быстрой замены стакана-дозатора

При этом крайне важным технологическим элементом является

обеспечение высокого показателя серийности разливки непосредственно из

одного проковша [3, 10, 11]. Это позволяет добиться стабильности работы машины, а также снижает удельные затраты на огнеупоры и потери металла, связанные с остановкой МНЛЗ. Соответственно, технологические функции проковша постоянно трансформируются и расширяются [12].

Наибольшее распространение в мировой практике получили «Т-образные» проковши (см. рис. 2). «Т-образная» конструкция проковша предполагает наличие «дельты» или «кармана» для приема металла и его дальнейшего распределения между ручьями. Данная конструктивная особенность позволяет эффективно усреднить металл по температуре и химическому составу, а также способствует увеличению времени пребывания стали в промежуточном ковше для более эффективного протекания процессов и всплытия неметаллических включений.

В 90-е годы XX века сформировалась тенденция повышения серийности разливки из одного проковша. Данный

аспект обусловил стремление технологов оптимизировать движение потоков и минимизировать износ футеровки, связанный с воздействием движущегося металла. Гармонизация схемы футеровки с помощью специальных металлоприемников и перегородок позволяет ускорить процесс достижения желаемого результата.

Известные технические решения в части футеровки промежуточных ковшей и применения дополнительных элементов можно разделить на две основные группы по совокупности выполняемых технологических операций:

- проковши, в которых создаются максимально благоприятные условия для разливки сверхдлинными сериями (по меньшей мере, несколько десятков плавов) с целью минимизации издержек на разливку;
- проковши, в которых широко используются операции рафинирования жидкой стали в совокупности с функциями усреднения и дозирования металла.

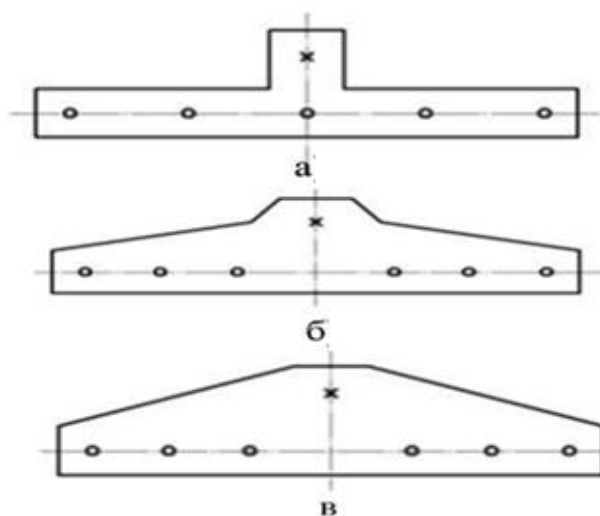


Рис. 2. Схема «Т – образных» проковшей различной конструкции

Стратегия минимизации издержек прежде всего относится к высокопроизводительным сортовым МНЛЗ, работающим в условиях металлургических мини-заводов [13-15]. Для таких условий литья процессы рафинирования стали в проковше, как правило, предусматриваются в минимальном объеме. При этом основным

критерием эффективности работы МНЛЗ является возможность работы сверхдлинными сериями без замены промежуточного ковша и остановки машины. Например, в конвертерном цехе ПАО «Челябинский металлургический комбинат» на 6-ручьева сортовой МНЛЗ достигнута средняя серийность разливки 40-45 плавов (максимальная 104

плавки) [13], в ЭСПЦ ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» на 5-ручьевой сортовой МНЛЗ средняя серийность цикла разливки достигает 40 часов [15]. На металлургическом мини-заводе «Badische Stahlwerke GmbH» (Германия) средняя серийность составляет 45-50 плавов из одного ковша на 5-ручьевой сортовой машине [16], на мини-заводе ООО «Электросталь» (г. Курахово) достигнута средняя серийность 40 плавов при максимальной серии в 63 плавки и продолжительностью около 60 часов [17]. При этом проблема износа или зарастания внутренней полости стаканов-дозаторов решается путем оптимизации технологии подготовки стали к разливке и применением устройств для быстрой замены стаканов-дозаторов. Такие устройства предполагают расположение под днищем промежуточного ковша специальной кассеты, имеющей, по крайней мере, два стакана-дозатора, быстрая установка которых в рабочее положение при цикле перемещения стакана-дозатора составляет около 0,2-0,3 секунд, осуществляется с помощью специального гидропривода.

Применение устройства для быстрой замены стакана-дозатора обеспечивает повышение стабильности процесса литья за счет хорошей организации истечения струи и квазипостоянного мгновенного расхода стали, а также минимизации вторичного окисления металла на участке промежуточный ковш – кристаллизатор за счет уменьшения участка открытой струи. Кроме того, такое устройство позволяет оперативно менять диаметр стакана-дозатора и, соответственно, регулировать скорость вытяжки заготовки. В определенных случаях это создает благоприятные условия для синхронизации работы плавильного агрегата и МНЛЗ.

Рабочий слой футеровки промковша выполняется путем торкретирования с использованием огнеупорных масс на основе высококачественного магнезитового

порошка. Толщина рабочего слоя футеровки обычно составляет 60-80 мм, а при разливке сверхдлинными сериями доходит до 100 мм. Основной зоной износа рабочего слоя футеровки промковша, лимитирующей длительность разливки, является область, прилегающая к месту падения струи стали, вытекающей из сталеразливочного ковша. Кроме того, повышенный износ футеровки промковша наблюдается, как правило, по всему периметру шлакового пояса, что объясняется химической активностью покровного шлака по отношению к рабочему слою футеровки [18].

Важную роль в стабильности работы футеровки промковша играет организация движения потоков стали в момент начала разливки и по ее ходу. Металл, попадающий в промковш из сталеразливочного ковша, движется в виде компактной струи вертикально вниз со скоростью несколько метров в секунду. При падении такой струи может происходить вовлечение в перемешивание покровной теплоизолирующей смеси, а также удар струи о днище промковша, что приводит к изменению направления движения потоков: вверх под наклоном или горизонтально. При этом днище ковша в месте удара более интенсивно разрушается и имеет повышенный износ.

В зоне падения струи также создается высокотурбулентная область, которая закручивает поверхностный шлак, тем самым уменьшая эрозионную стойкость футеровки в шлаковом поясе. Обычно эта зона футеровки промковша выполняется из более прочных огнеупоров. Для торможения струи в области ее контакта с днищем используются дополнительные приемные устройства, которые выполняются из специальных высокопрочных огнеупорных материалов [19].

Анализируя работу промковша многоручьевой сортовой МНЛЗ при разливке длинными и сверхдлинными сериями, следует выделить следующие функциональные особенности:

1) постоянный контакт определенной части днища

промежуточного ковша с падающей струей металла приводит к размыванию огнеупорного слоя в месте падения струи;

2) периодическое многократное изменение уровня металла в промковше (во время замены сталеразливочных ковшей) изменяет динамику движения потоков стали в нем;

3) «бурление» и активное перемешивание металла с покровным шлаком в зоне падения струи обуславливают повышенный износ рабочего слоя футеровки;

4) попадание шлака из сталеразливочного ковша существенно влияет на свойства и толщину покровного шлака в промковше по ходу разливки;

5) разность температуры стали, вытекающей из центральных и крайних ручьев промежуточного ковша, должна быть минимальной, что обеспечивает стабильность процесса литья.

Учет всех особенностей работы промковша для обеспечения разливки сверхдлинными сериями невозможен без применения специальных устройств, металлоприемников и порогов, оказывающих управляющее влияние на гидродинамику в его жидкой ванне в

течение всего цикла разливки. Внедрение в практику разливки различных порогов, шлаковых и фильтрационных перегородок совместно с бойной плитой позволило решить ряд проблем организации движения потоков. Однако подобные устройства обладают несколькими существенными недостатками, связанными с точностью установки перегородок и порогов в промковше. Так, вследствие неправильного монтажа таких изделий, происходит их быстрое разрушение или зарастание, что приводит к дисбалансу процесса разливки, вплоть до остановки МНЛЗ.

В последнее десятилетие для обеспечения максимальной защиты стенок и днища промковша многоручьевых МНЛЗ от разрушения широко используются монолитные металлоприемники колодцеобразного типа с «окнами». На рис. 3 приведен общий вид некоторых характерных металлоприемников колодцеобразного типа. Несмотря на некоторые конструктивные отличия у разных производителей, такие металлоприемники, как правило, обеспечивают торможение струи и ограничивают перемешивание металла со шлаком в зоне ее падения.



Рис. 3. Различные типы металлоприемников сортовых МНЛЗ

Благодаря специально выполненным в стенках металлоприемника «окнам» удается предотвратить прямой контакт вытекающих из него потоков со стенами промковша при существенном снижении кинетической энергии первичного центрального потока в приёмной камере ковша. При этом на современных

сортных МНЛЗ между промежуточным ковшом и кристаллизатором струя может быть открытой или защищенной специальными приспособлениями, например, разливочной воронкой.

ВЫВОДЫ

. На сегодняшний день, несмотря на очевидные успехи производственной практики и развития общей теории непрерывной разливки стали, основные особенности конструкции промежуточных ковшей сортовых МНЛЗ, в частности геометрические размеры металлоприемника и иных модификаторов потока, требуют дополнительного уточнения применительно к конкретным условиям разливки, числу ручьев и геометрической конфигурации внутренней полости промежуточного ковша, скорости разливки и пр. При разработке нового вида

металлоприемников и иных модификаторов потока должны учитываться основные различия между ковшами для слабов и сортовых МНЛЗ, которые заключаются в меньшей емкости последних и большем количестве разливочных ручьев. На каждом разливочном ручье МНЛЗ должны соблюдаться условия свободного истечения струи металла, при этом необходимо стремиться к нивелированию разницы средней скорости движения и объема застойных зон на ближних и дальних ручьях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Непрерывная разливка сортовой заготовки: Монография. / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, А.Л. Подкорытов [и др.]. – Донецк: Цифровая типография, 2012. – 417 с. – Текст : непосредственный.

2. Смирнов, А.Н. Непрерывная разливка стали / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Текст : непосредственный // Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.

3. The Making, Shaping and Treating of Steel - Casting Volume / Edited by A.Cramb. – Pittsburgh, PA: The AISE Steel Foundation. – 2003 – 1017 p. – Text : immediate.

4. Технологические параметры разливки на высокоскоростной сортовой МНЛЗ ОАО «Северсталь» и их влияние на качество литой заготовки. – Текст : непосредственный / А.А. Степанов, А.В. Зиборов, А.М. Ламухин [и др.] // ОАО «Черметинформация. Бюлл. «Черная металлургия». – 2004. – №10. – С.46-49.

5. Этапы и перспективы совершенствования технологии непрерывной разливки стали на ОАО «Днепропетровский меткомбинат» / И.Д. Буга, В.В. Ивко, Е.А. Сургучев [и др.] – Текст : непосредственный // 50 лет непрерывной разливки стали в Украине: сборник научных трудов конференции : – Донецк: ДонНТУ. – 2010. – С. 138 – 143.

6. Освоение технологии непрерывной разливки открытой струей арматурных сталей 35ГС и 25Г2С / А.Л. Подкорытов, С.А. Ботников, И.С. Мурзин [и др.] – Текст : непосредственный // Сталь. – 2006. – №5. – С. 45–47.

7. Повышение конкурентоспособности сортовых МНЛЗ путем их модернизации / А.М. Ротенберг, И.Н. Шифрин, А.К. Белитченко [и др.]. – Текст : непосредственный // Электрометаллургия. – 2003. – №3. – С. 41–46.

8. Касьян, Г.И. Отливка заготовок круглого и квадратного сечения на МНЛЗ в электросталеплавильном цехе / Г.И. Касьян. – Текст : непосредственный // Электрометаллургия. – 2006. – № 5. – С. 16–22.

9. Развитие металлургического мини-завода с повышением производительности сортовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, М.М. Лам, А.С. Хобта [и др.]. – Текст : непосредственный // Электрометаллургия. – 2011. – № 5. – С. 18–22.

10. Способы повышения продолжительности работы МНЛЗ / М. Берти, Л. Питерс, Э. Перрен [и др.] – Текст : непосредственный // Черные металлы. – 2006. – № 5 – С. 21–26.

11. Энергосберегающий ресурс непрерывной разливки в условиях современного конвертерного цеха / А.Н. Смирнов, А.А. Ларионов, С.П. Матвеев [и др.] – Текст : непосредственный // Металлургическая и

горнорудная промышленность. – 2003. – № 3. – С. 21–24.

12. Sahai, Y. Tundish Technology for Clean Steel Production / Y. Sahai, T. Emi // – Text : immediate. New Jersey: World Scientific. – 2008. – 316 p.

13. Освоение технологии непрерывной разливки стали на сортовых машинах / А.Г. Левада, Д.Н. Макаров, В.И. Антонов [и др.] // Сталь. – 2008. – №3. – С.34–36.

14. **Чигринов, М.Г.** Производство мелких непрерывнолитых заготовок / М.Г. Чигринов, А.М. Чигринов, М.Е. Пруцков. – Москва: «СП Интермет Инжиниринг». – 1998. – 126 с. – Текст : непосредственный.

15. Разработка оборудования системы распределения потоков стали для промежуточного ковша / С.Н. Ушаков, А.А. Хоменко, К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин. – Текст : непосредственный // Сталь. – 2009. – №3. – С. 12–18.

16. High-reliability unit for complex treatment of steel / I.M. Bershetskii, A.A. Nikulin, N.A. Savalyk, S.A. Tarakanov. – Text : immediate // RUSSIAN METALLURGY. – 2009. – Number 7. – P. 560–563.

17. **Серов, А.И.** Создание и развитие электрометаллургического комплекса ООО «Электросталь» / А.И. Серов. – Текст : непосредственный // Металл и литье Украины. – 2010. – №9. – 10. – С. 14–17.

18. **Смирнов, А.Н.** Гармонизация схемы футеровки промежуточного ковша при разливке сверхдлинными сериями на многоручьевых сортовых МНЛЗ / А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.Л. Подкорытов. – Текст : непосредственный // Новые огнеупоры. – 2011. – №3. – С.87–88.

19. Jacobi H. Reinheitsgradiententwicklung verschiedener Stähle für Flach- und Rundprodukte / H. Jacobi, H.-J. Ehrenberg, K. Wunnenberg. – Text : immediate // Stahl und Eisen. – 1998. – №11. – P. 87–95.

Сведения об авторах:

Роговский Александр Николаевич
кандидат технических наук, заведующий
кафедрой металлургических технологий,
Липецкий государственный технический
университет,
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.
e-mail: ashipelnikov@yandex.ru

Шипельников Алексей Александрович
кандидат технических наук, доцент
кафедры металлургических технологий,
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.
Бобылева Наталия Александровна
преподаватель кафедры металлургических
технологий,
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.

Information about the authors:

Rogovsky Alexander Nikolaevich
Lipetsk State Technical University
398055 Lipetsk, Moskovskaya str., 30
e-mail: ashipelnikov@yandex.ru
Candidate of Technical Sciences, Head of the
Department of Metallurgical Technologies of
Lipetsk State Technical University.
Shipelnikov Alexey Alexandrovich
Lipetsk State Technical University
398055 Lipetsk, Moskovskaya str., 30
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of Metallurgical
Technologies of Lipetsk State Technical
University.
Bobyleva Natalia Alexandrovna
Lipetsk State Technical University
398055 Lipetsk, Moskovskaya str., 30
Lecturer of the Department of Metallurgical
Technologies of Lipetsk State Technical
University.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В журнале «Вестник Липецкого государственного технического университета» публикуются статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера.

Статья должна поступить на электронный адрес kaf-vm@stu.lipetsk.ru и сохранена в версии Microsoft Word 2003. Рукопись статьи (1 экземпляр) и сопроводительные документы должны быть высланы в редакцию. К сопроводительным документам относятся:

- рецензия, отражающая следующие пункты: актуальность представленной работы; характеристика объекта исследования; качество постановки целей работы и задач исследования; степень научной новизны исследования, практическая значимость работы; учебно-методическая ценность исследования, стиль изложения; степень разработанности темы научного исследования; структурность работы. (В случае, если один из авторов является доктором наук, рецензия должна быть подписана доктором соответствующего профиля.);

- выписка из протокола заседания кафедры, на котором было принято решение о рекомендации публикации статьи в журнал «Вестник Липецкого государственного технического университета»;

- согласие на публикацию и гарантии того, что статья не будет больше нигде опубликована, подписанные автором.

Оформление статьи должно соответствовать следующим требованиям:

1. На первой странице должны быть указаны: УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, название учреждения, представляющего рукопись для опубликования.

2. Текст статьи набирается в формате *.doc шрифтом Times New Roman размером 12 pt через одинарный интервал, без отступов, отступ красной строки 0,5 см, выравнивание по ширине, без уплотнения. Поля: верхнее, нижнее, левое, правое – 2 см., в две колонки. Не использовать табуляций, автоматических списков. Не использовать курсив, жирный текст и подчеркивания.

Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела.

3. Для набора формул применять редактор Microsoft Equation 3.0. Формулы должны быть оформлены шрифтом Times New Roman, без курсива, размером 12 pt, одинарным интервалом.

Большие формулы необходимо разбивать на отдельные части. Фрагменты формул должны быть независимы (при использовании редактора формул каждая строка – отдельный объект).

Нумерацию и знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

4. Таблицы должны быть оформлены шрифтом Times New Roman, размером 12 pt, одинарным интервалом. В случае, если в тексте есть ссылка на таблицу, то пишется слово «табл.».

5. Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи. Список составляется в соответствии с последовательностью ссылок в тексте. Библиографический список должен быть оформлен согласно ГОСТ 7.0.100-2018. Ссылки на библиографический список в тексте приводятся в квадратных скобках. Перечень литературных источников должен содержать не менее 15 наименований.

6. Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим государственным стандартам.

7. К статье прилагаются: аннотации (200-250 слов; ключевые слова (не менее трех); имена и фамилии авторов, ученые звания, должности и адрес места работы, электронный адрес; на английском языке название статьи, аннотация, ключевые слова, имена и фамилии авторов.

ВЕСТНИК

**Липецкого государственного технического университета
(Вестник ЛГТУ)**

№ 3 (46) 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Scientific and technical journal «Vestnik LSTU»

Свидетельство о регистрации средства массовой информации **ПИ № ФС77-57003**. Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 25.02.2014 г.

Выходит 4 раза в год.

Учредитель: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Адрес редакции: 398055, Липецк, ул. Московская, 30.

Телефон: (4742) 32-81-33.

Издательство Липецкого государственного технического университета.

Адрес: 398055, Липецк, ул. Московская, 30.

Телефон: (4742) 32-82-14.

Редакторы: Г.В. Казьмина, М.Ю. Болгова, Е.А.Федюшина

Перевод (англ.) Н.В. Барышев

Подписано в печать 24.12.2021. Выход в свет 29.12.2021.

Бумага офсетная. Формат 60х84 1/8. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 6,5. Тираж 500 экз.

Заказ № 719. Цена свободная.

Отпечатано в полиграфическом подразделении Издательства ЛГТУ.

Адрес: 398055, Липецк, ул. Московская, 30.

Телефон: (4742) 32-82-14.