

Периодический рецензируемый научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ.

Учредитель и издатель – Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод».

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных ВАК для апробации кандидатских и докторских диссертаций.

Свидетельство о регистрации СМИ  
ПИ N ФС 77-29963  
от 17 октября 2007 г.

#### Главный редактор:

В.А. Осипова

#### Редакционный совет:

М.П. Бадер, д.т.н., профессор  
В.Я. Беспалов, д.т.н., профессор  
А.С. Веденеев, д.ф.-м.н., доцент  
Л.А. Герман, д.т.н., профессор  
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор  
В.В. Калугин, д.т.н., доцент  
А.А. Ковалев, д.т.н.  
К.Л. Ковалев, д.т.н., доцент  
В.Н. Козловский, д.т.н., доцент  
А.С. Космодамианский, д.т.н., профессор  
А.И. Попов, д.т.н., профессор  
В.Т. Пенкин, д.т.н., доцент  
С.Т. Рембеза, д.ф.-м.н., профессор  
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор  
М.В. Шевлюгин, д.т.н., доцент

#### Выпускающий редактор:

О.А. Кожухова

#### Редакция:

140070, Московская область,  
Люберецкий район, п. Томилино,  
ул. Гаршина, д. 11.

Тел./факс: (495) 500-40-20  
E-mail: npptez@mail.ru  
Сайт: www.npptez.ru

Журнал издается в электронном виде.

Адрес сайта: eet-journal.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

#### Степанов М.А., Степанов А.П., Криворотова В.В.

Способы визуального и автоматического контроля температуры оборудования электроподвижного состава.....2

#### Гридин В.М.,

Особенности устройства и работы четырехфазного вентильного двигателя переменного тока с несимметричной обмоткой .....6

#### Евстафьев А.М., Пугачев А.А.

Моделирование энергоэффективной системы прямого управления моментом тягового асинхронного двигателя.....11

#### Михальчук Н.Л., Савоськин А.Н., Чучин А.А.

Силовая схема электровоза переменного тока с применением управляемого транзисторного преобразователя возбуждения .....18

#### Лесов А.Т.

Анализ методов решения задач оптимального управления движением поезда .....23

### ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

#### Васильев А.В.

Применение нейронных сетей для прогнозирования и оповещения событий информационной безопасности .....29

#### Макарова Е.И., Викулов И.П., Быльцева В.Д.

Трамвай-поезд и перспектива его применения в транспортной системе Санкт-Петербурга .....32

#### Рагимов Э.А.

Сравнение энергоэффективности электромобилей .....39

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

#### Николаев П.А., Козловский В.Н., Подгорный А.С., Крицкий А.В.

Исследование помехоустойчивости к внешним электромагнитным воздействиям канала управления скоростью, CAN-шины и электронного реле указателей поворота современного легкового автомобиля .....44

## Способы визуального и автоматического контроля температуры оборудования электроподвижного состава

### // METHODS OF VISUAL AND AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL OF ELECTRIC ROLLING STOCK EQUIPMENT //

**Степанов М.А.,**  
Иркутский государственный университет путей сообщения,  
г. Иркутск

**Степанов А.П.,**  
Иркутский государственный университет путей сообщения,  
г. Иркутск

**Криворотова В.В.,**  
Иркутский государственный университет путей сообщения,  
г. Иркутск

В статье изложены два способа контроля температуры электроподвижного состава железных дорог с помощью термоиндикаторов. Первый способ визуального контроля нагрева силового электрооборудования и электрических машин электровоза дополняет существующие способы контроля температуры на электровозах, делает информацию о нагреве электрооборудования и электрических машин электровоза доступной локомотивной бригаде при движении электровоза и на стоянках, а также позволяет определять после окончания поездки максимальную температуру нагрева контролируемого электрооборудования и электрических машин, которую они получили во время движения электровоза. Постоянный контроль теплового режима силового электрооборудования и электрических машин электровоза позволит локомотивной бригаде оперативно принимать оптимальные решения в сложившихся ситуациях, ремонтникам выявлять то оборудование, которое может выйти из строя при дальнейшей эксплуатации электровоза. В продолжении развития описанного визуального способа рассматривается способ автоматического контроля нагрева боксов при движении подвижного состава,

а также визуального контроля температуры боксов (узлов) на стоянках. Суть способа контроля температуры при движении подвижного состава заключается в том, что на крышки боксов крепится комплект термоиндикаторов, в состав которого включены реверсивный и нереверсивный термоиндикаторы. Регистрация информации о цвете реверсивных термоиндикаторов на крышках боксов колёсных пар подвижного состава, осуществляется в автоматическом режиме с помощью быстродействующих цифровых фотокамер, установленных стационарно в зоне контроля по обеим сторонам пути друг против друга для одновременного получения информации с двух боксов одной колёсной пары. Информация с фотокамер автоматически снимается, сохраняется, анализируется, передаётся и просматривается оператором на диспетчерском посту контроля. На остановках подвижного состава визуальная информация о нагреве боксов доступна обслуживающему персоналу.

Ключевые слова: визуальный и автоматический контроль нагрева электрооборудования, электрических машин, боксов колёсных пар, безопасность движения поездов, надёжность, экономическая выгода.

The article describes two ways to control the temperature of electric rolling stock of railways using thermal indicators (reversible and non-reversible) during movement and in parking lots. The first method of visual control of heating of electric power equipment and electric cars of an electric locomotive complements the existing methods of temperature control on electric wagons, makes information about heating of electric equipment and electric cars of an electric locomotive available to the locomotive crew when driving an

electric wagon and in parking lots, and also allows you to determine, after the end of the trip, the maximum heating temperature of controlled electrical equipment and electric cars which they received during the movement of the electric locomotive. Constant monitoring of the thermal regime of the electric locomotive's power equipment and electric machines will allow the locomotive crew to promptly make optimal decisions in the current situations, and the repairmen to identify the equipment that may fail during further operation of the electric locomotive. In the continuation of the development of the described visual method, the method of automatic control of the heating of the boxes during the movement of rolling stock, as well as visual control of the temperature of the boxes (nodes) in parking lots is considered. The essence of the method of temperature control during the movement of the rolling stock is that a set of thermal indicators is attached to the covers of the box, which includes reversible and non-reversible thermal indicators. Registration of information about the color of reversible thermal detectors on the covers of the wheelset boxes of rolling stock is carried out automatically using high-speed digital cameras installed permanently in the control zone on both sides of the track opposite each other to simultaneously receive information from two boxes of one wheelset. The information from the cameras is automatically captured, stored, analyzed, transmitted and viewed by the operator at the dispatcher control post. At the stops of the rolling stock, visual information about the heating of the box is available to the service personnel.

Keywords: Visual and automatic control of heating, electrical equipment, electric machines, wheelset boxes, train safety, reliability, economic benefits.

### Введение

При эксплуатации подвижного состава железных дорог возникают аварийные ситуации, связанные с нарушением контроля температурного режима электрооборудования, электрических машин, механической части электровозов и вагонов. Возникающие при этом аварийные ситуации приводят к аварийным остановкам, продолжительным ремонтам оборудования электроподвижного состава и вагонов [1-6].

Не редки случаи возгораний магистральных электровозов в разных регионах России. Всё это увеличивает затраты на эксплуатацию подвижного состава, ведёт к материальным потерям [7-9]. В связи с этим возникают задачи по повышению эффективности контроля температуры электрооборудования, электрических машин электровозов и букс (узлов) колёсных пар вагонов подвижного состава [10].

Применяемые системы контроля температуры высоковольтного электрооборудования и электрических машин электровозов отвечают требованиям электробезопасности, требуют регулярного обслуживания, проверки работоспособности, достоверности получаемой информации и других видов работ. При этом всё высоковольтное оборудование на электровозе ограждено металлической сеткой от обслуживающего персонала, т.е. находится на достаточно удалённом расстоянии в целях безопасности локомотивных бригад [3,4].

### Постановка задачи

Ставится задача создания новых дополнительных способов контроля температуры электроподвижного состава железных дорог на ходу поезда и на стоянках на основе современных не дорогих инструментов контроля.

### Решение задачи

Допустимая температура нагрева электрической изоляции проводов лежит в пределах 950-1350 С, которая определяет допустимый диапазон температур нагрева соответствующих частей электрооборудования и электрических машин электроподвижного состава. Для контроля температур в указанном диапазоне возможно использова-

ние не дорогих цветowych индикаторов температуры, которые делятся на два типа реверсивные и нереверсивные [11,12].

Рассмотрим более подробно их принцип действия. Реверсивные термоиндикаторы изменяют свой цвет в зависимости от температуры в реальном времени, т.е. от действующей температуры в данный момент времени, что позволяет использовать их многократно. Нереверсивные термоиндикаторы разовые, они изготавливаются из разных полосок термоиндикаторов, изменяющих свой цвет при определённых температурах нагрева. При этом при понижении температуры нереверсивные термоиндикаторы не изменяют свой цвет, а сохраняют цвет, соответствующий наибольшей температуре нагрева, т.е. показывают и сохраняют наибольшую температуры нагрева контролируемого оборудования [11,12].

Диапазон температур, на который в настоящее время могут выпускаться цветowych термоиндикаторы составляет 400-2500 С, что позволяет выбрать оптимальные для визуального наблюдения и температурного режима мест на электрооборудовании, электрических машинах и другом оборудовании электроподвижного состава [11,12].

Так как цветowych термоиндикаторы изготавливаются в виде самоклеющихся гибких плёнок, то могут наклеиваться на поверхности оборудования любой формы.

Цена цветowych термоиндикаторов незначительна, размещение их на оборудовании может определяться из условий эксплуатации оборудования, и в дальнейшем корректироваться опытным путём.

Наблюдение за изменением цвета наклеенных термоиндикаторов может проводиться поездными бригадами как на ходу электровоза, так и на остановках [13].

Рассмотрим второй предложенный способ контроля температуры с помощью термоиндикаторов [14].

Система контроля нагрева букс вагонов подвижного состава сводится к двум способам: автоматическому и ручному. С помощью автоматики обнаруживается перегрев и заторможенность колёс вагонов движущего состава. В этом способе используется аппаратура типа ДИСК, ПОНАБ и КТСМ. Второй способ за-

ключается в наружном осмотре работниками пунктов технического обслуживания после прибытия поезда [10].

При первом способе по инфракрасному излучению от букс вагонов аппаратура обнаруживает перегретые буксы и выдает сигнал обслуживающему персоналу для принятия соответствующего решения. При работе аппаратуры возможны сбои в зависимости от природных условий (и других внешних причин), например, от солнца [10].

При реализации второго способа контроля температурного режима букс подвижного состава работники должны на ощупь улавливать нагрев букс, сравнивать отклонения температуры букс от средней по составу поезда. Применение разрешённых приборов контроля температуры каждой буксы, увеличивает время осмотра вагонов [10].

Известен способ, предлагающий покрывать крышки букс материалом, изменяющим свой цвет, в зависимости от температуры нагрева буксы, который позволяет постоянно отслеживать температуру буксы, в том числе и при её остывании. С 1922 года, когда способ был предложен в Германии, то он не получил распространение в сети железных дорог, в силу того, что при ручном осмотре не давал большого преимущества по сравнению с традиционным способом, а также не был автоматизирован [15].

Предложенный способ автоматического контроля температуры нагрева букс (узлов) железнодорожных вагонов на ходу поезда при следовании по станциям, оборудованным пунктами наблюдения, а также визуального наблюдения на пунктах технического обслуживания, является самостоятельным способом, дополняет существующие способы контроля температуры, делает получаемую информацию более объективной, достоверной и надёжной, что уменьшает риски аварий поездов по причине неисправности букс вагонов [14].

Для реализации способа на крышки букс (узлов) колёсных пар вагонов всего состава поезда наклеиваются реверсивные и нереверсивные термоиндикаторы [14].

Снятие информации о цвете термоиндикаторов на крышках букс

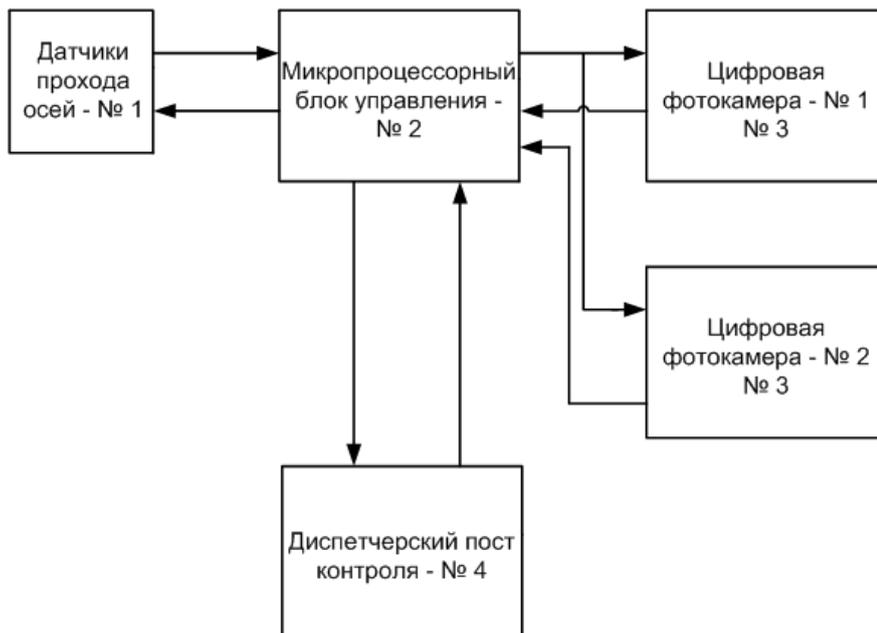


Рис. 1. Блок-схема устройства автоматического неконтактного контроля температуры букс колёсных пар движущего поезда

контроля или передаваться в другие базы данных [14].

Устройство для автоматического неконтактного контроля нагрева букс железнодорожных подвижных транспортных средств может располагаться стационарно на пунктах контроля, например, совместно с аппаратурой типа ПОНАБ, ДИСК и КТСМ или самостоятельно на других пунктах контроля. Обеспечивает достоверную информацию о температурном состоянии каждой буксы всего состава поезда в реальном масштабе времени. При этом по сравнению с аппаратурой типа ПОНАБ, ДИСК и КТСМ, существующими средствами защиты практически исключается вероятность сбоев из-за попадания солнечных лучей в объектив фотокамеры. Кроме того, нереверсивные термоиндикаторы при осмотре вагонов на станциях дают информацию работникам о максимальной температуре, до которой каждая букса в отдельности была нагрета в процессе её эксплуатации. Информация о температурном режиме эксплуатации каждой буксы колёсных пар служит обслуживающему персоналу основанием для принятия решения.

Предложенный способ можно использовать для контроля температуры букс грузовых и пассажирских вагонов поездов, который будет дополнять существующие системы контроля температуры нагрева букс подвижного состава [14].

### Заключение

Предложены способы визуального и автоматического контроля температуры нагрева электрооборудования, электрических машин электроподвижного состава, букс (узлов) вагонов железнодорожных поездов [13,14].

Конечный технический результат применения предложенных способов контроля температуры на основе недорогих, простых в эксплуатации термоиндикаторов заключается в повышении безопасности движения поездов.

### Литература

1. Сидоров, Н.Н. Как устроен и работает электровоз. / Н.Н. Сидоров – изд. 3-е перераб. и доп. М.: Транспорт, 1974. -224 с.
2. Медель, В.Б. Подвижной состав электрических железных дорог. Кон-

может осуществляться работниками визуально и (или) в автоматическом режиме, например, при движении поезда информация снимается с помощью цифровых видеокамер, установленных напольно около железнодорожного пути в требуемой зоне. Полученная таким образом информация в дальнейшем может передаваться, сохраняться и просматриваться диспетчером в реальном времени или после прохода поездом места наблюдения. При этом, по сравнению с аппаратурой, практически исключается вероятность сбоев из-за попадания солнца в объектив видеокамеры, т.к. ее ось, например, можно устанавливать горизонтально и перпендикулярно к плоскости крышек букс движущегося поезда [14].

Укрупненная блок-схема устройства автоматического неконтактного контроля температуры букс колёсных пар движущего поезда представлена на рис.1, где 1 – датчики прохода осей, 2 – микропроцессорный блок управления, 3 – цифровые фото камеры, 4 – диспетчерский пост контроля.

Устройство автоматического неконтактного контроля температуры букс колёсных пар движущегося поезда работает следующим образом: при прохождении состава поезда через участок контроля, с блока датчиков прохода осей поступает сигнал в блок управления,

который синхронно включает цифровые фотокамеры в момент попадания букс колёсной пары в поле их зрения. Полученные фотоснимки считываются с цифровых фотокамер микропроцессорным блоком управления, каждый фотоснимок идентифицируется по вагонам и по осям состава поезда. Параллельно фотоснимки сохраняются в памяти цифровых фотокамер. После обработки микропроцессорным блоком управления информации, полученной с фотокамер, заключающейся, в том числе, в сравнении с нормируемыми показателями нагрева букс, заложенными в его память, и регистрации фотоснимков букс с температурными отклонениями, фотоснимки поступают в диспетчерский пост контроля для дальнейшего анализа и принятия решения. С диспетчерского поста контроля по обратной связи передаются командные сигналы в микропроцессорный блок управления для повторения передачи информации, в том числе и всех фотоснимков, поступивших с фотокамер, тестирования системы, изменения нормируемых показателей, например, от температуры окружающей среды и для обнуления памяти цифровых фотокамер и приведения микропроцессорного блока управления в исходное рабочее состояние. Информация о перегретых буксах колёсных пар может храниться на диспетчерском посту

струкция и динамика / В.Б. Медель – М.: – Транспорт, 1974. – 232 с.

3. Головатых, А.Т. Электроподвижной состав: эксплуатация, надёжность, ремонт / А.Т. Головатых, П.И. Борцов – М.: Транспорт, 1981. – 240 с.

4. Айзинбуд, С. Я. Эксплуатация локомотивов / С.Я. Айзинбуд, П.И. Кельперис – 2 изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1990. – 261 с.

5. Некрасов, Т. И. Техническое обслуживание буксовых узлов вагонов / Т.И. Некрасов -М.: Транспорт, 1990. – 47 с.

6. Инструктивные указания по эксплуатации и ремонту вагонных букс с роликовыми подшипниками. <http://www.entc.ru/index.php?pg=logistri rail-Инфо>.

7. Хроника горящего локомотива. Газета «Гудок» от 30.07.2002. – <http://www.gudok.ru>

8. Из-за пожара в электровозе под Красноярском на Транссибе было прервано движение поездов. [www.newslab.ru](http://www.newslab.ru)

9. В Приморье произошел пожар на электровозе. – <http://www.primamedia.ru>

10. Миронов, А.А. Аппаратура обнаружения перегретых букс и заторможенных колес должна работать лучше / А.А. Миронов, В.Л., Образцов, А.Э. Павлюков – <http://www.newscb.ru/index.php>.

11. Измерение температуры. [www.DirectRelief.org](http://www.DirectRelief.org)

12. Абрамович Б.Г., Картавцев В.Ф. Цветовые индикаторы температуры / Б.Г. Абрамович, В.Ф. Картавцев – М.: Энергия, 1978. -216 с.

13. Пат. № 2411149/2011 Российская Федерация, RU 2 411 149 С2, МПК В61К 9/00 (2006.01). Способ визуального контроля нагрева силового электрооборудования и электрических машин электровоза / А.П. Степанов, А.И. Милованов, В.Н. Саломатов, К.А. Марютин, М.А. Степанов; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – №2008103611/11 заявл. 29.01.2008 опублик. 10.08.2009. Бюл. №22.

14. Пат. № 100477 Российская Федерация, RU 100477 U1, МПК В61К 9/04 (2006.01). Устройство для авто-

матического неконтактного контроля нагрева букс / Степанов А.П., Саломатов В.Н., Милованов А.И., Степанов М.А.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. – №2010118047/заявл. 05.05.2010/ опублик. 20.12.2010. Бюл. №35.

15. Патент Германии GB 155574 А, кл. В61К9/04, опублик. 24.04.1922.

#### **Степанов Максим Александрович**

Родился в 1974 году. В 1996 году окончил Иркутский государственный технический университет по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». В 2017 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка способов магнитного контроля и оценки технического состояния элементов протяжённых стальных конструкций». В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения. Автор 36 трудов, из них 1 монография, 13 патентов на изобретение и 1 патент на полезную модель РФ.

#### **Степанов Александр Петрович**

Родился в 1949 году. В 1971 году окончил Иркутский политехнический институт по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок». Защитил кандидатскую диссертацию в 1979 году. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения. Имеет отраслевые грамоты. Автор 91 научного труда, из них 16 патентов на изобретение и 1 патент на полезную модель РФ.

#### **Криворотова Виктория Викторовна**

Родилась в 1983 году. Окончила Иркутский государственный университет путей сообщения по специальности «Инженер путей сообщения» в 2003 году. Защитила кандидатскую диссертацию по теме «Возбуждение монокристаллов, легированных эрбием, в интенсивных оптических и

радиационных полях». В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения. Автор 43 научных трудов.

#### **Stepanov Maxim Alexandrovich**

Was born in 1974. In 1996 he graduated from the Irkutsk State Technical University with a degree in Electric Drive and Automation of Industrial Installations and Technological Complexes. In 2017 he defended his Ph.D. thesis on the topic "Development of methods for magnetic control and assessment of the technical condition of elements of extended steel structures". Currently, he works as an assistant professor at the Department of Electric Power Engineering of Transport at the Irkutsk State Transport University. Author of 36 works, including 1 monograph, 13 invention patents and 1 utility model patent of the Russian Federation.

#### **Stepanov Alexander Petrovich**

Was born in 1949. In 1971 he graduated from the Irkutsk Polytechnic Institute with a degree in Electric Drive and Automation of Industrial Installations. He defended his Ph.D. thesis in 1979. Currently, he works as an assistant professor at the Department of Electric Power Engineering of Transport at the Irkutsk State Transport University. He has industry credentials. Author of 91 scientific works, including 16 invention patents and 1 utility model patent of the Russian Federation.

#### **Krivorotova Victoria Viktorovna**

Was born in 1983. Graduated from Irkutsk State Transport University with a degree in Railway Engineering in 2003. She defended her Ph.D. thesis on the topic "Excitation of single crystals doped with erbium in intense optical and radiation fields." Currently, he works as an assistant professor at the Department of Electric Power Engineering of Transport at the Irkutsk State Transport University. Author of 43 scientific papers.

# Особенности устройства и работы четырехфазного вентильного двигателя переменного тока с несимметричной обмоткой

// FEATURES OF THE DEVICE AND OPERATION OF A FOUR-PHASE AC AC MOTOR WITH ASYMMETRICAL WINDING //

**Гридин В.М., к.т.н.,  
Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва**

В рассмотренном вентильном двигателе (ВД) обмотка выполнена несимметричной: ее вторая, третья и четвертая фазы смещены относительно первой фазы на угол, равный соответственно  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  и  $225^\circ$  электрических градусов. Рассмотрены особенности устройства и работы такого двигателя. Проведено сравнение основных характеристик четырехфазных и трехфазных моментных ВД переменного тока, при этом определены отношения их моментов и пульсаций моментов, оценена надежность работы обоих ВД. Вначале выразили электромагнитный момент ВД т:

$$m = A \cdot I_m \cdot w \cdot \sum_{k=1}^s \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k ,$$

$$\bar{i}_k = i_k / I_m , \quad \bar{b}_k = b_k / B_m ,$$

где:  $A$  – одинаковый коэффициент

для всех чисел фаз обмотки  $S$ ,  $I_m$  – максимальный ток в фазах обмотки,  $B_m$  – максимальная магнитная индукция в рабочем зазоре,  $i_k$  – ток в  $k$ -й фазе,  $b_k$  – магнитная индукция для  $k$ -й фазы,  $w$  – число витков в каждой фазе.

Составлены выражения для отнесенных фазных токов  $\bar{i}_k$  и магнитных индукций  $\bar{b}_k$  в четырехфазном и трехфазном двигателях в виде рядов Фурье. Используя их, получены выражения для электромагнитных моментов и пульсаций этих моментов. При анализе этих выражений установлено, что пульсация момента у четырехфазного двигателя примерно в 2.4 раза меньше, чем у трехфазного. Также установлено, что четырехфазный двигатель создает такой же момент, как и трехфазный двигатель. А в случае отказа одного транзистора или схемы управления им момент  $m$  будет изменяться в меньших пределах.

Ключевые слова: четырехфазная несимметричная обмотка, трехфазная обмотка, электромагнитный момент, пульсация момента.

*In the engine under consideration,*

*the winding is asymmetrical: its second, third and fourth phases are shifted relative to the first phase by an angle equal to  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  and  $225^\circ$  electrical degrees, respectively. The features of the device and the operation of such an engine are considered.*

*The expressions for phase currents and magnetic inductions in torque four-phase and three-phase motors in the form of Fourier series are compiled. Using them, expressions for the electromagnetic moment and pulsation of this moment are obtained. When analyzing these expressions, it was found that the ripple of the moment in a four-phase motor is approximately 2.4 times less than in a three-phase motor. It has also been found that a four-phase motor produces the same specific torque as a three-phase motor and is more reliable.*

Keywords: four-phase unbalanced and three-phase windings, electromagnetic moment, ripple of torque, specific moment.

Вентильные двигатели (ВД) по сравнению с двигателями постоянного тока обладают подобными характеристиками, но не имеют скользящих контактов [1] – [4], поэтому они работают более надежно, особенно при вибрациях, ускорениях, после ударов, в вакууме и т.п.

ВД содержит синхронный двигатель (СД), инвертор тока (ИТ), формирующий значения фазных токов в соответствии с положением ротора, датчик положения ротора (ДПР) и преобразователь сигналов ДПР в напряжения, управляющие ИТ.

Основными характеристиками ВД являются удельный момент (от-

ношение момента к объему активной, электромеханической части двигателя), КПД и пульсация момента. Последняя должна быть как можно меньше, особенно для моментных, т.е. низкоскоростных ВД, у которых скорость вращения вала может быть, например, (0,01 – 0,1) об/с. Такие рассматриваемые здесь двигатели применяют например в гироскопических системах как коррекционные для удержания оси гироскопа в заданном направлении.

ВД можно разделить на два типа: ВД постоянного тока и ВД переменного тока. ВД постоянного тока посвящены, например [2], [5] – [13].

Они обеспечивают при повороте ротора поочередное подключение секций ЯО к источнику питания и отключение их от источника. При желаемой трапецидальной форме ЭДС и оптимальных моментах подключений секций к источнику форма тока в каждой секции близка к трапецидальной. Трапецидальная форма ЭДС возможна при трапецидальном распределении магнитной индукции по окружности воздушного зазора [11], [12]. Так как реальное распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора не строго трапецидальное, то при повороте ротора момент пульсирует.

ет. Пульсацию можно уменьшить, изменяя при повороте ротора фазные токи плавно или ступенчато, как это показано в [11], [12].

ВД переменного тока посвящены, например [7], [14] – [16]. Они обеспечивают при повороте ротора токи в секциях (фазах) ЯО, изменяемые путем позиционной непрерывной или широтно-импульсной модуляции фазных напряжений [7], [14.] – [16]. Для них характерны синусообразное распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора и синусообразные фазные токи. ИТ может быть выполнен линейным при относительно небольших значениях момента или с широтно-импульсным модулятором (ШИМ) фазных напряжений. Так как реальное распределение магнитной индукции по окружности воздушно-го зазора и фазные токи не строго синусоидальные, то при повороте ротора момент пульсирует. Пульсацию можно уменьшить, применяя для ИТ отрицательную обратную связь по току. В этом случае ВД содержит датчик тока, а схема ВД усложнена. С той же целью можно калибровать преобразователь сигналов ДПР в напряжения, управляющие ИТ, т.е. корректировать форму фазных токов. Но устройство и процесс калибровки весьма громоздки [14] – [16].

Обычно применяют ВД постоянного тока и ВД переменного тока с трехфазной ЯО и шестью силовыми

транзисторами. Индуктор выполняются в виде магнита – звездочки или составным из внутреннего магнитомягкого основания и наружных полюсов-магнитов.

Пульсация момента у известных ВД с дискретным и с аналоговым управлением составляет не менее 3, 5-4%, но во многих случаях она не должна превышать 1-2%, например, для коррекционных двигателей гироскопических систем.

Здесь рассматривается альтернативный ВД переменного тока.

На рис. 1 показана упрощенная электрическая схема четырехфазного ВД переменного тока с ИТ, содержащим ШИМ.

Силовая часть этой схемы, содержащая обмотку, транзисторы  $VT1 - VT8$  и диоды  $VD1 - VD8$ , вместе с источником питания изображена в виде принципиальной электрической схемы. Остальная часть, содержащая ДПР и ШИМ1 – ШИМ4, изображена в виде упрощенной функциональной схемы управления транзисторами  $VT1 - VT8$ . Преобразователь сигналов ДПР не показан. На входы ШИМ подаются также пилообразные напряжения, с которыми сравниваются преобразованные сигналы ДПР. Из-за несимметрии обмотки применен источник питания со средней точкой, которая соединена с общим выводом  $O$  фаз обмотки.

Обмотка – четырехфазная несимметричная, предложена автором. Ее

фазы  $BO$ ,  $CO$  и  $DO$  смещены относительно фазы  $AO$  на электрический угол, равный соответственно  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  и  $225^\circ$ . Обмотка выполнена распределенной с укороченным шагом. Она может быть уложена в пазы, скошенные на одно пазовое деление, или на внутренней цилиндрической поверхности гладкого магнитопровода якоря для исключения пульсации момента, обусловленной зубчатым строением магнитопровода. Индуктор выполнен в виде цилиндрического постоянного магнита с радиальными неявно выраженными полюсами или состоящим из внутреннего магнитомягкого основания, наружных полюсов – магнитов и профилированных полюсных наконечников.

ДПР может быть выполнен, например, в виде синус-косинусного вращающегося трансформатора или в виде двухфазного микросина. При вращении ротора напряжения на выходе преобразователя сигналов ДПР изменяются по законам, близким к синусоидальным:

$$\begin{aligned} u_{d1} &\approx U_{dm} \cdot \sin \alpha, & u_{d2} &\approx U_{dm} \cdot \sin(\alpha - 90^\circ), \\ u_{d3} &= (-u_{d1} + u_{d2}) / \sqrt{2} \approx U_{dm} \cdot \sin(\alpha - 135^\circ), \\ u_{d4} &= -(u_{d1} + u_{d2}) / \sqrt{2} \approx U_{dm} \cdot \sin(\alpha + 135^\circ), \end{aligned}$$

где  $U_{dm}$  – амплитуда выходных напряжений преобразователя,  $\alpha$  – угловое положение ротора.

ШИМ1 – ШИМ4 создают последовательности импульсов напряжений  $u_{y1} - u_{y8}$ , у которых отношение  $\gamma$  их длительности к интервалу времени между соседними импульсами соответствует напряжениям  $u_{d1} - u_{d4}$  и равно соответствующей синусоидальной функции от угла  $\alpha$ .

На одном полупериоде изменения напряжений  $u_{d1} - u_{d4}$  импульсы напряжений  $u_{y1} - u_{y4}$  с изменяемым отношением  $\gamma$  поступают на входы транзисторов  $VT1 - VT4$ , а на другом полупериоде аналогичные импульсы напряжений  $u_{y5} - u_{y8}$  поступают на входы транзисторов  $VT5 - VT8$ , и последние в это время открываются и проводят ток. В результате по фазам обмотки, представляющим активно-индуктивную нагрузку, через транзисторы  $VT1 - VT8$  и диоды  $VD1 - VD8$  протекают непрерывные синусообразные токи, и двигатель создает электромагнитный момент. Более подробно устройство и работа ВД с ШИМ описаны в [7.]

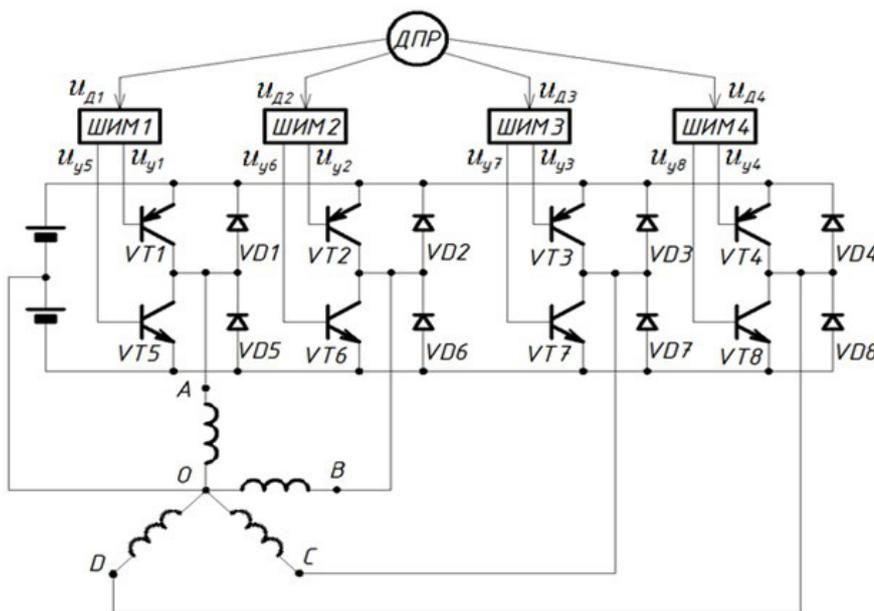


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема ВД переменного тока:  $AO, BO, CO, DO$  – фазы обмотки; ДПР – датчик положения ротора; ШИМ1 – ШИМ4 – широтно-импульсные модуляторы

ВД переменного тока, в том числе четырехфазный, может быть выполнен и без ШИМ, с линейным ИТ при относительно небольших значениях момента [14].

Электромагнитный момент  $m$  можно выразить следующим образом:

$$m = A \cdot I_m \cdot w \cdot \varepsilon,$$

где:  $A = D \cdot L \cdot B_m \cdot \rho$ ,

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^S \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k, \quad \bar{i}_k = i_k / I_m,$$

$$\bar{b}_k = b_k / B_m,$$

$D$  – диаметр воздушного зазора между якорем и индуктором,  $L$  – длина магнитопровода якоря,  $B_m$  – максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре,  $\rho \approx 0,95-0,97$  – коэффициент, учитывающий скос пазов или укладку обмотки на гладком магнитопроводе якоря,  $I_m$  – максимальный ток в фазах обмотки,  $w$  – число витков в каждой фазе,  $S$  – число фаз обмотки,  $i_k$  – ток в  $k$ -й фазе,  $b_k$  – магнитная индукция для  $k$ -й фазы обмотки.

Сравним основные характеристики четырехфазного и трехфазного моментных ВД переменного тока. У обоих ВД ИТ, ДПР и преобразователь сигналов ДПР однотипные. Например, ИТ выполнены как линейные. СД имеют одинаковую конструкцию и выполнены в одинаковых габаритах, а их обмотки потребляют одну и ту же энергию от источников питания с одинаковым напряжением. При этом считаем, что у обоих ВД одинаковы распределения магнитной индукции по окружности воздушного зазора. Учитываем, что фазные токи в трехфазных ВД не содержат гармоники, кратные трем, и содержат таковые в четырехфазных ВД.

Для сравниваемых ВД множитель  $A$  – одинаковый, а произведения  $I_m w \varepsilon$  – различные в формуле для электромагнитного момента. Будем обозначать характеристики трех- и четырехфазного ВД с индексом 3 и 4 соответственно.

Если при вращении ротора магнитные индукции  $b_k$  и токи  $i_k$  изменялись бы строго синусоидально, то были бы справедливы следующие выражения и значения:

$$\varepsilon_4 = \sum_{k=1}^4 \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k = \sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha - 90^\circ) +$$

$$+ \sin^2(\alpha - 135^\circ) + \sin^2(\alpha + 135^\circ) = 2,0$$

$$\varepsilon_3 = \sum_{k=1}^3 \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k = \sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha - 10^\circ) + \sin^2(\alpha + 120^\circ) = 1,5.$$

Очевидно, что множители  $\varepsilon_4$  и  $\varepsilon_3$ , а следовательно и электромагнитные моменты (далее – моменты) не зависели бы от положения ротора и отсутствовала бы пульсация моментов.

Но реально фазные токи  $i_k$  и магнитные индукции  $b_k$  как периодические функции от угла  $\alpha$  содержат высшие нечетные гармоники. С другой стороны, принципиально невозможно устранить хотя бы все значимые высшие гармоники или идеально откорректировать преобразователь сигналов ДПР, т.е. откорректировать форму фазных токов. Поэтому при вращении ротора момент всегда пульсирует.

Нахождение выражений для момента и пульсации момента с учетом всех дестабилизирующих факторов является очень сложной задачей. Искомые выражения были бы также очень сложными для анализа. А нахождение значений пульсаций вообще является неопределенной задачей, так как неизвестны гармонические составы (ряды) для относительных фазных токов ( $\bar{i}_k$ ) и магнитных индукций ( $\bar{b}_k$ ). Однако все же можно определить, оценить **отношение** пульсаций моментов сравниваемых ВД, а также **отношение** моментов, что и сделано ниже. **Отношение** пульсаций моментов гораздо менее критично к значениям коэффициентов Фурье для гармонических рядов, чем сами пульсации моментов.

Для относительных фазных токов и магнитных индукций в четырехфазном ВД ( $S = 4$ ) можно записать следующие выражения (ряды Фурье), считая, что  $\bar{i}_k = \bar{b}_k$ :

$$\bar{b}_1 = \bar{i}_1 = \sin \alpha + C_3 \cdot \sin 3 \cdot \alpha + C_5 \cdot \sin 5 \cdot \alpha + C_7 \cdot \sin 7 \cdot \alpha + C_9 \cdot \sin 9 \cdot \alpha + \dots$$

$$\bar{b}_2 = \bar{i}_2 = \sin(\alpha - 90^\circ) + C_3 \cdot \sin(3 \cdot \alpha + 90^\circ) + C_5 \cdot \sin(5 \cdot \alpha - 90^\circ) + C_7 \cdot \sin(7 \cdot \alpha + 90^\circ) + C_9 \cdot \sin(9 \cdot \alpha - 90^\circ) + \dots$$

$$\bar{b}_3 = \bar{i}_3 = \sin(\alpha - 135^\circ) + C_3 \cdot \sin(3 \cdot \alpha - 45^\circ) + C_5 \cdot \sin(5 \cdot \alpha + 45^\circ) + C_7 \cdot \sin(7 \cdot \alpha + 135^\circ) + C_9 \cdot \sin(9 \cdot \alpha - 135^\circ) + \dots$$

$$\bar{b}_4 = \bar{i}_4 = \sin(\alpha + 135^\circ) + C_3 \cdot \sin(3 \cdot \alpha + 45^\circ) + C_5 \cdot \sin(5 \cdot \alpha -$$

$$45^\circ) + C_7 \cdot \sin(7 \cdot \alpha - 135^\circ) + C_9 \cdot \sin(9 \cdot \alpha + 135^\circ) + \dots$$

Абсолютные фазные токи и магнитные индукции – результат умножения относительных фазных токов и индукций на максимальный ток  $I_m$  и на максимальную индукцию  $B_m$  соответственно.

Если учесть только 1-ю, 3-ю, 5-ю, 7-ю и 9-ю гармоники, пренебречь квадратами и произведениями выражений для высших гармоник как малыми членами и использовать формулу:

$$\sin(\alpha - \beta) \sin n(\alpha - \beta) = \{\cos[(n - 1)(\alpha - \beta)] - \cos[(n + 1)(\alpha - \beta)]\} / 2,$$

где  $\beta = 0, 90, 135, 225$ ,  $n = 3, 5, 7, 9, \dots$  то можно получить выражения:

$$\varepsilon_4 = \sum_{k=1}^4 \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k = \varepsilon_{cp4} (1 - v_4 \cos 8 \alpha),$$

$$\varepsilon_{cp4} = 2, \quad v_4 = 2(C_7 - C_9), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{cp4}$  – среднее значение множителя  $\varepsilon_4$ ,  $v_4$  – пульсация множителя  $\varepsilon_4$ . Так как момент  $m$  пропорционален множителю  $\varepsilon$ , то  $v_4$  есть пульсация момента четырехфазного ВД.

Для относительных магнитных индукций  $\bar{b}_k$ : в трехфазном ВД ( $S = 3$ ) можно записать аналогичные выражения (ряды Фурье):

$$\bar{b}_1 = \sin \alpha + C_3 \cdot \sin 3 \cdot \alpha + C_5 \cdot \sin 5 \cdot \alpha + C_7 \cdot \sin 7 \cdot \alpha + C_9 \cdot \sin 9 \cdot \alpha + \dots$$

$$\bar{b}_2 = \sin(\alpha - 120^\circ) + C_3 \cdot \sin(3 \cdot \alpha + C_{35} \cdot \sin(5 \cdot \alpha + 120^\circ) + C_7 \cdot \sin(7 \cdot \alpha - 120^\circ) + C_9 \cdot \sin 9 \cdot \alpha + \dots$$

$$\bar{b}_3 = \sin(\alpha + 120^\circ) + C_3 \cdot \sin 3 \cdot \alpha + C_5 \cdot \sin(5 \cdot \alpha - 120^\circ) + C_7 \cdot \sin(7 \cdot \alpha + 120^\circ) + C_9 \cdot \sin 9 \cdot \alpha + \dots$$

Здесь весовые коэффициенты Фурье при синусах такие же, как и для ВД с четырехфазной обмоткой. Считаем, что выражения для относительных фазных токов  $\bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{i}_3$  отличаются от приведенных выражений для относительных индукций только отсутствием гармоник, кратных трем. Действуя аналогично случаю  $S = 4$ , можно получить выражения:

$$\varepsilon_3 = \sum_{k=1}^3 \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k = \varepsilon_{cp3} (1 - v_3 \cos 6 \alpha),$$

$$\varepsilon_{cp3} = 1,5, \quad v_3 = 2(C_5 - C_7) \quad (2)$$

Из (1) и (2) получим искомое **отношение** пульсаций момента:

$$v_3/v_4 = (C_5 - C_7)/(C_7 - C_9)$$

Так как  $C_5 > C_7 > C_9$ , то  $(C_7 - C_9) < (C_5 - C_7)$

Следовательно  $v_4 < v_3$ .

$$\text{Если например } C_5 = \frac{1}{25}, C_7 = \frac{1}{49},$$

$$C_9 = \frac{1}{81},$$

то по формулам (1) и (2) получим следующие значения:

$$v_4 \approx 0,016, \text{ или } 1,6 \%, v_3 \approx 0,039, \text{ или } 3,9 \%$$

$$\text{Следовательно: } v_4 < v_3, v_3/v_4 \approx 3,9/1,6=2,44.$$

Этот результат близок к результатам испытаний моментных вентильных двигателей в НИИ прикладной механики. В результате испытаний установлено, что:

$$v_4 \approx 1,5 \%, v_3 \approx 3,5 \%, v_3/v_4 \approx 2,3.$$

Если в гармонических рядах Фурье для относительных фазных токов и магнитных индукций весовые коэффициенты различные, то можно получить выражения, аналогичные (1) и (2):

$$v_4 = \frac{C_{7i} + C_{7b} - C_{9i} - C_{9b}}{C_{5i} + C_{5b} - C_{7i} - C_{7b}}, v_3 =$$

где коэффициенты с индексом  $i$  относятся к относительному току, а коэффициенты с индексом  $b$  относятся к относительной магнитной индукции.

И в этом случае также  $v_4/v_3$ .

Найдем отношение моментов  $M_4/M_3$  сравниваемых ВД. Условия сравнения указаны выше. При равенстве площадей всех пазов якоря для  $S = 4$  и  $S = 3$  справедливы выражения:

$$8 \cdot w_4 \cdot g_4 = 6 \cdot w_3 \cdot g_3,$$

где  $w_3$  и  $w_4$ ,  $g_3$  и  $g_4$  – числа витков в каждой фазе обмотки и площади поперечного сечения проводников обмотки при  $S = 3$  и  $S = 4$ .

При равенстве напряжений питания отношение максимальных токов в Фазах обмоток:

$$\frac{I_{m4}}{I_{m3}} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{w_3}{g_3} \cdot \frac{g_4}{w_4} = \frac{3}{4} \left( \frac{w_3}{w_4} \right)^2,$$

где  $R_3$  и  $R_4$  – сопротивления фаз при  $S = 3$  и  $S = 4$ .

С другой стороны, при равенстве напряжений питания и энергий, потребляемых обмотками, справедливо:

$$4 \cdot I_{m4} = 3 \cdot I_{m3}$$

Из двух последних формул получим:

$$I_{m4} \cdot w_4 = \frac{3}{4} \cdot I_{m3} \cdot w_3.$$

Согласно вышеприведенной формуле, для момента  $m$  справедливо выражение:  $M = A \cdot \varepsilon_{cp} \cdot I_m \cdot w$

Поэтому:

$$\frac{M_4}{M_3} = \frac{\varepsilon_{cp4} \cdot I_{m4} \cdot w_4}{\varepsilon_{cp3} \cdot I_{m3} \cdot w_3},$$

Нетрудно установить, что  $M_3 \approx M_4 \approx M$ . Следовательно, удельные моменты сравниваемых ВД одинаковы.

Оценим и сравним работу сравниваемых ВД в случае отказа транзистора или схемы управления им. В этом случае для момента  $m$  справедливо выражения:

$$m_3 = [\sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha - 120^\circ)] \cdot M1,5 = [1 - 0,5 \cdot \cos(2\alpha + 60^\circ)] \cdot M1,5 = (1/3 \div 1) \cdot M,$$

$$m_4 \approx [\sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha - 90^\circ) + \sin^2(\alpha \pm 135^\circ)] \cdot M2 = (1,5 \pm 0,5 \cdot \sin 2\alpha) \cdot M2 = (1/2 \div 1) M.$$

При повороте ротора момент  $m$  будет изменяться от  $M_{min}$  до  $M$ :

$$M_{min4} = M/2, M_{min3} = M/3, M2 : M3 = 1,5,$$

т. е. у рассматриваемого ВД момент  $m$  будет изменяться в меньших пределах.

### Выводы

Результаты проведенного сравнения основных характеристик четырехфазных и трехфазных моментных вентильных двигателей переменного тока показывают, что четырехфазный двигатель создаёт такой же удельный момент, что и трехфазный двигатель, но пульсация момента у четырехфазного двигателя примерно в 2,4 раза меньше, чем у трехфазного. Поэтому четырехфазный вентильный двигатель переменного тока, несмотря на более сложное устройство, чем у трехфазного двигателя, может и должен найти применение.

### Литература

1. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики: Учебник для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985, 368 с.
2. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2003 – 424 с.

3. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высшая школа, 1985, 250 с.

4. Зимин Е. Н., Кацевич В. Л., Козырев С. К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями: – Энергоиздат, 1981, 192 с.

5. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1975, 128 с.

6. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. – Л.: Наука, 1979, 270 с.

7. Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путников В.В. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988, 184 с.

8. Овчинников И. Е. Теория вентильных электрических двигателей. Л.: Наука, 1985, 148 с.

9. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами, пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991, 229 с.

10. Штелтинг Г., Байссе А. Электрические микромашины: Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1991, 229 с.

11. Гридин В.М. Способы уменьшения пульсации момента и выходного напряжения бесконтактных моментных двигателей и тахогенераторов постоянного тока. – Электричество, 2016, № 4, с. 56 – 61.

12. Гридин В.М. Моментные бесконтактные двигатели постоянного тока с дискретным и дискретно-аналоговым управлением по положению ротора. – Электричество, 2017, № 4, с. 50 – 55.

13. Гридин В.М. Характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока с симметричной и несимметричной обмотками. – Электроника и электрооборудование транспорта, № 2, 2017, с. 28 – 31.

14. Балковой А. П., Цаценкин В, К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010 – 328 с.

15. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 223 с.

16. Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполни-

тельными двигателями. – М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.

**Гридин Владимир Михайлович**

Родился в 1940 году. В 1963 окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) по специальности «Авиационное электрооборудование». Кандидат технических наук, доцент. В 1979 году защитил диссертацию по теме «Исследование и расчет трехфазных бесконтактных двигателей постоянного тока с однополупериодной коммутацией». Опыт работы – 58 лет. В настоящее

время работает доцентом кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета (МГТУ) им. Н.Э.Баумана. Автор 80 печатных научных трудов, в том числе 1 монографии. Имеет 16 авторских свидетельств на изобретение.

**Gridin Vladimir Mikhailovich**

Was born in 1940. In 1963 he graduated from the Electromechanical Faculty of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI) majoring in Aviation Electrical Equipment.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. In 1979 he defended his dissertation on the topic "Research and calculation of three-phase non-contact DC motors with half-wave commutation". He has 58-year work experience. At the moment he works as the Assistant Professor of the Electrical Engineering and Industrial Electronics Department of the Moscow State Technical University (MSTU) named after N.E. Bauman. Author of 80 printed scientific works, including 1 monograph. Has 16 inventor's certificates.

## Моделирование энергоэффективной системы прямого управления моментом тягового асинхронного двигателя

### // SIMULATION OF AN ENERGY SAVING TRACTION INDUCTION ELECTRIC DRIVE WITH DIRECT TORQUE CONTROL //

**Евстафьев А.М., д.т.н.,  
Петербургский государственный  
университет путей сообщения  
Императора Александра I,  
г. Санкт-Петербург**

**Пугачев А.А., д.т.н.,  
Брянский государственный  
технический университет,  
г. Брянск**

Проведен краткий анализ существующих систем управления тяговых электроприводов с асинхронными двигателями. Показано, что по различным показателям качества применительно к алгоритмам энергосбережения целесообразно применение систем прямого управления моментом. В статье синтезированы расчетные и функциональные зависимости между основными параметрами системы прямого управления моментом и асинхронного двигателя, выполнение которых позволяет снизить потери мощности. Приведена функциональная схема электропривода с энергоэффективной системой управления. Аппаратное обеспечение этой системы управления не отличается от применяемого в настоящее время в преобразователях частоты. Подробно рассмотрена

реализация основных элементов электропривода средствами библиотек Simulink и SimPowerSystems программного комплекса Matlab. Приведены результаты моделирования для электропривода с двигателем мощностью 11 кВт, анализ которых показал адекватность разработанной модели и работоспособность синтезированной системы управления, КПД электропривода с энергоэффективной системой управления увеличивается до 18% по сравнению с традиционным вариантом исполнения системы прямого управления моментом.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, прямое управление моментом, коэффициент мощности, коэффициент полезного действия, моделирование, трехуровневый инвертор напряжения.

A brief survey of the existing traction motor control systems with induction motors was carried out. It has been shown that for various quality indicators in relation to energy saving algorithms, it is advisable to use direct torque control systems. The article synthesizes the calculated and functional dependencies between the main parameters of the direct torque control system and the induction motor, the implementation of which reduces power losses. Topology of electric drive with energy efficient control system is given. The hardware of this control system is not different from that currently used in frequency converters. The implementation of the main elements of the electric drive by means of the Simulink and SimPowerSystems libraries of the Matlab software complex is considered in detail. The results of simulation for 11 kW induction motor electric drive are given, the analysis of which showed the adequacy of the developed model and the performance of the synthesized control system, the efficiency of an electric drive with an energy-efficient control system increases up to 18% compared to the traditional version of the direct torque control system.

Keywords: induction motor, direct torque control, power factor, efficiency, simulation, three-level voltage source inverter

#### Введение

В последние десятилетия наметилась очевидная тенденция к переходу в электроприводах ответственных механизмов к техническим решениям с асинхронными двигателями, преимуществами которых перед двигателями постоянного тока бесспорны. Аналогичная ситуация сложилась и в тяговых электроприводах рельсового подвижного состава, где помимо стандартных требований предъявляются дополнительные требования по

массогабаритным показателям, высокодинамичному управлению моментом двигателя. В настоящее время наибольшее распространение в электроприводе с асинхронным двигателем получили три системы управления – система скалярного управления и система векторного управления и система прямого управления моментом [1,2,3].

Исторически первой системой управления, наиболее простой и надежной, является система скалярно-

го управления. Эта система в большинстве случаев нечувствительна к изменениям параметров схемы замещения асинхронного двигателя и работоспособна при минимальном наборе обратных связей по электрическим переменным двигателя. Основным недостатком системы скалярного управления является невозможность управления моментом в динамических режимах, что может приводить к нежелательным последствиям в режимах пуска (раз-

гона) и торможения тягового электропривода.

Переход к более совершенным системам векторного управления и прямого управления моментом позволяет устранить недостатки, присущие системам скалярного управления в отношении формирования желаемых переходных процессов не только по частоте вращения, но и по моменту, предлагает более широкий выбор возможностей по оптимизации различных показателей качества, в том числе энергетических. Использование таких систем управления сопряжено с наличием большого количества обратных связей, организованных как с помощью датчиков физических величин, так и с помощью микропроцессорных наблюдателей или идентификаторов, что вызывает проблемами обеспечения устойчивости. Поэтому основным инструментом исследования современных систем управления электропривода становится компьютерное моделирование, позволяющие отыскать наилучшее решение в ходе серии экспериментов.

#### **Краткий обзор современных и перспективных систем управления асинхронным двигателем**

Принципиальным отличием высокодинамичных систем управления от системы скалярного управления является возможность управления не только модулем напряжения, но и его фазой (или модулем и фазой другой электрической переменной) непрерывно (для систем векторного управления) или дискретно (для систем прямого управления моментом). В основу систем векторного управления положено разделение тока на две взаимно перпендикулярные составляющие, которые можно регулировать независимо друг от друга при наличии определенных блоков развязки, что дает некоторое сходство таких систем с системами управления двигателями постоянного тока. Основные направления исследований в этой области связаны с выбором рациональной частоты вращения системы координат, что позволяет регулировать переменные не только статора, но и ротора;

выбором регулируемых переменных и структуры системы управления, что позволяет создавать энергоэффективные электроприводы и др. [4,5]. Основные трудности – это получение достоверной информации о электромагнитных переменных двигателя, которые в силу отсутствия физических датчиков или невозможности их монтажа невозможно измерить непосредственно. Данная проблема становится еще актуальнее для тяговых электроприводов рельсового подвижного состава, где происходят значительные изменения не только параметров схемы замещения асинхронного двигателя, но и переменных механической части, что на порядок усложняет синтез косвенных систем измерения. Поэтому еще одним актуальным направлением разработок является синтез бездатчиковых систем управления и апробация их работы в механизмах с переменным моментом инерции.

Альтернативой системам векторного управления являются системы прямого управления моментом, принципиальным отличием которых является то, что за счет применения релейных регуляторов момента и потокосцепления статора регулирования угла выбранной электрической переменной (как правило, это потокосцепление статора) осуществляется с точностью до сектора в  $60^\circ$ . Преимуществами такого построения являются упрощение системы управления и отсутствие в ней части координатных преобразований, высокое быстродействие контура момента. Недостатки – колебания момента, отсутствие контура регулирования тока статора, переменная частота коммутации полупроводниковых приборов автономного инвертора напряжения. Основные направления исследований в этой области связаны с уменьшением амплитуды колебаний момента, фиксацией частоты коммутации полупроводниковых приборов, применением алгоритмов пространственно-векторной модуляции напряжения статора и многоуровневых инверторов напряжения, синтезом бездатчиковых систем управления (аналогично векторному управлению) и др. [6,7]. Отметим, что с точки зрения опти-

мизации режимов работы электропривода системы прямого управления моментом предлагают меньше вариантов, т.к. они оперируют только с переменными статора. Тем не менее, учитывая высокое быстродействие данные системы являются предпочтительными для их использования в составе тяговых электроприводов.

Таким образом, проведенный краткий обзор систем управления показал, что наиболее перспективным вариантом системы управления тягового электропривода является система прямого управления моментом. В связи с этим, в данной работе поставлена задача синтеза и исследования посредством компьютерного моделирования энергоэффективной системы управления на базе системы прямого управления моментом.

#### **Синтез энергоэффективной системы управления**

При синтезе энергоэффективных, т.е. зачастую экстремальных, систем управления электропривода основной задачей является выбор задающего воздействия, обеспечивающего минимизацию потерь мощности в асинхронном двигателе и увеличение КПД электропривода. Учитывая нелинейный характер зависимости потерь от основных характеристик двигателя, для решения этой задачи требуется принимать достаточно большое количество допущений, которые в итоге сказываются на эффективности регулирования в широком диапазоне изменения различных параметров. Одним из возможных задающих воздействий может являться потокосцепление ротора  $\psi_r$ . Неэффективность работы двигателя с постоянным потокосцеплением ротора при его работе в составе тягового электропривода хорошо известна [8]. Используя общепринятую Т-образную эквивалентную схему замещения асинхронного двигателя и соотношения между энергетическими показателями качества и электромеханическими характеристиками, можно вычислить значение КПД двигателя в функции частоты вращения, момента сопротивления и параметров эквивалентной схемы замещения:

$$\eta \approx \frac{6L_{\mu}^2 \omega p^2 \psi_r^2 R_c M}{9p^2 \psi_r^4 R_c R_s + 8L_{\sigma r} L_{\mu} R_c R_s M^2 + L_{\mu}^2 (3\omega p^2 \psi_r^2 + 2R_c M)(3\omega p^2 \psi_r^2 + 2(R_s + R_r)M)}, \quad (1)$$

где  $L_{\mu}$  – взаимдуктивность,  $L_{\sigma r}$  – индуктивность рассеяния обмотки ротора,  $p$  – число пар полюсов,  $M$  – электромагнитный момент двигателя,  $R_c$  – сопротивление, эквивалентное потерям в стали,  $R_s, R_r$  – сопротивления статора и ротора соответственно,  $\omega$  – частота вращения ротора.

Из выражения (1) получим значение оптимального с точки зрения КПД потокосцепления ротора:

$$\psi_{r, \text{опт}} = \sqrt{\frac{2}{3} \left[ \frac{L_{\mu}^2 R_c (R_s + R_r) + 2L_{\sigma r} L_{\mu} R_c R_s}{L_{\mu}^2 p^2 \omega^2 + R_c R_s} \right]^{\frac{1}{4}}} \sqrt{M}. \quad (2)$$

Анализ выражения (2) показывает, что оптимальное потокосцепление ротора для большинства асинхронных двигателей варьируется в диапазоне (0,3...1,0)  $\Psi_{\text{нном}}$  (здесь и дальше индексом «ном» обозначается номинальное значение параметра), причем большие значения соответствуют большим значениям момента и меньшим частотам вращения. Основная трудность при реализации такого подхода к построению энергоэффективных систем управления – это сложная функциональная зависимость оптимального значения задания на потокосцепление от параметров схемы замещения и момента двигателя. Во время работы в широком диапазоне изменяется как момент двигателя (особенно, при его использовании в тяговых целях), так и параметры схемы замещения, что связано с процессами нагрева и охлаждения обмоток двигателя и явлением насыщения. Эти причины и обусловили сдерживание практического применения большинства энергоэффективных систем управления и послужили причиной повышенного интереса и большого количества исследований в этой области.

Например, авторами работы [9] в качестве задающего воздействия выбрано напряжение статора, посредством которого предлагается обеспечивать минимизацию активного тока статора. Технически для этого требуются датчики тока и напряжения, а также быстродействи-

ющая микропроцессорная система для расчета датчиков и недостающих обратных связей. Апробация идеи авторами проведена для системы скалярного управления, однако заменив задающее воздействие, но оставив активный ток статора как регулируемую величину, данный вариант оптимизации можно применить для систем векторного управления и прямого управления моментом. Основным недостатком такого подхода является то, что предложенная система работоспособна только в диапазоне моментов сопротивления ниже номинального значения момента двигателя.

В работе [10] разработана поисковая система, обеспечивающая минимум полного тока статора. В отличие от системы, разработанной в [9], поисковая система поддерживает минимум тока во всем диапазоне изменения нагрузки электропривода, причем наибольшая эффективность проявляется при низких значениях частот вращения и высоких значениях момента сопротивления, что соответствует наиболее тяжелым режимам работы тягового электропривода. Аппаратная реализация этой идеи аналогична с работой [9], но для поиска минимума тока используется вспомогательный сигнал напряжения треугольной формы, складываемый с напряжением статора, что ухудшает коэффициент гармонического искажения тока и приводит к появлению дополнительных колебаний момента, из-за чего время работы поисковой системы лимитировано в динамических режимах работы.

В данной работе авторами разработана система управления, являющаяся логическим продолжением исследования, проведенного в [10]. Геометрически полный ток обмотки статора является гипотенузой прямоугольного треугольника, катетами которого являются активная и реактивная составляющая тока статора. Таким образом, если выполнить ориентацию перпендикулярных осей по магнитному полю статора так, чтобы

одна из осей была сонаправлена с активной составляющей тока, а другая – с реактивной, то минимизировать полный ток можно путем поддержания постоянного угла между ними или какой-либо его функции, например, коэффициент мощности обмотки статора. Особенностью такой постановки задачи является то, что для ее решения не нужно принимать во внимание текущее положение магнитного поля ротора, что позволяет применять данный подход в системах прямого управления моментом, в которых отсутствует информация о параметрах магнитного поля ротора. Уравнение коэффициента мощности обмотки статора в двухфазной системе координат:

$$k_M = \frac{u_{s\alpha} i_{s\alpha} + u_{s\beta} i_{s\beta}}{\sqrt{(u_{s\alpha}^2 + u_{s\beta}^2)(i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2)}}. \quad (3)$$

Результаты расчета коэффициента мощности и мощности потерь в функции тока статора для асинхронного двигателя мощностью 11 кВт показаны на рис. 1. Принято, что активная составляющая тока статора расположена по оси  $\alpha$ , реактивная – по оси  $\beta$ .

Из зависимостей, представленных на рис. 1, очевидно, что режиму минимума мощности потерь соответствуют токи статора, отличные от токов, необходимых для обеспечения режима максимума коэффициента мощности. Точка минимума потерь мощности расположена на падающем участке зависимости  $k_M = f(i_{s\alpha})$ , значение коэффициента мощности при этом  $k_M = 0.707$ , что соответствует равенству активной и реактивной составляющих тока статора. Результаты, приведенные на рис. 1, получены для номинальной частоты тока статора, снижение частоты тока статора приводит к тому, что точки максимума коэффициента мощности  $k_M$  и минимума потерь мощности  $\Delta P$  приближаются друг к другу.

Таким образом, предложенный метод является работоспособным и на рис. 2 приведена функциональ-

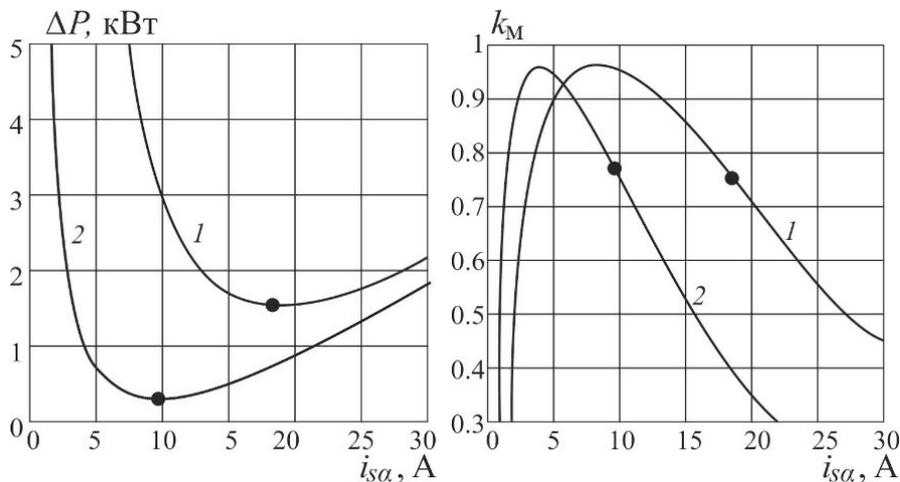


Рис. 1. Результаты расчета потерь мощности  $\Delta P$  (а) и коэффициента мощности  $k_M$  (б) в функции тока статора  $i_{s\alpha}$  (момент сопротивления  $M_{c1} = M_{ном}$ ,  $M_{c2} = 0,5M_{ном}$ )

ная схема его реализации. На рис. 2 приняты обозначения: АД – асинхронный двигатель, АИН – автономный инвертор напряжения, индекс «зад» обозначает заданное значение параметра.

Особенности работы электропривода с системой прямого управления моментом подробно описан в работе [3] и здесь не приводится. Отметим лишь те зависимости, которые необходимы при реализации этой системы средствами пакета имитационного моделирования.

В электроприводе и преобразовательной технике математическое описание проводится в двухфазной системе координат, поэтому нужно преобразовать напряжения из трехфазной системы координат в двухфазную:

$$u_{s\alpha} = \frac{2}{3} \cdot u_{sA} - \frac{1}{3} \cdot u_{sB} - \frac{1}{3} \cdot u_{sC}, \quad (4)$$

$$u_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot u_{sB} - \frac{1}{\sqrt{3}} u_{sC}. \quad (5)$$

Угол вектора потокосцепления статора  $\psi_s$  через проекции напряжения в осях  $\alpha\beta$  определяется следующим образом:

$$\theta = \text{tg} \left( \frac{u_{s\alpha}}{u_{s\beta}} \right), \theta \in [0, 2\pi]. \quad (6)$$

Номера фазового сектора  $n$  определяется из неравенства:

$$(n-1) \cdot 60^\circ < \theta \leq 2 \cdot n \cdot 60^\circ, \quad (7)$$

где  $n = 1, 2, \dots, 6$ .

Напряжения  $\Delta M$  и  $\Delta \psi$  принимают дискретные значения в функции знака и величины рассогласований по моменту и потокосцеплению. Эти

напряжения вместе с сектором  $n$  являются входными сигналами для таблицы переключений автономного инвертора напряжения.

$$\psi_{s\alpha} = \int (u_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_s) dt, \quad (8)$$

$$\psi_{s\beta} = \int (u_{s\beta} - i_{s\beta} R_s) dt. \quad (9)$$

Расчетная формула для потокосцепления статора не вызывает затруднений:

$$\psi_s = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2}. \quad (10)$$

Момент двигателя определяется выражением:

$$M = \frac{3}{2} p (i_{s\beta} \psi_{s\alpha} - i_{s\alpha} \psi_{s\beta}). \quad (11)$$

В качестве регулятора коэффициента мощности применен пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор.

Модель электропривода с энергоэффективной системой прямого управления моментом

Модель электропривода с энергоэффективной системой прямого управления моментом (рис. 2) реализована с помощью программного комплекса Matlab [11].

Нагрузкой автономного инвертора напряжения являлся асинхронный двигатель (модель АД *Asynchronous Machine Si Units* находится в библиотеке *SimPowerSystems*). В качестве модели силовых ключей АИН были выбраны элементы *Ideal Switch*, в качестве модели диодов выпрямителя – элементы *Diode*, в качестве модели конденсатора звена постоянного тока – элемент *Series RLC*; все элементы принадлежат библиотеке *SimPowerSystems*. Модель автономного инвертора напряжения полностью соответствует схеме, приведенной на рис. 3. Векторы выходных напряжений инвертора показаны на рис. 4 (в скобках рядом с номером вектора показаны функции переключения для каждой фазы преобразователя).

В качестве регуляторов момента и потокосцепления использованы трехуровневый релейный регулятор потокосцепления (рис. 5а) и пятиуровневый релейный регулятор момента (рис. 5б). Реализация регуляторов в программном комплексе *MatLab* показана на рис. 6 (основные элементы – *Relay*, *Logical operator*, *Gain*, *Data type conversion*, *Sum* из библиотеки *Simulink*).

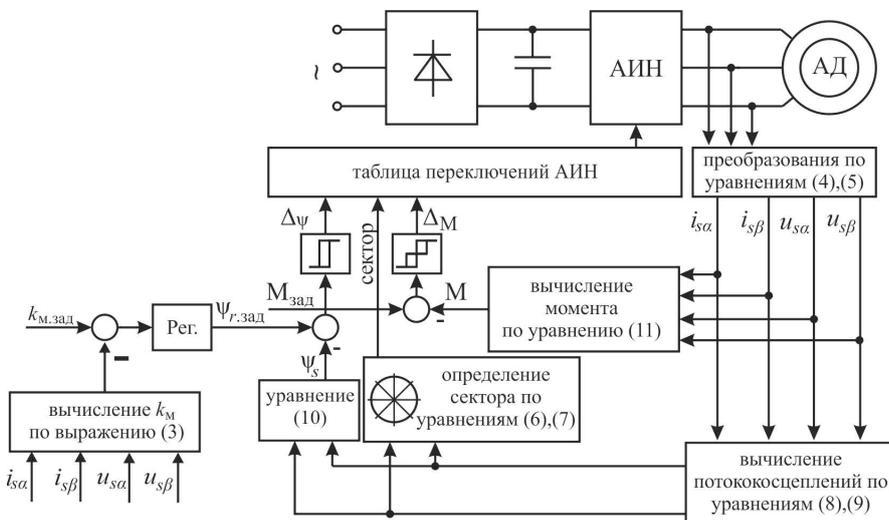


Рис. 2. Функциональная схема электропривода с энергоэффективной системой прямого управления моментом асинхронного двигателя

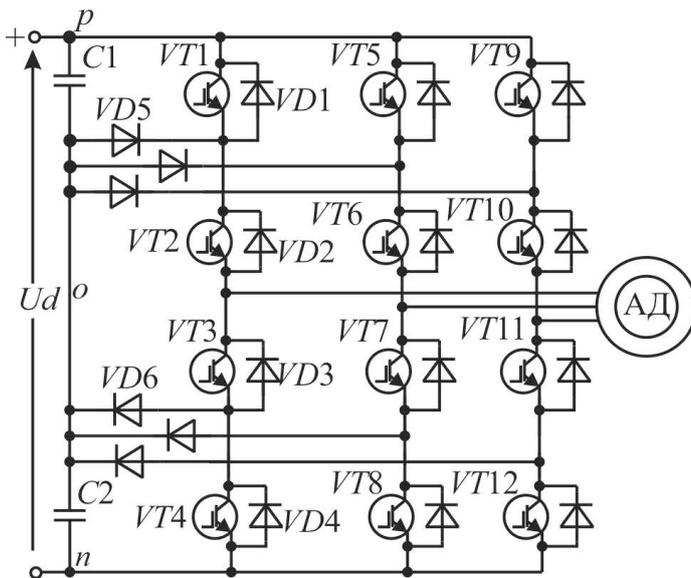


Рис. 3. Структура трехуровневого автономного инвертора ( $U_d$  – напряжение на конденсаторах  $C1, C2$  звена постоянного тока,  $VT1...VT12$  – транзисторы инвертора,  $VD1...VD6$  – диоды)

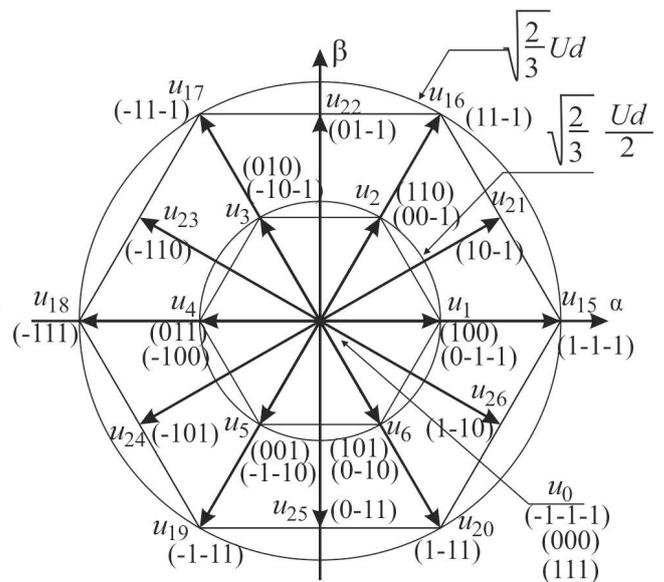


Рис. 4. Векторы выходного напряжения трехуровневого автономного инвертора в системе координат  $\alpha_\beta$

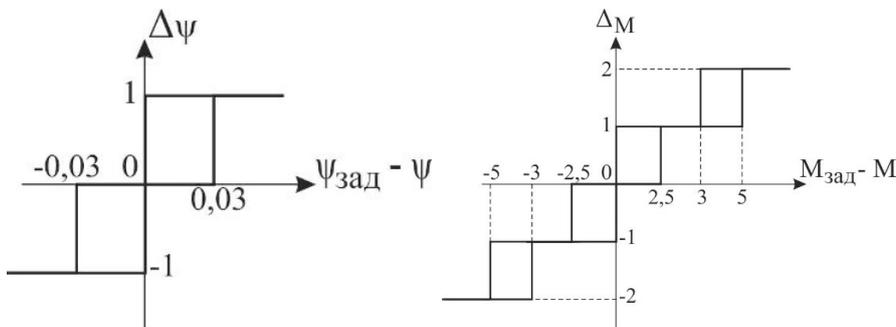


Рис. 5. Статические характеристики многоуровневых релейных регуляторов потокосцепления (а) и момента (б)

Таблица оптимальных переключений трехуровневого автономного инвертора напряжения при его использовании в составе систем прямого управления моментом хорошо известна [3], она синтезирована в программном комплексе *MatLab* с помощью блоков *Lookup2D*, *Switch*, *Constant*, *Multi-Port switch* из библиотеки *Simulink* (на рис. 7 показан фрагмент схемы).

Реализация остальных элементов схемы (рис. 2) средствами *Matlab*

*Simulink* тривиальна и трудностей не вызывает.

### Результаты моделирования и их обсуждение

На рис. 8 приведены результаты моделирования электромеханических характеристик электропривода с синтезированной системой управления. Анализ результатов показывает высокие быстродействие и точность регулирования момента и потокосцепления, что объясняется

применением релейных регуляторов.

На рис. 9 показаны результаты моделирования энергетических показателей качества электропривода с предложенной энергоэффективной системой прямого управления. При моделировании были приняты следующие значения параметров: частота тока статора  $f_s = 0.5f_{s,ном}$ , момент сопротивления  $M_c = 0,3M_{ном}$  (при времени  $t = 0...30$  с) и  $M_c = M_{ном}$  (при времени  $t = 30...60$  с). Мощность асинхронного двигателя  $P_{ном} = 11$  кВт, номинальная частота вращения  $n_{ном} = 1460$  об/мин, номинальная частота тока статора  $f_{s,ном} = 50$  Гц, номинальное напряжение  $U_{s,ном} = 220$  В, номинальный ток статора  $I_{s,ном} = 27$  А. Активация контура регулирования коэффициента мощности осуществляется в момент времени  $t = 15$  с. На рис. 9 индекс 1 соответствует результатам, полученным для традиционной системы, индекс 2 – для синтезированной энергоэффектив-

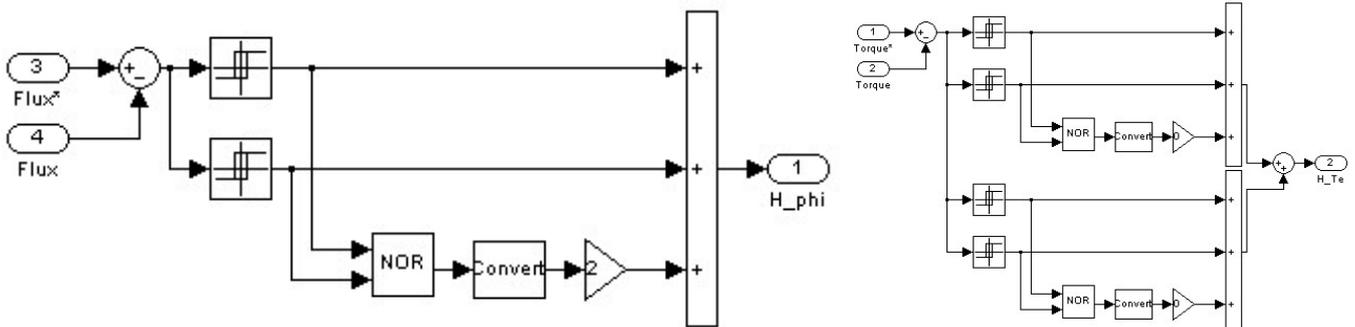


Рис. 6. Реализация регуляторов в программном комплексе *MatLab*

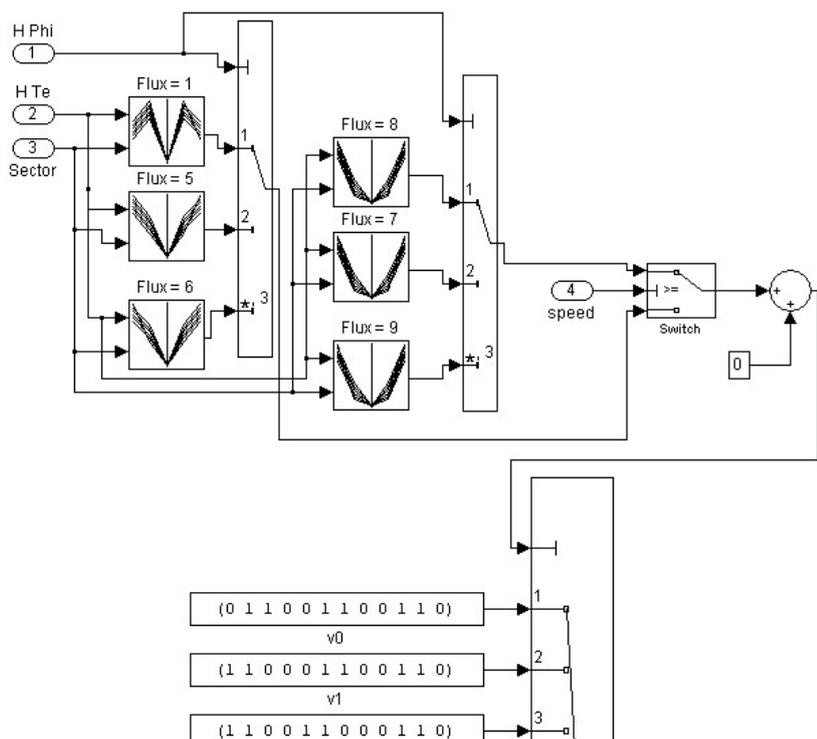


Рис. 7. Реализация таблицы переключений средствами MatLab Simulink (фрагмент)

ной системы прямого управления моментом.

Анализ результатов, приведенных на рис. 9, показывает адекватность разработанного математического описания синтезированной системы управления, применение которой позволяет добиться почти двукратного уменьшения потерь мощности в асинхронном двигателе и повышения КПД электропривода до 18% в сравнении с традиционным вариантом системы прямого управления. Зависимость коэффициента мощности от времени показывает, что данный эффект достигается за счет поддержания его на уровне 0,707, что обеспечивается за счет равенств составляющих тока статора по осям комплексной плоскости. Невысокое значение коэффициента мощности асинхронного двигателя, существенно ниже номинального, не оказывает никакого влияния на энергоэффективность электропривода в целом, т.к. наличие на входе преобразователя частоты неуправляемого выпрямителя (в общем случае) и определяет в итоге крайне низкое (стремящееся к нулю при отсутствии на входных фильтрах или реакторов) потребление реактивной мощности. Окончательный выбор структуры и параметров регулятора коэффициента мощности необходимо выполнять с помощью компьютерного моделирования (или физического моделирования при наличии объекта управления) из-за нелинейного характера переходных процессов и процессов управления.

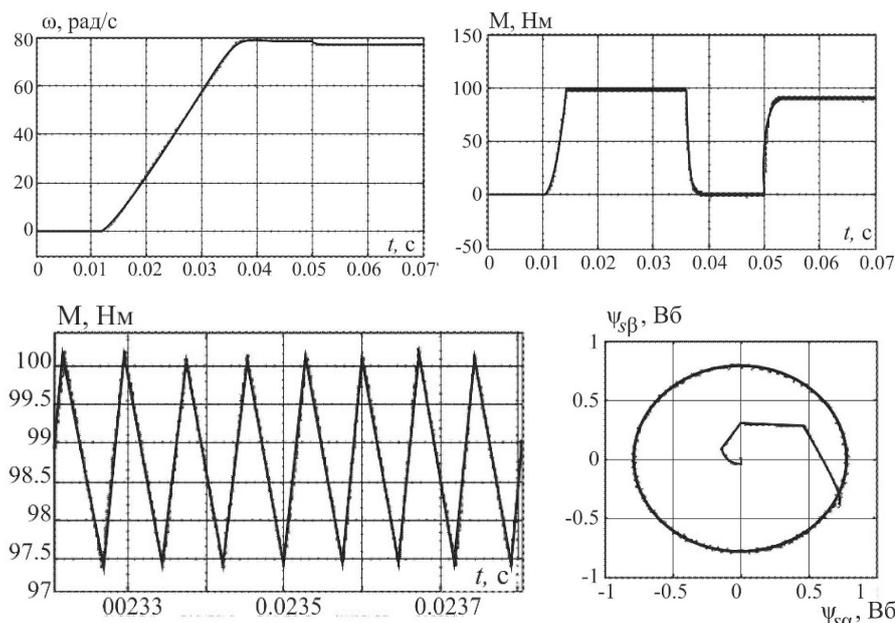


Рис. 8. Результаты моделирования электромеханических характеристик электропривода: а – временная зависимость частоты вращения, б – временная зависимость момента, в – временная зависимость момента (увеличено), г – годограф потокосцепления статора

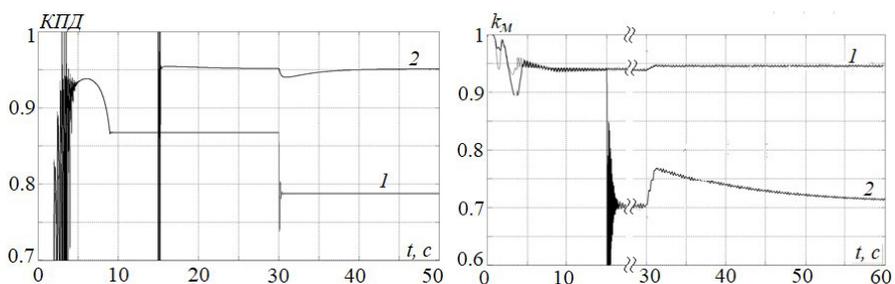


Рис. 9. Результаты моделирования энергетических показателей качества: временные зависимости КПД (а) и коэффициента мощности (б)

### Заключение

В статье разработана математическая модель и выполнено компьютерное моделирование энергоэффективной системы прямого управления моментом асинхронного двигателя. Снижение потерь мощности достигается посредством организации контура регулирования коэффициента мощности цепи обмотки статора; значение коэффициента мощности вычисляется на основании информации, полученной от датчиков тока и напряжения; в качестве регулятора применен ПИД-регулятор, выходной сигнал которого является задающим для подчинен-

ного контура потокоцепления статора. Аппаратное и информационно-измерительное обеспечение электропривода аналогично соответствующему обеспечению современных преобразователей частоты с функцией прямого управления моментом. Благодаря высоким быстродействию и точности регулирования момента, данную систему можно рекомендовать для ее применения в составе тяговых электроприводов на железнодорожном транспорте, где к электроприводу предъявляются дополнительные требования по предотвращению или ограничению боксования и юза в динамических режимах. Учитывая приоритет решения задач в динамических режимах и их возможные противоречия с решением задачи снижения потерь мощности, контур регулирования коэффициента мощности целесообразно активировать в установившихся (квазиустановившихся) режимах работы электропривода.

#### Литература

1. Александров А.В., Киселев И.П., Макарова Е.И. Моделирование электромагнитных процессов в асинхронном тяговом электроприводе автоматического электрического торможения электропоезда / Электротехника. – 2016. – № 5. – С. 20 – 24.
2. Титова Т.С., Евстафьев А.М. Энергоэффективные системы вспомогательного электропривода электрического подвижного состава / Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 5. – С. 60– 63.
3. Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А. Прямое управление моментом асинхронных двигателей при их питании от одного преобразователя частоты / Электротехника. – 2015. – № 9. – С. 29 – 35.
4. Aissa K., Eddine K.D. Vector control using series iron loss model of induction motors and power loss minimization / World academy of science, engineering and technology. – 2009. – 52 – P. 142 – 148.
5. Lim S., Nam K. Loss-minimising control scheme for induction motors / IEE Proc.-Electr. Power Appl. – 2004 – Vol. 151. № 4. – P. 386 – 397.
6. Mesaif I., Berkouk El-M., Saadia N. A study of DTC –power electronic cascade fed by photovoltaic cell-three-level NPC inverter / Smart grid and renewable energy. – 2010. – 1. – P. 109 – 118.
7. Wan H., Pan Y. A single inverter multi-motor system based on direct torque control / U.P.D. Sci. Bull. Series C. – 2014. – vol. 76, Iss. 2. – P. 207 – 218.
8. Иньков Ю.М., Космодамианский А.С., Пугачев А.А. Формирование задания на потокоцепление ротора в системе векторного управления асинхронным двигателем / Электроника и электрооборудование транспорта. – 2018 – № 6. – С. 40 – 42.
9. Козярук А.Е., Васильев Б.Ю., Емельянов А.П. Энергосберегающая система управления асинхронным электроприводом / патент RU №2498496, опубл. 10.11.2013.
10. Titova T.S., Evstaf'ev A.M., Pugachev A.A. Improving the energy efficiency of electric drives for auxiliary units of traction rolling stock / Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 2131 042085
11. Чуприна Н.В., Седых С.В., Пугачев А.А., Маклаков В.П. Моделирование электропривода переменного тока с алгоритмами пространственно-векторной модуляции / Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2022. – №1 (15). – С. 80 – 88.

#### Евстафьев Андрей Михайлович

Доктор технических наук, профессор. Окончил ПГУПС в 2001 году по специальности «Электрический транспорт». Заведующий кафедрой «Электрическая тяга» ПГУПС. В 2018 году защитил докторскую диссертацию по проблеме повышения энергетической эффективности электрического подвижного состава. Имеет свыше 150 научных трудов.

#### Пугачев Александр Анатольевич

Родился в 1984 году. В 2006 году окончил Брянский государственный технический университет по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Докторскую диссертацию по теме «Энергоэффективные электроприводы с асинхронными двигателями для магистральных локомотивов» защитил в 2020 году. В настоящее время является заведующий кафедрой «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета. Имеет свыше 100 научных трудов, более 30 патентов.

#### Evstafiev Andrey Mikhailovich

Doctor of Technical Sciences, Professor. He graduated from St. Petersburg State Transport University in 2001 majoring in Electric Transport. Head of the Electric Traction Department of the St. Petersburg State Transport University. In 2018, he defended his doctoral dissertation on the problem of improving the energy efficiency of electric rolling stock. He has more than 150 scientific papers.

#### Pugachev Alexander Anatolyevich

Was born in 1984. In 2006, he graduated from the Bryansk State Technical University with a degree in Electric Drive and Automation of Industrial Installations and Technological Complexes. He defended his doctoral dissertation on the topic "Energy-efficient electric drives with asynchronous motors for mainline locomotives" in 2020. Currently, he is the head of the department "Industrial electronics and electrical engineering" of the Bryansk State Technical University. He has more than 100 scientific papers, more than 30 patents.

## Силовая схема электровоза переменного тока с применением управляемого транзисторного преобразователя возбуждения

// POWER CIRCUIT OF AN ALTERNATING CURRENT ELECTRIC LOCOMOTIVE USING A CONTROLLED TRANSISTOR EXCITATION CONVERTER ///

Михальчук Н.Л., к.т.н.,  
Дирекция тяги – филиал  
ОАО «Российские  
железные дороги»,  
г. Москва

Савоськин А.Н., д.т.н.,  
профессор,  
Российский университет  
транспорта (МИИТ),  
г. Москва

Чучин А.А., к.т.н.,  
Российский университет  
транспорта (МИИТ),  
г. Москва

Одним из способов повышения тягово-цепных свойств электро-возов однофазно-постоянного тока является управление силой тяги двигателей. Для достижения поставленной цели необходимо обеспечить реализацию любых значений токов возбуждения без переключений в силовой цепи. Известен способ одновременного управления напряжением на якоре тягового двигателя и обмотке возбуждения для

тепловозов. Предложена адаптация этого способа для электровоза однофазно-постоянного тока. Для питания управляемого транзисторного преобразователя следует использовать мостовой выпрямитель, подключённый к отдельной обмотке трансформатора электровоза. Приведены результаты расчета электромагнитных процессов работы преобразователя и выполнен расчет обмотки трансформатора. Предлагаемая схема обеспечивает возможность потележечного и поосного управления силой тяги электровоза.

Ключевые слова: электровоз, тяговый двигатель, транзисторный преобразователь, управляемый преобразователь возбуждения, электромагнитные процессы, трансформатор, потележечное и поосное управления силой тяги.

One of the ways to increase the traction properties of single-phase direct current electric locomotives is to control the traction force of the engines. To achieve this purpose, it is necessary to ensure the implementation of any values of excitation currents without switching in the power circuit. A method is known for simultaneously controlling the voltage at the anchor of the traction motor and the excitation winding for diesel locomotives. An adaptation of this method for a single-phase direct current electric locomotive is proposed. To power the controlled transistor converter, a bridge rectifier connected to a separate winding of the electric locomotive transformer should be used. The results of the calculation of the electromagnetic processes of the converter operation are presented and the calculation of the transformer winding is performed. The proposed scheme provides the possibility of bogie and axial control of the traction force of an electric locomotive.

Keywords: electric locomotive, traction motor, transistor converter, controlled excitation converter, electromagnetic processes, transformer, bogie and axial traction control.

Во Всероссийском научно-исследовательском и конструкторско-техно-логическом институте подвижного состава (ВНИКТИ, г. Коломна) был разработан мостовой транзисторный преобразователь [1] для одновременного управления напряжением на якоре тягового двигателя и на обмотке возбуждения (рис. 1).

Выполним адаптацию этой схемы для электровоза однофазно-постоянного тока. Для этого обмотки возбуждения каждого тягового двигателя зашунтируем мостовым транзисторным преобразователем

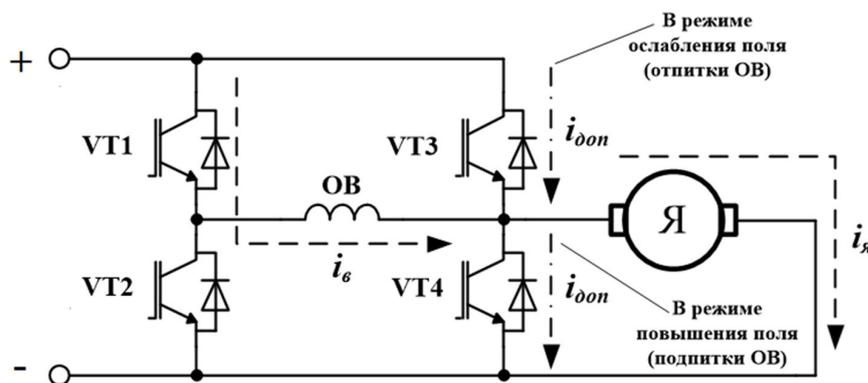


Рис. 1. Схема мостового транзисторного преобразователя для управления напряжением на обмотке возбуждения и на зажимах якоря тягового двигателя

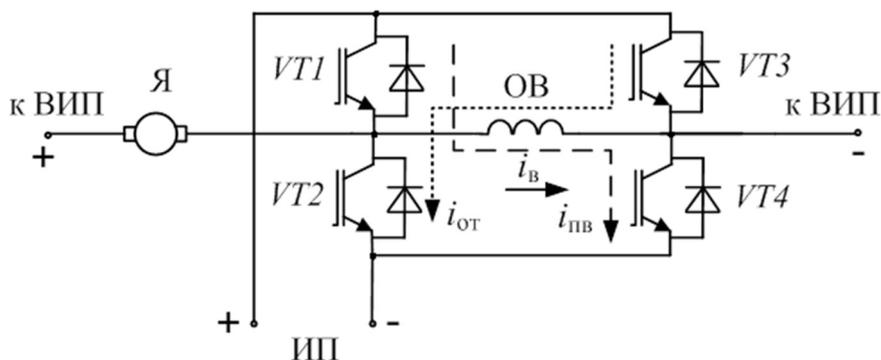


Рис. 2. Схема мостового транзисторного управляемого преобразователя для питания обмоток возбуждения

VT1-VT4 (рис. 2), подключённым к отдельному источнику питания (ИП).

В этом случае при включении вентилях VT1 и VT4 будет происходить подпитка обмотки возбуждения током  $i_{пв}$  от независимого источника питания. Если же включить вентили VT2 и VT3, то будет происходить отпитка обмотки возбуждения током  $i_{от}$

от того же источника. Используя токи подпитки и отпитки, можно обеспечить режимы работы тягового двигателя с независимым возбуждением, изменяя ток  $i_{пв}$  так, чтобы сумма этого тока и тока возбуждения двигателя  $i_{в}$  была постоянной и равной току независимого возбуждения  $i_{нв}$ :

$$i_{нв} = i_{в} + i_{пв} = \text{const.} \quad (1)$$

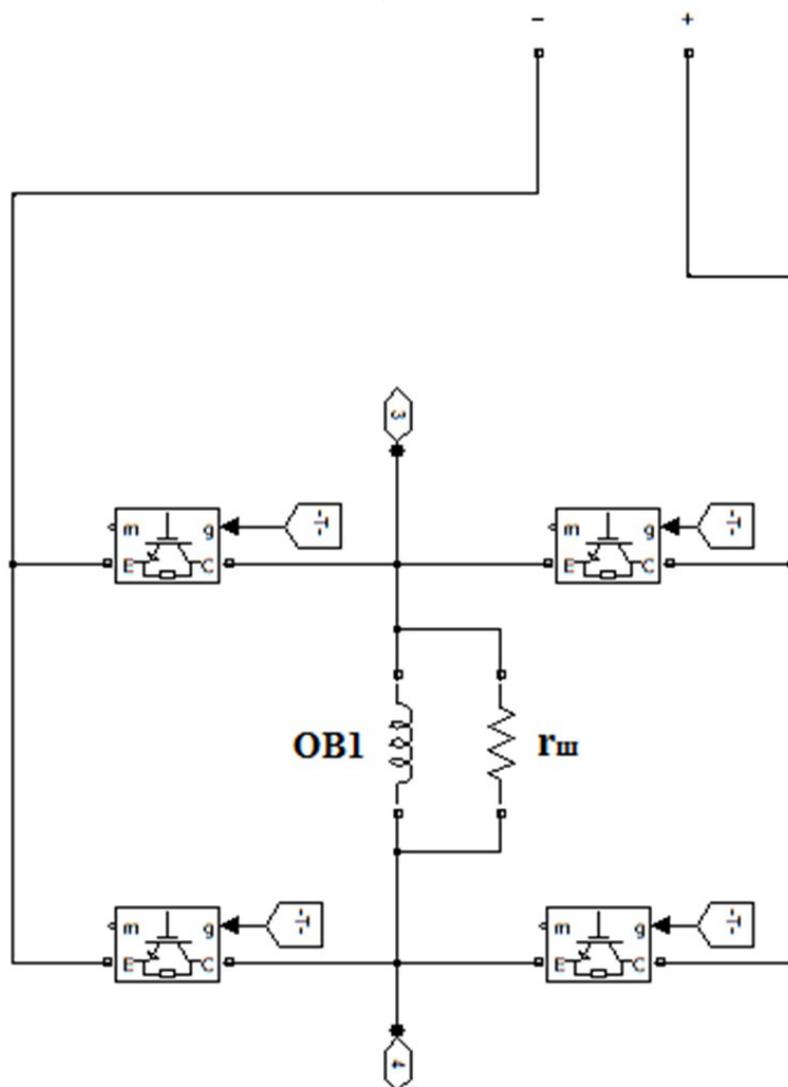


Рис. 3. Математическая модель питания обмоток возбуждения

При реализации режима отпитки, можно обеспечивать работу тягового двигателя в режиме последовательного возбуждения с уменьшением тока возбуждения («ослабления» поля):

$$i_{ув} = i_{в} + i_{от} = \text{const.} \quad (2)$$

И, наконец, если не включать вентили УПВ, то тяговый двигатель будет работать в обычном режиме последовательного возбуждения.

Таким образом, применение УПВ позволяет реализовать режим уменьшения магнитного потока, а также режимы независимого и последовательного возбуждения тягового двигателя. Отличительная особенность предлагаемой схемы обусловлена тем, что **переход из режима последовательного возбуждения в независимое и наоборот, происходит без разрыва силовой цепи и, следовательно, без потери силы тяги**, что является её существенным преимуществом.

Для реализации режима подпитки подаются управляющие сигналы на транзисторы VT1-VT4. Таким образом, ток возбуждения увеличивается на величину  $i_{доп}$ . Для режима отпитки необходимо подать управляющее воздействие на транзисторы VT2-VT3 и ток возбуждения двигателя уменьшится на величину  $i_{доп}$ .

Рассмотрим вначале упрощенную математическую модель работы обмоток возбуждения совместно с УПВ, разработанную в пакете Matlab/Simulink (рис. 3).

В этой модели для предварительной оценки возможностей УПВ не учитываются нелинейности кривой намагничивания и влияние вихревых токов (учёт этих явлений будет выполнен отдельно, при исследовании электромагнитных процессов в полной силовой схеме электровоза). Значения сопротивлений в модели приняты следующими:

$r_{я} = 0,01105$  Ом – сопротивление обмотки якоря;

$r_{дп+кв} = 0,01277$  Ом – сопротивление обмотки добавочных полюсов и компенсационной обмотки;

$r_{в} = 0,00714$  Ом – сопротивление обмотки возбуждения.

Диаграммы электромагнитных переходных процессов реализации режимов подпитки / отпитки (рис. 4) разделим на четыре участка.

гателя уменьшается. Поэтому при постоянном напряжении, приложенном к тяговому двигателю последовательного возбуждения, ток якоря увеличится от 840А до 915А, а также увеличивается сила тяги от 55кН до 59,5кН.

Приведенные результаты показывают, что, используя УПВ, можно реализовывать любые необходимые значения тока возбуждения, а следовательно, и силы тяги. В соответствии с принятой схемой УПВ было проведено совершенствование силовой схемы электровоза однофазно-постоянного тока. Для примера рассмотрим схему четырёхосной секции электровоза (рис. 5) с двумя выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП). В этой схеме, в отличие от типовой, вместо двух полуобмоток, питающих двухполупериодный выпрямитель возбуждения, предусмотрена одна обмотка, питающая через LC фильтр мостовой выпрямитель. К этому выпрямителю подключены четыре УПВ, шунтирующие обмотки возбуждения тяговых двигателей. Такая схема обеспечивает возможность потележечного и поосного управления силой тяги электровоза. Потележечное управление можно реализовать за счёт отдельного управления каждым ВИПом, а поосное – путём дополнительного воздействия на ток возбуждения ТЭД с помощью УПВ. Алгоритмы такого способа управления будут разработаны отдельно.

Определим параметры обмотки трансформатора для питания УПВ. За основу примем трансформатор ОНДЦЭ-4350/25-У2-02 электровоза 2ЭС5К. В этом трансформаторе заменим обмотку ОВ, питающую двухполупериодный управляемый выпрямитель типа ВУВ на обмотку ОВН, питающую мостовой выпрямитель, к которому параллельно подключены четыре УПВ. При такой схеме включения напряжение на ОВН должно иметь величину 45 В, а ток обмотки составит:

$$I_{ОВН} = I_{ВМ} = 650 \text{ А.}$$

Для получения напряжения 45 В на вторичной обмотке выбранного трансформатора достаточно расположить один виток. Сечение проводника проектируемой обмотки (ОВН) транс-

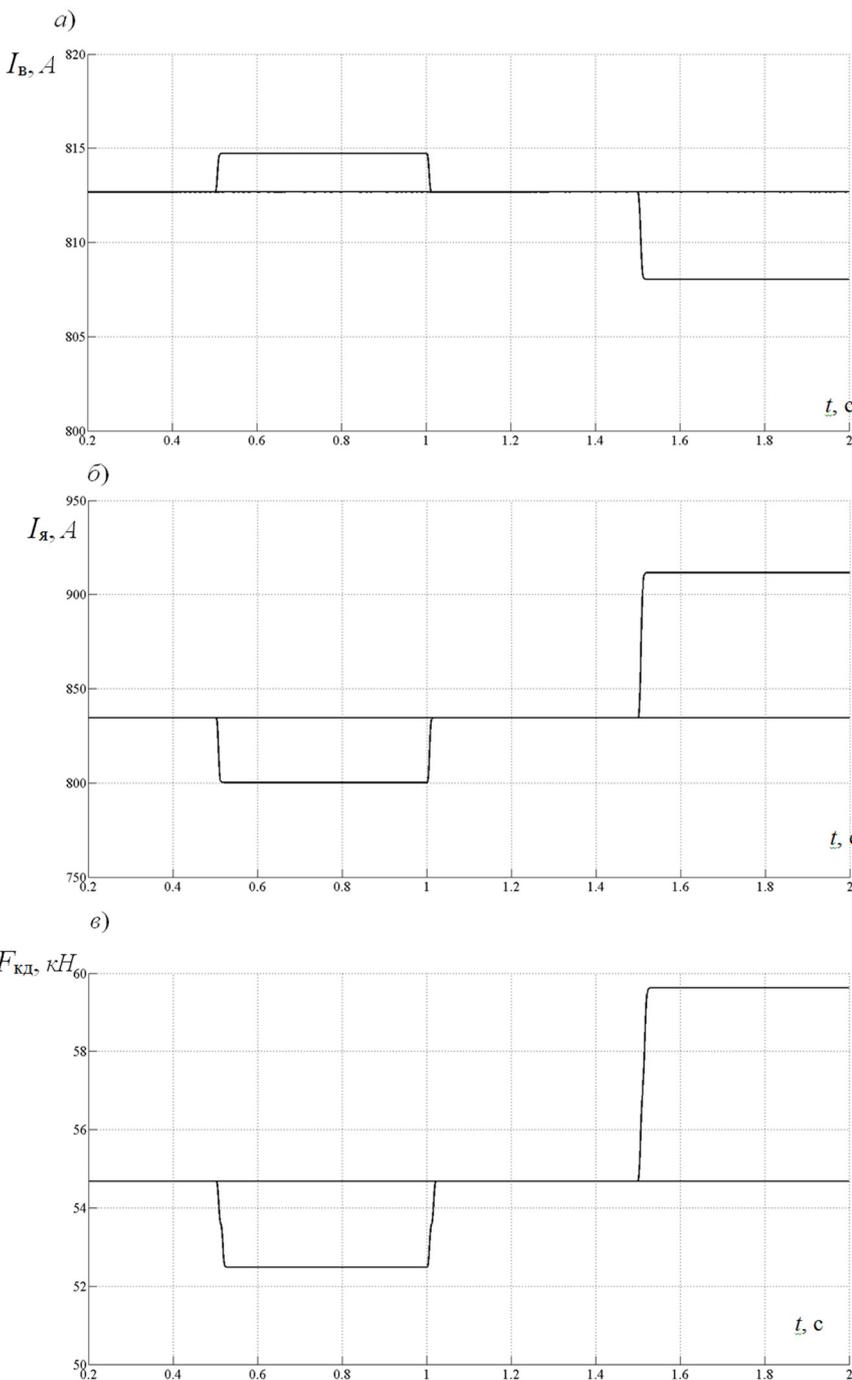


Рис. 4. Диаграммы электромагнитных переходных процессов реализации режимов подпитки / отпитки  
а) ток возбуждения, б) ток якоря, в) сила тяги двигателя

1. До момента времени 0,5с реализуется нормальный режим работы последовательного возбуждения ТЭД. При этом ток якоря равен 840А, а ток возбуждения 813А за счёт влияния сопротивления постоянного шунтирования  $r_{ш}$ . Тогда сила тяги ТЭД составит 54,5кН.

2. В интервал времени 0,5–1с реализуется режим подпитки. Ток возбуждения увеличивается от 813А до 815А, что вызывает увеличение эдс

двигателя. За счёт этого при постоянном напряжении, приложенном к тяговому двигателю последовательного возбуждения, ток якоря уменьшится от 840А до 800А и сила тяги уменьшится от 54,5кН до 52,5кН.

3. В интервале 1–1,5с реализуется нормальный режим работы.

4. В интервале 1,5–2с реализуется режим отпитки. Ток возбуждения уменьшается от 813А до 808А, эдс дви-

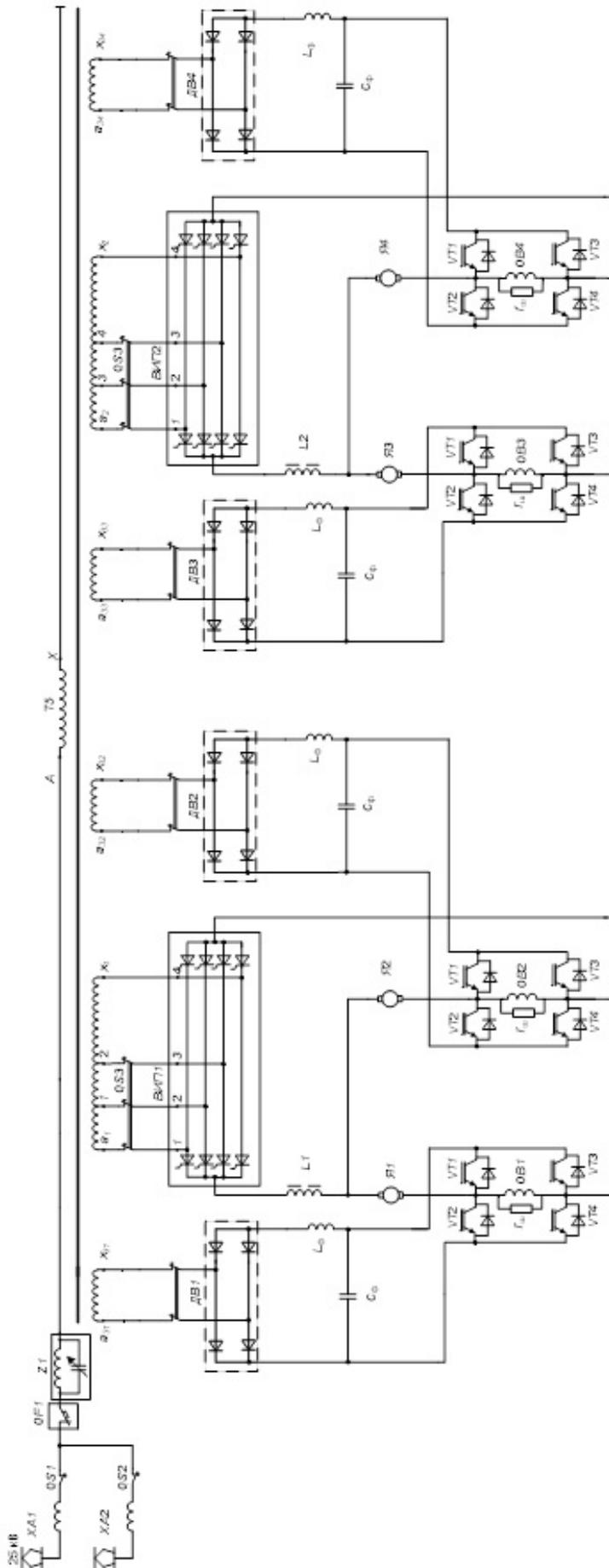


Рис. 5. Упрощенная схема силовых цепей электровоза с управляемыми преобразователями возбуждения

форматора найдём в соответствии с методикой, изложенной в [3]. Для этого вначале определим активное сечение стержня трансформатора:

$$S_{ст} = \frac{\pi}{4} K_c d^2 = 0,12 \text{ м}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр стержня трансформатора; в соответствии с [4]  $d = 0,41 \text{ м}$ ;

$K_c$  – коэффициент заполнения стержня сталью,  $K_c = 0,894$ .

Найдём эдс одного витка:

$$e_1 = 4,44 f B_{ст} S_{ст}, \quad (4)$$

где  $f$  – частота переменного напряжения,  $f = 50 \text{ Гц}$ ;

$B_{ст}$  – индукция в стержне,  $B_{ст} = 1,67 \text{ Тл}$ .

$$e_1 = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,67 \cdot 0,12 = 44,73 \text{ В}$$

Средняя плотность тока в обмотке ОВН составит:

$$J_{cp} = 0,746 \cdot 10^4 K_D N_k e_1 / N d_{12}, \quad (5)$$

где  $N_k$  – общие потери короткого замыкания трансформатора,  $N_k = 41000 \text{ Вт}$ ;

$d_{12}$  – средний диаметр канала между обмотками,  $d_{12} = 0,602 \text{ м}$ ;

$K_D$  – коэффициент, учитывающий добавочные потери в обмотках, потери в отводах, стенках бака, и других металлических конструкциях от гистерезиса и вихревых токов, от воздействия поля рассеяния. Для однофазных трансформаторов принимается по номинальной мощности трансформатора  $1,5N = 1,5 \cdot 4351,5 \text{ кВА}$ . В соответствии с [3 таблица 3.6]  $K_D = 0,84$ .

Определим значение средней плотности тока

$$J_{cp} = 0,746 \cdot 10^4 \cdot 0,84 \cdot 41000 \cdot 44,73 / (4350 \cdot 0,602) = 4,387 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 = 4,387 \text{ А/мм}^2$$

Тогда сечения витка обмотки ОВН будет равно:

$$S_B = I / J_{cp} = 650 / 4,387 = 148 \text{ мм}^2.$$

Такое поперечное сечение можно получить в соответствии сортаментом обмоточного провода или шин, предлагаемым промышленностью. Для нашей обмотки достаточно иметь шину  $10 \times 20 = 200 \text{ мм}^2$ . При этом плотность тока будет равна  $J_{cp} = 650 / 200 = 3,25 \text{ А/мм}^2$ , что меньше допустимой плотности.

### Выводы

1. Применение управляемого преобразователя возбуждения (УПВ) обеспечивает возможность реализации любых необходимых значений токов возбуждения без переключений в силовой цепи.

2. Для питания УПВ следует использовать мостовой выпрямитель, подключённый к отдельной обмотке ОВН трансформатора электровоза.

3. Обмотка ОНВ должна иметь один виток с напряжением 45 В и рассчитана на ток 650 А. Она должна быть выполнена из шины сечением мм<sup>2</sup>, что обеспечивает плотность тока 3,25 А/мм<sup>2</sup>, меньшую, чем её допустимая величина.

4. Предлагаемая схема обеспечивает возможность потележечного и поосного управления силой тяги. При этом потележечное управление выполняется за счёт отдельного управления каждым ВИПом, а поосное – путём дополнительного воздействия на ток возбуждения ТЭД с помощью УПВ.

#### **Литература**

1. Бабков Ю. В., Клименко Ю. И., Варегин Ю. А., Суркова Е. Г. Тяговый электропривод транспортного средства. Патент РФ. RU2399514C1. Бюл. №26, 2010.
2. Евсеев В. Ю., Савоськин А. Н. Математическая модель коллекторного тягового двигателя с отдельным учётом вихревых токов главных и добавочных полюсов. Электротехника №9, 2020. С. 32–38.
3. Тихомиров П. М. Расчёт трансформаторов: Учеб. Пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.: ил.
4. Трансформаторы тяговые однофазные типа ОНДЦЭ-4350/25-У2-02. Технические характеристики. ПАО «Укрэлектрощаппарат», 4 с.

5. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Руководство по эксплуатации. ИДМБ.661142.009РЭ. ОАО «ВЭЛНИИ», 2007. – В 2-х томах.

#### **Михальчук Николай Львович**

Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме «Адаптивная система управления температурным режимом изоляции электрооборудования электровозов». В настоящее время работает заместителем начальника Дирекции тяги в филиале ОАО «Российские железные дороги».

#### **Mikhailchuk Nikolai Lvovich**

Candidate of Technical sciences. In 2010 he defended his dissertation on the topic «Adaptive control system for the temperature regime of the insulation of the electrical equipment of the electric locomotives». At the moment he works as the Deputy Head of the Traction Directorate in a branch of the AO Russian Railways.

#### **Савоськин Анатолий Николаевич**

Доктор технических наук, профессор. В 1974 году защитил диссертацию по теме «Усталостная прочность и безотказность рам тележек электроподвижного состава». В настоящее время является профессором кафедры «Электропоезда и

локомотивы» в Российском университете транспорта (МИИТ).

#### **Savoskin Anatoly Nikolaevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor. In 1974 he defended his dissertation on the topic «Fatigue strength and fail-safety of electric rolling stock frames». At the moment he is the Professor of the Electric Trains and Locomotives Department of the Russian University of Transport (MIIT).

#### **Чучин Антон Александрович**

Кандидат технических наук, доцент. В 2005 году защитил диссертацию по теме «Индивидуальное потележечное и поосное управление силой тяги электровоза однофазно-постоянного тока с адаптацией по сцеплению». В настоящее время является доцентом кафедры «Электропоезда и локомотивы» в Российском университете транспорта (МИИТ).

#### **Chuchin Anton Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. In 2005 he defended his dissertation on the topic «Individual bogie and per-axle control of the traction force of the single-phase DC electric locomotive with the adhesion adaptation». At the moment he is the Assistant Professor of the Electric Trains and Locomotives Department of the Russian University of Transport (MIIT).

## Анализ методов решения задач оптимального управления движениям поезда

// ANALYSIS OF METHOD FOR SOLVING PROBLEMS OF OPTIMAL CONTROL OF TRAIN MOVEMENT //

**Лесов А.Т.,**  
**Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,**  
**г. Санкт-Петербург**

Оптимальное управление поездами уже много лет является активной темой исследований. Во всем мире принимаются важные меры по эффективному использованию электроэнергии в связи с растущим спросом на энергоресурсы. Такие меры принимаются и в железнодорожной отрасли. Общая цель состоит в том, чтобы управлять поездом таким образом, чтобы свести к минимуму общее энергопотребление с учетом ограничений по времени и физических ограничений налагаемых поездом и условиями эксплуатации. Выполнение этой цели обеспечивается передовыми технологиями, используемыми в настоящее время на электроподвижном составе и новыми возможностями ЭВМ. Львиную долю потребления электроэнергии на железнодорожном транспорте составляет расход на тягу поездов. Поэтому актуальным является мероприятие, направленные на оптимизацию расхода электроэнергии электровозами и электропоездами. Оптимизация – это мощный инструмент и перспективное решение любых проблем, связанных с эксплуатацией ж.д. транспорта. Постоянно возрастающая сложность инженерных систем, растущий спрос

на точность и поиск оптимальных и надежных конструкций создают дополнительные трудности, которые можно решить только разработкой оптимизационных моделей. В теории оптимизация – это процесс максимизации или минимизации целевой функции путем последовательного выбора и расчета возможных результатов в рамках определенного набора параметров. В условиях растущей конкуренции на рынке перевозок интерес к энергоэффективности среди железнодорожных компаний в последние годы стал предметом повышенного интереса, как для модернизации существующих транспортных средств, так и для приобретения новых.

Ключевые слова: Энергоэффективность, оптимальное управление движениям поезда, график движения, энергооптимальные траектории движения, динамическое программирование.

*Optimal train management has been an active research topic for many years. All over the world, important measures are being taken to use electricity efficiently due to the growing demand for energy resources. Such measures are also being taken in the railway industry. The overall objective is to operate the train in such a way as to minimize the overall energy consumption, taking into account the time and physical*

**Введение.** Движение поездов подвержено нескольким неопределенным факторам, такие как, непредвиденные остановки и механические проблемы. Эти факторы влияют на соблюдение графика движения и энергоэффективность.

Одним из способов устранения этих проблем является определение энергооптимальной траектории движения поезда между двумя станциями в течение заранее определенного времени с учетом неопределенных факторов.

*constraints imposed by the train and the operating conditions. The achievement of this goal is ensured by advanced technologies currently used on electric rolling stock and new computer capabilities. The lion's share of electricity consumption in railway transport is accounted for by the cost of train traction. Therefore, measures aimed at optimizing electricity consumption by electric locomotives and electric trains are relevant. Optimization is a powerful tool and a promising solution to any problems associated with the operation of railway transport. The ever-increasing complexity of engineering systems, the growing demand for accuracy and the search for optimal and reliable designs create additional difficulties that can only be solved by developing optimization models. In theory, optimization is the process of maximizing or minimizing an objective function by sequentially selecting and calculating possible results within a certain set of parameters. In the context of growing competition in the transportation market, the interest in energy efficiency among railway companies in recent years has become the subject of increased interest, both for the modernization of existing vehicles and for the acquisition of new ones.*

Keywords: energy efficiency, optimal train movement control, the optimal trajectory planning, energy-optimal movement trajectories, dynamic programming.

Проблема нахождения определенной кривой движения, т.е. последовательности значений скорости вдоль оси времени и пути, возникает как задача оптимального управления с учетом определенных эксплуатационных, географических и физиче-

ских ограничений. Основные цели оптимальной траектории движения, рассмотренные до сих пор, связаны с решением следующих задач:

- 1) своевременное прибытие в пункт назначения, т.е. отклонение от заданного времени должно быть сведено к минимуму;
- 2) наименьшее время в пути, т.е. время в пути должно быть сведено к минимуму, а скорость должна быть как можно большей;
- 3) минимальный расход электроэнергии, т.е. общее потребление электроэнергии должно быть сведено к минимуму.

Поскольку все эти три цели противоречат друг другу, многие исследования посвящены их сочетанию или компромиссу или включают одну из них в качестве ограничения, а другую – в качестве цели.

Исследования по оптимальному планированию кривых движения поездов начались в 1960-х годах. Упрощенная задача оптимального управления поездом были рассмотрены в [26,34]. Авторы решили эту проблему, используя принцип максимума Понтрягина. Позже многие исследователи решали проблему оптимального управления [2,3,6,10,11,13,20], применяя различные методы, поскольку она оказывает значительное влияние на экономию энергии, пунктуальность и комфорт при езде. Классификация энергооптимальных методов расчета показано на рис.1.

Известные подходы к решению задач определения оптимальной

по энергозатратам траектории движения поездов можно разделить на две группы: аналитические и численные.

Аналитический алгоритм требует хороших свойств целевой функции, так что исследователям приходится упрощать некоторые условия при моделировании. Численный алгоритм не предъявляет никаких требований к целевой функции. Однако аналитический алгоритм позволяет точно получить оптимальное решение, даже если процесс сложный. Для численного алгоритма существует компромисс между точностью и вычислительной эффективностью. Как правило, скорость вычислений невелика, и иногда она может найти только локальное оптимальное решение. Но точность может быть гарантирована при использовании некоторых численных решателей с достаточным временем вычислений. Предпосылка состоит в том, что задача энергооптимального ведения поезда формулируется как модель смешанного целочисленного линейного программирования с некоторыми приближениями.

**Аналитический метод  
оптимизации**

Энергоэффективный метод ведения поезда в первую очередь основывался на теории оптимального управления. Таким образом, вначале для простоты, задача была сформулирована в виде непрерывных моделей оптимального управления,

основанных на классическом вариационном исчислении. Оптимизацию управления движением поезда с помощью классического вариационного исчисления впервые в СССР исследовал Ю.П. Петров [14,15]. Условия оптимальности им были сформулированы в форме уравнений Эйлера. При условии, что сила тяги может изменяться непрерывно, а коэффициент полезного действия тягового привода локомотива постоянный, было установлено, что оптимальная кривая движения обычно состоит из участков, на которых скорость должна быть постоянной, и участков с неровными профилями соответствующими ограничениями на скорость [17]. Позже, учеными активно разрабатывались алгоритмы оптимизации режимов управления, где теоретическое решение выполнялось с помощью принципа максимума Л. С. Понтрягина. Принцип максимума Понтрягина в отличие от классического вариационного вычисления позволяет решать задачи управления, в которых на управляющие параметры наложены ограничения, хотя обычно заранее оговаривается ряд свойств решения. Благодаря этому, принцип максимума, является основным математическим приемом, используемым при расчете оптимального управления во многих важных задачах техники [12,16].

И. А. Аснис и др. [1] предположили, что ускорение является непрерывной управляющей переменной с равномерными границами, и использовали принцип максимума Понтрягина для нахождения необходимых условий по оптимальному графику движения. В [33] автор предложил нелинейную модель второго порядка для минимизации потребления электроэнергии, где решалась задача Лагранжа. Для поиска более строгих математических доказательств Хаулетт [30,31] показал, что задача может быть сформулирована в соответствующем функциональном пространстве. Он пришел к выводу, что оптимальный график движения существует и что график движения должен удовлетворять критерию принципа Понтрягина. Я.М. Головичер [24] предложил аналитический метод оптимизации

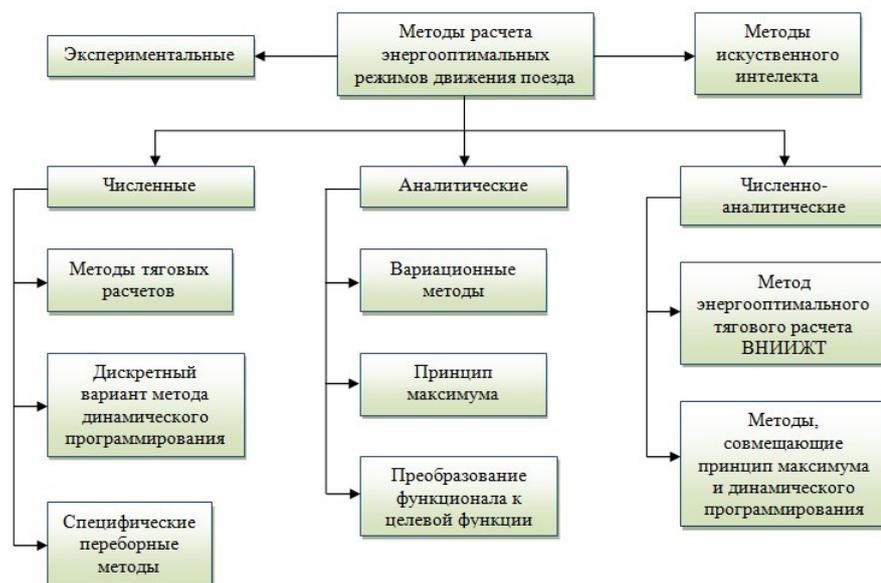


Рис.1. Классификация методов энергооптимального расчета

работы поезда при минимальном потреблении энергии. Чтобы уменьшить вычислительное время, для определения оптимального режима работы была применена гамильтонова формулировка с принципом максимума. Было установлено, что оптимальное управление может сэкономить 3% энергопотребления.

В зависимости от того, является ли тяговое и тормозное усилие непрерывным или позиционным (дискретным), существует два варианта к решению. Один из вариантов предназначен для операций с поездами с непрерывным управлением, в то время как другой – для операций с поездами с позиционным управлением [32].

Основываясь на аналитических подходах, упомянутых выше, существует четыре оптимальные последовательности сценария управления на оптимальной кривой движения: разгон с максимальным ускорением, движение с установившейся скоростью, выбег и торможение с максимальным замедлением. Однако более подробная модель работы поезда рассмотрена в [36], который включает в себя эффективность двигательной установки и схему рекуперативного торможения электроподвижного состава. Стоит отметить, что аналитические методы часто встречаются трудности в поиске аналитического решения, если учитывать более реалистичные условия, которые вводят сложные нелинейные члены в уравнения модели и ограничения.

### Численные методы оптимизации

Я.М. Головичер [37] заявил, что классические методы численной оптимизации не подходят для решения задачи планирования оптимальной кривой движения на бортовом компьютере для расчетов в реальном времени, поскольку эти методы, такие как дискретное динамическое программирование, требуют значительного времени на вычисления. Поэтому исследования в этой области долгое время были затруднены из-за трудностей с вычислениями. Однако из-за высокой вычислительной мощности, доступной в настоящее время, все больше и больше исследователей применяют подходы, используя численные методы оптимизации для получения энергооптимальных кривых движения.

Учитывая сложные отношения между движением поезда и потреблением энергии, аналитические результаты доступны только в упрощенных случаях. Из-за этой трудности большая часть усилий была посвящена разработке приближенных численных схем и алгоритмов. Здесь кратко упомянем некоторые из наиболее важных подходов численных методов [19], применяемых для оптимального управления, принятых в контексте оптимизации железнодорожных систем.

*Прямые методы.* Прямые методы не требуют предварительных знаний о структуре решения. Первый шаг состоит в том, чтобы дискретизировать задачу, чтобы получить конечномерную задачу, и затем можно использовать методы нелинейного программирования. Идея этих методов состоит в том, чтобы решить более простые подзадачи, которые сходятся к исходному решению за конечное число итераций или в пределе. Рассматриваются два различных типа алгоритмов:

1) Метод внутренней точки и штрафной функции: проблема переформулирована, чтобы превратить ее в задачу оптимизации без ограничений. После этого для поиска решения могут использоваться методы оптимизации без ограничений, такие как методы на основе градиента [29].

2) Метод касательных Ньютона. Задача решается путем нахождения точки, удовлетворяющей условиям Каруша-Куна-Такера (необходимые условия для оптимальности). В [21] квадратичное программирование использовалось для решения упрощенной модели поездов.

*Подход к решению с динамическим программированием.* Методы динамического программирования позволяют решить проблему управления без какой-либо инициализации проблемы, и при любых данных обстоятельствах может быть найдено оптимальное решение, это одно из главных преимуществ подхода динамического программирования, оно проходит через все пространство состояний для предоставления решений от любой возможной точки

пространства состояний до места назначения. Идея состоит в том, чтобы разделить сложную проблему на более простые подзадачи, и каждый раз, когда подзадача решается, решение сохраняется в памяти, чтобы помочь решить большие подзадачи. Основным недостатком использования этого метода является то, что он предполагает очень дорогие вычислительные затраты.

В настоящее время вычислительная мощность значительно возросла по сравнению с периодом, когда было написано большинство работ. Поэтому в [36] предложена более подробная нелинейная модель поезда, в которой моделируются потери мощности электровоза с тяговым преобразователем. Задача планирования оптимальной кривой движения на основе этой нелинейной модели решается методами нелинейного программирования и динамического программирования. Сделан вывод о том, что дискретное динамическое программирование оказалось более эффективным для решения нелинейной оптимальной задачи по сравнению с последовательным квадратичным программированием, поскольку общее время вычисления дискретного динамического программирования является детерминированным и результат вычисления получается в виде закона управления с обратной связью.

Среди численных методов решения задачи оптимального управления с динамическим программированием широкое распространение получил метод динамического программирования Р. Беллмана [4]. Метод Беллмана основан на принципе оптимальности «оптимальная стратегия управления имеет свойство: какие бы ни были первичный состояние и решение в начальный момент, следующие решения должны составлять оптимальную стратегию управления относительно состояния, полученного на начальной стадии процесса» [5]. Этот метод позволяет сформулировать более простые алгоритмы оптимизации динамических объектов малой величины [7-9,18]. В [25] применяют динамическое программирование Беллмана для оптимизации оптимальной базовой траектории.

Динамическое программирование, градиентный метод и последовательное квадратичное программирование вводятся для решения задачи планирования оптимальной кривой движения в [28]. В простых и сложных условиях эксплуатации моделирование показало, что градиентный метод имеет хорошую сходимость.

Однако оптимальное решение не всегда гарантируется в этих подходах числовой оптимизации. Поскольку полученное «оптимальное» решение может быть локальным минимумом. Кроме того, скорость сходимости в целом неопределенна. Более того, вычисления этих подходов числовой оптимизации часто слишком медленны для приложений реального времени.

*Нечеткие и эволюционные алгоритмы.* Для достижения определенного эффекта для кривой движения в энергоэффективных решениях были внедрены и усовершенствованы некоторые нечеткие и интеллектуальные методы, включая генетический алгоритм [29], роевой интеллект [35] и нейронную сеть [42]. Однако, помимо обеспечения энергоэффективности, ожидается достижение комплексного эффекта в отношении нескольких аспектов, основанных на значительном уровне энергетических возможностей, что означает, следует также учитывать адекватность, точность модели тяги и эффективность вычислений решения. С. Ясунобу [43] предложил нечеткий контроллер автоматической эксплуатации поезда, и внедрили его в японском городе Сендай в 1987 году. Этот контроллер может управлять отправлением каждого поезда, регулированием скорости и временем ожидания. Функция принадлежности играет важную роль в обеспечении точности управления и надежности нечеткого контроллера автоматической эксплуатации поезда. Поэтому в [22] авторы предложили модифицированный алгоритм дифференциальной эволюции для оптимальной настройки нечетких функций, которые обеспечивают компромисс между пунктуальностью, комфортом езды и энергопотреблением. Реализация генетического алгоритма для оптимизации

управления движением поезда была продемонстрирована в [23]. В работе результаты приведены в виде таблиц для строки команд управления, на которые ссылается система автоматической эксплуатации поезда для принятия решения о том, когда начинать движение выбегом и возобновлять максимальное ускорение. Хан [39] также использует генетический алгоритм для построения оптимальной базовой кривой движения. Ю. Бочарников и др. [47] пришли к выводу, что на экономию энергии влияют ускорения и замедления путем параллельного выполнения серии симуляций с использованием генетического алгоритма. В [38] авторы объединили искусственные нейронные сети и генетический алгоритм для получения оптимального графика движения выбегом. Целевая функция рассматривается как общий расход электроэнергии и эффективность вычислительной системы.

#### **Метод комплексной оптимизации**

Оптимизация распределения участкового времени хода на времена хода по перегону и энергооптимальное ведение, две основные используемые энергооптимальные ведения движения поезда по минимизации расхода электроэнергии и изучаются в течение длительного времени. Оптимизация распределения участкового времени хода на времена хода по перегону рассчитывает, как компенсировать опоздание поезда путем уменьшения времени хода по перегону на оставшихся перегонах. Когда поезд опережает плановый график движения, рассчитывается, как распределить избыточное время между впереди лежащими перегонами с целью прихода в фиксированное время на заданную станцию, а также решает задачу максимального использования рекуперативной энергии на основе времени разгона и торможения по графику движения. Энергооптимальное ведение оптимизирует графики движения на участках, чтобы минимизировать расход электроэнергии на тягу в соответствии с ограничениями по скорости и по времени хода. Оптимизация распределения участкового времени и энергоопти-

мальных режимов ведения взаимосвязаны. Первый обеспечивает времени хода на каждом перегоне для второго, а последний оптимизирует времени разгона, выбега и торможения на каждом перегоне для первого. Энергооптимальное ведение поезда направлено на оптимизацию кривой движения между двумя станциями для одного поезда и во многих задачах игнорирует рекуперативную энергию, передаваемую обратно в контактную сеть. Следовательно, полученный энергооптимальный кривой движения является оптимальным только для одного поезда. Оптимизация распределения участкового времени хода на времена хода по перегону синхронизирует действия нескольких поездов для максимального использования рекуперативной энергии, но обычно предполагает график движения в качестве постоянного параметра. Тяговое усилие от полученного оптимального распределения участкового времени хода не снижается. Поэтому в последние годы много исследователей изучает метод комплексной оптимизации.

В [27] описывается регулирование и координация работы нескольких поездов в режиме реального времени со смешанным контролем участкового времени хода. Целями являются минимальный расход электроэнергии и комфорт. Для поиска решения авторы использовали подход с динамическим программированием. Несколько иная схема решения этой же задачи, также базирующаяся на методе динамического программирования, описана в [19]. Ю.В. Бочарников [49] представил модель для оптимизации графика движения поезда, учитывающую как оптимизацию тягового усилия, так и использование рекуперативной энергии. Он также провел моделирование, чтобы оценить преимущества и результаты оптимального графика движения при минимизации энергопотребления. В [48] проблема энергооптимальной эксплуатации поездов сформулирована в виде двухуровневой модели оптимизации и разработан генетический алгоритм для поиска оптимального решения. На первом уровне определялась подходящая траектория

прохождения участка для поездов, а на втором уровне определялось время хода для каждого участка, чтобы свести к минимуму энергопотребление на тягу. В работе [40] авторы предложили модель комплексного управления поездом для снижения энергопотребления и разработали численный алгоритм для получения оптимальных режимов ведения с заданным временем хода, в котором учитываются переменные результирующие силы, действующие на поезд, ограничения скорости и уклоны. Х. Янг [45] разработал комплексный метод оптимизации для снижения общего энергопотребления и общего времени хода. В работе автор находит оптимальное время прибытия поездов на станциях и максимальную участковую скорость поезда на участках по определенной кривой движения. Есть работы, посвященные моделям целочисленного программирования для определения графика и кривой движения с минимальным энергопотреблением, где учитывается рекуперативная энергия [44]. Там проведено сравнение между методом оптимизации распределения участкового времени хода [46], энергооптимальным методом ведения [41] и комплексном методом оптимизации энергопотребления. Результаты показали, что метод комплексной оптимизации позволяет снизить общее энергопотребление по сравнению с остальными методами.

### Заключение

Различные методы в литературе сгруппированы в две основные категории: аналитическое решение и численная оптимизация. Как указывалось выше, аналитические методы часто сталкиваются с трудностями при поиске аналитических решений, если рассматриваются более реалистичные условия, которые вводят сложные нелинейные члены в уравнения движения и ограничения. Большинство методов показали свою эффективность на численных примерах, но лишь немногие из них были протестированы в реальных системах. При лабораторном моделировании поезда всегда строго выполняют заданный график движения и прибывают на каждую станцию вовремя в

точном соответствии с расписанием. Однако на практике поезда могут иметь некоторые небольшие отклонения. Эти небольшие отклонения не влияют на нормальную работу, но они оказывают некоторое влияние на оценки энергопотребления. Поэтому следует провести больше эмпирических исследований для проверки его эффективности при практической эксплуатации железнодорожных систем.

### Литература

1. Аснис И.А., Дмитрук А.В., Осмоловский Н.П. Решение задачи энергооптимального управления движением поезда по принципу максимума. // Вычисл. СССР. Математика. Физика. № 6. 1985. С. 37 – 44.
2. Баранов Л.А., Головичер Я.М., Ерофеев Е.В., Максимов В.М. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Под ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
3. Баранов Л.А., Ерофеев Е.В., Мелёшин И.С., Чинь Л.М. Оптимизация управления движением поездов. Учебное пособие/ под редакцией доктора технических наук, профессора Л.А. Баранова. - М.:МИИТ, 2011. – 164 с.
4. Беллман, Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных / Р. Беллман, Э. Энджел; [пер. с англ. С. П. Чеботарёва]; под ред. А. М. Летова. – Москва : Мир, 1974. – 205 с.
5. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – Москва: Наука, 1965. – 460 с.
6. Головичер Я.М. Алгоритмы управления движением транспортных средств для систем автоведения поезда. // Автоматика, телемеханика и связь. 1986. №11. С. 118 –126.
7. Ерофеев Е.В. Выбор оптимального режима ведения поезда на АЦВМ с применением метода динамического программирования. //Тр. МИИТ.1967. Вып.228. С.16–30.
8. Ерофеев Е.В. Определение оптимального режима ведения движения поезда при заданном времени хода. // Вестник ВНИИЖТ. 1969. №1. С.54–57.
9. Ерофеев Е.В., Мостов И.С. Оптимизация программ движения по-

ездов. // Тр.МИИТ. 1977. Вып.550. С. 121–125.

10. Климович А.В. Оптимизация управления движения поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу. М.: Компания Спутник+. 2008. – 263 с.
11. Костромин А.М. Оптимизация управления локомотивом. М.: Транспорт,1979. – 119 с.
12. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – 4-е изд. – Москва: Наука, 1983. – 392 с.
13. Мугинштейн Л.А., Илютович А.Е., Ябло И.А. Энергооптимальные методы управления движением поездов. // Сб. научн. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2012. – 80 с.
14. Петров Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления. // Энергия: М. 1977. – 96 с.
15. Петров Ю.П. Оптимальное управление движением транспортных средств. // Энергия: М. 1969. – 96 с.
16. Понтрягин, Л.С. Принцип максимума в оптимальном управлении / Л. С. Понтрягин. – Москва: Наука, 1989. – 62 с.
17. Пекман А.И. О поиске оптимального режима езды электроподвижного состава // Тр. МИИТ. 1970. Вып.310. С. 29 – 41.
18. Сидельников В.М. Выбор оптимального режима управления локомотивом с использованием ЭЦВМ. // Вестник ВНИИЖТ. 1965. №2. С.48–52.
19. Тяга поездов и применение специализированных электронных вычислительных машин для тяговых расчетов. / Бабичков А. М., Егорченко В. Ф.-М.: Трансжелдориздат, 1962. – с. 263.
20. Юренко К.И. Расчет энергооптимальных режимов движения перспективного подвижного состава методом динамического программирования. // Изв. вузов. Электромеханика. № 3. 2013. С. 78 – 82.
21. A. Grünig, Efficient Generation of Train Speed Profiles, Bachelor's Thesis, Institute for Operations Research, ETH Zurich, 2009.
22. C. Chang and D. Xu, "Differential evolution based tuning of fuzzy automatic train operation for mass rapid transit system," IEE Proceedings – Electric Power Applications, vol. 147, no. 3, pp. 206–212, May 2000.

23. C. Chang and S. Sim, "Optimising train movements through coast control using genetic algorithms," IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 144, no. 1, pp. 65–73, Jan. 1997.
24. Golovitcher, I. M. (2001). "Energy efficient control of rail vehicles. Systems, man, and cybernetics." Proc., IEEE Int. Conf., Vol. 1, Tucson, AZ, 658–663.
25. H. Ko, T. Koseki, and M. Miyatake, "Application of dynamic programming to optimization of running profile of a train," in Computers in Railways IX, WIT Press, vol. 15, Southampton, Boston, Sept. 2004, pp. 103–112.
26. K. Ichikawa, "Application of optimization theory for bounded state variable problems to the operation of a train," Bulletin of Japanese Society of Mechanical Engineering, vol. 11, no. 47, pp. 857–865, Nov. 1968.
27. K. K. Wong and T. K. Ho, "Dwell-time and run-time control for DC mass rapid transit railways," Proc. Inst. Elect. Eng.—Elect. Power Appl., vol. 6, no. 1, pp. 956–966, Nov. 2007.
28. M. Miyatake and H. Ko, "Optimization of train speed profile for minimum energy consumption," IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol. 5, no. 3, pp. 263–269, May 2010.
29. Nilam R. Dongre. "Optimization of Energy Consumption In Electric Traction System By Using Interior Point Method." IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSRJEET) 13.2 (2018): 09–15.
30. P. G. Howlett, "Existence of an Optimal Strategy for the Control of a Train," South Australian Inst. Technol., School Math. Rep., Adelaide, SA, Australia, 1987.
31. P. G. Howlett, "Necessary conditions on an optimal strategy for the control of a train," South Australian Inst. Technol., School Math. Rep., Adelaide, SA, Australia, 1987.
32. P. Howlett, "The optimal control of a train," Annals of Operations Research, vol. 98, no. 1–4, pp. 65–87, Dec. 2000.
33. P. Kokotovic and G. Singh, "Minimum-energy control of a traction motor," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 17, no. 1, pp. 92–95, Feb. 1972.
34. Peter Horn. Über die Anwendung des Maximumprinzips von Pontrjagin zur Ermittlung von Algorithmen für eine energieoptimale Zugsteuerung. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" in Dresden, 18(4), 1971.
35. R. Chen, L. Liu and J. Guo, "Optimization of High-Speed Train Control Strategy for Traction Energy Saving Using an Improved Genetic Algorithm," Journal of Traffic and Transportation Engineering. 1, 12 (2012)
36. R. Franke, M. Meyer, and P. Terwiesch, "Optimal control of the driving of trains," Automatisierungstechnik, vol. 50, no. 12, pp. 606–614, Dec. 2002.
37. R. Liu and I. M. Golovitcher, "Energy-efficient operation of rail vehicles," Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 37, no. 10, pp. 917–931, Oct. 2003.
38. S. Acikbas and M. Soylemez, "Coasting point optimization for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms," Proceedings of the IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 2, no. 3, pp. 172–182, May 2008.
39. S. H. Han, Y. S. Byen, J. H. Baek, T. K. An, S. G. Lee, and H. J. Park, "An optimal automatic train operation (ATO) control using genetic algorithms (GA)," in Proceedings of the IEEE Region 10 Conference (TENCON 99), vol. 1, Korea, Aug. 1999, pp. 360–362.
40. S. Su, T. Tang, C. Roberts, and L. Huang, "Cooperative train control for energy-saving," in Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Rail Transp., Beijing, China, Aug. 2013, pp. 7–12.
41. S. Su, X. Li, T. Tang, and Z. Gao, "A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 14, no. 2, pp. 883–893, Jun. 2013.
42. S. Sun, Y. Li and H. Xu, "Energy Consumption Optimization for High-speed Railway based on Particle Swarm Algorithm," Proceedings of 4th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, (2012) November 3–5; Mathura, India
43. S. Yasunobu, S. Miyamoto, and H. Ihara, "Fuzzy control for automatic train operation system," in Proceedings of 4th IFAC/IFIP/IFORS International Conference on Control in Transportation Systems, Baden, Germany, June 1983, pp. 39–45.
44. X. Li and H. K. Lo, "An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations," Transp. Res. Part B: Methodol., vol. 64, pp. 73–89, Jun. 2014.
45. X. Yang, X. Li, B. Ning, and T. Tang, "An optimization method for train scheduling with minimum energy consumption and travel Time in metro rail systems," Transportmetrica B: Transp. Dyn., vol. 3, no. 2, pp. 79–98, 2015.
46. X. Yang, X. Li, Z. Gao, H. Wang, and T. Tang, "A cooperative scheduling model for timetable optimization in subway systems," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 14, no. 1, pp. 438–447, Mar. 2013.
47. Y. Bocharnikov, A. Tobias, C. Roberts, S. Hillmansen, and C. Goodman, "Optimal driving strategy for traction energy saving on dc suburban railways," IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 1, no. 5, pp. 675–682, Sept. 2007.
48. Y. Ding, H. Liu, Y. Bai, and F. Zhou, "A two-level optimization model and algorithm for energy-efficient urban train operation," J. Transp. Syst. Eng. Inf. Technol., vol. 11, no. 1, pp. 96–101, Feb. 2011.
49. Y. V. Bocharnikov, A. M. Tobias, and C. Roberts, "Reduction of train and net energy consumption using genetic algorithms for trajectory optimisation," in Proc. IET Conf. Railway Traction Syst., Birmingham, U.K., Apr. 2010, pp. 32–36.

#### **Лесов Алтинбек Талгат угли**

Родился в 1991 году. В 2015 году окончил специалитет Петербургского государственного университета путей сообщения, электрический транспорт железных дорог. В настоящее время является аспирантом кафедры «Электрическая тяга».

#### **Altinbek Lesov**

Was born in 1991. In 2015 he graduated from the St. Petersburg State University of Communications, electric transport of railways. Currently, he is a post-graduate student of the Department of Electrical Traction.

## Применение нейронных сетей для прогнозирования и оповещения событий информационной безопасности

// APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR NOTIFICATION OF INFORMATION SECURITY EVENTS //

**Васильев А.В.,  
Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет,  
г. Комсомольск-на-Амуре**

В настоящее время во всех сферах производства и жизнедеятельности человека динамичными темпами развиваются технологии, увеличивая значение информационной безопасности. Применение достижений цифровизации в профессиональной деятельности требует повышенного внимания и высокой цифровой грамотности сотрудников в связи с необходимостью обеспечить конфиденциальность, целостность информации

В последние годы технологии искусственных нейронных сетей (ИНС) играют важную роль в решении многих задач информационной безопасности.

Это связано с резким увеличением сложности задач и объективной необходимостью включения нейросетевых технологий в алгоритмы решения таких задач как:

- обнаружение атак на информационные ресурсы, где теперь происходит преобразование из классической сигнатуры – методы, основанные на методике кластеризации нейронных сетей в модулях кластеризации входных данных и типах классификации атак;
- обнаружение вирусов и спама во входных потоках данных информационных сетей;
- проблемы нейронной криптографии, включая взаимодействие нейронных сетей для безопасной передачи секретного ключа по открытому каналу связи, генераторы случайных чисел на основе нейронных сетей, проблемы стеганографии;

и защиту ценных цифровых данных.

В данной статье уделяется внимание обеспечению информационной безопасности систем и устройств, применяемых в различных сферах, в том числе на транспорте, применяя искусственные нейронные сети. Проводится сравнение расчета прогнозирования с помощью программных средств.

**Ключевые слова:** нейросеть, нейроны, алгоритм, информационная безопасность.

• обеспечение жизненного цикла распределенных программ;

• биометрическая идентификация с различными признаками: 2D и 3D изображения лица, изображения радужной оболочки, отпечатки пальцев и другие [1-2].

При решении этих проблем ИБ необходимы следующие разделы нейросетевых технологий:

- теория нейронных сетей (нейронная парадигма и методы выбора структур, алгоритмы обучения нейронных сетей);
- нейроматематика (методы решения формализованных и не формализованные проблемы в логической основе нейронной сети);
- аппаратная реализация алгоритмов нейронной сети для ускорения решения задач.

Технологии нейросетей применимы для прогнозирования, в частности, угроз и инцидентов информационной безопасности [3-4].

Для наглядного изображения процесса прогнозирования с помощью нейросетей была заде-

Given the dynamic pace of development and widespread use of technology in many areas of society, the importance of their information security is increasing. In particular, the use of technology in professional activities requires increased attention, due to the fact that we are talking about confidentiality, integrity and information and the protection of valuable digital data.

Many technologies and methods are being developed for information security management systems, but in this paper, attention will be paid to the topic of ensuring information security using artificial neural networks.

**Keywords:** neural network, neurons, algorithm, information Security.

ствована аналитическая платформа Deductor Studio Academic. Рассмотрим задачу прогнозирования числа инцидентов информационной безопасности абстрактной организации на ближайшие два дня, опираясь на количество уже произошедших инцидентов за последний месяц. Временной ряд инцидентов представлен Таблице 1.

Таблица 1. Временной ряд инцидентов.

Дата	Число инцидентов
01.10.2019	1280
02.10.2019	1284
03.10.2019	1286
04.10.2019	1281
05.10.2019	1280
00.10.2019	1273
07.10.2019	1266
08.10.2019	1269
09.10.2019	1268
10.10.2019	1269
11.10.2019	1272

Дата	Число инцидентов
12.10.2019	1283
13.10.2019	1270
14.10.2019	1267
15.10.2019	1268
16.10.2019	1278
17.10.2019	1278
18.10.2019	1274
19.10.2019	1268
20.10.2019	1270
21.10.2019	1269
22.10.2019	1268
23.10.2019	1273
24.10.2019	1273
25.10.2019	1271
26.10.2019	1269
27.10.2019	1258
28.10.2019	1259
29.10.2019	1259
30.10.2019	1252

Далее необходимо составить из этого временного ряда обучающую выборку. Ее можно составить

Таблица 2. Обучающая выборка.

Дата	Число инцидентов	Число инцидентов+1	Число инцидентов+2	Число инцидентов+3	Число инцидентов+4
01.10.2019	1280	1284	1286	1281	1280
02.10.2019	1284	1286	1281	1280	1273
03.10.2019	1286	1281	1280	1273	1266
04.10.2019	1281	1280	1273	1266	1269
05.10.2019	1280	1273	1266	1269	1268
06.10.2019	1273	1266	1269	1268	1269
07.10.2019	1266	1269	1268	1269	1272
08.10.2019	1269	1268	1269	1272	1263
09.10.2019	1268	1269	1272	1263	1270
10.10.2019	1269	1272	1263	1270	1267
11.10.2019	1272	1263	1270	1267	1268
12.10.2019	1263	1270	1267	1268	1278
13.10.2019	1270	1267	1268	1278	1278
14.10.2019	1267	1268	1278	1278	1274
15.10.2019	1268	1278	1278	1274	1268
16.10.2019	1278	1278	1274	1268	1270
17.10.2019	1274	1274	1268	1270	1269
18.10.2019	1260	1268	1270	1269	1268
19.10.2019	1270	1270	1269	1268	1273
20.10.2019	1269	1269	1268	1273	1273
21.10.2019	1268	1268	1273	1273	1271
22.10.2019	1273	1273	1273	1271	1269
23.10.2019	1273	1273	1271	1269	1258
24.10.2019	1271	1271	1269	1258	1259
25.10.2019	1269	1269	1258	1259	1253
26.10.2019	1269	1258	1259	1253	1252

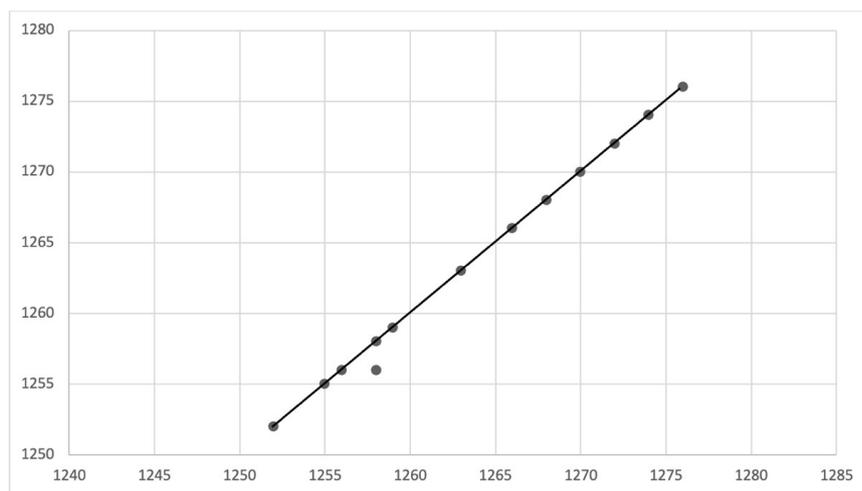


Рисунок 1. Диаграмма рассеяния нейросетевой модели

в любом текстовом редакторе, программе для работы с таблицами или с помощью инструмента «Скользящее окно» непосредственно в DeductorStudioAcademic. Полученная выборка представлена в таблице 2.

В данной таблице первые четыре столбца будут служить входными данными, а пятый – выходными.

С использованием обработчика «Нейросеть», который входит в состав платформы Deductor Studio Academic, была построена нейросетевая модель прогнозирования.

Входной слой состоит из четырех нейронов, которые распределяют входные данные на следующий слой, скрытый слой – из восьми нейронов, которые обрабатывают полученные данные, а выходной – из одного, формирующего выходные сигналы. На рисунке 1. представлена диаграмма рассеяния нейросетевой модели.

Результаты моделирования показаны на рисунке, где можно четко оценить эффективность регулирования напряжения, обеспечиваемое цифровым видеорегастратором.

### Вывод

Из рисунка видно, что полученный результат не выходит за рамки установленного отклонения, величиной 5%. Более того, результат, полученный нейросетью, практически идентичен выходным данным обучающей выборки, что говорит о высокой эффективности нейросети как инструмента прогнозирования.

### Литература

Bogdanov D.S., Mironkin V.O. Data recovery for a neural network-based biometric authentication scheme // Матем. вопр. криптогр., 10:2 (2019), 61–74 р.

Катенко Ю.В., Петренко С.А. Концепция контроля достоверности информации в профессиональной социальной сети с применением

сверточной нейронной сети // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям – 140-143 с.

Малышев Е.В., Москвин Д.А., Зегжда Д.П. Применение искусственной нейронной сети для обнаружения атак в VANET -сетях // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 1. 11-17 с.

Орлов С.П., Кусакина Н.М. Использование искусственных нейронных сетей для анализа трафика компьютерных сетей // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2019. – Т. 12-3. 98-102 с.

**Васильев Александр Владимирович**

Родился в 1991 году. Окончил Комсомольский-на-Амуре государственный университет по специальности (КнАГУ) «Электроника и нанотехника». В настоящее время работает инженером отдела информационных технологий и связи Комсомольской ТЭЦ-2, является аспирантом КнАГУ, тема исследования – «Разработка микрокомпьютерной системы обнаружения несанкционированного проникновения на объект». Автор 4 научных статей и 1 патента.

**Vasiliev Alexander**

Was born in 1991. Graduated from the Komsomolsk-on-Amur State University with a degree in Electronics and Nanotechnology (KnAGU). Currently, he works as an engineer of the information technology and communication department of Komsomolskaya CHPP-2, is a post-graduate student of KnASU, the research topic is «Development of a microcomputer system for detecting unauthorized entry into an object». Author of 4 scientific articles and 1 patent.

## Трамвай-поезд и перспектива его применения в транспортной системе Санкт-Петербурга

### // TRAM-TRAIN AND THE PROSPECT OF ITS APPLICATION IN THE TRANSPORT SYSTEM OF ST. PETERSBURG //

**Макарова Е.И., д.т.н.,  
Петербургский государственный  
университет путей сообщения  
Императора Александра I,  
г. Санкт-Петербург**

**Викулов И.П., к.т.н.,  
Петербургский государственный  
университет путей сообщения  
Императора Александра I,  
г. Санкт-Петербург**

**Быльцева В.Д.,  
Петербургский государственный  
университет путей сообщения  
Императора Александра I,  
г. Санкт-Петербург**

**Цель:** Рассмотреть классификацию гибридного подвижного состава, рассмотреть взаимодействие между двумя разными транспортными инфраструктурами на примере СПб «ГЭТ» и ОАО «РЖД», описать процесс анализа и проектирования, необходимый для разработки профиля колеса двойного действия, работающего, как на путях СПб ГУП «Горэлектротранс», так и на путях общего пользования ОАО «РЖД». Разработать электрическую схему для эксплуатации на гибридном подвижном составе, построить и описать маршрут следования трамвая-поезда в городе Санкт-Петербурге для эксплуатации подвижного состава, как на железной дороге общего пользования, так и на трамвайных путях. **Методы:** Применяется метод сравнительного анализа и синтеза существующих профилей.

**Результаты исследования:** Предложено решение улучшения доступности районов города Санкт-Петербурга и решение, спо-

собствующее ускорению их развития, в виде разработки и внедрения трамвая-поезда. Проведен анализ видов гибридного подвижного состава, проведен анализ профилей колес, используемых в Англии и в Санкт-Петербурге. Разработан профиль колеса двойного действия для трамвая-поезда, разработана электрическая схема проектируемого вагона трамвая-поезда. Произведен выбор полигона для эксплуатации гибридного подвижного состава в городе Санкт-Петербурге.

**Практическая значимость работы:** Создание доступного и камфорного подвижного состава в едином маршруте для эксплуатации как на трамвайных, так и на железнодорожных линиях общего пользования в городе Санкт-Петербурге. Возможное использование трамвая-поезда на малодействующих или заброшенных железнодорожных и трамвайных путях, тем самым улучшая доступность некоторых районов города и пригородной зоны.

**Ключевые слова:** Гибридный подвижной состав, трамвай-поезд, профиль колеса, остряк стрелочного перевода, профиль рельса, инвертор, токоприемник, транспортная инфраструктура.

**Objective:** Consider the classification of hybrid rolling stock, consider the interaction between two different transport infrastructures using the example of St. Petersburg GET and JSC Russian Railways, describe the analysis and design process necessary to develop a double-acting wheel

profile that works like on the tracks of St. Petersburg State Unitary Enterprise Gorelektrotrans"; and on the public roads of Russian Railways. Develop an electrical circuit for operation on a hybrid rolling stock, build and describe the route of a tram-train in the city of St. Petersburg for the operation of rolling stock, both on a public railway and on tram tracks.

**Methods:** The method of comparative analysis and synthesis of existing profiles is applied.

**Results of the study:** A solution was proposed to improve the accessibility of the districts of the city of St. Petersburg and a solution that accelerates their development, in the form of the development and implementation of a tram-train. The analysis of the types of hybrid rolling stock was carried out, the analysis of the profiles of the wheels used in England and St. Petersburg was carried out. A profile of a double-acting wheel for a tram-train has been developed, an electrical circuit of the designed tram-train car has been developed. A selection of a landfill for the operation of hybrid rolling stock in the city of St. Petersburg was made.

**Practical significance of the work:** Creation of affordable and camphor rolling stock in a single route for operation on both tram and public railway lines in the city of St. Petersburg. Possible use of the tram-train on underused or abandoned railway and tram tracks, thereby improving the accessibility of some areas of the city and the suburban area.

**Keywords:** Hybrid rolling stock, tram-train, wheel profile, switch point, rail profile, inverter, pantograph, transport infrastructure.

### Введение

В последние годы на транспорте более широко стали использоваться гибридные технологии. Гибридным подвижным составом принято называть транспортные средства, имеющие не менее двух различных силовых установок, либо получающие энергию от различных источников [1].

К гибридам относятся тепловозы и дизель-поезда с накопителями энергии на основе электрических или гидropневматических аккумуляторов энергии, контактно-аккумуляторные электровозы, локомотивы на несколько различных видов топлива, а также многосистемный электрический подвижной состав, дизель-электровозы и дизель-поезда [2,3].

Свойство гибридности характерно не только для конструкции силовой установки, но и для ходовых частей, электрооборудования и смешанному полигону эксплуатации. Гибридная ходовая часть позволяет использовать подвижной состав на различных путях, а в некоторых случаях – и на обычном дорожном



Рис. 1. Классификация гибридного подвижного состава

проезде [4]. Характерным примером многосистемного локомотива является электровоз Vektron компании SIEMENS (рис. 2).

Электровоз Vektron рассчитан на работу с 4 системами электропитания: 1,5 и 3 кВ постоянного тока, 15 кВ 16 2/3 Гц переменного тока пониженной частоты и 25 кВ 50 Гц. Дизель-поезда и дизель-электровозы применяются с целью рас-

ширения полигона эксплуатации на неэлектрифицированные участки. Примером такого подвижного состава являются дизель-электровоз ALP450 DP производства компании Bombardier [5, 6]. Такой локомотив может водить пассажирские поезда как по электрифицированным, так и по неэлектрифицированным участкам железной дороги со скоростями 200–240 км/ч (рис. 3).



Рис. 2. Электровоз Vektron



Рис. 3. Дизель-электровоз ALP450 DP

покрытии. На рисунке 1 изображена классификация гибридного подвижного состава.

Гибридная силовая установка используется с целью расширения полигона эксплуатации. Двух- и многосистемные электровозы и электropоезда, ранее являвшиеся редкостью, в настоящее время серийно выпускаются многими компаниями. Если ранее термин «многосистемный электровоз» касался только возможности работы с различными системами электропитания, то теперь это означает и разные системы СЦБ, безопасности, радиосвязи и



Рис. 4. Дизель-электropоезд ДТ1



Рис. 5. Макет и опытный образец гибридного локомотива DE18 Smart Hybrid

В России в течение 7 лет также выпускались дизель-электропоезда ДТ1, предназначенные для эксплуатации в смешанных районах в плане электроснабжения (рис. 4).

Контактно-аккумуляторный подвижной состав позволяет не только расширить полигон эксплуатации, но и улучшить условия приема энергии рекуперации (а на тепловозах – создать такие условия) [7,8]. Таким примером является гибридный локомотив DE 18 SmartHybrid компании Vossloh. Гибридный локомотив DE 18 может использоваться как в тяжелой маневровой, так и в поездной работе (рис. 5).

Если обратиться к конструкции подвижного состава с гибридной ходовой частью, то в данном случае выделяются 2 большие группы: локомотивы и трамвай-поезда. В первом случае это автомобили, приспособленные к движению по рельсовому пути (рис. 6).

Трамвай-поезд относится к гибридному подвижному составу, который может эксплуатироваться как на путях городского электротранспорта, так и на железнодорожных путях общего пользования, совместно как с трамваями, так и с поездами. Таким образом становится

возможным создание комбинированных транспортных систем, сочетающих преимущества обоих видов транспорта [9].

Трамвай-поезда применяются в транспортных системах Великобритании и Германии, а также во Франции и в США. Следует отметить, что в перечисленных странах трамвайные и железнодорожные пути имеют одинаковую ширину колеи, в России же ширина колеи составляет у трамвая и железных дорог – 1524 и 1520 мм соответственно.

#### Разработка профиля колеса двойного применения

В данной статье исследуется проблема взаимодействия между колесом и рельсом железнодорожного пути двух сильно отличающихся инфраструктурой рельсовых систем, описывается процесс разработки оптимизированного профиля колеса для работы в двух режимах, а также рассмотрена электрическая схема

проектируемого вагона трамвая-поезда и полигон его эксплуатации.

Одной из основных проблем при разработке профиля колеса двойного действия является управление условиями контакта на стыке колеса и рельса. Сочетание в себе качеств двух систем имеет решающее значение не только для безопасной эксплуатации транспортного средства, но и для максимального продления срока службы колесной пары и минимизации повреждений колеса и рельса.

Сочетание динамического моделирования транспортных средств и специального программного обеспечения позволила разработать новый профиль колеса для трамвая-поезда, который успешно применяется за рубежом [10]. Профили колес обычно разрабатываются или подбираются таким образом, чтобы они сочетались с профилями рельсов, используемых в конкретной системе. Профили колес, использу-



Рис. 6. Маневровый локомотив Unitog

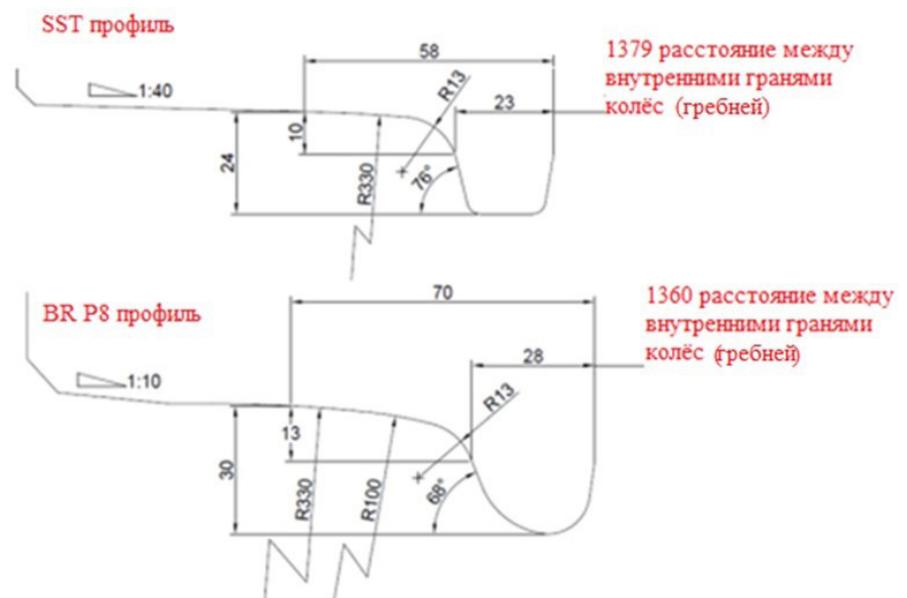


Рис. 7. Сравнение существующих профилей колес SST и NR

емые на Sheffield Supertram (SST) и Network Rail (NR), отличаются друг от друга, на рисунке 7 показаны два профиля и их основные размеры.

В транспортных средствах SST используется профиль колеса, типичный для трамвайных путей, поверхность катания с низкой конусностью совместима с плоской поверхностью головки рельса, для рельсов такого профиля как 55G2 (желобчатый) и 39E1 (без желоба), используемых в системе SST, большая величина – 76° угол наклона наружной грани гребня для устойчивости к сходам на кривых малого радиуса, и плоская вершина гребня для движения по желобчатым рельсам стрелкам и пересечениям [11].

Наиболее распространенным профилем на участке NR маршрута трамвай-поезд является профиль BR P8, который широко используется по всей Великобритании и совместим со всей инфраструктурой NR. Профиль P8 имеет меньший угол гребня 68°, а его поверхность катания имеет «предварительно изношенную» форму, подходящую для меньших радиусов профиля поверхности головки рельса NR, что обеспечивает более высокий уровень сцепления колеса с рельсом, по сравнению с профилем SST [12].

Профиль SST имеет более узкий гребень чем профиль P8, необходимый для движения по желоб-

чатым участкам рельсов, как и у большинства трамвайных вагонов, профиль SST устанавливается с более оптимальным расстоянием между внутренними поверхностями гребней, обеспечивая тем самым стандартный зазор между острием и рамным рельсом при поддержании стандартной ширины колеи пути [13].

Маршрут эксплуатации трамвая-поезда будет иметь комбинацию новых и изношенных профилей типов рельсов как желобчатых, так и Виньоля (с широкой плоской подошвой). Для того, чтобы разработать оптимизированный профиль колеса для работы в двух системах, необходимо рассмотреть все профили, с которыми столкнется трамвай-поезд [13]. В таблице 1 перечислены установленные профили рельсов на маршруте трамвай-поезд.

Особенно сложно организовать эксплуатацию трамвая-поезда при разной степени износа трамвайного и железнодорожного пути. При рассмотрении изношенных форм профилей рельсов выяснилось, что измеренные рельсовые профили SST BS80A и 55G2 имеют одинаковую форму износа, поэтому для SST рассматривается только один изношенный профиль рельса [14].

На рисунке 8 изображены распространенные новые профили рельсов и соответствующие изно-

шенные профили. Новые профили BS80A и 55G2, которые установлены на SST, имеют практически одинаковые профили рабочей грани головки рельса, что обеспечивает схожие условия контакта. Ключевым отличием является наличие губы рельса у 55G2 [15].

При сравнении новых и изношенных профилей SST и NR можно увидеть, что есть различие, заключающееся в рабочей грани и радиусе поверхности катания головки. Обычно по мере износа рельс принимает форму колес, движущихся по нему, так что форма изношенного рельса NR аналогична колесу BR P8 и изношенному рельсу SST профиль аналогичен профилю колеса SST. Это показано на рисунке 9.

Конструкция профиля рельса трамвая-поезда была оптимизирована для изношенных форм рельс на NR и SST с максимально возможной совместимостью с новыми рельсами 55G2 (41GP), BR113a (56E1) и BS80A (39E1). Чтобы облегчить процесс утверждения, конструкция профиля была сосредоточена на соответствии стандарта железнодорожных колесных пар, GM/RT2466 [16,17]. Очевидно, что подобные проблемы придется решать и в России.

Первоначальное исследование, проведенное компанией RTU, рассматривало ряд существующих профилей колес для использования на трамвае-поезде. В ходе исследования был сделан вывод, что ни один из существующих профилей трамвайных колес не подходит для использования на NR из-за сильного двухточечного контакта на больших радиусах кривых, что приводит к ускоренному износу колес и рельсов [18]. Было решено, что требуется гибридный профиль, основанный на комбинации SST и профиля P8 для обеспечения взаимодействия на двух системах. Конструкция профиля колеса показана на рисунке 10.

#### Электрическая схема проектируемого вагона трамвая-поезда

Данная электрическая схема проектируемого трамвая-поезда обеспечивает возможность питания подвижного состава как от железнодорожной контактной сети постоянного тока, так

Таблица 1. Профили рельсов, используемые на маршруте трамвая-поезда.

Профиль	Стандарт	Система	Тип рельса	Подуклонка	Тип колеи
BS80A (39E1)	EN 13674-4 (3)	SST	Виньоля	Вертикальный, 1:40	SST, путь на балласте
55G2(41GP)	EN 14811 (4)	SST	Желобчатый	Вертикальный	Путь заглубленный в дорожное покрытие
54E1 (UIC 54)	EN 13674-1 (5)	SST	Виньоля	Вертикальный	Виадук
BR113A (56E1)	EN 13674-1 (5)	SST, NR	Виньоля	Вертикальный, 1:20	Путь на балласте
SST Worn	-	SST	-	-	-
NR используемый	-	NR	-	-	-
PT58	ГОСТ Р 55941-2014	СПб ГУП «Горэлектротранс»	Желобчатый	-	Путь на балласте
PT60E	ГОСТ Р 55941-2014		Желобчатый	-	Путь на сплошном основании
P65	ГОСТ 8161-75	ОАО «РЖД»	T1	Вертикальный, 1:20	Путь на балласте

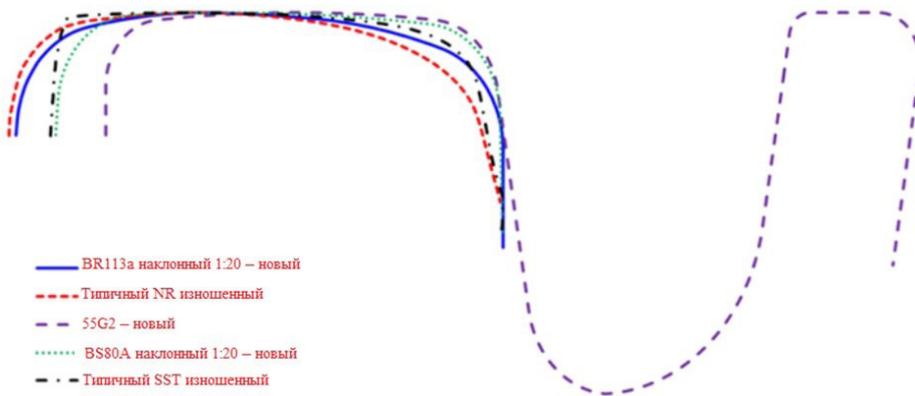


Рис.8. Преобладающие профили рельсов на маршруте трамвая-поезд

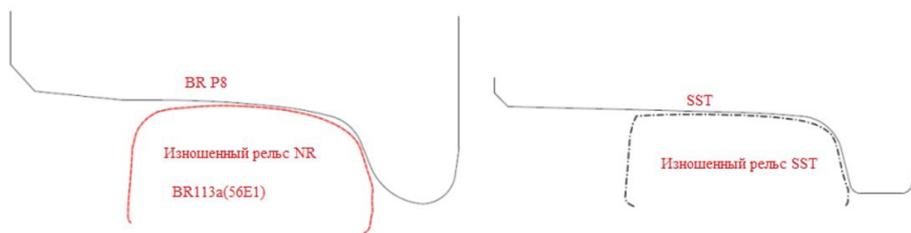


Рис. 9. Сравнение профилей колёс и изношенных профилей рельсов

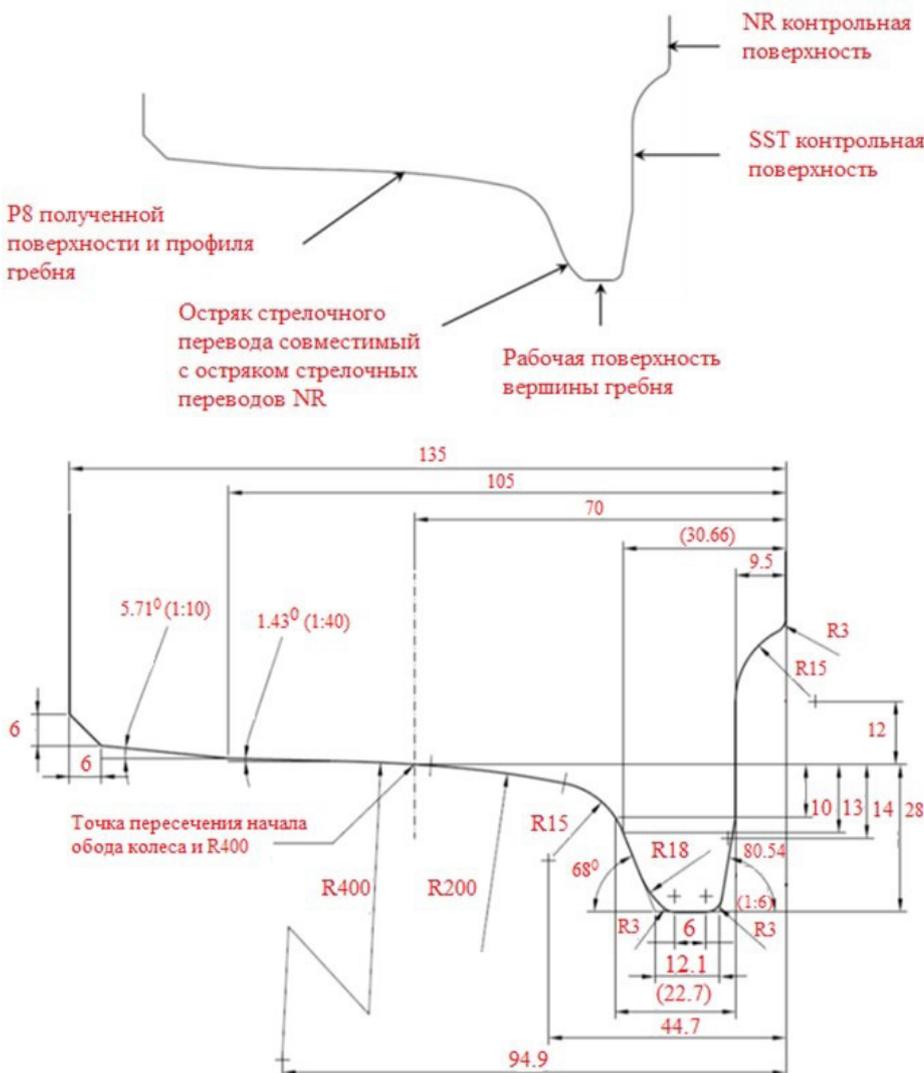


Рис. 10. Конструкция профиля колеса трамвая-поезда

и от контактной сети трамвая. При питании от железнодорожной контактной сети от токоприемника Т1 через быстродействующий выключатель QF1, линейный контактор ЛК1, выходной фильтр L и диод VD3 приходит на автономный многоячейковый инвертор высокой частоты АИНЧ 1.1-1.6. через повышающий преобразователь ИП.

После преобразования через разделительный изолирующий трансформатор и неуправляемые выпрямители выпрямленный ток поступает на промежуточную шину, а от нее на инверторы АИН 1, 2 и блок заряда аккумуляторной батареи BLG. После поступления на АИН 1 происходит обратное преобразование постоянного тока в переменный для подачи в цепь питания асинхронных тяговых двигателей.

Аналогично через АИН2 получает питание мотор-компрессор и трехфазная цепь напряжением 380 В. Через понижающий преобразователь BLG происходит заряд аккумуляторной батареи, а также питание цепей управления. При работе схемы от трамвайной контактной сети ток через токоприёмник Т2, быстродействующий выключатель QF2, линейный контактор ЛК2 и выходной фильтр L поступает сразу на шину 550 В, а от нее АИН 1, 2 и BLG. Остальные процессы протекают так же, как при работе от железнодорожной контактной сети. Электрическая схема проектируемого трамвая-поезда изображена на рисунке 11.

**Полигон эксплуатации трамвая-поезда**

Маршрут трамвая-поезда начинается своё движение у ТЦ Мега Дыбенко, проходит через Кудрово и на Ленинградской улице разделяется на 2 части: одна часть идёт по существующим трамвайным путям по улице Дыбенко и сворачивает на Дальневосточный проспект, по Дальневосточному проспекту легкорельсовый транспорт идёт до пересечения с улицей Подвойского и уходит на эстакаду, там подвижной состав переходит на железную дорогу.

По железнодорожным путям из промышленной зоны марш-

рут уходит либо на «узел» в сторону станции метро Волковской (как возможное соединение с маршрутом до аэропорта Пулково), либо на Ладожский вокзал. От Ладожского вокзала через Заневский железнодорожный пост 1, железнодорожную станцию Пискаревка до железнодорожной станции Кушелевка, где трамвай-поезд меняет свой вид тяги и сворачи-

вает на трамвайные пути на Лесной проспект.

По Лесному проспекту трамвай-поезд следует до Финляндского вокзала (как продолжение маршрута соединения его через Литейный мост и Литейный проспект с маршрутом в аэропорт Пулково). Схема маршрута трамвая-поезда в городе Санкт-Петербург изображена на рисунке 12.

Вторая часть маршрута идёт по железнодорожным путям до Лесопарковой улицы, далее меняет вид тяги и продолжает своё движение по Ириновскому проспекту по трамвайным путям до пересечения Ириновского проспекта с железнодорожным узлом, где продолжить своё движение либо по первоначальному маршруту, либо в сторону Ладожского вокзала (таким образом можно закольцевать маршрут).

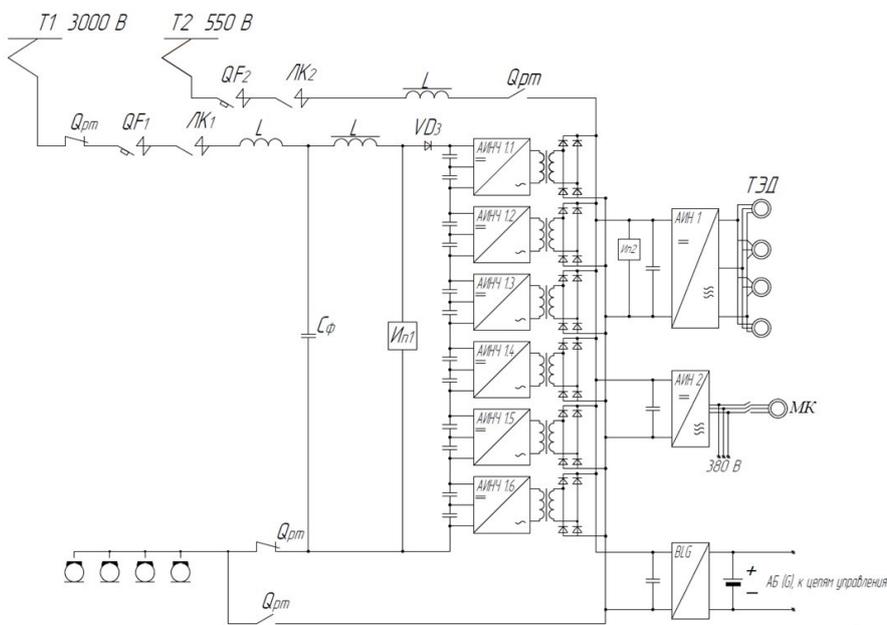


Рис. 11. Электрическая схема проектируемого трамвая-поезда

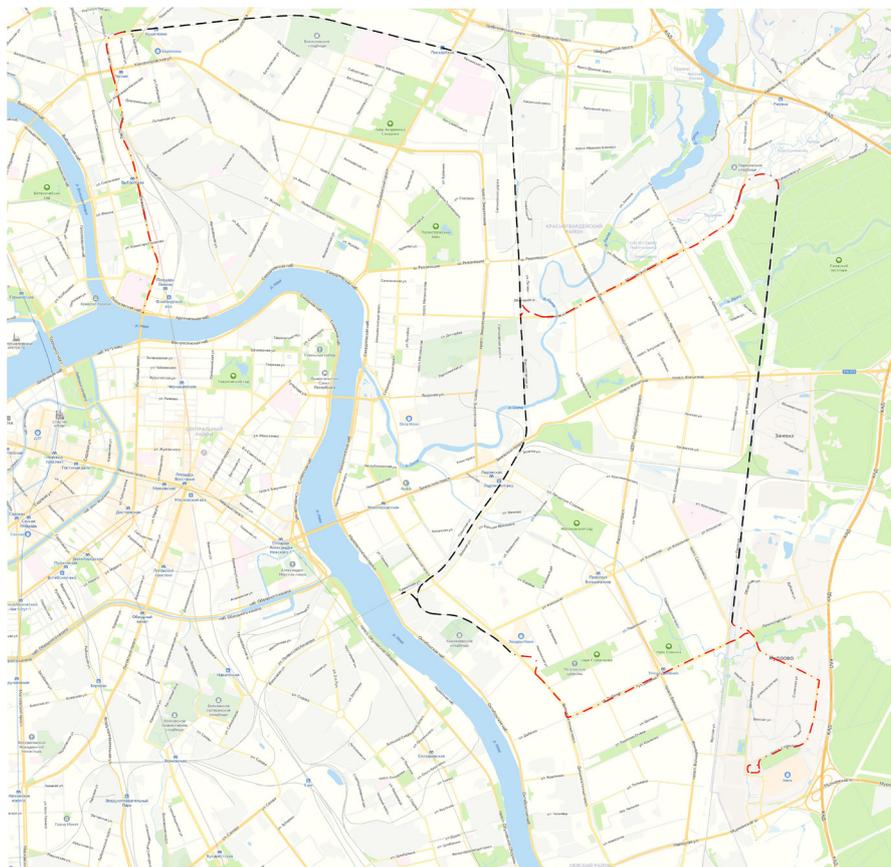


Рис. 12. Маршрут трамвая-поезда

### Заключение

Быстрое развитие районов Санкт-Петербурга и прилегающих территорий вызывает необходимость усиления существующей транспортной связи. В этих условиях трамвай-поезд является одним из предпочтительных направлений для благоприятного функционирования города и области.

Трамвай-поезд использует различную инфраструктуру, в том числе традиционные уличные трамвайные линии, линии железной дороги, общее пространство города, полосы движения, отдельные пути, легкие линии метро и трамвайные поезда. Специфика применения такого гибридного транспорта в городской среде характеризуется рядом его отличительных качеств, улучшающих транспортную доступность районов.

Реализация запуска трамвая-поезда требует решения ряда задач, главными из которых является – разработка профиля колеса двойного действия, разработка электрической схемы планируемого вагона трамвая-поезда и полигон эксплуатации для подвижного состава использующего различную инфраструктуру. В данной статье были описаны решения этих задач, благодаря чему внедрения такого гибридного подвижного состава становится менее затруднительным.

### Литература

1. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Сычугов А.Н. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 1. Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике № 6 (79). – 2018 – 40-44 с.
2. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Сычугов А.Н. Пер-

спективы развития тягового подвижного состава. Часть 2. Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике № 6 (79). – 2018 – 52-55 с.

3. Евстафьев А.М., Титова Т.С. Энергосберегающие технологии на тяговом подвижном составе. Монография. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС. – 2018. – 165 с.

4. Евстафьев А.М. Гибридные системы тягового привода / А.М. Евстафьев, И.Ю. Евстафьев // Интеллектуальные системы на транспорте: сборник материалов V Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС. – 2015. – 363-366 с.

5. Евстафьев А.М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе / А.М. Евстафьев // Бюл. результатов науч. исследований, выпуск № 3. – 2018 – 27-38 с.

6. Евстафьев А.М. Повышение энергетической эффективности гибридного локомотива / А.М. Евстафьев // Электроника и электрооборудование транспорта №2. – 2015 – 6-10 с.

7. Обухов М. Ю. Применение гибридного моторвагонного подвижного состава с накопителями энергии в пригородном сообщении / М.Ю. Обухов, И.П. Викулов // Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного железнодорожного транспорта: материалы VIII Междунар. симпозиума «Элтранс-2015». – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС. – 2017. – 336-343 с.

8. Обухов М.Ю. Повышение энергоэффективности гибридного моторвагонного подвижного состава / М.Ю. Обухов, И.П. Викулов // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сб. трудов LXXXVII Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС. – 2017. – 320-324 с.

9. Трамвай-поезд. Общие сведения: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tram-train> (дата обращения: 04.05.2024).

10. Crosbee, David and Allen, Paul (2015) Development of a Tram-Train wheel profile for dual operation running. In: 1st International I Mech E Stephenson Conference, 21st - 23rd April 2015, London – 17 p.

11. Duewag Drawing No. 3-D-02-Y-09006320, Sheffield Supertram Wheel Tyre.

12. «Railway applications – Track-Rail-Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above», BS EN 13674-1:2003+A1:2007.

13. «Railway applications – Track-Special purpose rail-Grooved and associated construction», BS EN 14811:2006+A1:2009.

14. «Railway applications – Track-Rail-Part 4: Vignole railway rails from 27kg/m to, but excluding 46 kg/m», EN 13674-4:2006+A1:2009.

15. Allen, P. (2008) «Support for the Introduction of Tram-Train Vehicles on Network Rail Infrastructure», RTU Report 81/13 Issue 2.

16. McEwan I. J. and Harvey R. F. (1986), «Technical Memorandum – Interpretation of Wheel Wear Numbers», British Rail Research Report TMVDY-004.

17. Стандарт железнодорожной группы GM/RT2466. Железнодорожные колесные пары. Выпуск третий: <https://docplayer.net/21274829-Railway-wheelsets-railway-group-standard-gm-rt2466-issue-three-date-february-2010.html> (дата обращения: 04.05.2024).

18. «Regulations on the Guidance of Rail Vehicles in accordance with the German Federal Regulations on the Construction and Operation of Light Rail Transit Systems (BOStrab) – Guidance Regulations (SpR)», March 2004, English translation by J Snowden Sept. 2008.

#### **Макарова Елена Игоревна**

Родилась в 1975 году. В 1993 году окончила ПГУПС по специальности «Водоснабжение, водоотведение, рациональное использование и защита водных объектов». Доктор технических наук, профессор. В 2012 году защитила диссертацию по теме «Научные основы защиты окружающей среды при ликвидации, обезвреживании и блокировании загрязнений железнодорожного транспорта». Опыт работы – 28 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 200 научных работ.

#### **Викулов Илья Павлович**

Родился в 1981 году. В 2004 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Инженер путей сообщения – электромеха-

ник». Кандидат технических наук. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Усовершенствование алгоритмов управления тяговыми электродвигателями электропоезда переменного тока с зонно-фазовым регулированием». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Имеет более 40 научных трудов.

#### **Быльцева Василиса Дмитриевна**

Родилась в 1999 году. В 2022 году защитила диссертацию по теме «Моторвагонный подвижной состав городского электрического транспорта для беспересадочного сообщения».

#### **Makarova Elena.**

Was born in 1975. In 1997 she graduated from St. Petersburg State Transport University majoring in “Water supply, water disposal, sustainable utilization and protection of water bodies”. Doctor of engineering science, professor. In 2012 she defended the dissertation with topic «Scientific basis of environmental protection under decommissioning, detoxification and blockage of pollution from rail transport». He has 28 years of work experience. At present she works as professor at the Department of electric traction of PGUPS. She has more than 200 scientific works.

#### **Vikulov Ilya**

Was born in 1981. In 2004 he graduated from the St. Petersburg State University of Railways with a degree in Communications Engineer – electromechanics. Candidate of Engineering Science. In 2009 he defended his thesis on the topic «Improvement of control algorithms for traction motors of an alternating current electric train with zone-phase control». Work experience is 15 years. At present he works as an associate professor of the «Electric traction» department of PGUPS. He has over 40 scientific publications.

#### **Byltseva Vasilisa Dmitrievna**

Was born in 1999. In 2022, she defended her dissertation on the topic «Motor-car rolling stock of urban electric transport for direct communication».

## Сравнение энергоэффективности электромобилей

// ENERGY EFFICIENCY COMPARISONS OF ELECTRIC VEHICLES //

**Рагимов Э.А., д.т.н.,  
Института Географии  
имени акад. Г. Алиева,  
г. Баку**

Часто считается, что электромобили являются важным средством сокращения выбросов парниковых газов и энергопотребления в глобальном транспорте, особенно для автомобильного пассажирского транспорта.

Целью данной статьи является изучение относительного использования энергии и выбросов парниковых газов электромобилей по сравнению с автомобилями с двигателем внутреннего сгорания. Сравнение энергоэффективности, а также сравнение выбросов парниковых газов были использованы в качестве методов в данной статье. Сравнения энергоэффективности осложняются противоречивыми методами, используемыми для первичных источников электроэнергии, таких как гидро, солнечная энергия или энергия ветра.

В этой статье пересматривается степень, в которой электромобили могут эффективно решать проблемы глобального изменения климата и истощения запасов ископаемого топлива.

Более того, в статье утвержда-

ется, что сравнение электромобилей и транспортных средств с двигателем внутреннего сгорания намного сложнее, чем общепризнано. Неопределенности возникают как при использовании первичной энергии, так и при расчете выбросов парниковых газов.

В целом, должен быть сделан вывод о том, что выгоды от использования электромобилей для энергии и парниковых газов меньше, чем обычно предполагается.

Только когда во взаимосвязанных энергосистемах преобладают возобновляемые источники энергии, будет безопасно заявлять о превосходстве электромобилей.

**Ключевые слова:** выбросы углерода; электрические транспортные средства; энергоэффективность; хранилище энергии; эффекты перелива.

*It is frequently believed that electric cars are an important means of reducing greenhouse gas emissions and energy consumption in global transport, especially for passenger automobile transport.*

*The purpose of this paper is to study the relative energy usage and greenhouse gas emissions of electric*

*vehicles compared to cars with an internal combustion engine.*

*A comparison of energy efficiency as well as a comparison of greenhouse gas emissions were used as methods in this paper.*

*Energy efficiency comparisons are complicated by conflicting methods used for primary sources of electricity, such as hydro, solar, or wind.*

*This paper reviews the extent to which electric cars can effectively address global climate change and fossil fuel depletion.*

*Moreover, the paper proves that comparing electric vehicles and vehicles with an internal combustion engine is much more complicated than generally accepted.*

*Uncertainties arise both when using primary energy and when calculating greenhouse gas emissions.*

*In general, it must be concluded that the benefits of using electric vehicles for energy and greenhouse gases are less than usually expected.*

*Only when renewable energy prevails in interconnected energy systems, it will be safe to claim the superiority of electric vehicles.*

**Keywords:** carbon emissions; electric cars; energy efficiency; energy storage; spillover effects.

### Введение

Глобальный транспорт является как основным потребителем мировой добычи нефти, так и основным источником выбросов парниковых газов, в частности, от углекислого газа (CO<sub>2</sub>).

Таким образом, сокращение как потребления энергии, так и выбросов парниковых газов на транспорте может сыграть важную роль в решении глобальных проблем истощения запасов ископаемого топлива (особенно нефти) и изменения климата, с которыми сталкивается мир.

Таблица 1. Номенклатура

CH <sub>4</sub>	метан
CO <sub>2</sub>	углекислый газ
CO <sub>2</sub> -экв	эквивалента углекислого газа
N <sub>2</sub> O	закись азота

Электрические транспортные средства, в данном случае включающие электромобили с полным аккумулятором, а также гибридные электромобили с подключаемым модулем, часто рассматриваются в качестве важного средства решения обеих проблем [1]. Кроме того, они помогают уменьшить загрязнение

воздуха в городах. Другие исследователи [2–4] утверждают, что существенные барьеры для внедрения электромобилей остаются из-за множества социальных и технических барьеров. Ма и др. [5] сравнили выбросы парниковых газов от электромобилей и автомобилей с двигателем внутреннего сгорания на основе полного жизненного цикла для калифорнийских и британских сетей. Как и ожидалось, они обнаружили, что электромобили сравнительно лучше работали в Калифорнии, чем в Великобритании, из-за менее интенсивного использования ископаемого топлива.



Рис.1. Гибридный автомобиль Toyota Prius четвертого поколения (выпускается с 2015 года)

топлива. Поскольку только 4,4 % электроэнергии, произведенной в мире в 2013 году, было произведено из нефти [7], электромобили безоговорочно могут помочь отсрочить наступление «пика добычи нефти». Но в следующих трех разделах этой статьи утверждается, что невозможно однозначно сказать, поможет ли значительный переход на электромобили сэкономить энергию или парниковые газы по сравнению с продолжением использования обычных транспортных средств, работающих на бензине или дизельном топливе.

Кроме того, они обнаружили, что рабочие характеристики электромобилей улучшились в условиях низких скоростей в городских условиях и что затраты на производство парниковых газов при производстве автомобилей были выше, чем при производстве автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, главным образом из-за производства аккумуляторов.

Онат и др. [1] провели анализ энергии и парниковых газов для каждого штата США для автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, электромобилей и гибридных электромобилей. Они обнаружили, что как у электромобилей, так и у гибридов потребление энергии в течение полного жизненного цикла было ниже, чем у автомобилей с двигателем внутреннего сгорания в целом по США, а также более низкие выбросы углерода. Однако гибриды были превосходны электромобилем для потребления энергии почти во всех штатах.

Наконец, Хокинс и соавторы [6] резюмировали свои выводы следующим образом: «Мы находим, что электрические транспортные средства, работающие на существующей европейской структуре электроснабжения, обеспечивают снижение потенциала глобального потепления на 10–24 % по сравнению с обычными дизельными или бензиновыми транспортными средствами, предполагающими срок службы 150 000 км.

Тем не менее, электромобили демонстрируют потенциал значительного увеличения токсичности для человека, экотоксичности для пресной воды, эвтрофикации пресной воды и воздействия истощения металлов, что в значительной сте-

пени связано с цепочкой поставок транспортных средств.

Результаты чувствительны к предположениям об источнике электроэнергии, потреблении энергии на этапе использования, сроке службы транспортного средства и графиках замены аккумулятора».

Целью данной статьи является изучение относительного использования энергии и выбросов парниковых газов электромобилей по сравнению с автомобилями с двигателем внутреннего сгорания. Сравнение энергоэффективности, а также сравнение выбросов парниковых газов были использованы в качестве методов в данной статье. Сравнения энергоэффективности осложняются противоречивыми методами, используемыми для первичных источников электроэнергии, таких как гидро, солнечная энергия или энергия ветра.

Более того, в статье утверждается, что сравнение электромобилей и транспортных средств с двигателем внутреннего сгорания намного сложнее, чем общепризнанно. Неопределенности возникают как при использовании первичной энергии, так и при расчете выбросов парниковых газов.

В целом, должен быть сделан вывод о том, что выгоды от использования электромобилей для энергии и парниковых газов меньше, чем обычно предполагается.

Только когда во взаимосвязанных энергосистемах преобладают возобновляемые источники энергии, будет безопасно заявлять о превосходстве электромобилей.

В этой статье пересматривается степень, в которой электромобили могут эффективно решать проблемы глобального изменения климата и истощения запасов ископаемого

### Сравнение энергоэффективности

Сравнение энергоэффективности различных автомобилей с двигателем внутреннего сгорания легко; например, сравните число транспортных средств в км для каждого транспортного средства на литр используемого бензина. Но для сравнения электромобилей и автомобилей с двигателем внутреннего сгорания бензин и электричество должны быть переведены в первичные энергетические термины – например, сырая нефть для автомобилей с двигателем внутреннего сгорания и уголь для производства электроэнергии на угольных электростанциях. Но возникает трудность при преобразовании электричества в первичную энергию для различных неископаемых видов топлива.

Для производства тепловой энергии на атомных или геотермальных электростанциях первичная энергия всегда рассчитывается на основе тепловой энергии, используемой для выработки электроэнергии, так же как на электростанциях, работающих на ископаемом топливе.

Для нетеплового возобновляемого электричества, такого как электричество, производимое гидроэлектростанциями или ветряными турбинами, разные органы власти используют разные методы преобразования [8]. Международное энергетическое агентство [7] преобразует гидроэнергию, фотоэлектрические элементы и энергию ветра в соотношении 1:1. В отличие от этого, ВР преобразует гидроэлектроэнергию в первичную энергию таким же образом, как и для ядерной электроэнергии – на основе тепловой эквивалентной электроэнергии на тепловой электростанции, предполагая 38 % эффективность преобра-

зования на современной тепловой электростанции» [9]. Отсюда следует, что первичная энергоэффективность, рассчитанная для данного автомобиля, будет сильно различаться в зависимости от источника неископаемой энергии.

В энергосистеме, использующей 100 % ядерной энергии, эффективность будет такой же, как в энергосистеме, использующей 100 % гидроэлектроэнергии, если рассчитать ее методом ВР, но намного ниже, если использовать метод Международного энергетического агентства. Понятно, что это неудовлетворительный результат.

Это также делает расчеты эффективности использования энергии двигателя внутреннего сгорания электрическими транспортными средствами произвольными для сетей, использующих значительное количество первичной электроэнергии из возобновляемых источников энергии. Проблема может усугубиться только в том случае, если, как и ожидалось, энергия ветра, гидро и, особенно, фотоэлектрических элементов, будет обеспечивать все более высокий процент мирового электричества.

Дальнейшее осложнение возникает, если есть необходимость в накоплении энергии. Доля атомной электроэнергии падает, и даже Международная ассоциация по атомной энергии не прогнозирует, что ее доля значительно возрастет, если вообще увеличится [10]. Хотя на улавливание и хранение углерода в значительной степени влияют сценарии Межправительственной группы экспертов по изменению климата на смягчение последствий изменения климата, это в значительной степени недоказанная технология [11], и кроме того, имеет высокие энергетические затраты [12] и длительные сроки реализации.

Отсюда следует, что возобновляемые источники энергии должны играть главную роль в долгосрочном смягчении последствий изменения климата [13]. Тем не менее, возобновляемые источники энергии с наибольшим потенциалом, ветряное и солнечное электричество [14], являются прерывистыми источниками, и поэтому потребуются некоторая форма накопления энергии, если электроснабжение будет постоянно соответствовать спросу. В настоящее время производство

электроэнергии из этих источников достаточно мало [9], чтобы ассимилироваться в существующие сети (где почти вся энергия поступает от ископаемого топлива, гидроэлектростанций и атомных станций), но это придется изменить.

Аккумуляция энергии, возможно, с использованием энергоносителей, таких как водород или метанол, значительно снизит чистую электроэнергию, доступную из данной валовой энергии ветра и солнечной энергии.

Таким образом, затраты на первичную энергию для автомобилей, работающих от таких источников, будут расти. Один из предложенных способов уменьшить потребность в аккумуляции энергии коммунальными предприятиями или жилыми домами – это использовать «транспортное средство в сеть». При использовании транспортного средства для хранения в сети электрические транспортные средства будут подключены к электрической сети и будут накапливать энергию в своих аккумуляторных батареях и продавать такую накопленную электроэнергию в сеть, когда спрос на электроэнергию превышает генерируемое предложение [15].

Но такой подход будет противоречить предложению о широком совместном использовании автомобилей, что значительно сократит количество принадлежащих автомобилей. В настоящее время автомобили находятся в пути только 4-5 % времени [3]. Неизбежно, что совместно используемые транспортные средства теперь будут использоваться более интенсивно (то есть проезжать больше км в год), так что время их парковки также будет сокращено. Таким образом, возможности для дневной зарядки и хранения энергии в сети будут уменьшены. Потребуется зарядка батарей в ночное время, но, если солнечная энергия станет доминирующим источником энергии в будущем, в ночное время необходимо, чтобы сеть потребляла энергию от аккумуляторов автомобиля, а не поставляла ее.

#### Сравнение выбросов парниковых газов

Проблемы, выявленной в предыдущем разделе, можно избежать, если сравнивать автомобиль с двигателем внутреннего сгорания и

электромобиль на основе CO<sub>2</sub> или, в более общем смысле, выбросов парниковых газов, обычно выражаемых в эквиваленте CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-экв.).

Но затем возникает новая проблема: почти во всех опубликованных сравнениях, не связанных с ископаемым топливом, электричество (возобновляемые источники энергии и атомная энергия) предполагается, что эти источники генерируют нулевые выбросы парниковых газов, что они являются «нулевыми источниками углерода».

Но это далеко не так. Хотя это правда, что эти источники напрямую генерируют незначительные парниковые газы, это не относится к их косвенным выбросам.

Гидроэлектроэнергия является крупнейшим источником электроэнергии из возобновляемых источников энергии, и большая часть остающегося неиспользованного потенциала находится в тропических регионах Африки, Латинской Америки и Азии [11, 16].

Если водохранилища за тропическими дамбами содержат разлагающиеся растительные вещества (например, это происходит, если лес погружен), могут произойти значительные выбросы как CO<sub>2</sub>, так и метана (CH<sub>4</sub>). CO<sub>2</sub> возникает в результате аэробного распада; CH<sub>4</sub>, мощный парниковый газ, от анаэробного распада. В первые годы эксплуатации выбросы в эквиваленте CO<sub>2</sub> могут конкурировать с выбросами на электростанциях, работающих на природном газе, с одинаковой выработкой электроэнергии [17]. Геотермальные растения также могут выделять парниковые газы [11]. В обоих случаях важно вычлест базовые выбросы (выбросы до строительства электростанции), чтобы получить более справедливую картину выбросов.

Что касается других возобновляемых источников энергии, выбросы парниковых газов возникают в результате затрат на строительство возобновляемых источников энергии или, в случае биоэнергии, для выращивания биомассы. Поскольку на ископаемое топливо по-прежнему приходится 86,3 % всей коммерческой энергии [9], большая часть энергии, затрачиваемой на создание и обслуживание устройств возобновляемой энергии, все еще производится из ископаемого топлива. Значительные

поступления азотных удобрений будут необходимы для повышения годового урожая с гектара биоэнергии, особенно на маргинальных почвах, которые останутся после удовлетворения глобальных потребностей в продовольствии и клетчатке.

Но удобрения производят закись азота (N<sub>2</sub>O), мощный и долгоживущий парниковый газ [18]. Крутцен и др [19] даже спорно утверждал, что из-за N<sub>2</sub>O освобождения из оплодотворенных почв, топливо из биомассы может производить аналогичные или даже более высокие уровни CO<sub>2</sub>-экв чем ископаемое топливо. Можно подумать, что для такой страны, как Норвегия, где почти 100 % электроэнергии вырабатывается на гидроэлектростанциях, замена существующих дорожных транспортных средств, работающих на нефтяном топливе, на электромобили приведет к значительному сокращению транспортных парниковых газов.

Но следует помнить, что Норвегия является частью более широкой европейской сети и экспортирует излишки гидроэлектроэнергии в другие страны. Вероятно, что чем больше гидроэнергии Норвегия потребляет, тем больше электроэнергии нужно будет вырабатывать из ископаемого топлива в других частях европейской энергосистемы, чтобы заменить норвежский гидроэнергетический импорт.

### Побочные эффекты для электромобилей

До настоящего времени сравнения основывались на сопоставлении использования первичной энергии и выбросов парниковых газов на транспортное средство-км для электромобилей и автомобилей с двигателем внутреннего сгорания.

Однако такие сравнения не будут действительны, если произойдут побочные эффекты. Положительное распространение происходит, если 'продвижение одного про-экологического поведения повышает вероятность того, что люди примут другое проэкологическое поведение [20]. Отрицательный вторичный эффект возникает, когда введение определенного проэкологического поведения (такого как переработка отходов) приводит к снижению принятия других проэкологических поведений отдельными лицами.

Негативные побочные эффекты связаны с другими понятиями, такими как «энергетический отскок» и «моральное лицензирование» [21].

Клекнер и др. [22] специально исследовали такие эффекты для электромобилей в Норвегии. Электромобили хорошо продаются в Норвегии, учитывая, что различные налоги на транспортные средства снижены или отменены, а также дорожные сборы и стоимость парковки. Они обнаружили, что, если в домохозяйствах есть только электромобиль, они ездят на нем меньше, чем владельцы обычных автомобилей. Однако большинство покупок электромобилей в домашних хозяйствах являются дополнением к автопарку, а не заменой транспортных средств.

Эти домохозяйства, владеющие электромобилями, ездили на своих электромобилях больше, чем ожидалось, скорее всего из-за субсидий, уже упомянутых для электромобилей.

Следовательно, отрицательный побочный эффект, по-видимому, работает, что ставит под сомнение прямое сравнение энергии или CO<sub>2</sub>-экв на транспортное средство-км для электромобилей и автомобилей с двигателем внутреннего сгорания.

### Обсуждение и выводы

Электрические транспортные средства, безусловно, превосходят транспортные средства с двигателем внутреннего сгорания по снижению использования транспортного топлива и локального загрязнения воздуха. Учитывая, что затраты на электроэнергию также намного ниже затрат на бензин на транспортное средство-км, электромобили также будут иметь более низкие эксплуатационные расходы, особенно в Европе, с высокими расходами на топливо на основе нефти [7]. Электрические сети могут (и обычно работают) на различных видах топлива,

что облегчает переход к электромобилям, работающим на полностью неископаемом электричестве.

Как и ожидалось, в литературе нет сомнений относительно преимуществ электромобилей в отношении первичной энергии и парниковых газов. Если необходим километраж, соответствующий транспортным средствам с двигателем внутреннего сгорания, то увеличение массы аккумулятора приведет к снижению энерго-эффективности электромобиля и увеличению выбросов парниковых газов. Выбросы парниковых газов также будут зависеть от состава топлива, используемого для энергоснабжения сети. Сравнения как энергии, так и парниковых газов также будут зависеть от предполагаемого срока службы транспортного средства-км и цикла вождения.

В этой статье были подняты некоторые другие вопросы, которые обычно не рассматриваются во многих исследованиях, посвященных изучению относительного использования энергии и выбросов парниковых газов электромобилей по сравнению с автомобилями с двигателем внутреннего сгорания.

Во-первых, сравнения энергоэффективности осложняются противоречивыми методами, используемыми для первичных источников электроэнергии, таких как гидро, солнечная энергия или энергия ветра. Эта проблема может стать более серьезной только в том случае, если энергия ветра и солнечная энергия будут доминировать в будущем энергоснабжении.

Затраты энергии на хранение этих прерывистых источников энергии являются дополнительным осложнением.

Во-вторых, для сравнения парниковых газов прямые выбросы некоторых возобновляемых источников энергии добавляют еще один источник неопределенности. Кроме того, если более широкое использование электромобилей в богатой возобновляемыми источниками энергии стране, такой как Норвегия, приводит к снижению экспорта электроэнергии из возобновляемых источников энергии, то общесистемные выгоды от использования парниковых газов для электромобилей должны быть соответственно снижены.

В-третьих, новая, по-видимому, «зеленая» технология, такая как



Рис.2. Второе поколение электромобиля Nissan Leaf (выпускается с 2017 года)

электромобили, создает побочные эффекты, что еще больше усложняет сравнение. В целом, должен быть сделан вывод о том, что выгоды от использования электромобилей для энергии и парниковых газов меньше, чем обычно предполагается. Только когда во взаимосвязанных энергосистемах преобладают возобновляемые источники энергии, будет безопасно заявлять о превосходстве электромобилей.

### Литература

- Онат Н.К., Куцуквар М., Татари О. Обычные, гибридные или электромобили с подключаемым модулем? Государственный сравнительный углерод и анализ энергетического следа в США. Прикладная энергия, 2015; 150, стр.36–49.
- Штайнхильбер С., Уэлс П., Тханкаппан С. Социально-техническая инерция: понимание барьеров для электромобилей. Энергетическая политика, 2013; 60, стр.531–539.
- Совакул Б.К., Хирш Р.Ф. Помимо батарей: изучение преимуществ и барьеров для подключаемых гибридных электромобилей и переход между транспортным средством и сеткой. Энергетическая политика, 2009; 37, стр.1095–1103.
- Мориарти П., Ван С.Дж. Показатели экологической эффективности городского транспорта, Журнал устойчивого развития энергетики, водоснабжения и водного хозяйства. Системы окружающей среды, 2015; 3 (2), стр.183–195.
- Ма Х., Балтазар Ф., Таит Н., Рiera-Палоу Х., Харрисон А. Новое сравнение между выбросами парниковых газов в течение жизненного цикла аккумуляторные электромобили и автомобили внутреннего сгорания. Энергетическая политика, 2012; 44, стр.160–173.
- Хокинс Т.Р., Сингх Б., Маджо-Беттез Г., Стремман А.Х. Сравнительная экологическая оценка жизненного цикла обычных и электрические транспортные средства. Журнал промышленной экологии, 2013; 17, стр.53–64.
- Рагимов Э.А. (2021) Экологические аспекты сопротивления движения автомобиля. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. № 4. С. 19–26. DOI: <https://dx.doi.org/10.25791/pribor.4.2021.1252>.
- Мориарти П., Хоннери Д. Водородный стандарт для учета энергии? Международный журнал водородной энергетики, 2010; 35, стр.12374–12380.
- БП: статистический обзор мировой энергетики. 2016, Лондон.
- Оценки Международной энергетической ассоциации (МАГАТЭ) в области энергетики. Электроэнергии и ядерной энергетики на период до 2050 года, 2012, Вена: МАГАТЭ.
- Мориарти П., Хоннери Д. Подъем и падение углеродной цивилизации. 2011, Лондон: Спрингер.
- Андерсон К. Двойственность в науке о климате. Природоведение, 2015, 8, стр.898–900.
- Мориарти П., Ван С.Дж. Оценка глобальных прогнозов возобновляемых источников энергии. Энергетическая процедура, 2015, 75, стр.2523–2528.
- Мориарти П., Хоннери Д. Каков глобальный потенциал возобновляемой энергии? Обзор возобновляемой и устойчивой энергетики. 2012, 16, стр.244–52.
- Тертон Х., Мора Ф. Транспортные системы для устойчивого развития: Комплексный энергетический анализ. Технологическое прогнозирование и социальные перемены, 2008, 75, стр.1091–1108.
- Всемирный энергетический совет. Мировые энергетические ресурсы: обзор 2013 года. 2013, Лондон.
- Фирнсайт П.М. Выбросы парниковых газов от гидроэлектростанций: споры обеспечивают трамплин для переосмысления предположительно чистый источник энергии. Изменение климата, 2004, 66 (2–1), стр.1–8.
- Рагимов Э.А. (2019) Перспективы автоматизированных автомобилей для снижения транспортной энергии. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, № 11. с.11–16.
- DOI: <https://dx.doi.org/10.25791/pribor.11.2019.1001>.
- Крутцен П.Дж., Мосье А.Р., Смит К.А., Винивартер В. Выпуск N2O из производства агробиотоплива предотвращает глобальное потепление сокращение путем замены ископаемого топлива. Атмосфера и химическая физика, 2008, 8, стр.389–395.
- Трулав Х.Б., Каррико А.Р., Вебер Е.С., Райми К.Т., Ванденберг М.П. Положительный и отрицательный побочный эффект проэкологии поведение: интегративный обзор и теоретические основы. Глобальное изменение окружающей среды, 2014, 29, стр.127–138.
- Мерритт А.С., Эффон Д.А., Мунин Б. Моральное самолицензирование: когда мы хороши, мы становимся плохими. Социальный и личный физический компас, 2010, 4/5, стр.344–357.
- Клекнер К.А., Наюм А., Мехметоглу М. Положительные и отрицательные побочные эффекты от покупки электромобилей до использования автомобиля. Транспортные исследования, 2013, 21, стр.32–38.

### **Рагимов Эльмар Агаргим оглу**

Родился в 1983 году. Окончил Азербайджанский Технический Университет по специальности «Техническое обслуживание автомобилей». В 2014 году защитил докторскую диссертацию по теме «Экологические аспекты термомеханических процессов в дисковых тормозных системах и их влияние на окружающую среду». Доцент. Имеет опыт работы более 18 лет. В настоящее время является ведущим научным сотрудником Института Географии имени акад. Г. Алиева, Национальная Академия Наук Азербайджана. Автор 35 научных трудов и 1 патента.

### **Rahimov Elmar Agarhim oglu**

Was born in 1983. Graduated from the Azerbaijan Technical University with a degree in Vehicle Maintenance. In 2014 he defended his doctoral dissertation on the topic "Environmental aspects of thermomechanical processes in disc brake systems and their impact on the environment." Docent. He has over 18 years of experience. Currently, he is a leading researcher at the Institute of Geography named after acad. G. Aliyeva, National Academy of Sciences of Azerbaijan. Author of 35 scientific papers and 1 patent.

# Исследование помехоустойчивости к внешним электромагнитным воздействиям канала управления скоростью, CAN-шины и электронного реле указателей поворота современного легкового автомобиля

// INVESTIGATION OF NOISE IMMUNITY TO EXTERNAL ELECTROMAGNETIC INFLUENCES OF THE SPEED CONTROL CHANNEL, CAN-BUS AND ELECTRONIC RELAY OF TURN INDICATORS OF A MODERN PASSENGER CAR //

Николаев П.А., д.т.н.,  
АО «АВТОВАЗ»,  
г. Тольятти

Козловский В.Н., д.т.н., профессор  
Самарский государственный тех-  
нический университет,  
г. Самара

Подгорный А.С., к.т.н.,  
Самарский государственный тех-  
нический университет,  
г. Самара

Крицкий А.В.,  
Самарский государственный тех-  
нический университет,  
г. Самара

*Ключевые слова:* автомобиль;  
бортовой электротехнический  
комплекс; электромагнитная со-  
вместимость.

*В работе представлены ре-  
зультаты экспериментальных ис-  
следований помехоустойчивости  
к внешним воздействиям канала  
управления скоростью, CAN-шины и  
электронного реле указателей по-  
ворота современного легкового ав-  
томобиля.*

*The paper presents the results  
of experimental studies of the noise  
immunity to external influences of  
the speed control channel, CAN bus  
and electronic relay of the direction  
indicators of a modern car.*

*Keywords:* car; onboard electrical  
complex; electromagnetic compatibility.

Исследования проводились при стан-  
дартном фронтальном и предлагаемом дис-  
кретном позиционировании автомобиля с  
углом поворота стенда 30 град. Оно было  
выбрано исходя из предоставленного лабо-  
ратории времени на проведение исследо-  
ваний.

Результаты экспериментов сводились в  
матричные массивы, которые анализирова-  
лись и определялись параметры помехоу-  
стойчивости.

Для обработки данных был введен пара-  
метр частотности, равный

$$F_{\beta} = \frac{K_{\beta}}{N_{\beta}} \Big|_{f=const} \quad (1)$$

где  $K_{\beta}$  – количество угловых позиций АТС по  
отношению к излучающей антенне при ко-  
торых наблюдается нарушение работоспо-  
собности;  $N_{\beta}$  – полное количество угловых  
позиций АТС по отношению к излучающей  
антенне.

Формула (1) показывает, сколько раз на  
конкретной частоте был зафиксирован сбой  
при разных углах позиционирования. Дан-  
ный параметр был взят как основной при  
определении частотных диапазонов с наи-  
меньшей помехоустойчивостью.

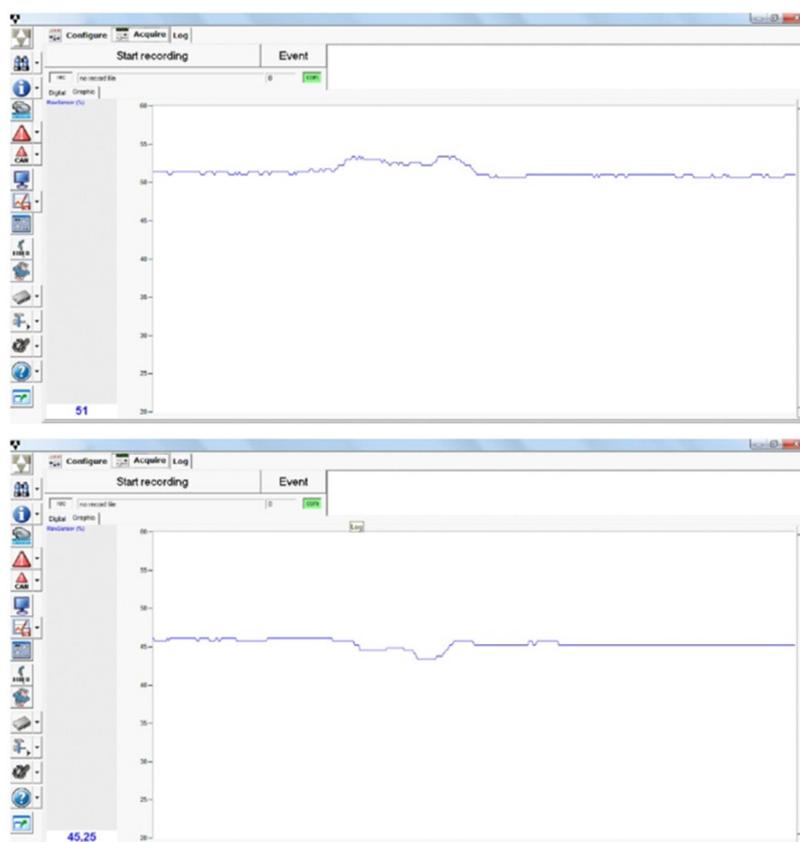


Рис. 1. Влияние электромагнитного воздействия на показания электронной педали акселератора: а) увеличение; б) уменьшение

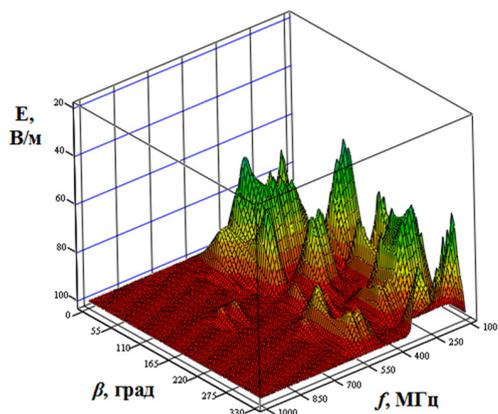


Рис. 2. Помехоустойчивость канала данных управления скоростью автомобиля

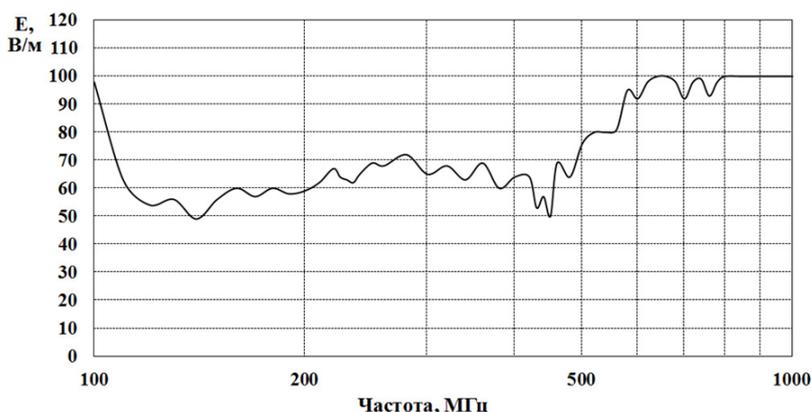


Рис. 3. Минимальные значения помехоустойчивости азимутальных проекций канала данных управления скоростью автомобиля

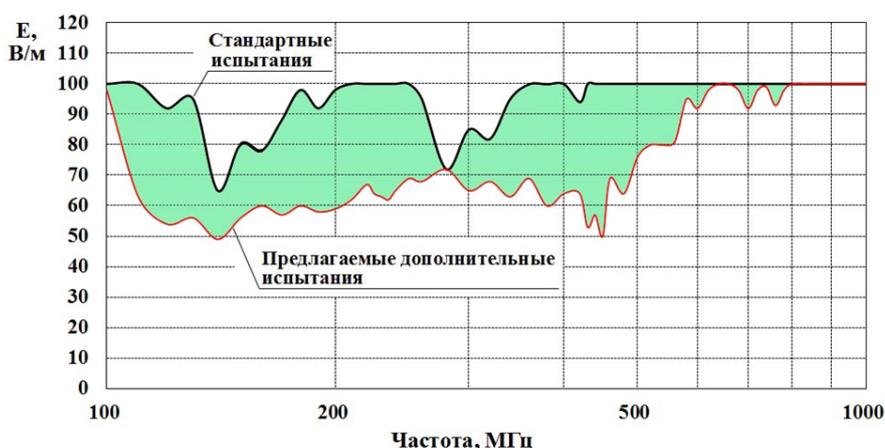


Рис. 4. Минимальные значения помехоустойчивости канала данных управления скоростью автомобиля при стандартных и предлагаемых дополнительных испытаниях

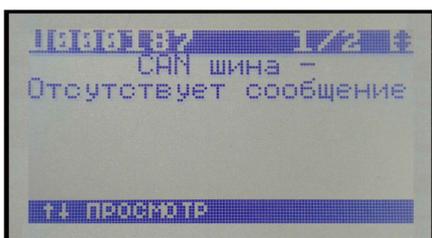


Рис. 5. Диагностическое сообщение ошибки CAN-шины

### Исследование помехоустойчивости канала управления скоростью

Объектом исследования был опытный легковой автомобиль с электронной педалью акселератора.

Конструкция электронной педали, с целью осуществления диагностики, состоит из двух переменных резисторов, напряжение с них является функцией изменения ускорения и, соответственно, скорости транспортного средства (АТС) [1, 2].

Исследования показали, что данные, получаемые контроллером системы управления двигателем, и

информация с педали акселератора могут исказиться таким образом, что будут интерпретироваться как команда на увеличение или уменьшение скорости автотранспортного средства, в зависимости от того в какую сторону эти данные исказятся (рис. 1) [3].

Искажение информации с педали акселератора происходило в диапазоне частот от 100 до 775 МГц при воздействии немодулированного узкополосного электромагнитного излучения (рис. 2). Минимальный уровень помехоустойчивости составил 49 В/м на частоте 139 МГц (рис. 3).

Исследования показали, что для  $F\beta \geq 0,3$  диапазон частот составил 110 – 580 МГц. Здесь было зафиксировано 95,9% проблем ЭМС.

Обработка данных показала, что максимальное значение параметра  $Q$  равно 26,3.

Сравнение результатов стандартных и предлагаемых дополнительных испытаний (рис. 4) показало,

что в большей части исследуемого диапазона частот уровни помехоустойчивости ЭТС при стандартном фронтальном позиционировании выше, чем при других азимутальных углах позиционирования АТС к излучателю. Минимальный уровень помехоустойчивости зафиксирован при азимутальном угле 120 град.

Обеспечение помехоустойчивости до уровня 100 В/м в диапазоне тестируемых частот достигнуто экранированием проводов, идущих от педали акселератора до контроллера системы управления двигателем.

### Исследование помехоустойчивости CAN-шины

Объектом исследования был легковой автомобиль с CAN-шиной, по которой происходит обмен данными между бортовыми электротехническими системами АТС.

Исследования помехоустойчивости выявили проблему искажения передаваемой в шине информации, которая диагностировалась как отсутствие сообщений (рис. 5) [3]. Данное нарушение работоспособности характеризовалось отключением системы ABS от сети, при этом она не передавала показания о скорости АТС. Данный сбой приводил к отключению функции антиблокировки колес при торможении, а также из-за отсутствия данных скорости контроллер системы управления двигателем переходил на аварийный режим работы, что влияло на динамические характеристики АТС.

Для восстановления штатного режима работы ABS необходимо выполнить перезагрузку ее контроллера операцией «выкл/вкл» зажигания.

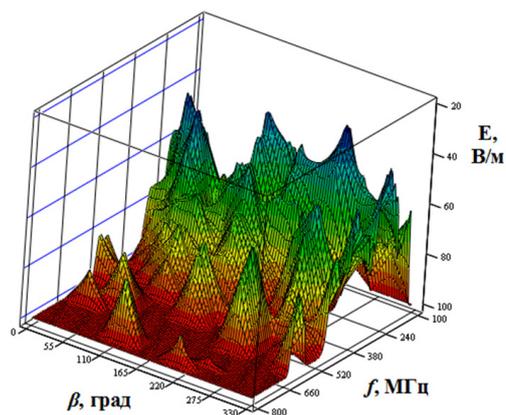


Рис. 6. Помехоустойчивость CAN-шины автомобиля

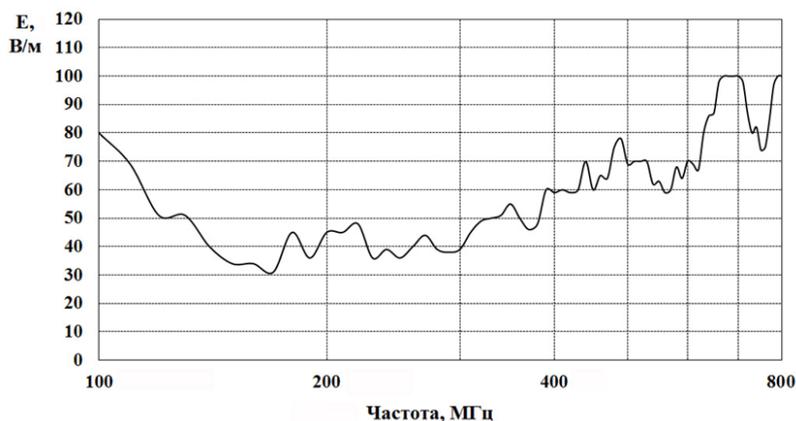


Рис. 7. Минимальные значения помехоустойчивости азимутальных проекций CAN-шины автомобиля

Исследования показали, что искажение информации в CAN-шине происходило в диапазоне частот 95 – 780 МГц при воздействии немодулированного узкополосного электромагнитного излучения (рис. 6).

Для  $F_{\beta} \geq 0,3$  диапазон частот составил 98 – 570 МГц. Здесь было зафиксировано 92,5% нарушений работоспособности по отношению к общему числу. Этому диапазону принадлежит минимальный уровень помехоустойчивости 31 В/м, зафиксированный на частоте 171 МГц (рис.7).

Для  $F_{\beta} \geq 0,2$  диапазон частот составил 95 – 630 МГц. В нем произошло 96,6 % проблем ЭМС.

Обработка данных показала, что максимальное значение параметра Q равно 25,6.

Сравнение результатов стандартных и предлагаемых дополнительных испытаний (рис. 8) показало, что в большей части исследуемого диапазона частот уровни помехоустойчивости CAN-шины при стандартном фронтальном позиционировании

выше, чем при других азимутальных углах позиционирования АТС к излучателю. Минимальный уровень помехоустойчивости зафиксирован при азимутальном угле 240 град.

Обеспечение помехоустойчивости до уровня 100 В/м в диапазоне тестируемых частот было достигнуто экранированием CAN-шины.

Исследования помехоустойчивости электронного реле указателей поворота. Объектом исследования был автомобиль с опытным образцом электронного реле указателя поворота. Исследования на помехоустойчивость выявили сбой исследуемого реле. Проблемы выражались в виде прекращения световой сигнализации указателя поворота в диапазоне во время воздействия функция сигнализации восстанавливалась. В эксплуатации подобного рода проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) могут привести к неправильной интерпретации сигналов о совершаемом маневре у других водителей.

Исследования показали, что нарушения работоспособности происходили в диапазоне частот от 96 до 473 МГц (рис. 9). Минимальный уровень помехоустойчивости 39 В/м, зафиксирован на частоте 142 МГц (рис. 10) при угле азимутального позиционирования 60 град [4].

Для  $F_{\beta} \geq 0,3$  диапазон частот составил 97 – 410 МГц. Здесь было зафиксировано 90,9% нарушений работоспособности по отношению к общему числу. Для  $F_{\beta} \geq 0,2$  диапазон частот составил 96 – 420 МГц. В нем происходило 97,7 % проблем ЭМС.

Обработка данных показала, что максимальное значение параметра Q равно 20,7.

Сравнение результатов стандартных и предлагаемых дополнительных испытаний (рис. 11) показало, что в большей части исследуемого диапазона частот уровни помехоустойчивости электронное реле указателей поворота при стандартном фронтальном позиционировании выше, чем при других азимуталь-

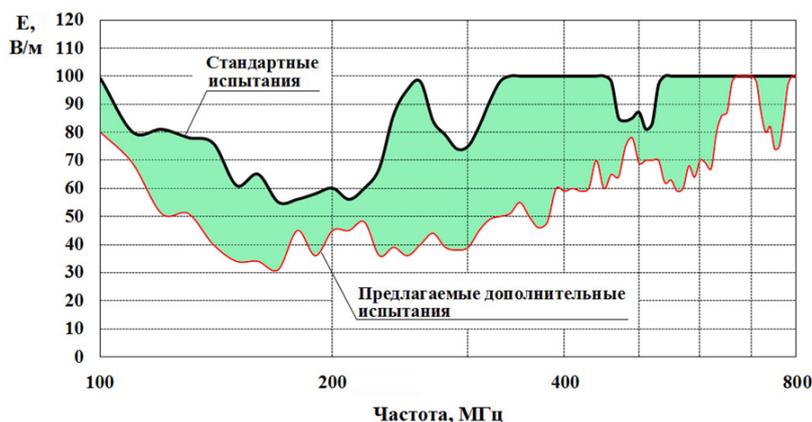


Рис. 8. Минимальные значения помехоустойчивости CAN-шины автомобиля при стандартных и предлагаемых дополнительных испытаниях

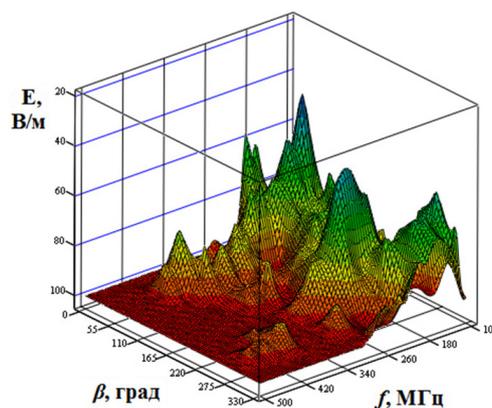


Рис. 9. Помехоустойчивость опытного образца электронного реле указателя поворота автомобиля

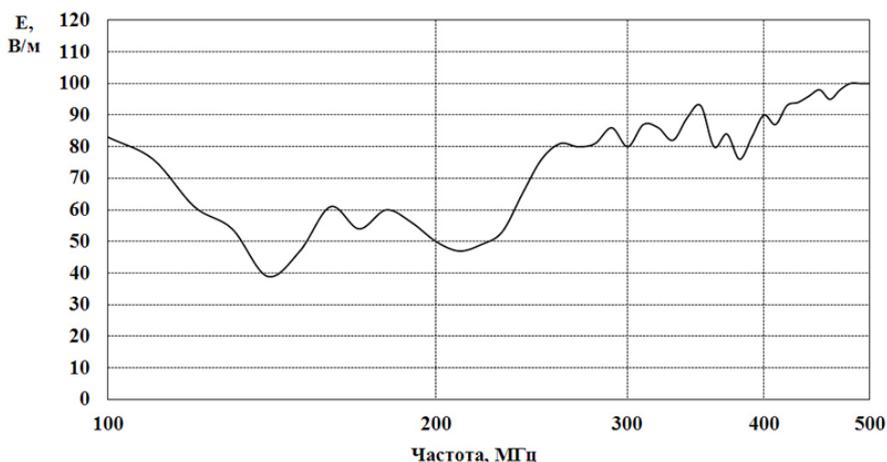


Рис. 10. Минимальные значения помехоустойчивости азимутальных проекций опытного образца электронного реле указателей поворота автомобиля

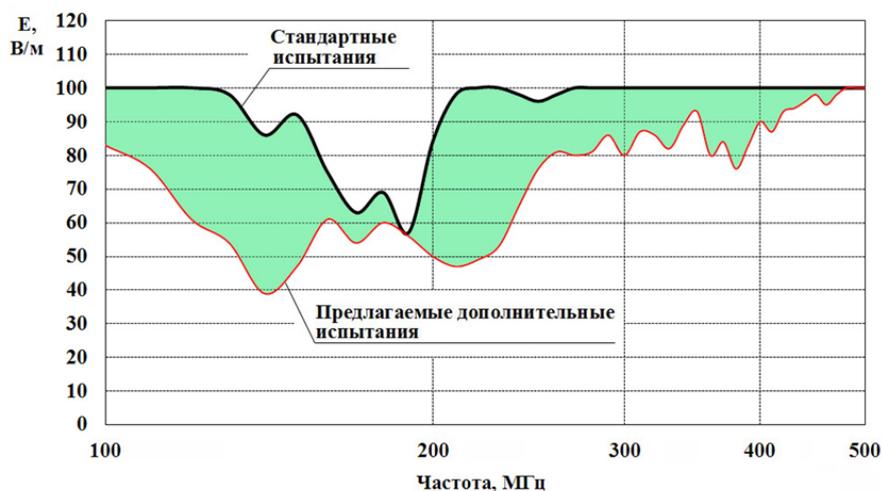


Рис. 11. Минимальные значения помехоустойчивости опытного образца электронного реле указателей поворота автомобиля при стандартных и предлагаемых дополнительных испытаниях

ных углах позиционирования АТС к излучателю. Минимальный уровень помехоустойчивости зафиксирован при азимутальном угле 60 град.

Обеспечение помехоустойчивости до уровня 100 В/м достигнуто увеличением емкости фильтрующих конденсаторов поверхностного монтажа по цепи питания до номинала 0,1 мкФ.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований помехоустойчивости различных электротехнических систем АТС отечественного производства, изучены проблемы совместимости и исследованы физические процессы сбоя. Показано, что наведенные внешним электромагнитным полем помехи воздействуют по слабозащищенным каналам, искажая данные с датчиковой аппаратуры и в линиях связи, а также воздействуют на микропроцессоры по сигнальным цепям и

проводам питания, вследствие чего из-за искажения, потери полезной информации или зависания микропроцессоров происходят нарушения работоспособности электротехнических систем. Определены частоты электромагнитных полей, при которых нарушалась работоспособность электротехнических систем (ЭТС) автотранспортных средств (АТС). Исследования выявили проблемы совместимости в диапазоне от 80 МГц до 1,4 ГГц. Частоты, на которых наиболее вероятно появление проблем ЭМС лежат в области от 97 до 580 МГц. Экспериментально определен диапазон параметра Q для задания шага перестройки позиционирования, имеющих пределы от 19,5 до 33,8.

**Литература**

1. Козловский, В.Н. Обеспечение качества и надежности системы

электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский // автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (техн. ун-т). Тольятти, 2010.

2. Козловский, В.Н. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 2. / Козловский В.Н., Строганов В.И., Дебелов В.В., Пьянов М.А. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 2. С. 19-28.

3. Николаев, П.А. Требования обеспечения устойчивости основных систем автотранспортных средств в условиях сложной электромагнитной обстановки / П.А. Николаев, Л.Н. Кечиев, Н.В. Балюк, А.С. Подгорный. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2016. – №3 (58). – С.3-10.

4. Подгорный А.С. Проблемы оценки помехоустойчивости автомобилей / А.С. Подгорный, П.А. Николаев // Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости: труды V Всероссийской НТК «Техно-ЭМС 2018». – М.: Грифон, 2018. – С. 74-75.

**Николаев Павел Александрович.**

Родился в 1977 году. В 2000 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет по специальности «Радиоинженер». Доктор технических наук. В 2012 году защитил докторскую диссертацию на тему «Обеспечение электромагнитной совместимости автомобильных систем зажигания». Опыт работы – 19 лет. В настоящее время работает начальником бюро электромагнитной совместимости ПАО «АВТОВАЗ». Автор более 100 научных трудов, в том числе 23 патентов.

**Козловский Владимир Николаевич.**

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил Тольяттинский политехнический институт по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». В 2010 году защитил докторскую диссертацию по теме «Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей». Опыт работы – 20 лет. В настоящее время

работает заведующим кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ). Автор 400 научных работ, из них более 300 в изданиях ВАК, 20 монографий, 40 статей в международных базах Scopus и Web of Science.

**Подгорный Александр Сергеевич.**

Родился в 1992 году. В 2015 году окончил ФГБОУ ВО «ПВГУС» по специальности «Автосервис». Кандидат технических наук. В 2019 году защитил диссертацию по теме «Совершенствование системы контроля бортового электротехнического комплекса автомобилей на помехоустойчивость к электромагнитным воздействиям». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает научным сотрудником кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета. Автор 17 работ, из них 10 в изданиях ВАК, 2 патента на изобретение.

**Крицкий Алексей Викторович.**

Родился в 1996 году. Окончил магистратуру Самарского государственного технического университета по специальности «Электрические станции» в 2019 году. В настоящее время является аспирантом кафедры «Теоретическая и об-

щая электротехника». Опыт работы – 4 года. Автор 8 научных трудов.

**Nikolaev Pavel Alexandrovich.**

Was born in 1977. In 2000 he graduated from Samara State Aerospace University majoring in «Radio engineer». He is doctor of technical sciences. In 2012 he defended the dissertation, the theme is «Provision of electromagnetic compatibility of automobile ignition systems». He has 19 years of work experience. At present he works as the head of the electromagnetic compatibility bureau of PJSC AVTOVAZ. He is author of 100 scientific works, including 23 patents.

**Kozlovskiy Vladimir Nikolaevich.**

Was born in 1976. In 1999 he graduated from the Togliatti Polytechnic Institute with a degree in Electrical equipment for cars and tractors. Doctor of technical sciences. In 2010 he defended his doctoral dissertation on the topic «Ensuring the quality and reliability of the electrical system of cars». Work experience is 20 years. At present he works as the head of the Department theoretical and general electrical engineering of Samara State Technical University (SamSTU). He is the author of 400 scientific works, of which more than 300 are in the editions of the

Higher attestation commission, 20 monographs, 40 articles in the international Scopus and Web of Science databases.

**Podgorny Aleksandr Sergeevich.**

Was born in 1992. In 2014 he graduated from PVGUS Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education with a degree in Autoservice. Candidate of Technical Science. In 2019 he defended his thesis on «Improving the control system of the on-board electrical complex of cars for noise immunity to electromagnetic influences». Work experience is 5 years. At present he works as a researcher at the Department of Theoretical and General Electrical Engineering of the Samara State Technical University. He is the author of 17 works, 10 of which are in the editions of the Higher Attestation Commission, 2 patents for invention.

**Kritsky Alexey Viktorovich.**

Born in 1996. Graduated from Samara State Technical University with a degree in Power Plants in 2019. Currently, he is a postgraduate student of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering. Experience - 4 years. Author of 8 scientific articles.