

**Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

## **ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЗА СЧЕТ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

**Аннотация.** *Одной из главных задач Российских железных дорог является доставка транзитных грузов между Европой и Азией максимально быстро и на качественном уровне. В связи с этим возникает актуальность вопроса об увеличении скоростей движения поездов. В настоящее время на отечественном электроподвижном составе переменного тока увеличение скорости обеспечивается за счет регулирования напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя и магнитного потока тягового электродвигателя. Магнитный поток регулируется за счет изменения тока возбуждения по сравнению с током якоря благодаря системе ослабления поля тяговых электродвигателей, которая подключается параллельно обмотки возбуждения. В статье представлены недостатки типовой системы ослабления поля тяговых электродвигателей электровоза. В связи с развитием силовой электроники появилась возможность усовершенствовать типовую систему ослабления поля путем применения в ней полностью управляемых полупроводниковых приборов, которая позволит исключить недостатки типовой системы. Для проверки предлагаемого технического решения разработан макет типовой и усовершенствованной систем ослабления поля тяговых двигателей и испытан на лабораторном стенде. В ходе проведения лабораторных испытаний получены электромагнитные процессы при работе тягового электродвигателя с типовой и предлагаемой системами ослабления поля. Результаты исследований представлены в данной статье.*

**Ключевые слова:** *электроподвижной состав, система ослабления поля тяговых электрических двигателей, техническая скорость, коэффициент относительной пульсации, IGBT-транзистор, лабораторный стенд.*

**T.V. Volchek, O.V. Melnichenko**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

## **INCREASING THE MOVEMENT SPEED OF AC ELECTRIC CARS DUE TO THE IMPROVED FIELD WEAKENING SYSTEM OF TRACTION ELECTRIC MOTORS**

**Abstract.** *One of the main tasks of the Russian Railways is the delivery of transit goods between Europe and Asia as quickly as possible and at a high quality level. In this regard, the relevance of the question of increasing the speed of trains arises. At present, on the domestic electric rolling stock of alternating current, the increase in speed is provided by regulating the voltage of the rectifier-inverter converter and the magnetic flux of the traction motor. The magnetic flux is regulated by changing the excitation current compared to the armature current due to the traction motor field weakening system, which is connected in parallel with the excitation winding. The article presents the disadvantages of a typical system for weakening the field of traction electric motors of an electric locomotive. In connection with the development of power electronics, it became possible to improve a typical field weakening system by using fully controllable semiconductor devices in it, which will eliminate the disadvantages of a typical system. To test the proposed technical solution, a model of a typical and improved systems for weakening the field of traction motors was developed and tested on a laboratory bench. In the course of laboratory tests, electromagnetic processes were obtained during operation of a traction motor with a typical and proposed field weakening systems. The research results are presented in this article.*

**Keywords:** *electric rolling stock, field weakening system of traction electric motors, technical speed, relative pulsation coefficient, IGBT transistor, laboratory bench.*

### **Введение**

Одной из главных задач Российских железных дорог является доставка транзитных грузов между Европой и Азией максимально быстро и на качественном уровне. В связи с этим возникает актуальность вопроса об увеличении скоростей движения поездов. Рост технической и участковой скоростей приведет к повышению грузооборота сети железных дорог, что является одной из важнейших задач Долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» к 2025 году, среднесуточного пробега, за счет чего произойдет высвобождение эксплуатируемого парка, экономия затрат на их ремонт, на содержание локомотивных бригад [1]. Одним из решений поставленных задач перед ОАО «РЖД» является усовершенствование электроподвижного состава (ЭПС).

На отечественном ЭПС переменного тока увеличение скорости обеспечивается за счет регулирования напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя и магнитного потока тягового электродвигателя (ТЭД). Магнитный поток регулируется за счет изменения тока возбуждения по сравнению с током якоря благодаря системе ослабления поля (ОП) ТЭД, устройство которой содержит электропневматические контактора, позволяющие изменять

сопротивления резистора ОП, и индуктивный шунт (далее типовая система ОП ТЭД) [2]. Типовая система ОП ТЭД имеет ряд недостатков, таких как:

- устройство данной системы применяется с 1932 года, и до сегодняшнего дня не изменялось;
- наличие массогабаритного медесодержащего индуктивного шунта и значительного количества контакторов, что приводит к дополнительным затратам на ремонт и обслуживание;
- хищение индуктивных шунтов, что приводит к неработоспособности системы ослабления поля;
- ограниченное число ступеней регулирования, что не позволяет поезду двигаться с максимально-допустимой скоростью движения;
- значительная пульсация тока возбуждения, что ухудшает коммутационную устойчивость ТЭД, вследствие образования вихревых токов.

В связи с развитием силовой электроники появилась возможность усовершенствовать типовую систему ОП ТЭД электровоза путем применения в ней полностью управляемых полупроводниковых приборов, что позволит упростить типовую систему, при этом обеспечить плавное регулирование тока возбуждения, что позволит повысить скорость движения как грузовых, так и пассажирских поездов [3].

Для проверки предлагаемого технического решения был разработан макет типовой и предлагаемой систем ОП ТЭД и испытан на лабораторном стенде.

Экспериментальные исследования системы ОП ТЭД электровоза проводились на базе кафедры «Электроподвижной состав» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения». Был использован стенд для имитации работы выпрямительно-инверторного преобразователя в режиме тяги в качестве нагрузки которого используется колесно-моторный блок (КМБ) с ТЭД типа НБ-514 с его доработкой, обеспечивающей работу стенда в режиме ОП [4]. Разработанный макет штатной и предлагаемой систем ОП ТЭД, подключается параллельно ОВ. На рис. 1 представлена функциональная схема экспериментального стенда работы КМБ электровоза в режиме ОП, который включает в себя две различные системы ОП ТЭД, выбор которых осуществляется с помощью контакторов (К2.1, К2.2 и К3.1, К3.2).

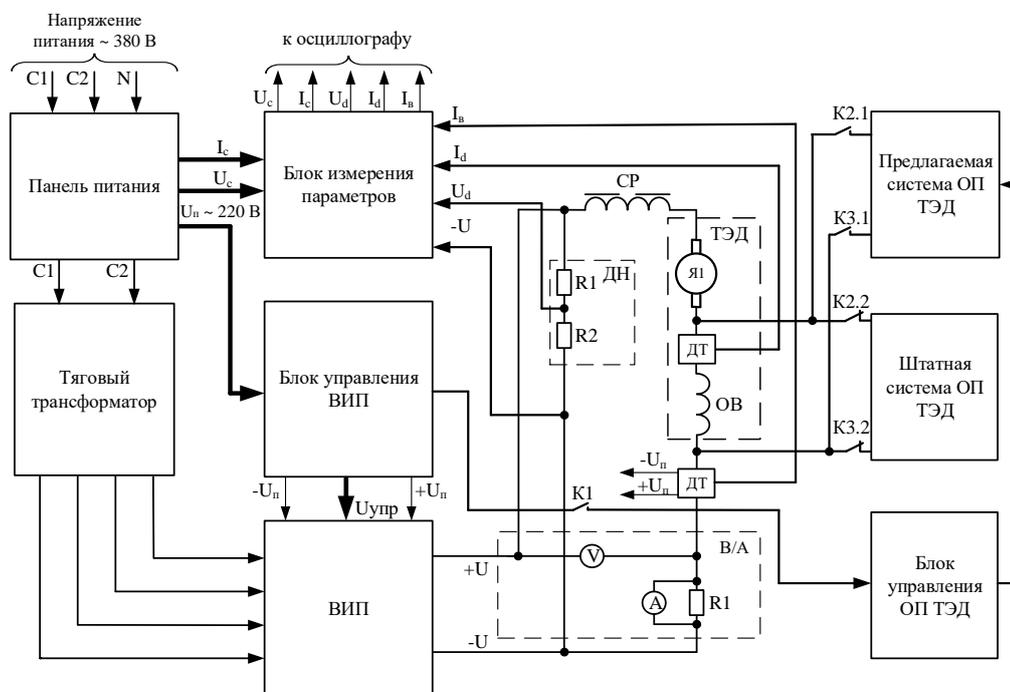


Рис. 1. Функциональная схема экспериментального стенда работы КМБ электровоза в режиме ОП

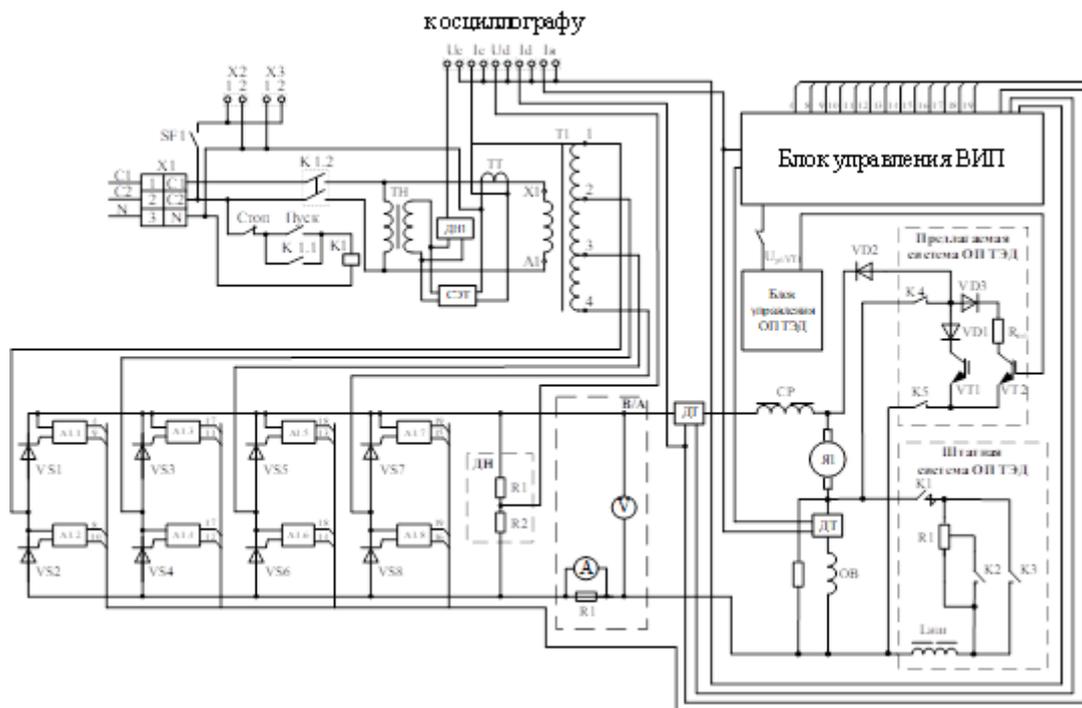
Стенд включает в себя следующие основные элементы:

- панель питания, которая представляет собой комплекс совмещённых устройств,

необходимых для обеспечения питания элементов стенда, панель получает питание от контактной сети переменного напряжения 380 В;

- модель тягового трансформатора, предназначенный для понижения напряжения питания и имитации работы электровоза;
- блок управления ВИП;
- ВИП, предназначенный для выпрямления однофазного переменного тока в постоянный и плавного регулирования выпрямленного напряжения на ТЭД;
- сглаживающий реактор (СР), предназначенный для уменьшения пульсации выпрямленного тока в цепи ТЭД;
- тележка электровоза ВЛ85, на которую располагается ТЭД серии НБ-514 с соединёнными последовательно обмоткой якоря и обмоткой возбуждения;
- датчики тока (ДТ), предназначенные для преобразования входного тока в пропорциональный выходной ток, необходимый для получения значения тока возбуждения и якоря ТЭД;
- цифровой вольтметр/амперметр (В/А), необходимый для наглядного отображения значений напряжения и тока ТЭД;
- блок измерения параметров, комплекс средств, необходимых для получения информации о происходящих электромагнитных процессах;
- делитель напряжения (ДН), необходимый для получения значения напряжения ТЭД.

На рис. 2 изображена электрическая принципиальная силовая схема стенда электровоза переменного тока, работающего в режимах полного и ослабленного поля со штатной и предлагаемой системами ОП, на которой содержатся следующие элементы: X1 – клеммная рейка, подключающая стенд к сети; VS1-VS8 – плечи ВИП; K1 – контактор электромагнитный; ТН – трансформатор напряжения; ТТ – трансформатор тока; СЭТ – счетчик электроэнергии; Т1 – тяговый трансформатор типа ОСЗМ-16 380/65В; А и V – амперметр и вольтметр; SF1 – электрический автомат; X2, X3 – розетки ~ 220 В.



**Рис. 2. Электрическая принципиальная силовая схема стенда КМБ электровоза переменного тока, работающего в режимах полного и ослабленного поля со штатной и предлагаемой системами ОП**

Макет штатной системы ОП ТЭД состоит из резистора ОП ( $R_1$ ), сопротивление которого регулируется за счет переключения контакторов ( $K1-K3$ ), и индуктивного шунта ( $L_{шп}$ ).

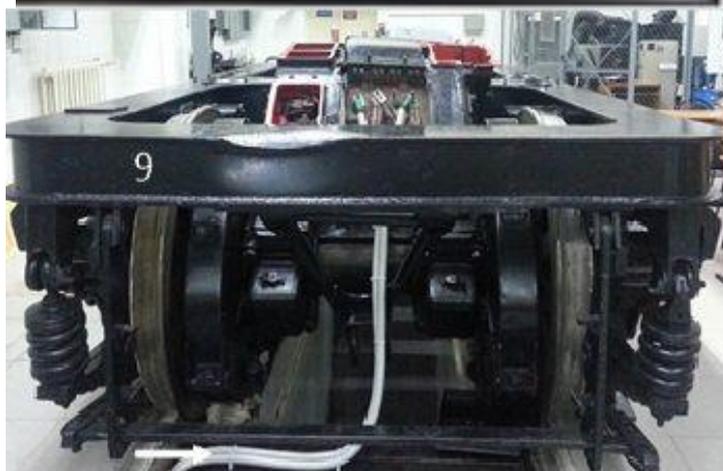
Макет предлагаемой системы ОП ТЭД включает в себя следующие элементы:

- IGBT-транзисторы (VT1, VT2), шириной импульса которых регулируется величина протекающего тока через шунтирующую цепь с помощью блока управления системой ОП ТЭД;
  - драйвера IGBT-транзисторов, вход которых подключен к системе управления шунтирования поля, а выход – к IGBT-транзистору;
  - диоды (VD1, VD3), включены последовательно с IGBT-транзисторами;
  - диод (VD2), который подключен к положительной шине питания двигателя;
  - параллельная RC-цепь;
- Общий вид экспериментального стенда представлен на рис. 3.

а)



б)



1 - осциллограф; 2 - пакетный переключатель SB1; 3 - счетчик СЭТ-1М.01; 4 - БУ; 5 - кнопка пуск/стоп; 6 - ВИП; 7 - имитатор тягового трансформатора; 8 - сглаживающий реактор; 9 - КМБ с ТЭД НБ-514; → - подключение ВИП с БУ ВИП к нагрузке

**Рис. 3. Физическая модель работы ТЭД в режиме полного поля а) ВИП с БУ ВИП; б) КМБ с ТЭД НБ-514**

В ходе проведения сравнительных испытаний исследовались электромагнитные процессы в цепи выпрямленного тока, для наглядного отображения которых использовался четырёхканальный осциллограф. Условием проведения лабораторных исследований являлось то, что все измерения производились при одинаковой нагрузке и входном напряжении питания. Получены осциллограммы напряжения ( $u_d$ ), токов якоря ( $i_a$ ) и возбуждения ( $i_b$ ) в цепи выпрямленного тока. Данные диаграмм электромагнитных процессов для проведения дальнейшей обработки записывались на usb накопитель. Полученные осциллограммы на примере третьей ступени штатной и предлагаемой систем ОП ТЭД электровоза, представлены на рис. 4 и 5.

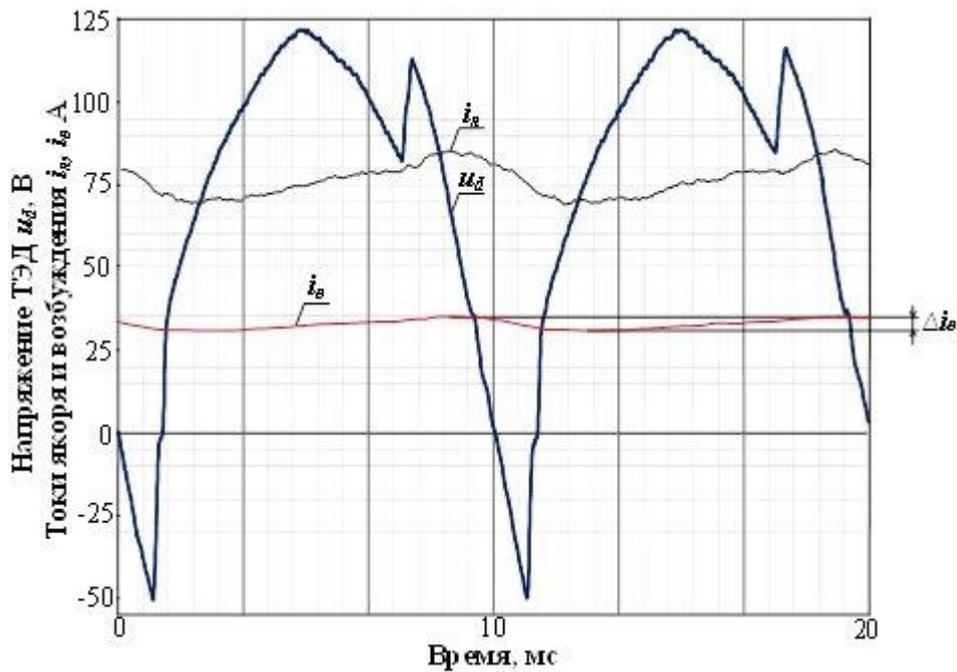


Рис. 4. Диаграмма выпрямленного напряжения  $u_d$ , токов якоря  $I_a$  и возбуждения  $I_b$  при работе штатной системы ОП ТЭД электровоза на третьей ступени регулирования

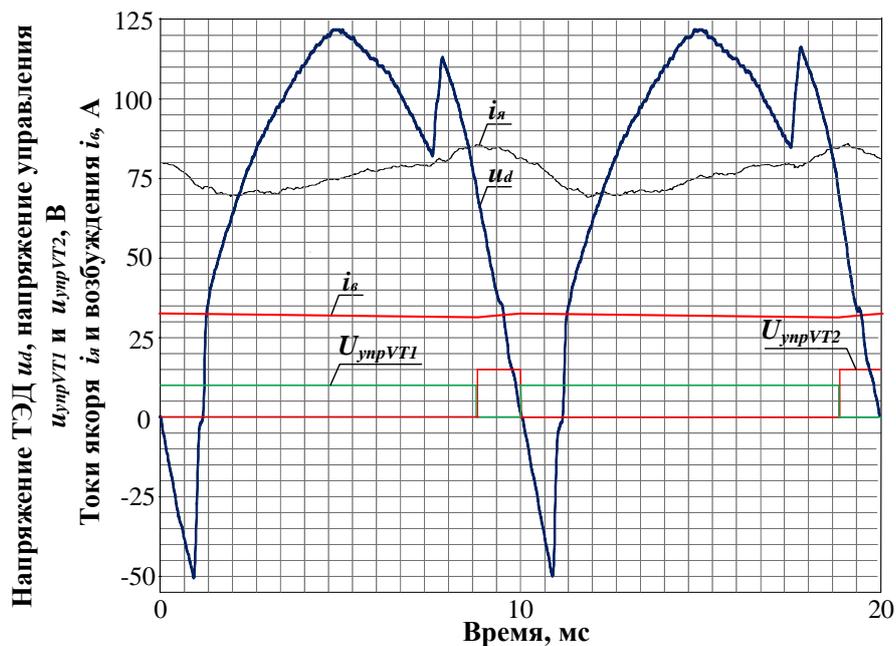


Рис. 5. Диаграмма выпрямленного напряжения  $u_d$ , токов якоря  $I_a$  и возбуждения  $I_b$  при работе предлагаемой системы ОП ТЭД электровоза на третьей ступени регулирования

При проведении эксперимента, выявлено, что при штатной системе ОП ТЭД относительная пульсация тока возбуждения ( $\Delta i_b$ ) на третьей ступени регулирования достигает 12 %, рис. 4, а при предлагаемой системе ОП ТЭД электровоза относительная пульсация практически равна нулю за счет того, что шунтирующая цепь на базе IGBT-транзисторов имеет незначительное активное сопротивление, по сравнению ОВ, поэтому большая часть переменной составляющей тока возбуждения пройдет по шунтирующей цепи на базе полупроводниковых приборов, рис. 6. Таким образом, снижение пульсации тока возбуждения позволит повысить ресурс работы ТЭД не менее чем на 15 % [6]. Также за счет регулирования ширины импульса управления IGBT-транзисторов предлагаемой системы ОП ТЭД обеспечивается плавное регулирование тока возбуждения, что позволяет увеличить техническую скорость электровоза не менее чем на 2,5 км/ч, что было доказано при

моделировании электровоза серии 2ЭС5К с плавным регулированием ОП ТЭД в программном комплексе «КОРТЕС» [5].

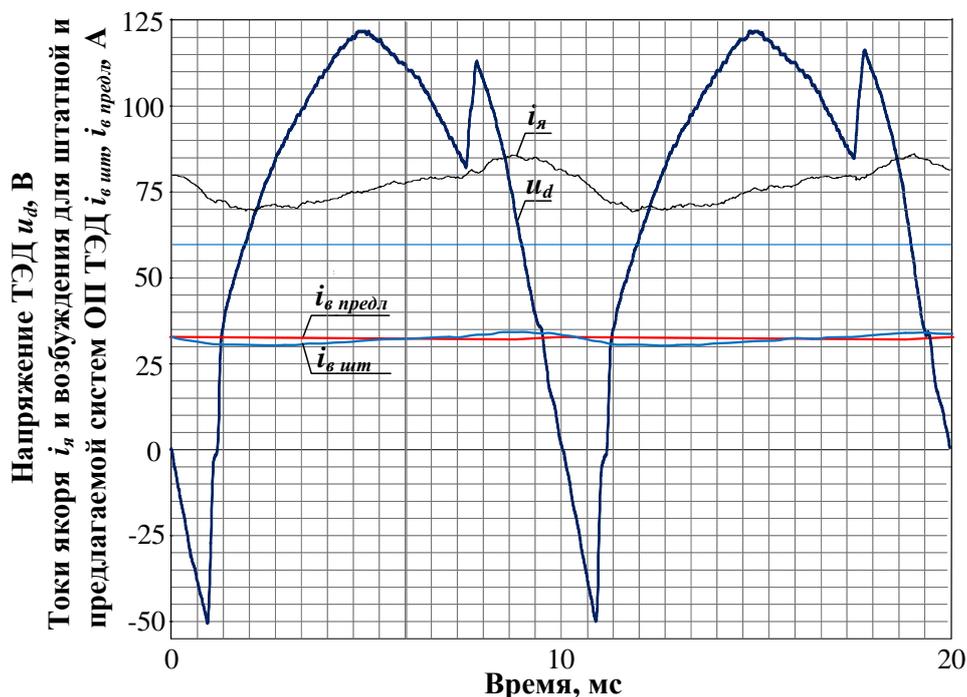


Рис. 6. Диаграмма выпрямленного напряжения  $u_d$  ТЭД, токов якоря  $i_a$  и возбуждения при работе штатной  $i_{в штат}$  и предлагаемой системы ОП ТЭД  $i_{в предл}$  на третьей ступени регулирования

Выводы:

1. Разработан макет штатной и предлагаемой систем ОП ТЭД электровоза переменного тока, проведены его испытания на лабораторном стенде и получены электромагнитные процессы работы ТЭД;
2. Результаты эксперимента показали, что предлагаемая система ОП ТЭД обеспечивает плавное регулирование тока возбуждения, что повысит техническую скорость движения поезда не менее чем на 2,5 км/ч, и снижение пульсации тока возбуждения практически до нуля, что повысит срок службы ТЭД не менее чем на 15 %;
3. Экономический эффект от внедрения предлагаемой системы ОП ТЭД на электровоз серии 3ЭС5К составит 393,71 тыс. руб.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года (утверждена распоряжением Правительством РФ от 19.03.2019 г. № 466р).
2. Тихменев Б.Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями. М.: Транспорт, 1958. 277 с.
3. Волчек Т.В. Математическое моделирование энергоэффективной системы ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов переменного тока [Текст] / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, А.О. Линьков // Известия Транссиба. – 2019. – №3 – С. 2- 14.
4. Власьевский С.В., Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Шрамко С.Г., Яговкин Д.А. Экспериментальный стенд для исследования процессов работы тиристорного и транзисторного выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме тяги на первой зоне регулирования / Вестник ЮУрГУ. – №4. – 2014. – С. 52-59.
5. Волчек Т.В. Повышение технической скорости электроподвижного состава за счет обеспечения плавного регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей [Текст] /

Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, В.С. Томилов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – №3. – С. 93-100.

6. Волчек Т.В. Возникновение трансформаторной эдс в секциях якоря тягового электродвигателя электровоза переменного тока в режимах полного и ослабленного поля и пути ее снижения [Текст] / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, А.О. Линьков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – №1 – С. 41-49.

## REFERENCES

1. Long-term development program of Russian Railways until 2025 (approved by the order of the Government of the Russian Federation of March 19, 2019, No. 466 r).

2. Tikhmenev B.N. AC electric locomotives with static converters. Moscow: Transport, 1958. 277 p.

3. Volchek T.V. Mathematical modeling of an energy efficient system for weakening the field of traction electric motors of alternating current electric locomotives [Text] / T.V. Volchek, O.V. Melnichenko, A.O. Linkov // Izvestia Transsib. - 2019. - No. 3 - P. 2-14.

4. Vlasyevsky S.V., Melnichenko O.V., Portnoy A.Yu., Shramko S.G., Yagovkin D.A. Experimental stand for studying the processes of operation of thyristor and transistor rectifier-inverter converters of an alternating current electric locomotive in traction mode on the first control zone / Bulletin of SUSU.– №4. - 2014 . - S. 52-59.

5. Volchek T.V. Increasing the technical speed of electric rolling stock by providing smooth regulation of the excitation current of traction electric motors [Text] / T.V. Volchek, O.V. Melnichenko, S.G. Shramko, V.S. Tomilov // Modern technologies. System analysis. Modeling. - 2020. - No. 3. - S. 93-100.

6. Volchek T.V. The emergence of transformer emf in the armature sections of the traction motor of an alternating current electric locomotive in full and weakened field modes and ways to reduce it [Text] / T.V. Volchek, O.V. Melnichenko, S.G. Shramko, A.O. Linkov // Bulletin of Rostov State Transport University. - 2020. - No. 1 - P. 41-49.

## Информация об авторах

*Волчек Татьяна Витальевна* – аспирант кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [tanya.vol4eck@yandex.ru](mailto:tanya.vol4eck@yandex.ru)

*Мельниченко Олег Валерьевич* – д.т.н., заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [olegmelnval@mail.ru](mailto:olegmelnval@mail.ru)

## Authors

*Tatyana Vitalevna Volchek* – Postgraduate of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [tanya.vol4eck@yandex.ru](mailto:tanya.vol4eck@yandex.ru)

*Oleg Valerievich Melnichenko* – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [olegmelnval@mail.ru](mailto:olegmelnval@mail.ru)