



Научно-производственное
предприятие
«ТОМИНСКИЙ
ЭЛЕКТРОННЫЙ ЗАВОД»

Разработка и производство
широкого класса диодов,
интегральных микросхем для
вторичных источников питания,
металлокерамических
корпусов и подложек

140070, РФ, Московская обл., г. Люберцы, рп Томилино,
ул. Гаршина, д. 11, лит. О.

Тел.: +7 (495) 500-40-20 www.nppteiz.ru e-mail: nppteiz@mail.ru



ЭЛЕКТРОНИКА И
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
ТРАНСПОРТА

научно-технический журнал

№ 2
2019

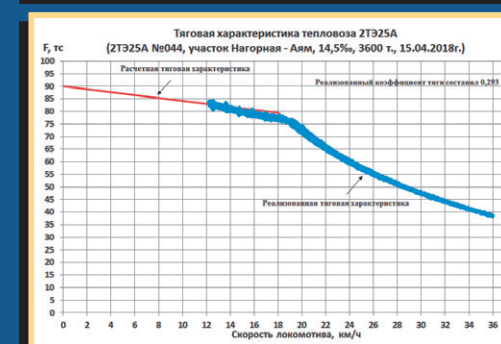
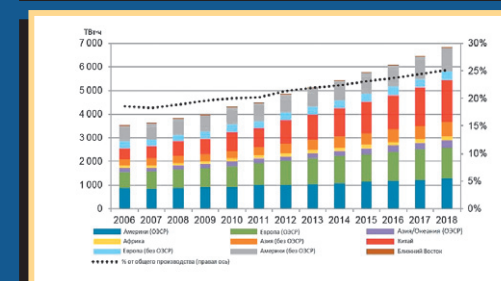
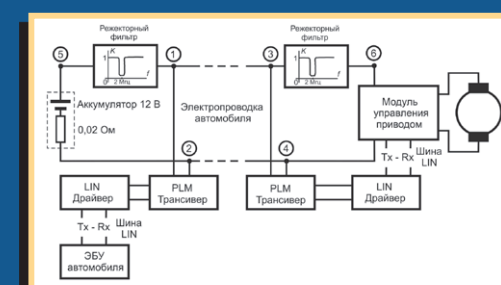
ISSN 1812-6782

В НОМЕРЕ:

Методы и устройства передачи цифровых
управляющих сигналов по силовой
электропроводке автомобиля

Автономная система энергоснабжения
с микропроцессорным управлением

Асинхронный тяговый привод
перспективного тепловоза для Восточного
полигона российских железных дорог





Уважаемые коллеги!

Научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» («ЭЭТ»), учредителем которого является НПП «Томилинский электронный завод», приглашает вас к сотрудничеству.

Цель издания – пропаганда научно-технических достижений в области систем управления наземного, воздушного и водного транспорта.

Одной из задач журнала является участие в подготовке научных кадров высшей квалификации. В журнале публикуются результаты теоретических и экспериментальных исследований ведущих ученых страны, докторантов и аспирантов многих вузов и НИИ. Информация о публикациях регулярно размещается в системе Российского индекса научного цитирования.

Журнал включен в Перечень ведущих российских периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ к апробации кандидатских и докторских диссертаций по следующим научным специальностям:

05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»;

05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»;

05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»;

05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»;

05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

Журнал открыт для авторских публикаций и размещения информационно-рекламных материалов.

С наилучшими пожеланиями и надеждами на дальнейшее сотрудничество,
редакционный совет журнала

Реквизиты: ООО «НПП ТЭЗ»

Адрес редакции: 140070, РФ, Московская обл., г. Люберцы, рп Томилино,
ул. Гаршина, д. 11, лит. О

Тел./факс: (495) 500-40-20, 557-23-95, e-mail: npptez@mail.ru

ИНН 5027095560 КПП 502701001

р/ч 40702810540240102500 в ПАО Сбербанк г. Москва

к/с 30101810400000000225 БИК 44525225

ЗАЯВКА НА ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ «ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ТРАНСПОРТА»

Просим оформить подписку на 20__ год
с № _____ по № _____ количество экз. _____

Полное наименование организации	
Ф.И.О., должность руководителя (полностью)	
Телефон/факс, e-mail руководителя	
Почтовый адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
Юридический адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
ИНН/КПП	
Расчетный счет	
Банк	
Корреспондентский счет	
БИК	
Контактное лицо, Ф.И.О., должность	
Телефон/факс, e-mail	

Адрес доставки: Кому: _____

Куда: _____

Для оформления подписки на журнал «ЭЭТ» заполните заявку и отправьте ее по факсу или электронной почте npptez@mail.ru.

По всем вопросам, связанным с подпиской, обращайтесь в редакцию журнала.

Стоимость годовой подписки 6000-00 руб., в т.ч. НДС 20%.

Периодичность – 6 номеров в год.

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 №ФС 77-29963
от 17 октября 2007 г.

Главный редактор:
А.Г. Баба, к.т.н.

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
В.Е. Ютт, д.т.н., профессор

Выпускающий редактор:
Н.А. Климчук

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

Подписано в печать: 2.04.2019 г.

Отпечатано:
ГУП МО «Коломенская типография».
140400, г. Коломна,
ул. III Интернационала, д. 2а.
E-mail: bab40@yandex.ru

Формат 60х90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 332.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ДИАГНОСТИКИ, СВЯЗИ

Дебелов В.В., Ендачев Д.В., Каменев В.Ф., Козловский В.Н.

Актуализация проблемы разработки электронной системы управления нагревателем датчика кислорода автомобильного двигателя внутреннего сгорания 2

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Васюков С.А., Мурзин И.А.

Методы и устройства передачи цифровых управляющих сигналов по силовой электропроводке автомобиля 5

Ютт В.Е., Сидоров К.М., Грищенко А.Г.

Расчетные исследования температурных режимов тяговых аккумуляторных батарей электромобилей 10

Григорьев Н.П., Марченко Л.В., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.

Повышение эффективности работы системы переменного тока 25 кВ. 15

Глущенко М.Д., Горюнов И.О.

Способ выбора параметров тяговых электрических машин электропоездов 18

Васильев И.А., Селиванов К.В., Люминарская Е.С.

Автономная система энергоснабжения с микропроцессорным управлением 21

Дураков Д.Н., Куштан М.И., Лобынцев В.В., Дожина Г.В.

Исследование методов усиления тяговой сети постоянного тока 26

Козловский В.Н., Новикова А.П., Самерханов Р.М.

Имитационное математическое моделирование при решении задач по оценке зарядного баланса автомобильной техники 30

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Бенькович Н.И., Ролле И.А.

Асинхронный тяговый привод перспективного тепловоза для Восточного полигона российских железных дорог 35

Белоусов И.В., Гельвер Ф.А., Самосейко В.Ф.

Динамическое управление частотой модуляции в системе преобразователь частоты – гребной электродвигатель 39

ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ

Деева В.С., Слободян С.М.

Моделирование динамики иглы систем зондовой диагностики 44

Способ выбора параметров тяговых электрических машин электропоездов

// Method of selection of parameters for electric engines by trains //

Глуценко М.Д., д.т.н., доцент,
Горюнов И.О.,
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва

Выбор параметров тяговой электрической машины в процессе проектирования является наиболее ответственным шагом при создании электропоезда. При проектировании необходимо учесть большое количество факторов и найти наиболее рациональные параметры для электродвигателя. Однако на сегодняшний день, несмотря на большое количество методик и рекомендаций, в основе расчетов продолжает оставаться машинная постоянная Арнольда как наиболее обобщающая форма записи зависимости между главными размерами электродвигателя. При использовании машинной постоянной возникают трудности выбора параметров, что приводит к неизбежности перерасчетов и трате времени. Поэтому необходимо найти новый, удобный и точный, способ определения параметров тяговой электрической машины на основе расчетов и моделирования. В данной статье показан способ выбора параметров тяговой электрической машины на примере электродвигателя постоянного тока для высокоскоростного электропоезда. **Ключевые слова:** электродвигатель постоянного тока, критерий подобия, параметры электродвигателя, постоянная Арнольда.

Проведение анализа размерностей и выведение критериального уравнения

Одним из способов определения параметров тяговой электрической машины является метод, основанный на теории подобия с составлением критериального уравнения [1, 2]. Теория подобия, в свою очередь, основана на методе анализа размерностей. Преимущества данного метода заключаются в том, что при анализе рассматривается большой объем информации об объекте исследования, выделяются наиболее важные зависимости; нет

The selection of parameters for electric engine in the design process is the most responsible step by the creation of trains. In the design process should be taken into account large number of factors and should be found the most rational parameters for electric motor. However, today, despite the existence methodologies, the determination of parameters for engine based of Arnold's equation as a general uniform dependence on engine diameter and length. By using the Arnold's equation not rare there are difficulties by choosing parameters thus increasing the time calculation and inevitability recalculations. New method of determination of parameters for engine with calculation and modelling must therefore be found. It must be new, simple and at the same time precise method applicable for determinate parameters. In this publication is illustrated the method to select parameters by electric engine an example of DC motor for high speed train.
Keywords: DC electric motor, similarity criterion, parameters by engine, Arnold's equation.

ограничений только в формулировках уравнений, рассматриваются в общем виде первичные величины и их зависимости, относящиеся к объекту исследования. Таким образом, воспользовавшись условиями отбора и алгоритмами выбора безразмерных критериев, описанными в [3], с помощью анализа размерностей можно вывести достаточно корректно сформулированные критерии подобия исследуемого объекта.

Однако теория подобия принимает во внимание уравнения процесса, при котором выделяются первичные величины, характеризующие процесс, на основании

которых составляются безразмерные комплексы. При этом соотношения первичных величин обладают критерием неизменности вида уравнений при изменении чисел размерности. Стандартный вид критериального уравнения, выведенного на основе анализа размерностей,

$$\pi_k = f(\pi_1, \dots, \pi_{m-k}), \quad (1)$$

где π_k – безразмерный комплекс критериального уравнения.

В истории двигателестроения различными школами проектировщиков были получены всевозможные зависимости элементов и параметров электрических машин. Среди ученых при большинстве расчетов базовой постоянной принято считать так называемую машинную постоянную Арнольда. Кроме этого, одной из базовых величин, характеризующих электродвигатель как электромеханический преобразователь энергии, является коэффициент полезного действия, более подробно об этом написано у Копылова [4, 5]. Поэтому было предложено использовать машинную постоянную Арнольда как основную форму записи зависимости между главными размерами тяговой электрической машины, отношение между потерями энергии и потребляемой энергией – и на их основе провести анализ размерностей и вывести критериальное уравнение.

После проведения анализа первичных величин тяговой электрической машины получена форма записи критерия в виде функции зависимости f от заданных параметров:

$$f(B_\delta, U, I, P) = f, \quad (2)$$

где B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл;

U – номинальное напряжение на зажимах двигателя, В;

P – потери в стали на перемагничивание, Вт;

I – номинальный ток электродвигателя, А.

Однако при анализе полученной формы комплекса было выдвинуто предположение о применении в расчетах вместо произведения значений номинального напряжения и тока тягового электродвигателя записи мощности тягового электродвигателя или отношение потребляемой электрической энергии электродвигателя к количеству тяговых электродвигателей. Тогда в выражение π -переменной предлагается внести дополнительный множитель k , характеризующий количество единиц тяговых электродвигателей в рассматриваемом подвижном составе. При этом количество двигателей является безразмерной величиной, и, таким образом, найденная π -переменная остается безразмерным комплексом:

$$\pi_{\pi} = \frac{k * P_{\text{магнитные потери}}}{P_1}, \quad (3)$$

где k – количество электродвигателей;
 $P_{\text{магнитные потери}}$ – магнитные потери на перемагничивание якоря при его повороте, Вт;

P_1 – потребляемая электрическая энергия подвижного состава, Вт.

Кроме этого, для составления полного критериального уравнения необходимы безразмерные комплексы, характеризующие отношения физических величин или подобных элементов в электродвигателе постоянного тока. Магнитное поле электродвигателя, возникающее при электро-механическом процессе преобразования электрической энергии в механическую, определяется отношениями между магнитодвижущей силой якоря, главных и дополнительных полюсов: $F_{\text{я}}$, $F_{\text{ГП}}$ и $F_{\text{ДП}}$ соответственно. Так как решается задача определения критериальных параметров основных элементов электродвигателя, то наиболее существенными величинами, характеризующими магнитное поле, принимаются следующие отношения между магнитодвижущими силами $\frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ГП}}}$, $\frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ДП}}}$, $\frac{F_{\text{ГП}}}{F_{\text{ДП}}}$.

Применение методов теории подобия и анализа размерностей [6] показывает, что индукция магнитного поля поперечного сечения электродвигателя в установившемся режиме характеризуется функциональной зависимостью между его безразмерными величинами. Таким образом, была составлена зависимость между критериями

$$\pi_{\pi} = \varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3), \quad (4)$$

$$\text{где } \pi_{\pi} = \frac{k * P_{\text{магнитные потери}}}{P_1}; \quad \pi_1 = \frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ГП}}};$$

$$\pi_2 = \frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ДП}}}; \quad \pi_3 = \frac{F_{\text{ГП}}}{F_{\text{ДП}}} - \text{найденные критерии.}$$

Итоговая форма записи критериального уравнения согласно теории подобия представлена в следующем виде:

$$\pi_{\pi} = A \pi_1^a \pi_2^b \pi_3^c, \quad (5)$$

где A , a , b , c – постоянные, зависящие от рассматриваемых режимов подключения электродвигателя.

Выведение итоговых форм записи уравнений для нахождения параметров электродвигателя

После проведения необходимых расчетов и установления значений параметров комплексов и постоянных критериального уравнения в численном виде для электродвигателя подвижного состава, зная известные соотношения магнитодвижущих сил между элементами электродвигателя и применяя известные уравнения для расчета электродвигателя постоянного тока, были выведены следующие формы записи зависимостей для определения основных параметров с учетом критериального уравнения. Форма записи для определения изменения индукции магнитного поля

$$\Delta B = \sqrt{\frac{A \cdot \left(\frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ГП}}}\right)^a \cdot \left(\frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ДП}}}\right)^b \cdot \left(\frac{F_{\text{ГП}}}{F_{\text{ДП}}}\right)^c \cdot P_1}{k \cdot P_{1/50} \cdot \Sigma m_{\text{зубца}}}}, \quad (6)$$

где $P_{1/50}$ – удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл, Вт/кг;

$m_{\text{зубца}}$ – масса зубца якоря, кг.

Уравнение (6) позволяет найти изменение индукции магнитного поля на перемагничивание якоря электродвигателя постоянного тока электропоезда.

Масса зубцов якоря тягового электродвигателя постоянного тока подвижного состава определяется в соответствии с уравнением

$$\Sigma m_{\text{зубца}} = \frac{A \cdot \left(\frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ГП}}}\right)^a \cdot \left(\frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ДП}}}\right)^b \cdot \left(\frac{F_{\text{ГП}}}{F_{\text{ДП}}}\right)^c \cdot P_1}{k \cdot P_{1/50} \cdot \Delta B^2}. \quad (7)$$

Для нахождения параметров главных размеров электродвигателя были составлены следующие зависимости с учетом критериального уравнения.

Итоговый вид уравнения для нахождения внешнего диаметра якоря электродвигателя

$$D_{\text{я}} = \frac{A \cdot \left(\frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ГП}}}\right)^a \cdot \left(\frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ДП}}}\right)^b \cdot \left(\frac{F_{\text{ГП}}}{F_{\text{ДП}}}\right)^c \cdot P_1}{k \cdot P_{1/50} \cdot \Delta B^2 \cdot H \cdot b \cdot l_{\text{я}} \cdot \rho} \cdot b \cdot 2 + \frac{H}{2} \cdot \pi, \quad (8)$$

где H – высота паза, мм;

b – ширина паза, мм;

$l_{\text{я}}$ – длина активной части якоря, мм;

ρ – удельная плотность стали, кг/м³.

Полученная зависимость для определения выражения длины активной части якоря с учетом критериального уравнения принимает следующий вид:

$$l_{\text{я}} = \frac{A \cdot \left(\frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ГП}}}\right)^a \cdot \left(\frac{F_{\text{я}}}{F_{\text{ДП}}}\right)^b \cdot \left(\frac{F_{\text{ГП}}}{F_{\text{ДП}}}\right)^c \cdot P_1}{k \cdot P_{1/50} \cdot \Delta B^2 \cdot H \cdot b \cdot n \cdot \rho}. \quad (9)$$

Таким образом, в ходе проведенного исследования на основании теории подобия были выведены три итоговые зависимости (6, 8, 9).

В таблице 1 представлен список зависимости требуемых параметров от заданных параметров электродвигателя, т.е. составлен необходимый минимум из задаваемых величин электродвигателя подвижного состава и электропоезда для нахождения требуемых параметров тягового электродвигателя с учетом решения критериальной задачи.

Таблица 1. Определение параметров тяговой электрической машины

Требуемый параметр	Задаваемый параметр
ΔB	P_1, k
$D_{\text{я}}$	$P_1, k, H, b, l_{\text{я}}$
$l_{\text{я}}$	P_1, k, H, b, n

Таблица 2. Критериальные параметры на примере высокоскоростного электропоезда ЭР200

Задаваемый параметр					
Для электропоезда	Мощность общая, МВт	11	11	11	11
	Количество ТЭД, ед.	48	32	24	16
Для тягового электродвигателя	Высота паза якоря, мм	42,2	42,2	42,2	42,2
	Ширина паза якоря, мм	13,6	13,6	13,6	13,6
№	Получаемый параметр				
1	Длина якоря, мм	254,9	379,6	504,3	753,8
2	Диаметр якоря, мм	384,7	566,6	748,4	1103,4

Для высокоскоростного электропоезда с распределенной тягой уменьшение количества тяговых электродвигателей предпочтительнее, поскольку уменьшается количество электрооборудования и увеличивается удельная мощность подвижного состава.

Как видно из таблицы 2, чтобы уменьшить количество тяговых электродвигателей с 48 до 16 при сохранении общей мощности, необходимо внести следующие изменения в конструкцию тягового электродвигателя: увеличить длину активной части якоря с 254,8 до 753,8 мм (изменение в 2,96 раза); увеличить внешний диаметр якоря с 384,7 до 1103,4 мм (изменение в 2,87 раза) (рис. 1). Кроме этого, по приведенной формуле, указанной у Иоффе А.Б. [7], была рассчитана масса тягового электродвигателя постоянного тока для каждого из рассчитанных длин и диаметров. После этого определен общий вес всех электродвигателей электропоезда и составлены зависимости суммарной массы тяговых электродвигателей постоянного тока от их количества (рис. 2).

Выводы

Проведен анализ размерностей тяговых электрических машин, составлено критериальное уравнение

электродвигателя постоянного тока. Выявлен способ определения параметров тяговых электродвигателей с учетом критериального уравнения: главных размеров электродвигателя постоянного тока и изменения индукции магнитного поля. Метод основан на теории подобия и базируется на рассмотрении машинной постоянной Арнольда и коэффициента полезного действия. Составлена таблица определяемых параметров с учетом теории подобия и рассчитаны параметры тягового электродвигателя на примере высокоскоростного электропоезда.

Литература

1. Гухман А.А. О сущности теории подобия [Текст]: учебное пособие для студентов / А.А. Гухман, Е.А. Ермакова. – М.: Типография МИХМ, 1959. – 36 с. – Библиогр.: с. 3-13, 32.
2. Гухман А.А. Введение в теорию подобия: учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений / А.А. Гухман. – 3-е изд. – М.: URSS, 2010. – 294 [1] с.: табл.; ISBN 978-5-382-01101-1.
3. Юдаев Б.Н. Теплопередача: [Учебник для машиностроит. спец. вузов] / Б.Н. Юдаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1981. – 319 с., ил.
4. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для сту-

дентов электротехн. и энергет. специальностей вузов / И.П. Копылов. – 3 изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 326 с.: ил.; табл. – Библиогр.: с. 22-26, 28-30. – ISBN 5-06-003861-0.

5. Копылов И.П. Проектирование электрических машин [Текст]: учебник для бакалавров: для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов / И.П. Копылов и др. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 766, [1] с.: ил.; табл. – ISBN 978-5-9916-1848-9.

6. Веников В.А. Теория подобия и моделирование [Текст]: применительно к задачам электротехники: учебник для студентов вузов / В.А. Веников, Г.В. Веников. – изд. 4-е. – М.: URSS, 2014. – 438 с.: ил.; табл. – Библиогр.: с. 54-60, 73-77, 93-100, 112-114. – ISBN 978-5-397-04140-9.
7. Иоффе А.Б. Тяговые электрические машины [Текст]: (Теория, конструкция, проектирование) / А.Б. Иоффе. – М.: Энергия, 1965. – 232 с.: ил.

Глушенко Михаил Дмитриевич

Родился в 1947 году. Окончил МИИТ по специальности «Инженер-электромеханик путей сообщения». Доктор технических наук, доцент. В 1999 году защитил диссертацию по теме «Проблемы эксплуатационной диагностики тяговых электродвигателей подвижного состава и пути их решения». Опыт работы – 47 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электропоезда и локомотивы» РУТ (МИИТ). Имеет 71 публикацию, 4 авторских свидетельства.

Горюнов Иван Олегович

Родился в 1991 году. В 2015 году окончил МГУПС МИИТ по специальности «Электрический транспорт железных дорог». В настоящее время – аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы» РУТ (МИИТ). Имеет 7 публикаций.

Glushchenko Michael

Was born in 1947. Graduated from Moscow State University of Railway Engineering with Electrical engineer of lines of communication. Doctor of engineering science, associate professor. In 1999 presented a thesis on The problems of operational diagnostics of traction electric motors of rolling stock and ways to solve them. Has working experience of 47 years. At present works as a professor of Electric trains and locomotives at Moscow State University of Railway Engineering. Has 71 publications, 4 author's certificates.

Goryunov Ivan

Was born in 1991. In 2015 graduated from Moscow State University of Railway Engineering with Electric transport of railways. At present is a post-graduate student at Electric trains and locomotives faculty at Moscow State University of Railway Engineering. Has 7 publications.

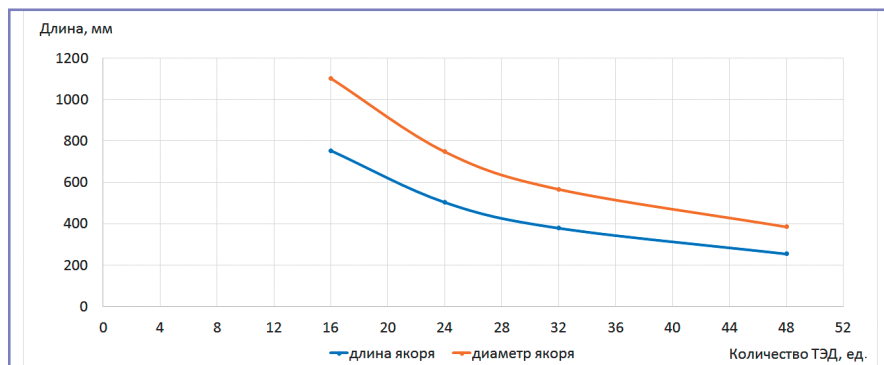


Рис. 1. Зависимость длины и диаметра якоря тягового электродвигателя от количества двигателей в электропоезде ЭР200

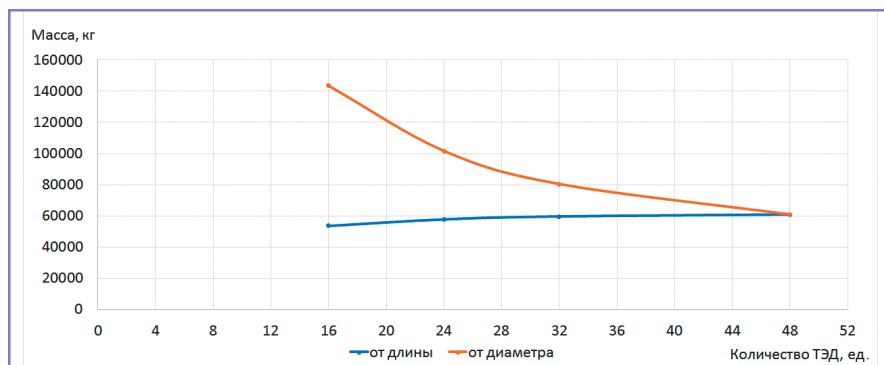


Рис. 2. Зависимость общей массы всех тяговых электродвигателей от их количества в электропоезде ЭР200