

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:
Р.А. Валиулин

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

Подписано в печать: 15.10.2024

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Старостина Я.К., Сафонов З.Ю., Пакцаев Я.А.
Универсальный преобразователь напряжения на основе широтно-импульсного модулятора 2

Доманов В.И., Доманов А.В., Билалова А.И.
Исследование электротехнического комплекса конвейера с двумя проводными барабанами 8

Чебоксаров А.Н.
Особенности эксплуатации автомобильных аккумуляторов 12

Доманов В.И., Мурзаков Д.Г.
Синтез вычислителей координат асинхронного двигателя при двухканальном управлении 16

Шакурова З.М., Сафин А.Р.
Аддитивные технологии при производстве электрических машин 20

Аветисян А.С.
Коэффициенты теплопередачи в транзисторах на основе гетеропереходов: исследование слоев с теплопроводящими добавками для повышения эффективности 30

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

Саксонов А.С., Козловский В.Н., Корольчук Д.С.
Исследование вопроса влияния технологических отклонений на работоспособность машин постоянного тока, работающих в составе бортовых электротехнических комплексов 35

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Петров Г.И., Сергеев И.К., Пищик А.В.
О некоторых мерах по исключению максимально допустимых износов контактирующих поверхностей узла пятник-подпятник и элементов узла гашения колебаний длиннобазных вагонов-платформ 39

ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Рыжова Е.Л.
Внедрение наилучших доступных технологий для снижения экологического воздействия тепловых электрических станций на окружающую среду 46

ИНФОРМАЦИЯ

Книги 54

Выставки 56

Универсальный преобразователь напряжения на основе широтно-импульсного модулятора

// UNIVERSAL VOLTAGE CONVERTER BASED
ON A PULSE-WIDTH MODULATOR //

**Старостина Я.К., к.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО «Ульяновский
государственный
технический университет»,
г. Ульяновск**

**Сафонов З.Ю., студент,
ФГБОУ ВО «Ульяновский
государственный
технический университет»,
г. Ульяновск**

**Пакшаев Я.А., студент,
ФГБОУ ВО «Ульяновский
государственный
технический университет»,
г. Ульяновск**

В статье рассматривается конструкция и принцип действия универсального преобразователя с широтно-импульсным модулятором. Устройство работает в трех

режимах: преобразование постоянного напряжения 12В от аккумуляторной батареи в переменное 220В, преобразование переменного напряжения в постоянное с выходными характеристиками необходимыми для дуговой электросварки и преобразование переменного напряжения 220В в постоянное 12В. Описывается общая структурная и схема управления, а также выполнены предварительные расчеты. Устройство реализовано на современной элементной базе, с применением компактных трансформаторов на ферритовых сердечниках, и IGBT, MOSFET-транзисторов.

Ключевые слова: универсальный преобразователь, аккумуляторная батарея, широтно-импульсный модулятор, Push-pull схема, транзисторный ключ.

The article discusses the design and principle of operation of a universal converter with a pulse width modulator. The device operates in three modes: conversion of DC voltage 12V from the battery to AC 220V, conversion of AC voltage to DC with output characteristics necessary for arc welding and conversion of AC voltage 220V to DC 12V. The general structural and control scheme is described, as well as preliminary calculations are performed. The device is implemented on a modern element base, using compact transformers on ferrite cores, and IGBT, MOSFET transistors.

Keywords: universal converter, battery, pulse width modulator, Push-pull circuit, transistor key.

ВВЕДЕНИЕ

У автомобилистов случаются такие ситуации, в которых требуется устройство, способное преобразовать бортовое постоянное напряжение автомобиля 12 вольт в 220 переменное с частотой 50 Гц для зарядки гаджетов или работы электроинструмента. В других случаях необходимо преобразовать переменное напряжение из однофазной распределительной сети, чтобы произвести пуск двигателя при неисправной батарее, или подзарядить её. Бывают и такие случаи, когда может потребоваться сварочный инвертор, для устранения неисправности и эвакуации до ближайшего ремонтного сервиса. На рынке существуют устройства, помогающие в данных ситуациях. Однако в виду совокупной габаритности

этих устройств не всегда, получается, иметь их при себе. Представленная в данной статье концепция позволяет объединить все эти устройства в одно универсальное решение. Разработанная концепция предполагает несколько режимов работы прибора [1]. Первый режим работы: преобразование постоянного напряжения 12В от аккумуляторной батареи в переменное необходимое для автономной работы устройств питающихся от однофазной распределительной сети ~ 220В. Второй режим работы: дуговая электросварка – преобразование переменного напряжения в постоянное с другими выходными характеристиками. Третий режим работы: преобразование переменного напряжения 220В в постоянное 12В.

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

К подобным устройствам предъявляются следующие требования: повышенные энергетические характеристики, небольшие массогабаритные показатели и т. д. Данные условия возможно реализовать только при обращении к современной элементной базе, используя высокочастотные способы преобразования с применением компактных трансформаторов на ферритовых сердечниках, и IGBT, MOSFET-транзисторы. Пользователю необходимо дать возможность переключения режимов работы инвертора в зависимости от которого меняется силовая цепь.

Основной технологией является Push-pull схема импульсного преобразователя с нулевым выводом, которая в присутствии двух транзисторных ключей выполняет функ-

ции высокочастотной модуляции, а при введении третьего ключа – способна регулировать напряжение в первичных обмотках согласующего трансформатора. Структурная схема состоит из: высокочастотного согласующего трансформатора на ферритовом сердечнике с двумя одинаковыми первичными обмотками, и тремя на вторичными, модулятора первичного напряжения трансформатора на 2х или 3х транзисторных ключах, а также два выпрямительных моста. Первичные обмотки соединены последовательно – согласнo имея при этом нулевой вывод, который присоединен напрямую к отрицательному полюсу источника питания, или через третий транзисторный ключ. Оставшиеся выводы обмоток присоединяются к положительному полюсу посредством транзисторных ключей два и три.

Чтобы из постоянного напряжения 12В получить переменное 220В, необходимо взять в качестве источника питания аккумуляторную батарею (АКБ) совместно с генератором. С целью применения универсального преобразователя в качестве сварочного инвертора или зарядного устройства потребуется подключить его к сети питания 220В. Выпрямленное напряжение после диодного моста поступает на входы транзисторов модулятора.

Широтно-импульсный модулятор (ШИМ) управляет транзистор-

ными ключами. К его входам подключены управляющий и опорный сигналы. Опорный сигнал получается в результате интегрирования входящего напряжения с потенциометра на выходе выпрямительного моста, который меняется с частотой питания первичных обмоток трансформатора. Интегратор подключен к сравнивающему устройству. Сформировав задающий сигнал, сравнивающий узел подает его на формирователь управляющих импульсов, а его выходы уже подключены к базам транзисторных ключей.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Описание первого режима работы.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема силовых цепей и упрощенная блок-схема цепей управления преобразователя в режиме DC/AC.

В данном режиме первичными обмотками трансформатора выступают обмотки с понижающей стороны W11, W12, а в качестве вторичных – последовательно-согласно соединенные обмотки W21, W22, W23. Первичные обмотки имеют вывод нулевой точки с постоянно включенным транзистором, который в данном рисунке не учитывается. Другие выводы обмоток подключены к плюсу источника питания через транзисторы 2,3. В данном режиме для увеличения выходной мощно-

сти и продолжительности автономной работы в качестве источником является АКБ (4) с параллельно подключенным генератором автомобиля (5). Широтно-импульсный модулятор является основным элементом управления и состоит из: потенциометрического задатчика управляющего сигнала 6, источника опорного сигнала 7, формирователя управляющих импульсов 8.

Работа данной схемы заключается в последовательном переключении транзисторов 2,3 в противофазе с определенной тактовой частотой. Частота переключений выбирается с учетом магнитной проницаемости сердечника трансформатора, и составляет от 1 до 10-100 кГц. Работа управляющей схемы выполняется согласно вертикальному принципу: опорное напряжение с источника интегрируется на каждом такте, образуя тем самым сигнал пилообразной формы. В сравнивающем устройстве опорный управляющий сигналы совмещается, и в местах пересечения образуются точки, указывающие на моменты переключения транзисторов. Соответственно если задающий сигнал будет иметь синусоидальную форму с частотой 50 Гц, в таком случае на выходе схемы образуется очередность импульсов, основная гармоника которой будет схожа с гармоникой в сети, что даст возможность работать электроинструменту [2].

Расчетный набросок устройства без учета воздействия индуктивности обмоток должен содержать в себе выражение действующего значения напряжения в одной из обмоток с понижающей стороны

$$U_{w1} = \frac{U_{d1}\pi}{2\sqrt{2}} = \frac{12 \cdot 3,14}{2 \cdot 1,4} = 13,3 (В) \quad (1)$$

где $U_{d1} = 12 В$ – номинальное напряжение аккумулятора.

Чтобы определить напряжение на каждой из обмоток с повышающей стороны, принимая во внимание выходное напряжение 220 В, необходимо использовать формулу

$$U_{w2} = \frac{220}{3} = 73,3 (В) \quad (2)$$

Коэффициент трансформации при этом

$$K_T = \frac{U_{w2}}{U_{w1}} = \frac{73,3}{13,3} = 5,5 \quad (3)$$

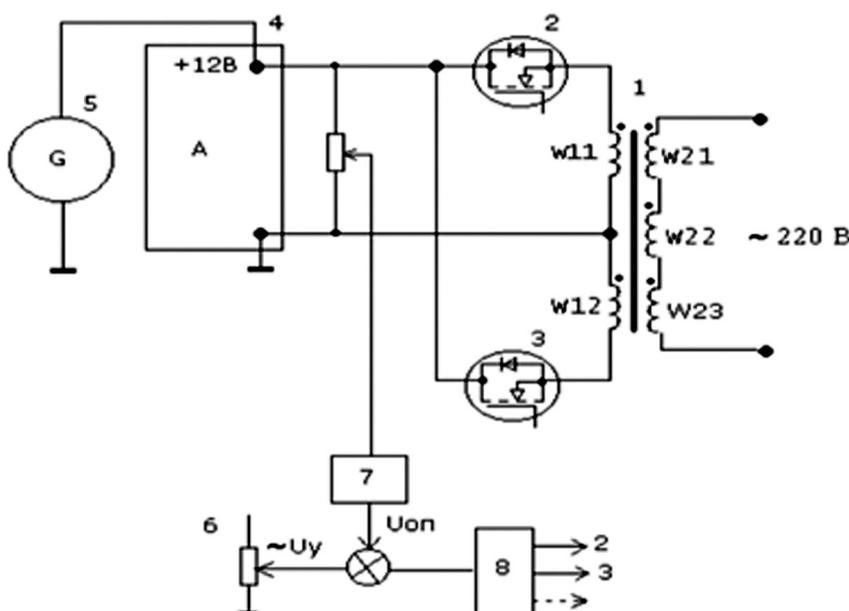


Рисунок 1 – Схема преобразователя для первого режима работы DC/AC

Чтобы рассчитать нагрузку на первичные обмотки и на всю понижающую сторону, необходимо определить ток нагрузки на выходе трансформатора. Обычные бытовые приборы в виде микроволновых печей, осветительных приборов и компьютеров потребляют в среднем до 10 А, однако могут быть ручные инструменты, потребляющие большой ток (углошлифовальная машина, шуруповерт, перфоратор и т.д.) в пределах до 16 А. Для расчета подобных электрических схем принято брать рабочую мощность с запасом, поэтому $I_n=20A$.

Отсюда получаем

$$I_{w1} = I_{w2} \cdot K_T = 20 \cdot 5,5 = 110 \text{ (A)} \quad (4)$$

а также габаритную мощность трансформатора

$$S_T = \frac{2I_1 \cdot U_{w1} + 3I_2 \cdot U_{w2}}{2} = \frac{2 \cdot 110 \cdot 13,3 + 3 \cdot 20 \cdot 73,3}{2} \approx 6 \text{ (кВ} \cdot \text{А)} \quad (5)$$

2. Описание второго режима работы

В данном режиме схема (рис.2) получает питание от однофазной сети 220В за счет диодного моста 9. При таком исполнении важно избавиться от низкочастотных пульсаций напряжения на входе трансформатора. Поэтому была найдена технология устранения низкочастотных пульсаций модуляционным способом без использования LC фильтров.

Для реализации данного решения потребуется получить опорный сигнал, необходимый цепи управления преобразователем, посредством интегрирования выходного сигнала диодного выпрямителя. На временной диаграмме (рис.2), полу-

ченной при помощи компьютерного моделирования, проиллюстрирована результативность модуляционного метода устранения низкочастотных пульсаций.

Коммутацию транзисторов нужно производить в точках равенства U_y и U_{on} сигналов, сбросив интегратор и обнулив его выходной сигнал. Данное равенство сигналов в моменты переключений задает постоянство вольт-секундных площадей под кривой питающего напряжения U_{w2} во вторичных обмотках трансформатора на протяжении каждого такта модуляции [2].

Графики подтверждают, что вопреки синусоидальному характеру огибающей этого напряжения, стабильность вольт-секундных площадей сохраняется на всем полупериоде сетевого напряжения. Компьютерное моделирование показывает симметричное перемагничивание сердечника трансформатора, что позволяет освободиться от применения сглаживающих фильтров.

Данный режим предназначен для дуговой электросварки, которую для большей эффективности предполагается производить на постоянном токе. Следовательно, подразумевается подключение нагрузки в виде сварочного электрода ко второму выпрямительному мосту 10, который расположен на вторичной обмотке трансформатора. В стандартном сварочном инверторе постоянного тока напряжение сваривания деталей электродом диаметром 3-4 мм находится в диапазоне 60-70 в. По этой причине, чтобы получить данные напряжения на

выходе схемы, возьмем в качестве первичной обмотки W21, W22. Соответственно эффективная величина напряжения в каждой обмотке будет равна

$$U_{w2} = U_{d1} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 220 \text{ (В)} \quad (6)$$

где $U_{d1} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ – среднее значение напряжение после выпрямления первого моста. Расчет напряжения на одной из вторичных обмоток

$$U_{w1} = U_{w2} \frac{1}{K_T} = 220 \frac{1}{5,5} = 40 \text{ (В)} \quad (7)$$

Для соответствия поставленным требованиям необходимо включить вторичные обмотки трансформатора согласно-последовательно. Тогда напряжение на выходе второго выпрямительного моста станет равным

$$U_{d2} = 2 \cdot U_{w1} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 2 \cdot 40 \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 72 \text{ (В)} \quad (8)$$

Чтобы удерживать дугу необходимо иметь среднее значение тока сварки $I_d=100A$.

Протекающий ток во вторичных обмотках

$$I_{w1} = I_d \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 100 \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 110 \text{ (А)} \quad (9)$$

величина тока в первичных обмотках данного преобразователя

$$I_{w2} = I_{w1} \frac{1}{K_T} = 110 \frac{1}{5,5} = 20 \text{ (А)} \quad (10)$$

Значения, полученные при расчете, напряжений и токов в обоих режимах работы достаточно схожи. Это предоставляет возможность применять трансформатор в обе стороны с минимальными изменениями силовой цепи.

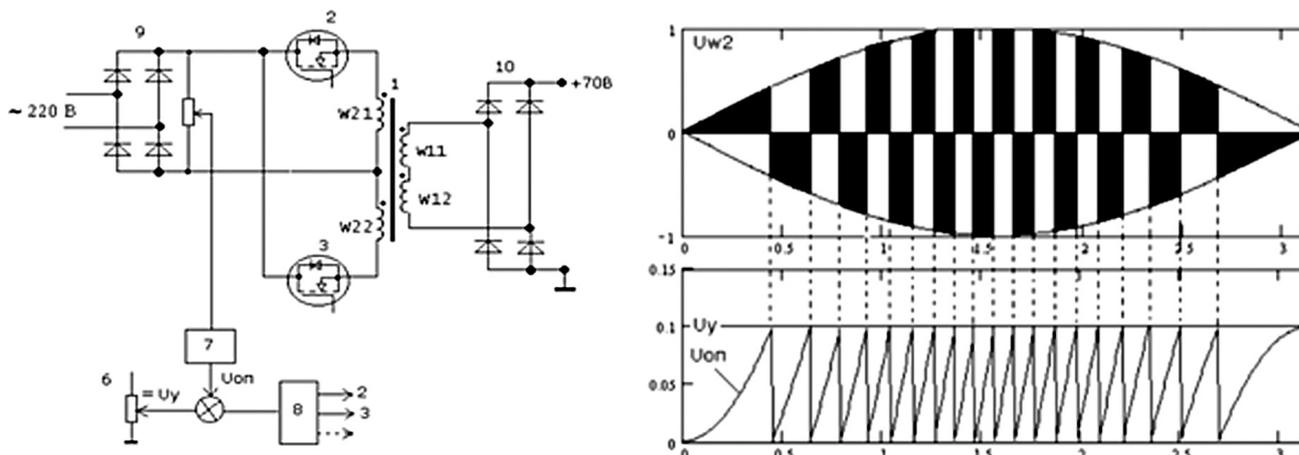


Рисунок 2 – Преобразователь во втором режиме работы и диаграмма коммутаций ключей в схеме

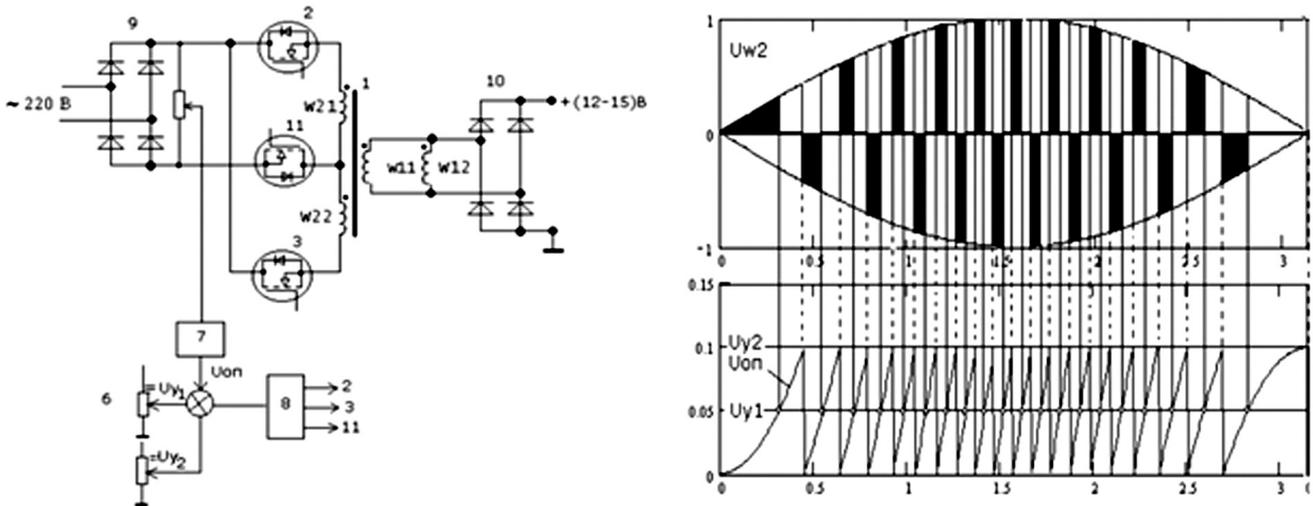


Рисунок 3 – Схема преобразователя в управляемом режиме AC/DC и его коммутационная диаграмма.

3. Описание третьего режима работы

Данный режим предоставляет возможность использовать преобразователь в качестве зарядки аккумуляторной батареи или позволит произвести пуск двигателя в случае её неисправности. Для осуществления такого режима работы, необходимое значение напряжения на выходе УП должно составлять порядка 12В, а выходная мощность обеспечиваться достаточной для пускового момента стартера. Решением поставленных задач будет являться перевод инвертора в управляемый режим AC/DC (рис.3).

Важное внесенное изменение, это наличие транзисторного ключа 11, который включен между отрицательным контактом и средней точки первичных обмоток. Такой метод регулирования предполагает периодическое отключение транзистором 11 питания схемы, для уменьшения скважности импульсов, что позволяет регулировать напряжение на выходе схемы. Для соответствия данной логике работы кроме основного управляющего напряжения U_{y1} , задающего включение ключей 2 и 3, потребуется дополнительный управляющий сигнал U_{y2} , который при пересечении с опорным напряжением задает точки закрытия транзистора 11 в необходимые моменты времени.

Для увеличения максимального выходного тока схемы и одновременно снизить напряжение на выходе необходимо соединить обмотки понижающей стороны W11, W12

параллельно. Затем общие выходы подключаются к выходному диодному мосту 10, с которого снимаются мощность для зарядки аккумулятора или пуска стартера [2].

В самом тяжелом режиме преобразователь должен выдавать ток порядка $I_d=(200-300)$ А. Такая величина взята из расчета пускового тока стартера легкового автомобиля с небольшим запасом.

Предполагая активный характер нагрузки, вычислим пределы изменения тока во вторичных обмотках трансформатора

$$I_{w1} = \frac{I_d}{2} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = \frac{200(300)}{2} \cdot \frac{3,14}{2\sqrt{2}} = (110 - 150)(A) \quad (11)$$

а затем границы соответствующего изменения тока в первичных обмотках

$$I_{w2} = \frac{I_{w1}}{K_T} = \frac{110(150)}{5,5} = (20 - 30)(A) \quad (12)$$

По расчетам можно проследить, что вычисленные значения для данного режима не существенно отличаются от цифр в ранее рассмотренных режимах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Принципиальная схема универсального преобразователя

Данная принципиальная схема (рис.4) позволяет использовать универсальный преобразователь автомобилиста в вышеописанных режимах работы. Важно отметим принятые допущения: ключи K1-K7 являются транзисторными ключами, датчики задающие $U_{оп}$ и $U_{у}$ являют-

ся потенциометрический задатчик, 7й блок это интегратор, 8й блок – формирователь управляющих импульсов.

Переключение силовой схемы устройства из одного режима в другой предполагается производить через систему управления. Перекоммутацию ключей производит блок управления согласно заданной программе режимов. Производить переключение пользователю, нужно учитывая источник питания и необходимое выходное напряжение. Процесс состоит в переключении работы схемы путём изменения связей между элементами силовой схемы.

Такой метод позволит использовать один и тот же трансформатор в различных преобразовательных режимах и избегать необходимости внесения структурных изменений в схему самого устройства со стороны пользователя. Подобные решения берутся за основополагающие при проектировании универсального преобразователя для автомобилиста.

Работа схемы в различных режимах подразумевает перекоммутацию ключей особым образом.

При выборе *первого режима* схема работает следующим образом: ключи K2, K3, K5, K6, K7 замкнуты, ко входу подключен источник питания от АКБ, в качестве первичных обмоток используются W11, W12 подключенные последовательно, вторичные обмотки W21, W22, W23, соединены так же последовательно, попеременно работают транзисторы VT1, VT2. Транзистор VT3 перехо-

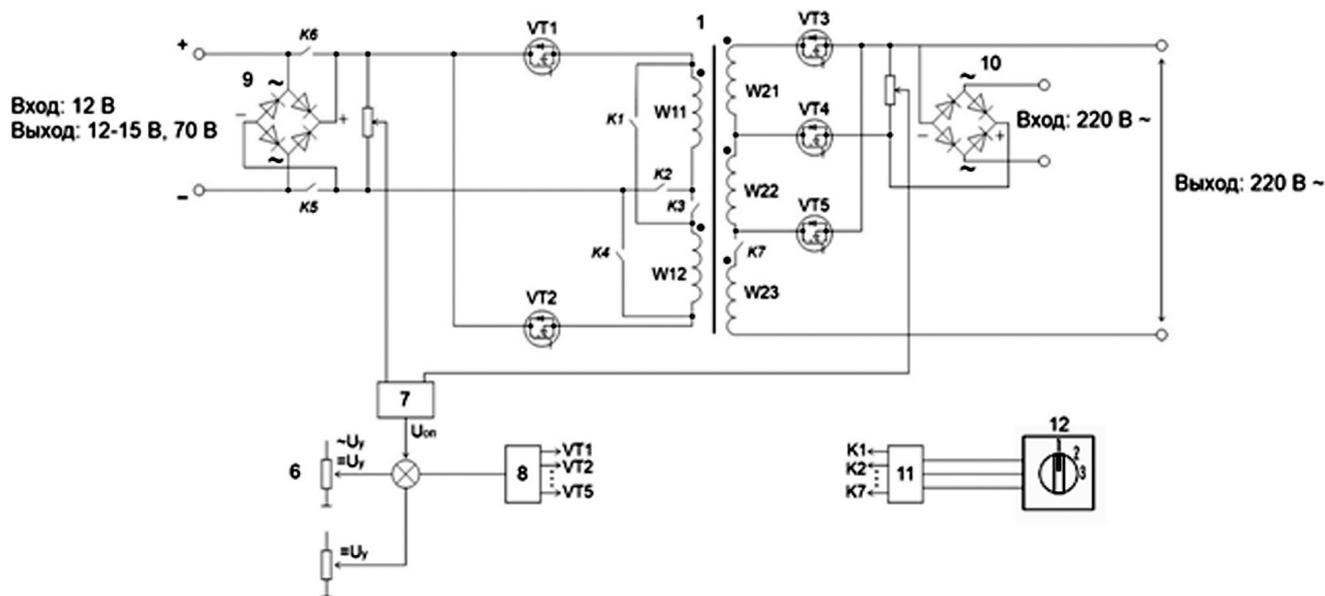


Рисунок 4 – Принципиальная схема преобразователя на основе широтно-импульсного модулятора.

дит в постоянно проводящее состояние.

При выборе *второго режима* работы схема работает следующим образом: ключ K3 замкнут, ко входу подключен источник питания ~220В, в качестве первичных обмоток используются W21, W22 подключенные последовательно, вторичные обмотки W11, W12, соединены так же последовательно, попеременно работают транзисторы VT3, VT5. Транзисторы VT1, VT2, VT4 переходят в постоянно проводящее состояние.

При выборе *третьего режима* работы схема работает следующим образом: ключи K1, K4 замкнуты, ко входу подключен источник питания ~220В, в качестве первичных обмоток используются W21, W22 подключенные последовательно, вторичные обмотки W11, W12, соединены параллельно, попеременно работают транзисторы VT3, VT4, VT5. Транзисторы VT1, VT2, переходят в постоянно проводящее состояние.

2. Система управления преобразователем

Чтобы реализовать систему управления (рис.5), предлагается следующий вариант её реализации. Алгоритм работы широтно-импульсного модулятора реализовать при помощи программируемого микроконтроллера, используя известные языки программирования.

К аналоговому входу подключён потенциометр задающий сигнал

опорного напряжения, находящийся на выходе диодного моста первичного источника питания. Для переключения режимов предусмотрен переключатель, который подключен к микроконтроллеру. Программируемый микроконтроллер выполняет алгоритм соответствующий выбранному режиму работы и управляет затворами транзисторов.

Микроконтроллер может быть выбран из различных платформ, например: Arduino, Wemos Mini или ESP. Важно, чтобы микроконтроллер поддерживал функцию ШИМ и имел достаточно выходов с ее реализацией для управления транзисторными ключами VT1-VT5. После выбора платформы в коде программы нужны учесть правки, соответствующие языку программирования данного микроконтроллера [3]. Если выходов для управления транзисторными ключами K1-K7 недостаточно целесообразно их сгруппировать,

не нарушая логику схемы. Либо использовать дополнительные коммутирующие устройства. В зависимости от выбранного транзистора и микроконтроллера возможно потребуется соответствующий драйвер для управления ключами. Он должен усиливать сигнал, с микроконтроллера выдавая номинальный ток/напряжение тем самым надёжно открывать транзисторы. Также в своей сборке микроконтроллер должен иметь необходимую обвязку (генератор синусоидального сигнала, АЦП и т.д.) или добавить её извне для корректного выполнения алгоритма программы. Другое важное уточнение состоит в том, что необходим блок питания для самой схемы управления с постоянным номинальным напряжением в виду неоднородности питания силовой схемы. Ещё одним важным условием является чувствительность микроконтроллера к различным помехам,

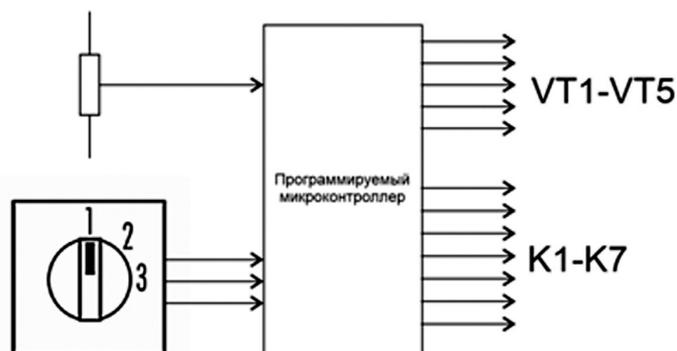


Рис. 5. Блок-схема системы управления преобразователем.

потому необходимо учесть такой фактор в работе устройства.

ВЫВОДЫ

Представленный в данной статье преобразователь на основе широтно-импульсного модулятора позволяет реализовать универсальное решение для выполнения трёх функций:

- преобразование постоянного напряжения 12 В от аккумуляторной батареи в переменное, необходимое для автономной работы устройств, питающихся от однофазной распределительной сети ~ 220 В.

- дуговая электросварка – преобразование переменного напряжения в постоянное с другими выходными характеристиками.

- преобразование переменного напряжения 220 В в постоянное 12 В.

Алгоритм работы широтно-импульсного модулятора реализовать при помощи программируемого микроконтроллера, используя известные языки программирования. Для переключения режимов предусмотрен переключатель, который подключен к микроконтроллеру. Программируемый микроконтроллер выполняет алгоритм, соответствующий выбранному режиму работы, и управляет затворами транзисторов.

Технико-экономический эффект достигается в использовании одного трансформатора в различных преобразовательных режимах и устранение необходимости внесения структурных изменений в схему преобразовательного устройства со стороны пользователя. Подобные решения берутся за основополагающие при проектировании универ-

сального преобразователя для автомобилиста.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Патент № 2249907 С2 Российская Федерация, МПК Н02М 7/10. Способ перекомпоновки универсального преобразователя : № 2003116532/09 : заявл. 03.06.2003 : опубл. 10.04.2005 / М. А. Боровиков, А. Ф. Кузьмин, П. В. Кудряшов, С. Н. Сидоров ; заявитель Ульяновский государственный технический университет.

Сидоров, С. Н. Универсальный преобразователь автомобилиста / С. Н. Сидоров, Я. К. Старостина // Вопросы теории и проектирования электрических машин. Параметры и характеристики электрических машин в статических и динамических режимах: сборник научных трудов / Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2013. – С. 206-217.

Бродин В.В., Калинин А.В. Системы на микроконтроллерах и БИС программируемой логики -М.: Издательство ЭКОМ, 2002.-400с..

Старостина Ярослава Константиновна

Родилась в 1990 году. Место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет». Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета.

Сафонов Захар Юрьевич

Родился в 2003 году. Студент группы ЭАбд-41 Энергетического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»

Пакцаев Ярослав Андреевич

Родился в 1996 году. Студент группы ЭАбд-41 Энергетического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»

Starostina Ya.K

Born in 1990. Place of work: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Technical University". Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Faculty of Energy

Safonov Z.Yu.

Born in 2003. Student of group EAbd-41 of the Energy Faculty of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Technical University"

Pakshaev Ya.A

Born in 1996. Student of group EAbd-41 of the Energy Faculty of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Technical University"

Исследование электротехнического комплекса конвейера с двумя проводными барабанами

// STUDY OF THE ELECTRICAL COMPLEX OF A CONVEYOR WITH TWO WIRE DRUMS //

Доманов В.И., к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г.Ульяновск

Доманов А.В., к.т.н., ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г.Ульяновск

Билалова А.И., к.т.н., доцент ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г.Ульяновск

Рассматривается система электроприводов конвейерного транспортера. Составлены функциональная и структурная схемы. Проведен анализ работы одно- и двухбарабанных электроприводов. Получены структурные схемы механической части транспортера. Составлены математическое описание, структура и модель упругого звена с учетом сил трения. Составлена математическая модель электротехнического комплекса. Проведена идентификация основных переменных координат транспортера.

Ключевые слова: конвейер, упругость, модель, идентификация, распределенные параметры, демпфирование, приводной барабан.

The article considers the system of electric drives of a conveyor. Functional and structural diagrams are compiled. The analysis of the operation of single and double-drum electric drives is carried out. Structural diagrams of the mechanical part of the conveyor are obtained. A mathematical description, structure and model of an elastic link are compiled taking into account friction forces. A mathematical model of the electrical complex is compiled. The main variables of the conveyor coordinates are identified.

Keywords: conveyor, elasticity, model, identification, distributed parameters, damping, drive drum.

Существует большое количество вариантов построений электротехнических комплексов конвейеров (ЭКК) в случае, когда два электропривода связаны через упругое звено (транспортную ленту) [1-5]. В таких системах широко применяются асинхронные двигатели с фазным ротором (АДФР), что позволяет выравнять нагрузки между электроприводами. Применение схемы с поворотным статором [6] даёт возможность управления величиной упругого момента. Однако, в современных схемах такие технические решения применяются редко по следующим причинам:

- конструкция поворотного статора требует дополнительных механических узлов и существенно усложняет схему управления;
- сложность изготовления АДФР и его более низкая надежность по сравнению с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором (АДКЗ).

Внедрение частотных преобразователей, оснащенных вычислителями координат, позволяет эффективно применять АДКЗ в ЭКК. Для построения системы управления в этом случае необходимо иметь достаточно подробное описание объекта – конвейера. Так же требуется идентификация переменных координат, не подлежащих прямому измерению.

Механическая часть конвейера является системой с распределенными массами и упругостью в рабочем органе. В публикациях [7,8] рассматриваются различные варианты представления подобных систем. Подробное описание приводит к появлению в структуре гиперболических функций, что существенно усложняет анализ и синтез системы в таком варианте. В [9] отмечается, что изучение системы удобнее проводить если представить конвейерную ленту в виде сосредоточенных масс. Основные собственные частоты колебаний соответствуют системе с распределенными массами. В то же время, если с помощью регулируемого электропривода будет обеспечен апериодический процесс в упругом звене (ленте), систему можно представить в виде, удобном для анализа и синтеза.

Для однодвигательного (однобарабанного) электропривода механическая часть описывается системой уравнений [10].

Для однодвигательного (однобарабанного) электропривода механическая часть описывается системой уравнений [10].

$$\left. \begin{aligned} J_1 p \omega_1 &= M - M_{y1} + M_{y2} - K_1 \omega_1 \\ J_2 p \omega_2 &= M_{y1} - M_{y2} - M_C - K_2 \omega_2 \\ p M_{y1} &= C_1 (\omega_1 - \omega_2) \\ p M_{y2} &= C_2 (\omega_2 - \omega_1) \\ M_{y1p} &= M_{y1} - M_{y2} \end{aligned} \right\} (1)$$

где J_1 – суммарный приведённый момент приводного барабана; J_2 – момент инерции механической части конвейера с грузом; ω_1 – угловая скорость двигателя; ω_2 – приведённая угловая скорость ленты; M – момент двигателя; M_C – момент сопро-

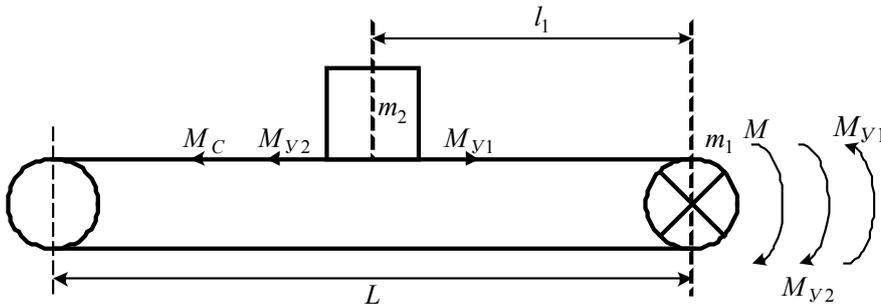


Рис.1. Расчётная схема для l_1 и l_2 .

тивления; M_{y1} – момент упругих сил на набегающей ветви; M_{y2} – момент упругих сил на сбегающей ветви; C_1 – коэффициент жёсткости между первыми и вторыми массами; C_2 – коэффициент жёсткости между вторыми первыми массами; M_{ynp} – момент упругой нагрузки.

$$C_1 = \frac{E_L}{l_1} \rho^2; C_2 = \frac{E_L}{l_2} \rho^2 \quad (2)$$

где E_L – модуль упругости; ρ – радиус приведения; l_1 и l_2 зависят от расположения центра масс груза на ленте (рис.1)

l_1 – расстояние между m_1 и m_2 .

$$l_2 = 2L - l_1$$

В соответствии с рис.1 можно составить структурную схему.

Систему (1) можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \omega_1(J_1p + K_1) &= M - M_{ynp} \\ \omega_2(J_2p + K_2) &= -M_c + M_{ynp} \\ M_{ynp} &= M_{y1} - M_{y2} = \frac{C_1}{p}(\omega_1 - \omega_2) - \frac{C_2}{p}(\omega_2 - \omega_1) = \frac{K_C}{p}(\omega_1 - \omega_2) \end{aligned} \right\} (1.1)$$

где $K_C = C_1 + C_2$

Дальнейшие подстановки позволяют получить выражение

$$M_{ynp} = \frac{K_C}{p} \left[\frac{M - M_{ynp}}{J_1p + K_1} - \frac{-M_c + M_{ynp}}{J_2p + K_1} \right]$$

$$M_{ynp} \left[1 + \frac{K_C}{p} \left(\frac{1}{J_1p + K_1} + \frac{1}{J_2p + K_1} \right) \right] =$$

$$= \frac{K_C}{p} \left(\frac{M}{J_1p + K_1} + \frac{M_c}{J_2p + K_2} \right)$$

В итоге получаем передаточную функцию для M_{ynp} в однобарабанной схеме

$$M_{ynp} = \frac{K_C(J_2p + K_2)M}{p(J_1p + K_1)(J_2p + K_2) + K_C} + \frac{K_C(J_1p + K_1)M_c}{p(J_1p + K_1)(J_2p + K_2) + K_C} \quad (3)$$

На основе выражения (3) можно сделать вывод, что в статике значение M_{ynp} в однобарабанной схеме прямо пропорционально суммарному значению момента двигателя M и момента сопротивления M_c .

Рассмотрим механическую часть двухдвигательного (двухбарабанного) электропривода транспортёра.

Принимаются допущения аналогичные предыдущей схеме. В этом случае динамика механической части конвейера может быть представлена системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} J_1p\omega_1 &= M_1 - M_{y1} + M_{y2} - K_1\omega_1 \\ J_2p\omega_2 &= M_{y3} - M_{y2} - M_c - K_2\omega_2 \\ J_3p\omega_3 &= M_3 + M_{y1} - M_{y3} - K_3\omega_3 \\ pM_{y1} &= C_1(\omega_1 - \omega_2) \\ pM_{y2} &= C_2(\omega_2 - \omega_3) \\ pM_{y3} &= C_3(\omega_3 - \omega_1) \end{aligned} \right\} (4)$$

Для этого случая

$$C_1 = \frac{E_L}{l_1} \rho^2; C_2 = \frac{E_L}{l_2} \rho^2; C_3 = \frac{E_L}{L} \rho^2.$$

В соответствии с системой уравнений (4) составлена структурная схема механической части двухдвигательного электропривода транспортёра (рис.3).

Систему (4) можно преобразовать к виду

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= W_1(p)[M_1 + M_{y1} + M_{y2}] \\ \omega_2 &= W_2(p)[-M_c + M_{ynp}] \\ \omega_3 &= W_3(p)[M_3 - M_{y3} + M_{y1}] \\ M_{y1} &= \frac{C_1}{p}(\omega_1 - \omega_2) \\ M_{y2} &= \frac{C_2}{p}(\omega_2 - \omega_3) \\ M_{y3} &= \frac{C_3}{p}(\omega_3 - \omega_1) \\ M_{ynp} &= M_{y3} - M_{y2} \end{aligned} \right\} (5)$$

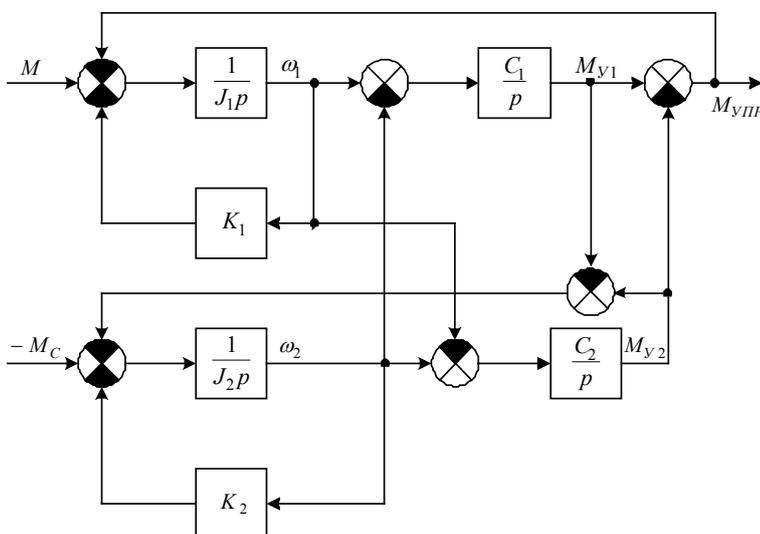


Рис.2. Структурная схема механической части привода однобарабанного конвейера.

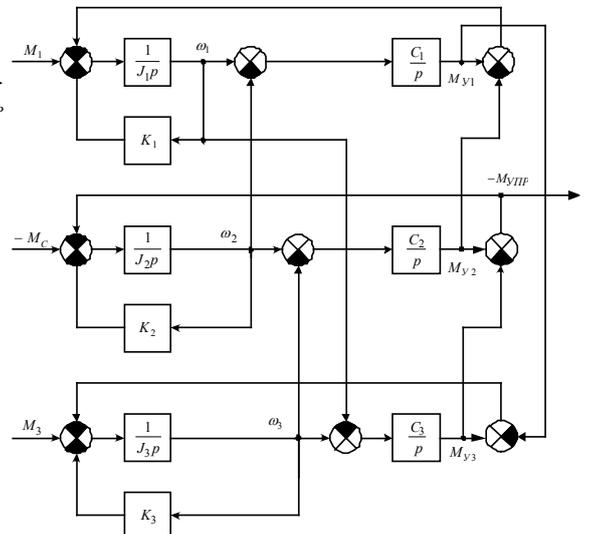


Рис.3. Структурная схема механической части двухдвигательного транспортёра.

Подстановка в седьмое уравнение формулы (5) и (6) позволяет получить

$$M_{\text{упр}} = -\frac{C_3}{p}\omega_1 - \frac{C_2}{p}\omega_2 + \frac{C_2 + C_3}{p}\omega_3 = \\ = \frac{C_3 W_1(p)}{p} [M_1 - M_{y1} + M_{y2}] - \\ - \frac{C_2 W_2(p)}{p} [-M_c + M_{\text{упр}}] + \\ + \frac{(C_2 + C_3) W_3(p)}{p} [M_3 - M_{y3} + M_{y1}]$$

Если не учитывать разнонаправленные составляющие (M_{y1} , M_{y2} , M_{y3}), можно получить приближенное значение передаточной функции для $M_{\text{упр}}$:

$$M_{\text{упр}} \approx \frac{-C_1 W_1(p)}{p + C_2 W_2(p)} M_1 + \frac{C_2 W_2(p)}{p + C_2 W_2(p)} M_c + \\ + \frac{(C_2 + C_3) W_3(p)}{p + C_2 W_2(p)} M_3$$

где $W_1(p) = \frac{1}{J_1 p + K_1}$; $W_2(p) = \frac{1}{J_2 p + K_2}$;
 $W_3(p) = \frac{1}{J_3 p + K_3}$.

В отличие от однобарабанной схемы, значение $M_{\text{упр}}$ в статике в двухбарабанной схеме будет зависеть от местоположения груза (значения C_1 и C_2). Значения составляющих слагаемых в передаточной функции $M_{\text{упр}}$ являются переменными функциями от веса груза и его местоположения.

Идентифицируем основные переменные координаты для дальнейшего расчета системы уравнения. Считаем, что доступны для контроля ω_1 и ω_3 , также известны параметры кинематики по которым находим $W_1(p)$, $W_3(p)$ и C_3 . Известны вычислители [11], позволяющие определить моменты M_1 и M_3 из системы уравнений (4) можно по доступным координатам определить по формуле M_{y3}

$$M_{y3} = \frac{C_3(\omega_3 - \omega_1)}{p}$$

Из третьего уравнения системы (4) в этом случае получаем

$$M_{y1} = \frac{\omega_3}{W_3(p)} - M_3 + M_{y3} = \\ = \frac{\omega_3}{W_3(p)} - M_3 + \frac{C_3(\omega_3 - \omega_1)}{p}$$

Из первого уравнения той же системы после подстановки получаем

$$M_{y2} = \frac{\omega_1}{W_1(p)} - M_1 + M_{y1} = \frac{\omega_1}{W_1(p)} - \\ - M_1 + \frac{\omega_3}{W_3(p)} - M_3 + \frac{C_3(\omega_3 - \omega_1)}{p}$$

Подстановка в седьмое уравнение системы позволяет определить основную координату $M_{\text{упр}}$

$$M_{\text{упр}} = M_{y3} - M_{y2} = \frac{C_3(\omega_3 - \omega_1)}{p} - \\ - \frac{\omega_1}{W_1(p)} + M_1 + \frac{\omega_3}{W_3(p)} + \\ + M_3 - \frac{C_3(\omega_3 - \omega_1)}{p} = \\ M_1 + M_3 - \frac{\omega_1}{W_1(p)} - \frac{\omega_3}{W_3(p)} \quad (6)$$

Если соблюдается условие $W_1(p) = W_3(p)$, то уравнение (6) принимает вид

$$M_1 + M_3 - \frac{\omega_1}{W_1(p)} - \frac{\omega_3}{W_3(p)}$$

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты:

- составлены системы уравнений, описывающие одно- и двухвальные кинематические цепи транспортеров;
- составлены структурные схемы для рассматриваемых кинематических цепей;
- определены передаточные функции для $M_{\text{упр}}$ в этих схемах;
- проведена идентификация основной переменной для двухвальной схемы.

Библиографический список:

1. Расудов Л.Н., Мядзель В.Н. Электроприводы с распределенными параметрами механических элементов. М: «Энергоатомиздат» – 1987-144с.
2. Рывкин С. Е. Синтез цифрового управления электроприводом с упругими механическими передачами / С. Е. Рывкин, Д. Б. Изосимов, С. В. Байда / Электричество.- 2004-№11-с. 46-55.
3. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы.– М.: Мир, 1971.–557 с.
4. Спиваковский А.О. Карьерный конвейерный транспорт / А.О. Спиваковский, М.Г. Потапов, А.М. Котов. – М.: НЕДРА, 1976. – 264 с.
5. Сухарев И.А. Управление конвейерными линиями на базе асинхронного электропривода в рамках АСУТИ : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. В.: ВГТУ- 2003-178 с.
6. Унгру Ф., Иордан Г. Системы согласованного вращения асинхрон-

ных электродвигателей. Л.: Энергия, 1971. –182 с.

7. Кантович Л.И. Машины и оборудование для горно-строительных работ / Л.И. Кантович, Г.Ш. Казанович, В.В. Волков, Э.Ю. Воронова, А.В. Отраков. – М.: Горная книга, 2013. – 447 с.

8. Киселев Н.В., Мядзель В.Н., Расудов А.Н. Электроприводы с распределенными параметрами.– Л.: Судостроение, 1985.– 220 с.

9. Теличко Л.Я., Тарасов А.С. Математическое моделирование распределенно – упругого элемента с двухдвигательным электроприводом //Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж, ВГТУ 2009,Том. 5 №3-с. 74-78.

10. Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Электроприводы. Т. IV – 2 / Л. Б. Масандилов, Ю. Н. Сергиевский, С.К. Козырев и др. Под. Ред. Л. Б. Масандилова, 2012.– 520 с.

11. Костомаров А.С. Датчики обратных связей для электропривода / А.С. Костомаров, М.В. Могучев, А.Я. Микитченко // Вестник ОГУ. – 2001 г. – №3 – с. 117-121.

Доманов Виктор Иванович

Родился в 1950 году. В 1972 году окончил Ульяновский политехнический институт по специальности «Авиаприборостроение». В 1980 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Методика расчета и исследование следящих систем с устройствами упреждающей коррекции для токарных станков с ЧПУ». Опыт работы – 52 года. В настоящее время является заведующим кафедрой «Электропривод и АПУ» ФГБОУ ВО УлГТУ. Доцент. Имеет научные труды.

Доманов Андрей Викторович

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил Ульяновский государственный технический университет по специальности «Приборостроение». В 2003 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка и исследование электроусилителя рулевого управления легковых автомобилей на основе бесконтактных двигателей». Опыт работы – 14 лет. В

настоящее время является директором Центра трансфера технологий, заместитель директора Передовой инженерной школы «ФармИнжиниринг» ФГБОУ ВО УлГУ. Доцент. Имеет научные труды, а так же благодарственное письмо губернатора Ульяновской области.

Билалова Алиса Ильдаровна

Родилась в 1991 году. В 2013 году окончила ФГБОУ ВО Ульяновский Государственный Технический Университет по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технических комплексов». В 2019 году защитила кандидатскую диссертацию по теме «Прогнозирование электропотребления электротехнический комплексом городской электрической сети». Опыт работы – 4 года. В настоящее время является доцентом кафедры «Электропривод и АПУ» ФГБОУ ВО УлГТУ. Имеет научные труды.

Domanov Viktor Ivanovich

Was born in 1950. In 1972 he graduated from the Ulyanovsk

Polytechnic Institute with a degree in Aircraft Instrumentation. In 1980, he defended his Ph.D. thesis on the topic "Calculation methods and research of servo systems with predictive correction devices for CNC lathes." Work experience – 52 years. Currently he is the head of the department of "Electric drive and automated control systems" of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Technical University. Associate Professor Has scientific works.

Domanov Andrey Viktorovich

Was born in 1976. In 1999 he graduated from Ulyanovsk State Technical University with a degree in «Instrument Engineering». In 2003, he defended his PhD thesis on the topic "Development and research of electric power steering for passenger cars based on contactless motors." Work experience – 14 years. Currently he is the director of the Technology Transfer Center, deputy director of the Advanced Engineering School "PharmEngineering" of the

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State University. Associate Professor He has scientific works, as well as a letter of gratitude from the governor of the Ulyanovsk region

Bilalova Alisa Ildarovna

Was born in 1991. In 2013, she graduated from the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Technical University with a degree in Electric Drive and Automation of Industrial Installations and Technical Complexes. In 2019, she defended her PhD thesis on the topic "Forecasting power consumption by the electrical complex of the city electrical network." Work experience – 4 years. Currently, he is an associate professor in the department of "Electric drive and automatic control systems" of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Technical University. Has scientific works.

Особенности эксплуатации автомобильных аккумуляторов

// FEATURES OF THE OPERATION OF CAR BATTERIES //

**Чебоксаров А.Н., к.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный
автомобильно-дорожный
университет»
г. Омск**

В статье рассматриваются особенности эксплуатации автомобильных аккумуляторов в различных климатических и эксплуатационных условиях. Обсуждается влияние экстремальных температур, вибраций и длительного простоя на состояние аккумуляторных батарей, а также важность поддер-

жания оптимальных параметров заряда для продления их срока службы. Приведены графики зависимости напряжения и плотности электролита от времени хранения, которые иллюстрируют процесс саморазряда аккумуляторов.

Ключевые слова: автомобиль, аккумулятор, саморазряд, плотность электролита, напряжение аккумуляторной батареи, климатические условия, подзарядка.

The article discusses the features of the operation of car batteries in various climatic and operational conditions. The influence of extreme temperatures, vibrations and prolonged downtime on the condition of batteries is discussed, as well as the importance of maintaining optimal charge parameters to extend their service life. Graphs of the dependence of the voltage and density of the electrolyte on the storage time are shown, which illustrate the process of self-discharge of batteries.

Keywords: car, battery, self-discharge, electrolyte density, battery voltage, climatic conditions, recharging.

Введение

Автомобильные аккумуляторы – один из ключевых компонентов современных транспортных средств. Они не только обеспечивают запуск двигателя, но и питают многочисленные электронные системы машины. Однако в процессе эксплуатации аккумуляторы подвергаются значительным нагрузкам: экстремальные температуры, сильные вибрации, длительное время работы в режиме ожидания – всё это может существенно влиять на их производительность и срок службы. Важно понимать, что неправильный уход за батареей, а также игнорирование особенностей её эксплуатации в разных климатических условиях может привести к её преждевременному выходу из строя. Для продления ресурса аккумуляторов и поддержания их эффективности требуется соблюдение определённых правил эксплуатации и регулярное техническое обслуживание.

Автомобильные аккумуляторы эксплуатируются в сложных условиях, включая высокие пусковые токи, питание электроники во время сто-

янки, зарядку от генератора, а также воздействие различных температур, вибраций и тряски. Поскольку напряжение генератора зависит от оборотов двигателя, для поддержания постоянного напряжения используется регулятор напряжения [1, 2]. Значения напряжений регулятора в зависимости от климатических условий представлены в таблице 1.

В условиях холодного климата напряжение заряда должно быть

выше, чтобы компенсировать влияние низких температур. Например, для холодного климатического района зимой при установке батареи снаружи, рекомендуемое напряжение находится в диапазоне 14,5–15,5 В для 12-вольтовых батарей, а летом оно снижается до 13,8–14,8 В. В условиях же умеренного климата зимой напряжение заряда для 12-вольтовых батарей должно находиться в диапазоне 13,8–14,8 В, а летом снижаться до 13,2–14,2 В [3, 4].

Табл. 1. Значения напряжений регулятора в зависимости от климатических условий

Климатический район	Средне-месячная температура в январе, °С	Время года	Номинальное напряжение, В	Напряжение регулятора, В, при установке батареи	
				снаружи	под капотом
Холодный	-50...-15	Зима	12	14,5...15,5	14,2...15,2
			24	29...31	–
		Лето	12	13,8...14,8	13,2...14,2
			24	27...29	–
Умеренный	-15...-4	Зима	12	13,8...14,8	13,2-14,2
			24	27...29	–
		Лето	12	13,2...14,2	13...14
			24	26...28	–

Особые условия эксплуатации автомобильных батарей требуют соблюдения особых правил обслуживания, которые необходимо выполнять не реже одного раза в две недели. Следует очищать клеммы и выводы, а затем смазывать их техническим вазелином. Важно следить за состоянием вентиляционных отверстий в пробках и крышках, чтобы они не были заблокированы. Наконец, нужно контролировать уровень электролита в обслуживаемых батареях и при необходимости под-

ливать дистиллированную воду, доводя его до нормы, при этом использование электролита для доливки недопустимо [5, 6].

Батарея, не используемая продолжительное время (около 4-5 месяцев), нуждается в подзарядке из-за естественного процесса саморазряда. Однако подзарядка может потребоваться и батарее, находящейся в эксплуатации, в зависимости от условий её использования. Полностью заряженная батарея должна иметь плотность электролита в пределах

1,27-1,28 г/см³ и напряжение около 12,5 В.

На графиках, представленных на рисунках 1 и 2, показаны параметры, характеризующие саморазряд для различных типов батарей. Первый график иллюстрирует снижение напряжения в зависимости от времени хранения, а второй демонстрирует падение плотности электролита.

Анализ зависимостей напряжения и плотности электролита аккумуляторной батареи от срока её хранения показывает постепенное ухудшение характеристик. На графике видно, что в первые два месяца хранения напряжение батареи остаётся практически стабильным на уровне 12,7-12,8 В, однако начиная с третьего месяца начинается его плавное снижение, достигая 12,0 В к концу года. Аналогичную тенденцию отражает второй график, где плотность электролита также остаётся высокой на начальном этапе, но постепенно уменьшается, достигая 1,20 г/см³ через 12 месяцев хранения.

Сопоставление двух графиков показывает, что оба параметра – напряжение и плотность электролита – снижаются параллельно, что указывает на неизбежную потерю ёмкости аккумулятора в процессе длительного хранения. Эти данные подчёркивают важность регулярной подзарядки батарей для поддержания их работоспособности и предотвращения критического снижения характеристик.

Для оценки степени заряда аккумуляторных батарей можно использовать два основных метода. Первый метод основывается на измерении плотности электролита, который подходит только для обслуживаемых батарей. Измеряя плотность электролита, можно определить, насколько батарея заряжена. Второй метод заключается в измерении напряжения на батарее. Оценка ёмкости таким способом позволяет определить уровень заряда по величине напряжения, что также является надёжным методом для контроля состояния аккумулятора. Далее рассмотрим графики, которые наглядно показывают изменения этих параметров в зависимости от уровня заряда (рисунок 3, 4).

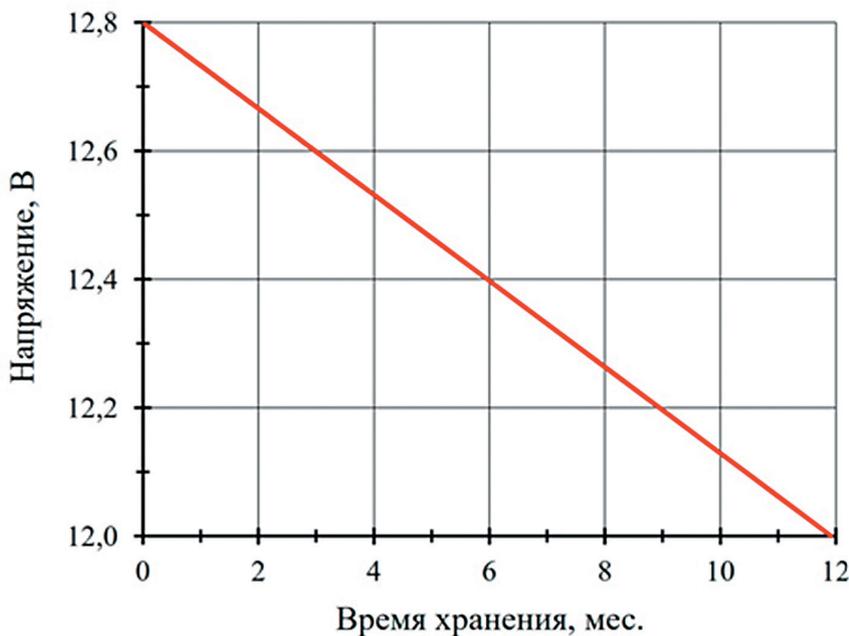


Рис. 1. График зависимости напряжения аккумуляторной батареи от времени её хранения

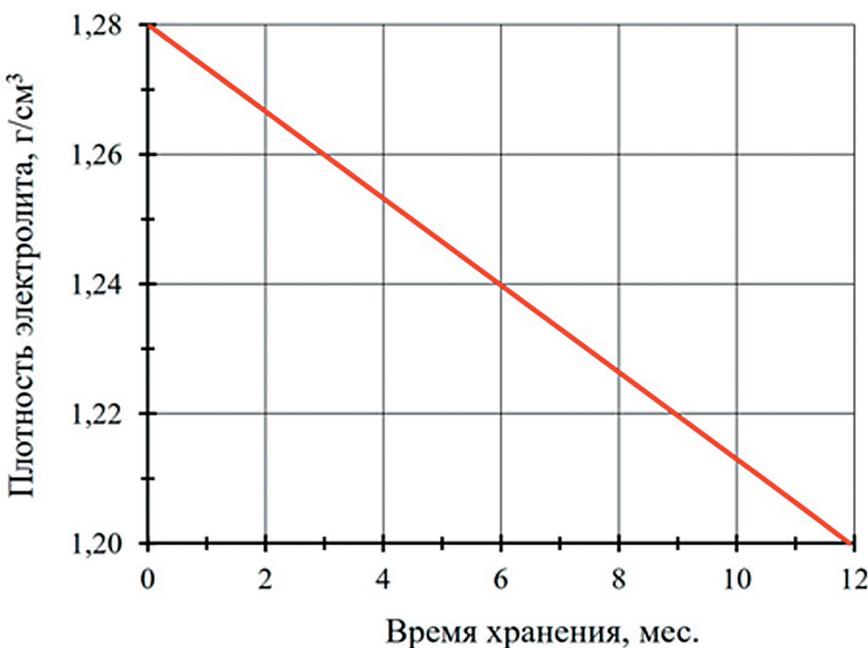


Рис. 2. График зависимости плотности электролита аккумуляторной батареи от времени её хранения

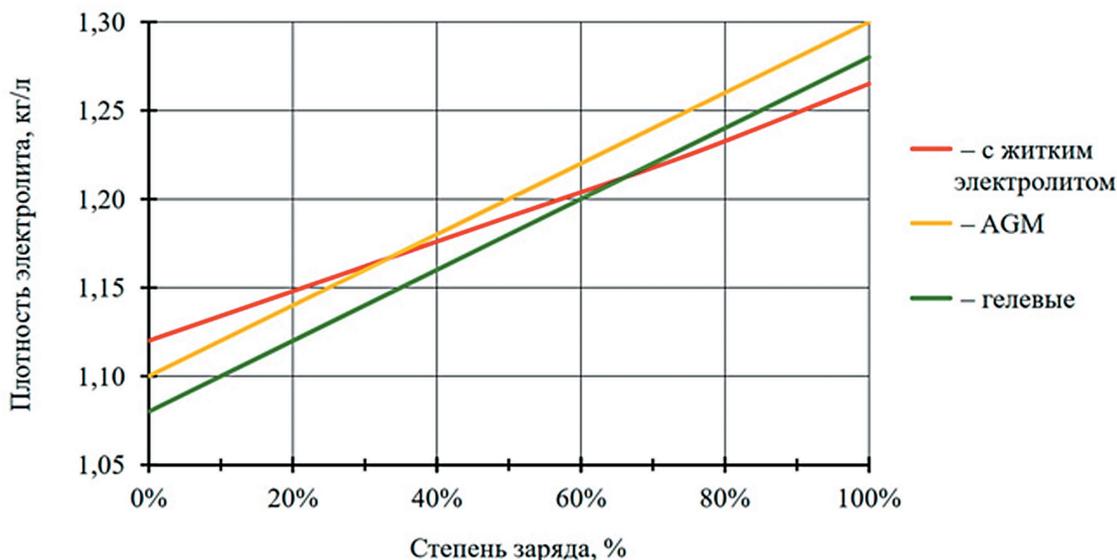


Рис. 3. График зависимости плотности электролита от степени заряда АКБ

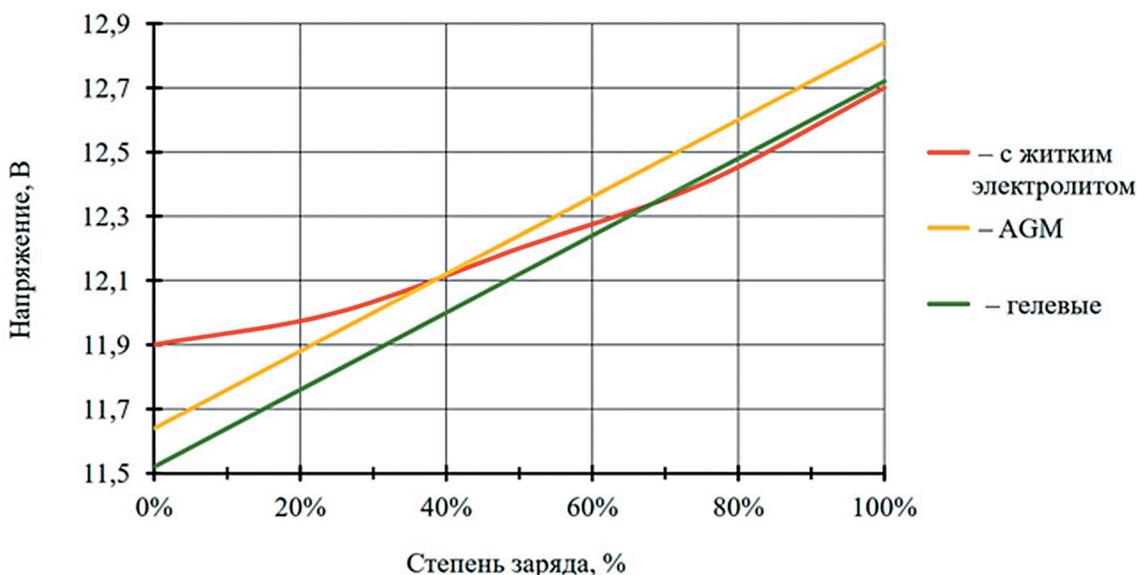


Рис. 4. График зависимости напряжения от степени заряда АКБ

Анализ данных показывает, что у аккумуляторов с жидким электролитом плотность электролита снижается с 1,265 кг/л при полном заряде до 1,120 кг/л при нуле, в то время как AGM и гелевые аккумуляторы демонстрируют более высокую начальную плотность – 1,3 и 1,28 кг/л соответственно. Падение плотности электролита происходит примерно одинаково для всех типов батарей, что указывает на сходные процессы разряда, но AGM сохраняют немного более высокие показатели на каждом уровне.

При сравнении напряжений видно, что AGM аккумуляторы обладают самым высоким напряжением на всех уровнях заряда, начиная с 12,84 В при полной ёмкости. Гелевые аккумуля-

торы имеют слегка ниже показатели напряжения, хотя их характеристики схожи с аккумуляторами с жидким электролитом. Напряжение у всех типов батарей постепенно снижается по мере разряда, но AGM остаются немного более стабильными. Это говорит о том, что AGM аккумуляторы могут быть более энергоэффективными и сохранять больше заряда при тех же условиях эксплуатации.

Заключение

Автомобильные аккумуляторы являются важной частью транспортных средств, но их долговечность и эффективность напрямую зависят от условий эксплуатации. Как показано в статье, экстремальные температуры, вибрации и длительное

хранение без подзарядки негативно влияют на ключевые параметры аккумуляторов, такие как напряжение и плотность электролита. Графики демонстрируют, что со временем эти параметры снижаются, указывая на необходимость регулярного ухода за батареями. Важно своевременно контролировать уровень заряда и плотность электролита, особенно в обслуживаемых батареях. Для сохранения работоспособности аккумуляторов рекомендуется соблюдать правила эксплуатации, подзаряжать батареи при длительном простое и проводить профилактические осмотры. Эти меры позволяют продлить срок службы аккумуляторов, сохраняя их характеристики на оптимальном уровне.

Библиографический список

1. Хрусталеv Д.А. Аккумуляторы / Д.А. Хрусталеv. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.
2. Курзуков Н.И. Аккумуляторные батареи. Краткий справочник / Н.И. Курзуков, В.М. Ягнятинский. – М.: ООО «Книжное издательство «ЗА рулем» 2006. – 88 с.
3. Семенов Н.В. Эксплуатация автомобилей в условиях низких температур / Н.В. Семенов. – М.: Транспорт, 1993. – 190 с.
4. Крамаренко Г.В. Безгаражное хранение автомобилей при низких температурах / Г.В. Крамаренко, В.Д. Николаев, А.И. Шаталов. – М.: Транспорт, 1984. – 136 с.
5. Оспанбеков Б.К. Оптимизация ресурсопределяющих эксплуатационных режимов тяговых аккумуляторных батарей электромобилей : дис... канд. техн. наук: 05.09.03 / Б.К. Оспанбеков. – Москва, 2017. – 170 с.

6. Шаманов Р.С. Проблемы эксплуатации и обслуживания авто-тракторных аккумуляторных батарей / Р.С. Шаманов, А.В. Лахно, Е.В. Новиков // Наука без границ. – М. 2020. № 4 (44). С. 61-67.

Чебоксаров Алексей Николаевич

Родился в 1985 году. В 2007 году окончил Сибирскую государственную автомобильно-дорожную академию (СибАДИ) по специальности «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (строительные, дорожные и коммунальные машины)». В 2011-м году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Совершенствование технических средств диагностирования двигателей силовых установок и гидроагрегатов дорожно-строительных машин». В настоящее время работает доцентом кафедры «Автомобильный транспорт» ФГБОУ ВО «Сибирского государственного

автомобильно-дорожного университета». Опыт работы – 14 лет. Имеет 4 патента, 48 научно-технические статьи.

Cheboksarov Alexey Nikolaevich

Born in 1985. In 2007, he graduated from the Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI) with a degree in "Service of transport and technological machines and equipment (construction, road and municipal machines)." In 2011, he defended his PhD thesis on the topic "Improving technical means for diagnosing engines of power plants and hydraulic units of road-building machines." Currently he works as an associate professor at the Department of Automotive Transport of the Siberian State Automobile and Highway University. Work experience – 14 years. He has 4 patents, 48 scientific and technical articles.

Синтез вычислителей координат асинхронного двигателя при двухканальном управлении

// SYNTHESIS OF ASYNCHRONOUS MOTOR COORDINATE CALCULATORS WITH TWO-CHANNEL CONTROL //

Доманов В.И., к.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО «Ульяновский
государственный технический
университет»,
г.Ульяновск

Мурзаков Д.Г., к.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО «Ульяновский
государственный технический
университет»,
г.Ульяновск

В работе проведен синтез вычислителей координат момента

и скорости для двухканального управления асинхронного двигателя с фазным ротором. Приведены результаты экспериментов и определены формулы вычислений требуемых координат. Найдена погрешность вычислителей координат. Выполнен синтез схемы измерителей скорости.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, вычислитель, двухканальное управление, погрешность, статор, ротор, скорость, момент.

In this work, the synthesis of moment and rotation speed coordinate calculators for two-channel control of anwound rotor induction motor is carried out. Experimental results are presented and formulas for calculating the required coordinates are determined. The error of the coordinate calculators was found. The synthesis of the circuit of speed meters has been performed.

Keywords: induction motor, coordinate calculator, two-channel control, error, stator, rotor, speed, torque.

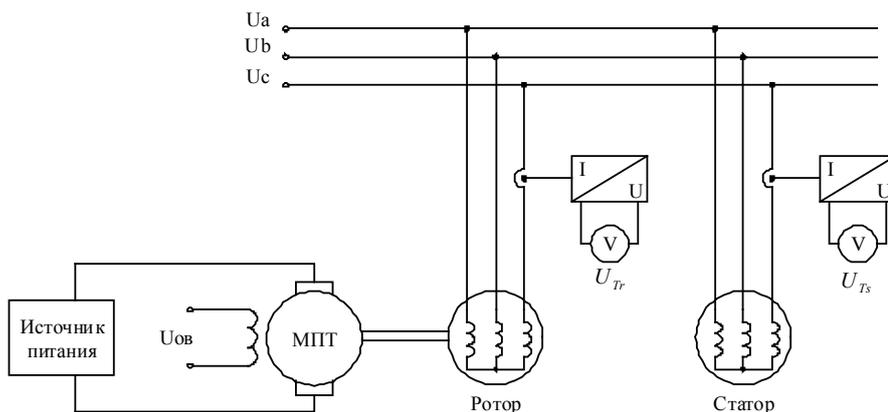


Рис. 1 – Схема для определения M_s и M_R

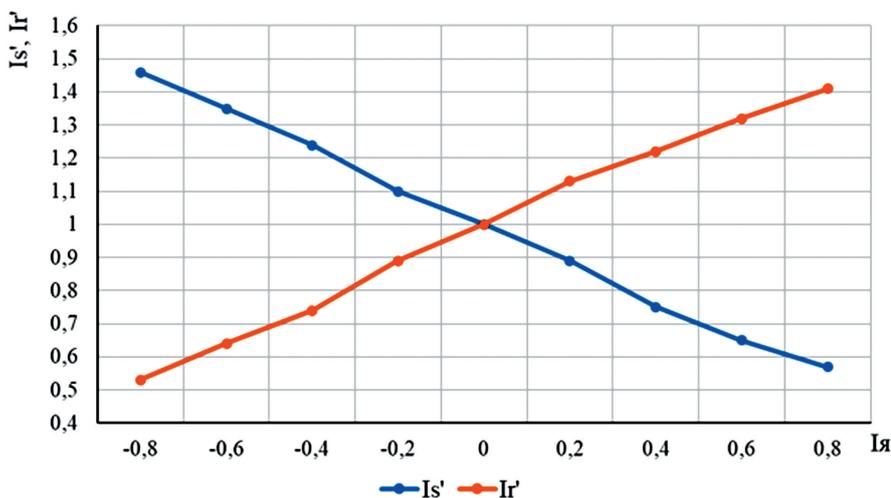


Рис.2 – Характеристика измерителя момента АДФР

В литературе [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10, 11] рассматривается возможность двухканального управления асинхронным двигателем с фазным ротором (АДФР). Это управление позволяет реализовать режим удержания, что представляет интерес грузоподъемном электрооборудовании и других отраслях промышленности. При этом система управления таким электроприводом имеет ряд особенностей, что приводит к необходимости создания вычислителей координат для ее реализации.

Синтез измерителя электромагнитного момента

В работах [1, 2] отмечается что при постоянстве потокосцепления ротора (статора) момент пропорционален току статора (ротора). Для исследования возможности формирования сигналов и была собрана следующая схема (рис. 1).

В режиме удержания нагрузочный момент создавался с помощью ДПТ. Выполнялось измерение напряжения с датчика тока статора U_{Ts} и ротора U_{Tr} пропорциональное выпрямленному току.

В таблице 1 приведены экспериментальные данные зависимости токов статора и ротора от направления и величины нагрузки (тока якоря нагрузочной машины).

На основании данных таблицы 3 получена формула расчета скорости вращения двигателя

$$n_{расч} = n_0 - K_1 I_R - K_2 U_R \quad (3)$$

где n_0 – синхронная скорость вращения, $K_1 = \frac{\Delta n}{\Delta I_R} I_R$ – выпрямленный ток ротора, $K_2 = \frac{(n_0 - n_{изм} - K_1 I_R)}{U_R}$, U_R – выпрямленное напряжение ротора.

По данным таблицы 3 вычислены значения $K_1 = 250$ и $K_2 = 4,03$. Формула расчета скорости вращения двигателя примет вид

$$n_{расч} = 1500 - 250 I_R - 4.03 U_R \quad (4)$$

где $\Delta n = |n_{изм} - n_{расч}|$.

Анализ значений Δn и $\frac{\Delta n}{n_{расч}}\%$ показывает что при низких значениях $R_r (R_r < 10r_r)$ относительная погрешность не превышает 1,5%. При больших значениях R_r погрешность возрастает до 3,5%. С учетом выражения (3) можно реализовать измеритель скорости по схеме рис. 5.

где $U_{смс}$, $U_{смR}$ – напряжение смещения необходимое для установки нуля при нулевой скорости.

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- разработаны вычислители момента и скорости АДФР при двухканальном управлении;
- определены погрешности вычислителей, которые не превышают 3,5%;
- выполнен синтез схемы измерения скорости.

Литература

1. Елисеев В.А., Шинянский А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
2. Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Электроприводы. Т. IV – 2 / Л.Б. Масандилов, Ю.Н. Сергиевский, С.К. Козырев и др. Под. Ред. Л.Б. Масандилова, 2012. – 520 с.
3. Довганюк И.Я., Лабунец И.А., Плотникова Т.В., Шейко П.А. Новые возможности регулируемого электропривода «двойного питания» // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2003. № 1. С. 21-26.
4. Крюков О.В. Электроприводы на основе машин двойного питания и асинхронного вентильного каскада с преобразователями в цепях статора и ротора. / О.В. Крюков, В.Н. Мещеряков, И.В. Гуляев. – Саранск: Изд-во Мордов. Ун-та, 2020. – 152 с.
5. Ляпин А.С. Модельное исследование машины двойного питания с токовым управлением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. № 4. С. 731-737.
6. Мазалов А.А. Адаптивная ветроустановка с машиной переменного тока двойного питания // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 1. С. 26-33.
7. Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Наблюдатель потокосцепления для машины двойного питания, управляемой по статорной и роторной цепям // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6. – № 11. – С. 170–173.
8. Исследование работы асинхронного двигателя по упрощенной схеме двойного питания. Доманов В.И., Доманов А.В., Мурзаков

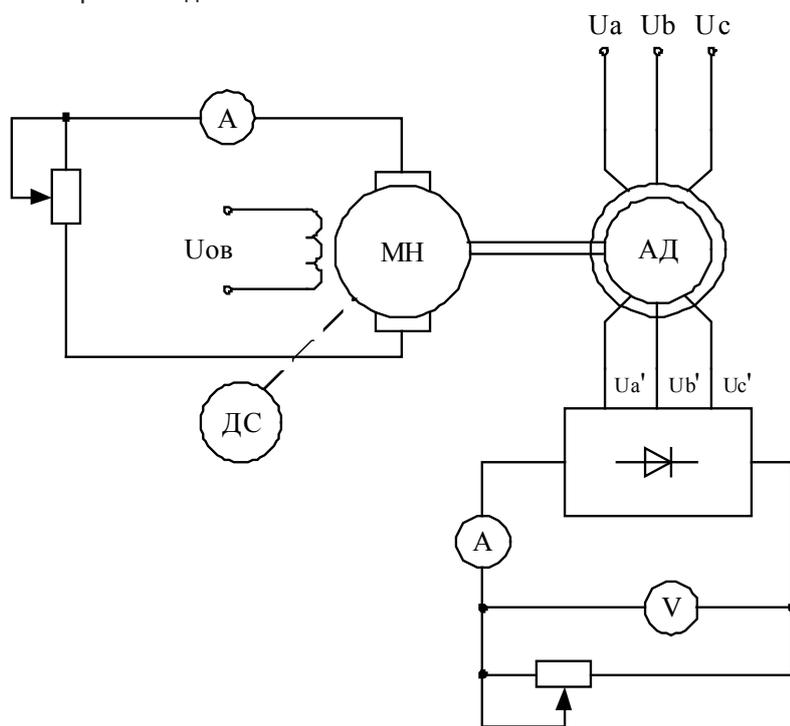


Рис.4 – Схема испытаний для определения

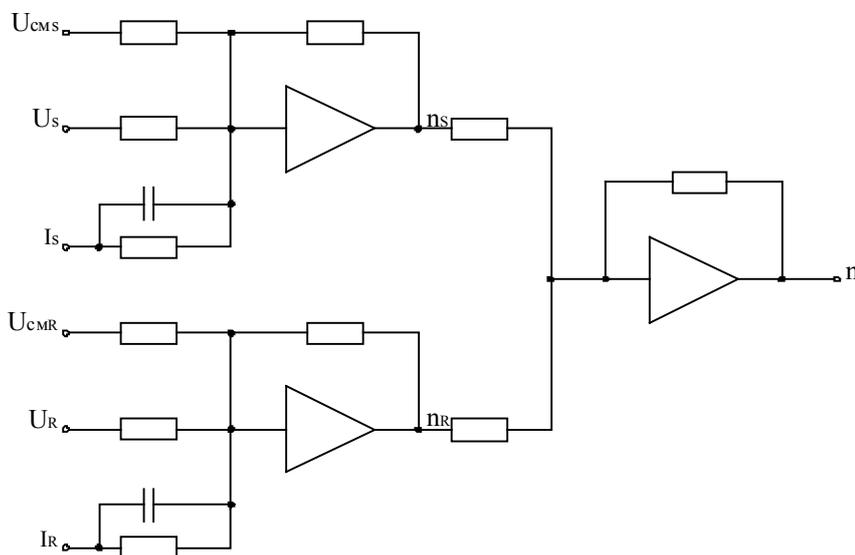


Рис.5 – Схема измерителя скорости АДФР

Д.Г. // Периодический научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» («ЭЭТ»). 2018. №2. С. 35-37.

9. Математическая модель асинхронного двигателя с фазным ротором в системе координат d-q. Доманов В.И., Мурзаков Д.Г., Халиуллов Д.С. // Вопросы электротехнологии. 2021. №3.

10. Онищенко Г.Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г.Б. Онищенко, И.Л. Локтева. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.

11. Jang Shun – Chang Methods electromagnets projected of the electrical double – supply machines Jhongauodianji gong Hong хuebao: pwc. Chin. Juc. Ebc. Ng. – 2001. – S. 21.

Доманов Виктор Иванович

Родился в 1950 году. Окончил в 1972 году Ульяновский политехнический институт по специальности «Авиаприборостроение». В 1980 году защитил кандидатскую диссер-

тацию по теме «Методика расчета и исследования следящих систем с устройствами упреждающей коррекции для токарных станков с ЧПУ». Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет 154 печатных работ, автор 16 изобретений.

Мурзаков Дмитрий Геннадьевич

Родился в 1992 году. Окончил в 2014 году Ульяновский государственный технический университет по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и ТК». Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет более 15 печатных работ в области электротехники.

Domanov Viktor

Was born in 1950. In 1972 he graduated from Ulyanovsk

Polytechnic Institute specializing in «Aircraft instrumentation». In 1980 has protected Ph. D. thesis by the theme «The method of calculation and research tracking systems with pre-emptive corrective devices for lathes numerically controlled». Ph. D., docent, Head of Department «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Technical University. He has 154 scientific publications, author of 16 inventions.

MurzakovDmitrij

Wasbornin 1992. In 2014 he graduated from Ulyanovsk State Technical University specializing in «Electric drives and automation of industrial installations ». Ph. D., docentof Department «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Technical University. He has more than 15 scientific publicationsin the field of electrical engineering.

Аддитивные технологии в производстве электрических машин

//ADDITIVE TECHNOLOGIES IN ELECTRICAL MACHINE MANUFACTURING //

**Сафин А.Р., д.т.н., доцент,
Казанский государственный
энергетический университет,
г. Казань**

**Шакурова З.М., к.п.н., доцент,
Казанский государственный
энергетический университет,
г. Казань**

Аддитивная технология (АТ) в последние годы переживает бурное развитие. АТ признана ключевой технологией, обеспечивающей широкий спектр применения, который включает медицинскую, аэрокосмическую и автомобильную промышленность. Использование АТ открывает новые возможности для проектных решений, которые сложно или невозможно реализовать при использовании традиционных методов производства. Отсутствие или низкое количество отходов,

высокая гибкость отличительные характеристики современной АТ.

Цель обзорной статьи — представить обзор существующих примеров использования АТ при изготовлении электрических машин. В статье рассматриваются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, связанные с аддитивным производством компонентов электрических машин. К ним относятся активные части, такие как обмотки, электрическая изоляция, пакеты магнитных сердечников статора и ротора, постоянные магниты.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электрическая машина, ротор, статор, постоянные магниты.

Additive manufacturing (AM) has been rapidly developing in recent years. AM is recognized as a key technology providing a wide range of applications, including medical, aerospace and automotive industries. The use of AM opens up new opportunities for design solutions that are difficult or impossible to implement using traditional manufacturing methods. No or low waste, high flexibility are the distinctive characteristics of modern AM.

The purpose of this review article is to provide an overview of existing examples of AM use in the manufacture of electrical machines. The article discusses research and development work related to the additive manufacturing of electrical machine components. These include active parts such as windings, electrical insulation, stator and rotor magnetic core packs, permanent magnets.

Keywords: additive technologies, electric machine, rotor, stator, permanent magnets.

Введение

АТ успешно применяется в самых разных приложениях, о чем свидетельствует множество публикаций исследователей [1]-[63]. Возможность создания практически неограниченных трехмерных (3D) моделей, безотходное производство, быстрое прототипирование деталей и компонентов являются преимуществами АТ. Использование широкого спектра материалов: пластика, керамики, металлических сплавов и даже биоматериалов выводит АТ на передовые позиции современных технологий производства. Кроме того, возможность масштабирования производства от единичного прототипа до крупносерийного производства добавляется к списку преимуществ

использования АТ. Примером являются крупные аэрокосмические компании, которые объявили об использовании АТ для массового производства [1], [2].

Последние отчеты относительно АТ предполагают динамичный рост рынка, при этом глобальный рынок АТ оценивается в 9,3 млрд. долларов США [5], [6]. Это включает все секторы АТ, например, оборудование, материалы, программное обеспечение, производство деталей.

Прогнозы показывают, что глобальная стоимость рынка АТ к 2027 году составит 41,1 млрд. долларов США. Это указывает на потенциал АТ и способствует активному участию со стороны крупных промышленных корпораций.

В данной статье основное внимание уделяется электрическим машинам, в которых используются такие материалы, как пластмассы, керамика и металлические сплавы.

Ключевые электрические узлы электрических машин, изготовленные с использованием АТ, обсуждаются в последовательных разделах статьи. Примеры включают: обмотки, пакеты сердечников статора и ротора, постоянные магниты.

Аддитивные технологии

Термин АТ или менее точный синоним «3D-печать» довольно широк и охватывает широкий спектр технологий. Общим для всех них является то, что изготовленная деталь изготавливается путем наложения слоев

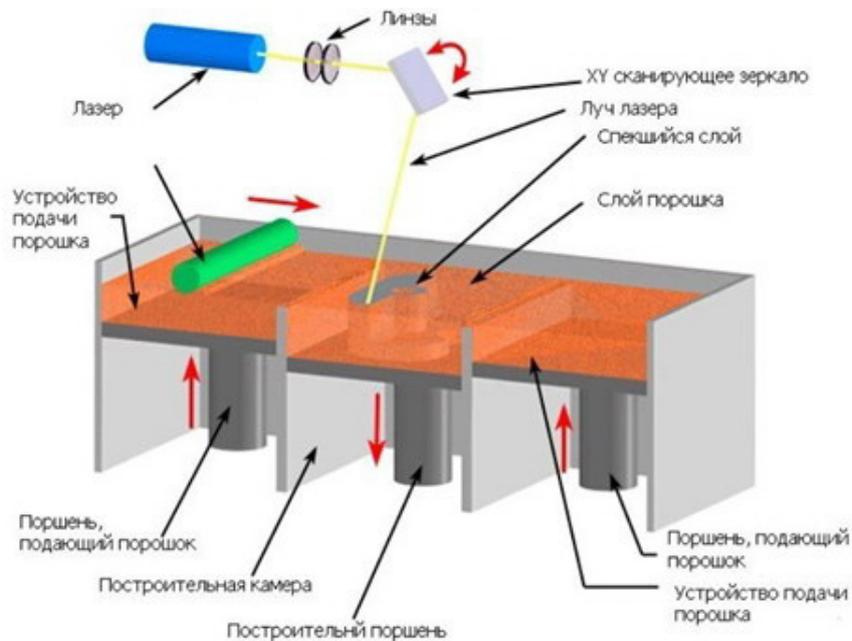


Рисунок 1. Схема системы SLM с порошковым слоем

материала или материалов на основе цифрового модельного представления.

Согласно ГОСТ Р 57589 (Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования) существуют различные технологические процессы, разработанные для аддитивных технологий. Они сгруппированы в семь основных категорий на основе фундаментальной части функциональности машин:

- для фотополимеризации в ванне;
- струйного нанесения материалов;
- струйного нанесения связующего;
- синтеза на подложке;
- экструзии материалов;
- прямого подвода энергии и материала;
- листовой ламинации.

Прямой подвод энергии и материала посредством сплавления в порошковом слое является наиболее актуальным в контексте АТ электрических машин. Данный производственный процесс включает следующие технологии [7]:

- прямое лазерное спекание металлов (DMLS),
- электронно-лучевая плавка (EBM),
- селективное термическое спекание (SHS),
- селективное лазерное плавление (SLM),

- селективное лазерное спекание (SLS).

Все перечисленные методы используют лазерный или электронный луч для индукции сплавления (спекания или плавления) частиц пластика или металлического порошка, слой за слоем. Также каждый из методов подходит для работы с набором определенных материалов, например DMLS/SLS позволяет изготавливать детали из сплавов металлов, таких как: алюминий, титан, сталь, никель и кобальт-хром. Важно отметить, что другие типы АТ также успешно использовались при изготовлении электрических машин, например, струйная обработка материалов, экструзия материалов и ламинирование листов [4], [36], [47].

На рисунке 1 представлена принципиальная схема системы SLM с порошковым слоем. Соответствующим образом подготовленный порошковый материал распределяется по пластине-подложке с толщиной слоя обычно от 20 мкм до 100 мкм. Затем лазер или набор лазеров, работающих в атмосфере инертного газа, плавит последовательные слои порошка, нанесенного механизмом покрытия.

Готовая деталь извлекается из порошкового слоя и обрабатывается в соответствии с конкретными требованиями к конструкции, например, термической обработкой для снятия остаточных механических напряже-

ний или встряхиванием для удаления остаточного порошка.

Примеры АТ в производстве электрических машин

При обзоре литературы, касающейся АТ электрических машин, становится ясно, что технологическая зрелость на данный момент относительно низка [11]-[36]. Это очевидно при рассмотрении активных компонентов электрической машины, таких как магнитные или обмоточные материалы, которые обладают худшими физическими свойствами по сравнению с существующими решениями, которые обычно используются при изготовлении электрических машин [11]-[36]. При этом исследования и разработки быстро продвигаются с новыми улучшенными методами и материалами АТ, например, «технология формирования точек» (DFT) для высокоточной улучшенной производительности АТ на основе металлических порошков или АТ из чистой меди и драгоценных металлов [13].

В некоторых областях практическое промышленное внедрение АТ значительно опережает тот задел, что подтверждается исследовательскими работами. Успешное внедрение АТ в производство электрических машин — это всего лишь вопрос времени. Большая часть работ, связанных с АТ электрических машин, сосредоточена на отдельных компонентах и материалах машины [11]-[36], хотя были предприняты некоторые попытки внедрить более целостный подход, при котором несколько деталей изготавливаются с использованием АТ [47], [51].

Механические свойства деталей, изготовленных с использованием АТ, часто сопоставимы с теми, которые производятся с использованием более традиционных методов, например, литья металла. На рисунке 2 представлены механические свойства для набора металлических материалов, обычно используемых в АТ.

Номенклатура, используемая на рисунке 2, относится либо к химическому составу конкретного металлического сплава, например алюминий-магний сплав AlSi10Mg, или номер DIN, например, 1.2709 относится к

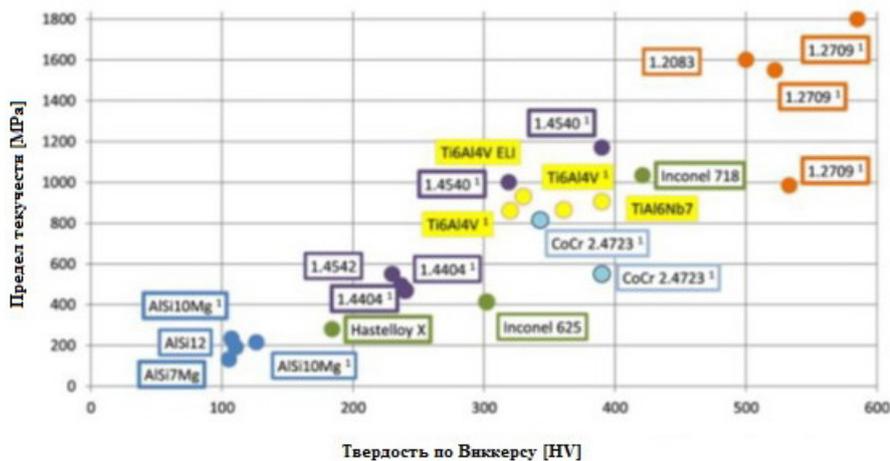


Рисунок 2. Механические свойства металлических сплавов, изготовленных с использованием АТ



Рисунок 3. Корпус двигателя со встроенными каналами охлаждения
а) CAD модель и моторное оборудование – Мюнхенский технический университет [14]
б) CAD модель – Университет Ноттингема [15]

чество деталей и улучшило общие характеристики тепловых режимов [14], [15]. На рисунке 3а авторы сообщают о снижении массы на 31% и улучшении на 20 % общей теплопроводности и эффективности системы охлаждения по сравнению с более традиционной конструкцией [14]. Авторы не предоставляют подробностей относительно металлического сплава, используемого для изготовления корпуса, но, учитывая теплопроводность имеющихся сплавов, скорее всего, это будет алюминиевый сплав, например $AlSi_{10}Mg$.

Уменьшение массы конструктивных частей электродвигателя является еще одной областью, где АТ успешно используется. На рисунке 4 показаны примеры узлов ротора с валом, разработанных для изготовления с использованием АТ. На рисунке 4а представлена легкая сборка внутреннего ротора с валом: CAD - модель и практическая реализация вместе с массивом постоянных магнитов и катушкой [16]. Ротор с валом был изготовлен с использованием инструментальной стали (H13). Хотя магнитные свойства H13 относительно плохие, авторы показывают, что с помощью соответствующей термической обработки их можно значительно улучшить, чтобы они соответствовали свойствам существующих магнитомягких композитов (SMC). Что еще более важно, путем внедрения решетчатой структуры общая масса ротора была уменьшена на 25%, а момент инерции уменьшился на 23% по сравнению с традиционной конструкцией.

На рисунке 4б показаны механические части внешнего ротора с валом для электродвигателя с постоянными магнитами с открытой рамой. В данной работе целью было обеспечить достаточный сквозной поток воздуха для отвода тепла от активных частей двигателя. Представленные механические компоненты были спроектированы и изготовлены с использованием титанового сплава (Ti_6Al_4V) для обеспечения сверхлегкой сборки двигателя.

Обеспечение высокопроизводительных и надежных конструкций роторов для высокоскоростных машин – еще одна область, где АТ была продемонстрирована. На рисунке

инструментальной стали (Marage 300), а 1.4540 - к нержавеющей стали (15- 5 PH), [10]. Очевидно, что существует некоторый разброс свойств для различных производителей машин для АТ. Это подчеркивает важность продолжающейся работы по стандартизации АТ. Важно отметить, что конкретные свойства материала могут быть изменены или улучшены с помощью соответствующей обра-

ботки, например, термической обработки, после АТ [10].

На рисунке 3 представлены примеры корпусов электродвигателей для электромобилей. Здесь показаны CAD модели и изготовленные прототипы электрических машин. В обоих случаях уникальная интегрированная конструкция канала для жидкостного охлаждения была включена в корпус, что сократило общее коли-

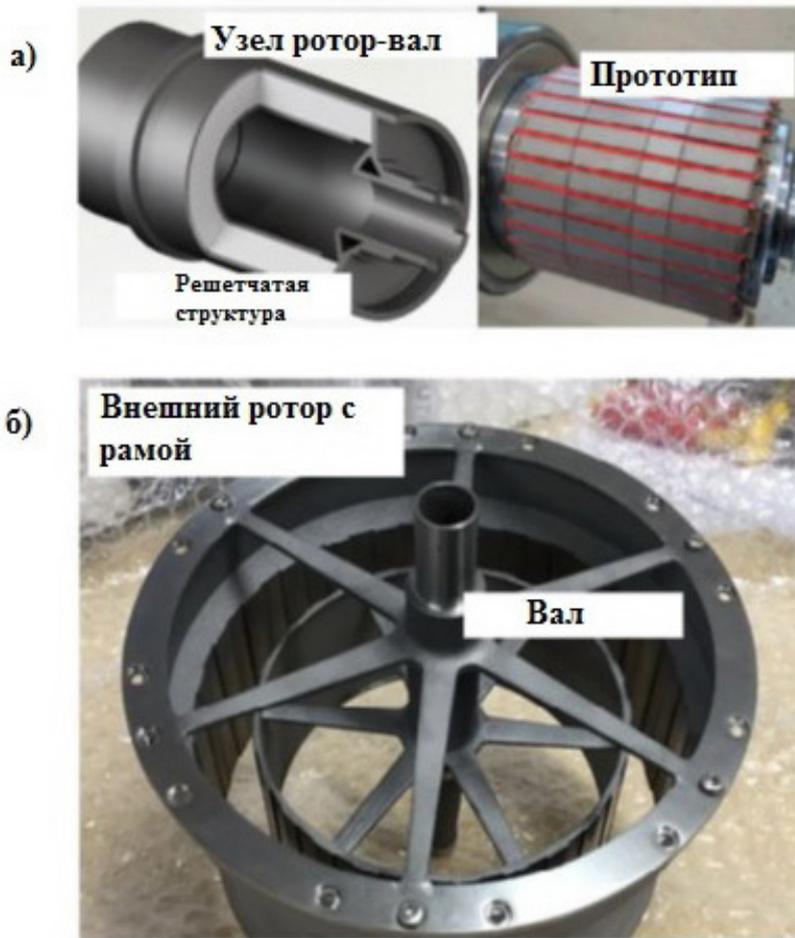


Рисунок 4. Облегченные сборки ротора с валом
а) внутренний ротор с валом и решетчатой структурой для применения в двигателях с постоянными магнитами (CAD модель и полная сборка) – Университет Падерборна, Технологический институт Карлсруэ и Университет Ганновера [16],
б) внешний ротор с валом для электродвигателя с постоянными магнитами открытого типа – Университет Ньюкасла.



Рисунок 5. Цельные стальные роторы с медным покрытием для высокоскоростной индукционной машины – Rolls Royce Central Technology [17]

5 представлен интересный пример конструкции сплошного стального ротора с медным покрытием для высокоскоростной индукционной машины [17].

На рисунке 5 представлены три этапа изготовления альтернативных роторов с гладкими и волнистыми профилями. Для изготовления роторов использовался метод струйной обработки материала (холодное распыление). Показано, что этот метод обеспечивает хорошую диффузионную связь между слоями стали и меди в сборке ротора. Прочность связи особенно важна при рассмотрении применения высокоскоростных двигателей. Некоторые методы оценки диффузионной связи обсуждаются в [63]. Кроме того, авторы сообщают о приблизительно 80% увеличении выходной мощности для ротора с волнистым и гладким профилем по сравнению с сплошной и более традиционной конструкцией ротора с короткозамкнутым ротором.

Ранее было показано, что существующие методы отвода тепла от корпуса машины значительно выигрывают от использования АТ. Поскольку АТ позволяет повысить эффективность управления тепловыми режимами электрических машин, в некоторых исследованиях были изучены менее традиционные решения.

В настоящее время является доцентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет 49 публикаций. Почетный работник сферы образования РФ. Имеет Почетную грамоту АО «Татэнергосбыт».

На рисунке 7а представлена CAD модель, так и прототип пакета сердечника ротора для поверхностно монтируемых постоянных магнитов. Однако основные исследовательские усилия были направлены на разработку подходящего материала и связанных с АТ процессов для производства деталей с подходящими магнитными свойствами [24]. Показано, что предлагаемый процесс обеспечивает магнитный материал со свойствами, сопоставимыми с коммерчески доступными электротехническими сталями, такими как JNEX Super Core [24], [33]. Интересно, что новый материал имеет относительно высокое содержание кремния 6,9% по сравнению с 6,5% для JNEX Super Core. Однако удельные потери в четыре раза выше для разработанного материала. При этом данные об удельных потерях мощности приведены для относительно низкой рабочей частоты 50 Гц. Механические свойства материала подробно не исследованы.



Рисунок 6/ Элементы систем терморегулирования для электрических машин
а) интегрированный теплообменник с жидкостным охлаждением (CAD модель статора и обмотки вместе с теплообменником и крепежными элементами) – Университет Висконсин-Мэдисон [18],
б) интегрированный теплообменник с воздушным охлаждением статора (пакет сердечника статора и крепежные элементы) – Университет Ньюкасла [19],
в) набор теплообменников для улучшения теплопередачи в электрических машинах (различные варианты до окончательной обработки) – Университет Ньюкасла [20]

Уменьшение массы магнитного сердечника ротора на 50%, показанного на рисунке 7а достигнуто путем объединения разработанного материала, производственного процесса, электромагнитной и механической оптимизации конструкции [24].

На рисунке 7б показана конструкция ротора, разработанная для легкой, высокопроизводительной коммутируемой реактивной машины [34]. В отличие от предыдущего примера, здесь пакет сердечника

ротора был изготовлен с использованием FeCo [25]. Химический состав стали с FeCo, например Hiperco50, вместе с соответствующим изготовлением и последующей обработкой обеспечивает наивысшее магнитное насыщение среди коммерчески доступных электротехнических сталей [35]. Экспериментальные данные испытаний образцов материалов, изготовленных с использованием АТ, показали, что электромагнитные свойства сопоставимы с эквивалент-

ной электротехнической сталью, например, магнитная насыщенность 2,3 Тл (материал АТ) по сравнению с 2,4 Тл (Hiperco 50) и аналогичные механические свойства, при условии специальной процедуры отжига [25].

Также авторы упоминают, что электрическое удельное сопротивление разработанных образцов можно дополнительно улучшить, чтобы снизить удельные потери мощности.

Рисунок 7в представляет собой семейство роторов, разработанных для синхронной реактивной машины [26]. Такая конструкция ротора требует тщательного анализа, поскольку как электромагнитные, так и механические аспекты проектирования должны рассматриваться совместно.

Характерные «механические» мосты, показанные на рисунке 7в, оказывают отрицательное влияние на общую производительность двигателя. Это происходит из-за дополнительных путей рассеяния магнитного потока. В [26] АТ позволили построить ротор с немагнитными мостами, устраняющими нежелательные эффекты утечки потока. Изменение магнитных свойств выбранных областей ротора было достигнуто здесь с помощью использования быстрого затвердевания и термической деформации, связанной с технологией SLM.

Следующие два примера, представленные на рисунке 7г и 7д, иллюстрируют части двух различных топологий машин: асинхронная машина с литой алюминиевой белочной клеткой [27] и синхронная реактивная машина с линейным пуском [28]. В обоих случаях основное внимание исследователей было уделено АТ изготовления деталей машин, при этом информация о приросте производительности машин, достигнутом за счет использования АТ, ограничена. Все приведенные выше примеры использования АТ в конструкции магнитомягких деталей показывают разный уровень готовности к серийному производству.

Магнитотвердые материалы, такие как редкоземельные высокоэнергетические постоянные магниты (ПМ), стали необходимыми при разработке электрических машин с

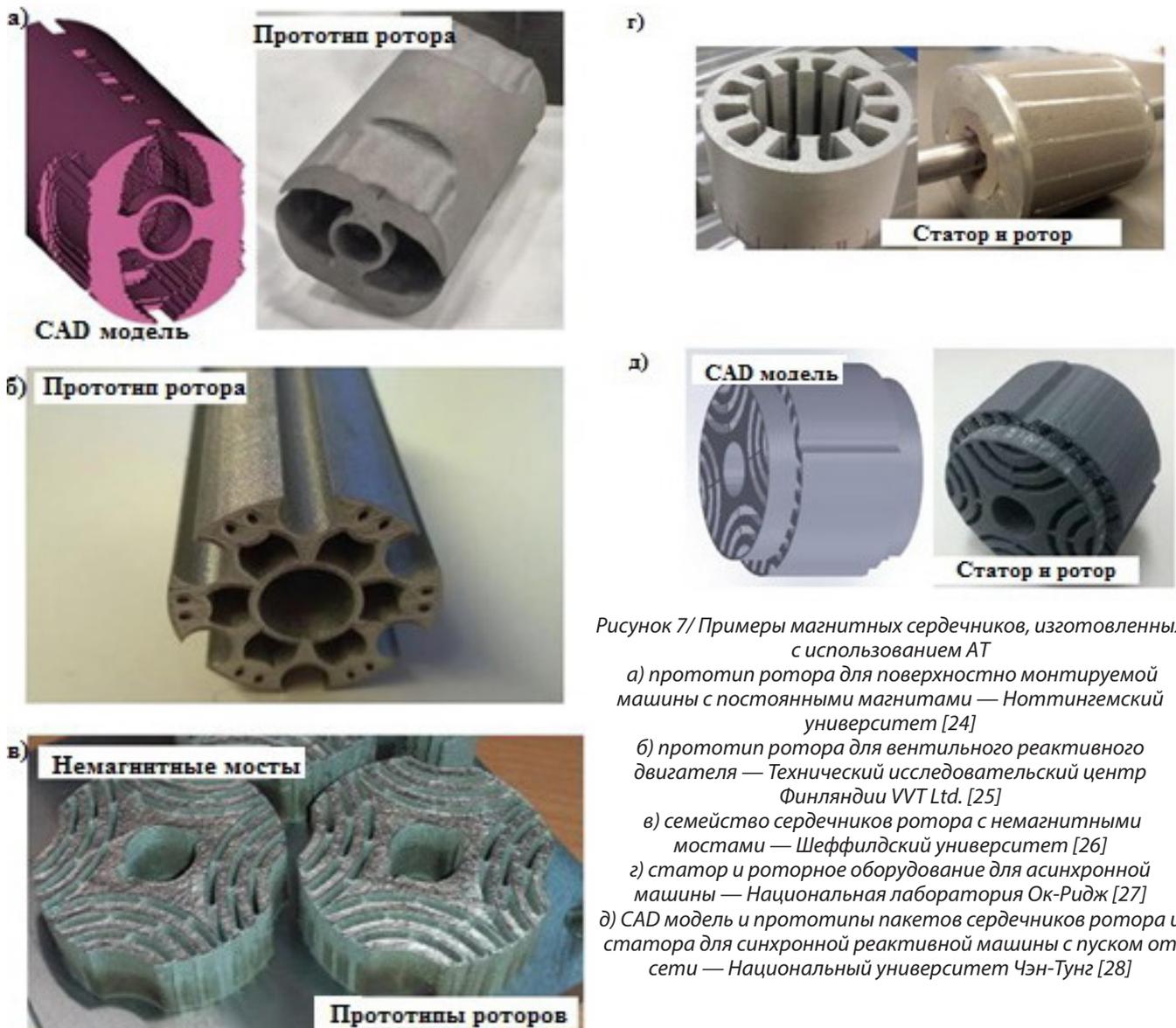


Рисунок 7/Примеры магнитных сердечников, изготовленных с использованием АТ

а) прототип ротора для поверхностно монтируемой машины с постоянными магнитами — Ноттингемский университет [24]

б) прототип ротора для вентильного реактивного двигателя — Технический исследовательский центр Финляндии VVT Ltd. [25]

в) семейство сердечников ротора с немагнитными мостами — Шеффилдский университет [26]

г) статор и роторное оборудование для асинхронной машины — Национальная лаборатория Ок-Ридж [27]

д) CAD модель и прототипы пакетов сердечников ротора и статора для синхронной реактивной машины с пуском от сети — Национальный университет Чэн-Тунг [28]

высокой удельной мощностью. Два типа редкоземельных ПМ: NdFeB и SmCo использовались в различных энергоэффективных приложениях. Другие, более низкоэнергетические ПМ, такие как ферриты, AlNiCo или MnAlC, также широко исследовались при проектировании электрических машин. Однако недорогие типы ПМ предлагают меньший общий прирост энергоэффективности, и, следовательно, их использование ограничено конкретными приложениями. Поскольку стоимость ПМ является важным фактором при рассмотрении массового производства, наблюдается постоянный интерес и разработки по улучшению использования материалов ПМ и их физических свойств материалов.

NdFeB обычно производится в спеченном или связанном виде. Вто-

рой тип особенно хорошо подходит для АТ [36]-[40].

Обычно связанные ПМ изготавливаются методом прессования или литья под давлением с использованием терморезистивного или термопластичного связующего. На рисунке 9а показан пример ПМ, изготовленного с использованием АТ и традиционного спекания [36]. Для оценки производства связанных ПМ NdFeB с формой, близкой к заданной, использовались как струйное связывание, так и аддитивное производство большой площади (технология ВААМ). Как магнитные, так и механические свойства ПМ, изготовленных с использованием ВААМ, лучше или сопоставимы с более распространенными литейными ПМ [36]. Сочетание NdFeB и полиамида (нейлон-12) позволило получить ПМ

с энергетическим производением 43,5 кДж/м³ и остаточной намагниченностью, равной 0,5 Тл, с использованием ВААМ.

АТ изготовления ПМ без использования редкоземельных элементов также нашли свое применение [37].

Оба типа ПМ AlNiCo и MnAlC испытаны с использованием АТ. Более конкретно, при изготовлении ПМ AlNiCo использовалась система прямого лазерного выращивания (LENS). Показано, что магнитные свойства изготовленных на основе LENS ПМ AlNiCo аналогичны или лучше аналогов, изготовленных с использованием более традиционного литья или спекания. Достигнуты остаточная намагниченность и коэрцитивная сила равны 0,9 Тл и -161,5 кА/м [37], [40]. Что касается ПМ MnAlC, первоначальные результаты



Рисунок 8. Технология изготовления ПМ на базе АТ

а) пример ПМ NdFeB, изготовленного с использованием струйной АТ, покрытого полиуретаном и спеченного NdFeB – Национальная лаборатория Оук-Ридж [36]

б) изготовление образцов ПМ MnAlC – Израильский институт металлов, Исследовательский центр спортивных технологий и Технический университет Дармштадта [37]

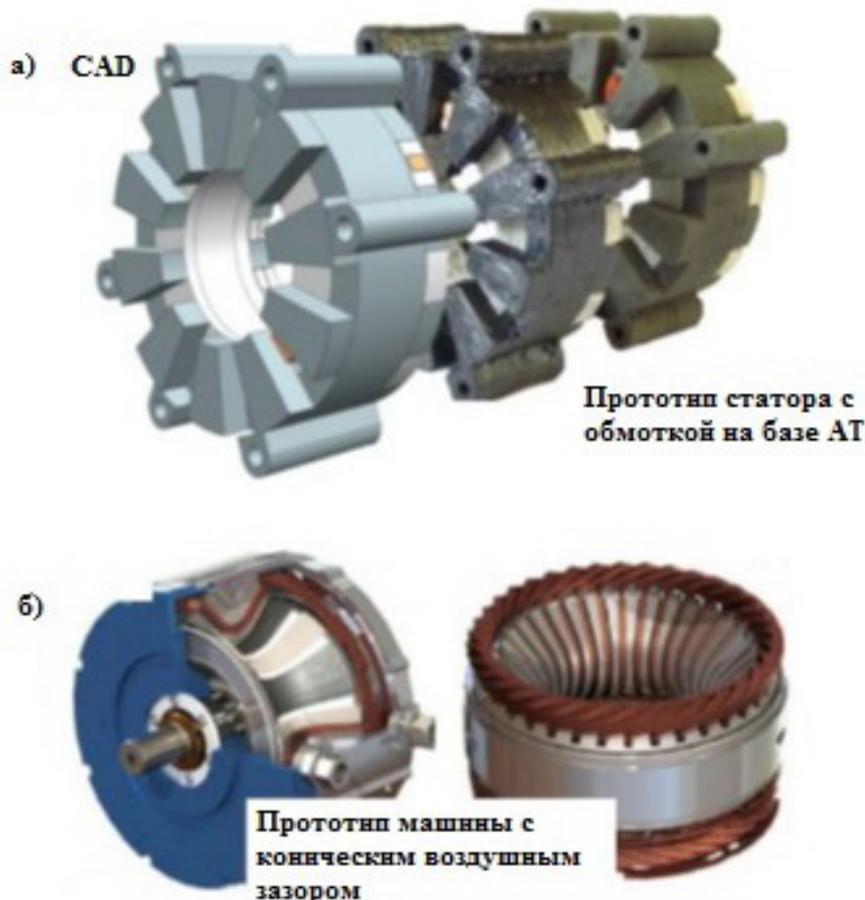


Рисунок 9. Примеры узлов электрических машин, изготовленных с использованием АТ

а) полная сборка статора и обмотки - Технический университет Хемница [51]

б) новая концепция машины с коническим воздушным зазором – Persimmon Technologies Corporation [52]

показали, что изготовление образцов твердого материала возможно, рисунок 9б. Однако процесс ЕВМ, используемый при изготовлении испытаний ПМ, требует тонкой настройки [37].

В дополнение к изучению существующих типов ПМ, как обсуждалось выше, появились некоторые интересные разработки, связанные с материаловедением ПМ. А именно, ПМ с нанокompозитными обменными пружинами, потенциально предлагающие производительность, превосходящую существующие современные спеченные ПМ из РЗЭ [41]-[43].

Заключение

Существующая литература, связанная с АТ электрических машин, показывает разный уровень технологической зрелости для ключевых узлов электрической машины. Наиболее продвинутыми являются реализации модернизации конструкции и управления тепловыми режимами, тогда как активные компоненты несколько отстают. Текущие исследования АТ для электрических машин сосредоточены на разработке отдельных узлов электрической машины и активных материалов различными способами. Несмотря на то, что АТ обеспечивает практически неограниченный способ проектирования и производства новых компонентов, необходимо понять, как подготовить АТ для перехода к серийному производству электрических машин и просчитать экономическую эффективность.

Необходимо рассмотреть несколько аспектов, включая: материалы, технологии производства и новые концепции проектирования, полностью использующие АТ.

Более комплексный подход к проектированию кажется естественным шагом вперед в разработке АТ следующего поколения электрических машин.

Некоторые из ранних примеров АТ интегрированных узлов машины или новых концепций машины выглядят действительно очень многообещающе (рисунок 9).

Однако АТ электрических машин не ограничивается самими машинами. Интеграция силовой электроники, магнитных компонентов и мотор-приводов с использованием технологии АТ является еще одним направлением развития [54] – [60].

Электрические, тепловые и механические характеристики электрических машин являются ключевыми моментами изучения при внедрении АТ. Исследовательская деятельность на данный момент сосредоточена преимущественно на улучшении выбранных показателей производительности, например, повышении удельной мощности, улучшенном отводе тепла и снижении механических напряжений, при сохранении компактных, надежных и экономически эффективных конструкторских решений.

Литература

- (2018, November). "GE to install first metal additively manufactured part on GEnx commercial airline engines," *Metal Additive Manufacturing*, vol. 4, no. 4, pp. 10.
- (2018, September). "Airbus Helicopters begins high-volume metal Additive Manufacturing," *Metal Additive Manufacturing*, vol. 4, no. 3, pp. 36.
- R. Wrobel, B. Mecrow, "Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines – Review," *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, pp. 1 – 8, April 2019.
- F. Wu, A. M. El-Refaie, "Towards Fully Additively-Manufactured Permanent Magnet Synchronous Machines: Opportunities and Challenges," *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, pp. 2225 – 2232, May 2019.
- (2018, December). "2019 Additive Manufacturing Market Outlook and Summary of Opportunities," *SmarTech Publishing Report*.
- (2019, March). "3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry," *Wohlers Associates Report*.
- (2013, September). "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies," *ASTM standard (Designation: F2792 – 12a)*, pp. 1 – 2.
- (2018, June). "Standardization Roadmap for Additive Manufacturing," *America Makes & ANSI Additive Manufacturing*, pp. 1 – 269.
- F. Petzoldt, C. Aumund-Kopp, "Standards for metal Additive Manufacturing: A global perspective," *Metal Additive Manufacturing*, vol. 2, no. 2, pp. 45 – 52, 2016.
- J. Isaza, C. Aumund-Kopp, "Additive Manufacturing with metal powders: Design for Manufacture evolves into Design for Function," *Powder Metallurgy Review*, vol. 3, no. 2, pp. 41 – 50, 2014.
- O. Wallmark, "Investigation of additive manufacturing of electric machine components for EV," *Report, Swedish Electromobility Centre*, 2018.
- (2018, November). "Mitsubishi Electric reveals new Dot Forming Technology for metal Additive Manufacturing," *Metal Additive Manufacturing*, vol. 4, no. 4, pp. 39.
- (2018, November). "Trumpf adds high-strength tool steel processing and green laser functionality for AM," *Metal Additive Manufacturing*, vol. 4, no. 4, pp. 16.
- "Additive Manufacturing moves TUFast," [Online], Available: <https://additivenews.com/additive-manufacturing-moves-tufast/>
- "Nottingham PhD student wins Additive World Design Challenge award," [Online], Available: <https://exchange.nottingham.ac.uk/blog/phd-student-wins-additive-world-design-challenge-award/>
- S. Lammers, G. Adam, H. J. Schmid, R. Mrozek, R. Oberacker, M. J. Hoffmann, F. Quattrone, B. Ponick, "Additive Manufacturing of a lightweight rotor for a permanent magnet synchronous machine," *6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, pp. 41 – 45, 2016.
- A. Lambourne, "Opportunities and Challenges of ALM in Electrical Machines," *Advance Propulsion Centre UK (APC UK) Seminar*, June 2019.
- W. Sixel, M. Liu, G. Nellis, B. Sarlioglu, "Cooling of Windings in Electrical Machines via 3D Printed Heat Exchanger," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 229 – 235, 2018.
- R. Wrobel, B. Scholes, A. Hussein, A. Mustaffar, S. Ullah, D. Reay, B. Mecrow, "Design and Experimental Characterisation of an Additively Manufactured Heat Exchanger for an Electric Propulsion Unit of a High-Altitude Solar Aircraft," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, (early access paper).
- R. Wrobel, A. Hussein, "Design Considerations of Heat Guides Fabricated Using Additive Manufacturing for Enhanced Heat Transfer in Electrical Machines," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 6506 – 6513, 2018.
- B. Richardson, L. Love, J. G. Tate, "Additive Manufacturing for Low Volume Bearings," *Crada Final Report: NFE-16-06278*, Oak Ridge National Laboratory, 2017.
- (2018, December). "Schaeffler and DMG MORI look to Additive Manufacturing for development of rolling bearings," *Metal Additive Manufacturing*, vol. 2, no. 3, pp. 21.
- H. Shokrollahi, K. Janghorban, "Soft magnetic composite materials (SMCs)," *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, vol. 189, no. 2, pp. 1 – 12, February 2007.
- G. Garibaldi, "Laser additive manufacturing of soft magnetic cores for rotating machinery: materials development and part design," *PhD thesis*, University of Nottingham, UK, 2018.
- S. Metsa-Kortelainen, T. Lindroos, M. Savolainen, A. Jokinen, A. Revuelta, A. Pasanen, K. Ruusuvoori, J. Pippuri, "Manufacturing of topology optimized soft magnetic core through 3D printing," *NAFEMS Nordic Seminar*, 2016.
- F. S. H. B. Freeman, A. Lincoln, J. Sharp, A. Lambourne, I. Todd, "Exploiting Thermal Strain to Achieve an in-situ Magnetically Graded Material," *Materials and Design*, Elsevier, vol. 161, no. 1, pp. 14 – 21, January 2019.
- M. Chinthavali, "Additive Manufacturing Technology for Power Electronics Applications," *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2016.
- Z.-Y. Zhang, K. J. Jhong, C.-W. Cheng, P.-W. Huang, M.-C. Tsai, W.-H. Lee, "Metal 3D printing of synchronous reluctance rotor," *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pp. 1125 – 1128, 2016.
- Y. Yan, "Design Methodology and Materials for Additive Manufacturing of Magnetic Components," *PhD thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA, 2017.
- Y. Yan, C. Ding, K. D. T. Ngo, Y. Mei, G.-Q. Lu, "Additive manufacturing of

planar inductor for Power Electronics applications," IEEE International Symposium on 3D Power Electronics Integration and Manufacturing (3D-PEIM), pp. 1 – 4, 2016.

31. C. V. Mikler, "Laser Additive Manufacturing of Magnetic Materials," MSc thesis, University of North Texas, TX, USA, 2017.

32. N. C. Benack, T. Wang, K. Matthews, M. L. Taheri, "Additive Manufacturing Methods for Soft Magnetic Composites (SMCs)," Microscopy and Microanalysis, Cambridge University Press, vol. 24, no. 6, pp. 1 – 2, December 2018.

33. (2019, January). "Super Core Electrical steel sheets for high-frequency application," Data sheet JFE Steel Corporation, [Online], Available: <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/electrical/catalog/f1e-002.pdf>.

34. J. Lee, J. H. Seo, N. Kikuchi, "Topology optimization of switched reluctance motors for the desired torque profile," Structural and Multidisciplinary Optimization, Springer, vol. 42, no. 5, pp. 783 – 796, November 2010.

35. (2019, January). "Alloy Data, Hiperco 50 Alloy," Data sheet Carpenter, [Online], Available: <https://www.carttech.com/en/product-solutions/cartech-hiperco-50-alloy/>.

36. M. P. Paranthaman, "Additive Manufacturing for Isotropic NdFeB Bonded Permanent Magnets," Crada Final Report: NFE-15-05761, Oak Ridge National Laboratory, 2016.

37. V. Popov, A. Koptyug, I. Radulov, F. Maccari, G. Muller, "Prospects of additive manufacturing of rare-earth and non-rare-earth permanent magnets," 15th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Procedia Manufacturing, Elsevier, vol. 21, pp. 100 – 108, 2018.

38. V. T. Nguyen, F. Calvayrac, A. Bajorek, N. Randtianantoandro, "Mechanical alloying and theoretical studies of MnAl(C) magnets," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Elsevier, vol. 462, pp. 96 – 104, 2018.

39. J. Jacimovic, F. Binda, L. G. Herrmann, F. Greuter, J. Genta, M. Calvo, T. Tome, R. A. Simon, "Net Shape 3D Printed NdFeB Permanent Magnet," Advanced Engineering Materials, vol. 18, pp. 1 – 9, November 2016.

40. E. M. H. White, A. G. Kassen, E. Simsek, W. Tang, R. T. Ott, I. E. Anderson, "Net Shape Processing of Alnico Magnets by Additive Manufacturing," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 11, pp. 1 – 6, 21 November 2017

41. A. Misra, "Nano-Magnets and Additive Manufacturing for Electric Motors," 8th Annual CAFE Foundation Electric Aircraft Symposium, Presentation – NASA Glenn Research Centre, 2014.

42. M. P. Paranthaman, I. C. Nlebedim, F. Johnson, S. K. McCall, "Additive Manufacturing of Permanent Magnets," Materials Matters, vol. 11, no. 4, pp. 1 – 19, 2016.

43. E. F. Kneller, R. Hawig, "The Exchange-Spring Magnet: A New Material Principle for Permanent Magnets," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 27, no. 4, pp. 3588 – 3600, July 1991.

44. N. Simpson, P. H. Mellor, "Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Gapped Inductors," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1 – 7, 2017.

45. C. Wohlers, P. Juris, S. Kabelac, B. Ponick, "Design and Direct Liquid Cooling of Tooth-Coil Winding," Electrical Engineering, Springer, vol. 100, no. 4, pp. 2299 – 2308, December 2018.

46. N. Simpson, P. H. Mellor, "Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Electrical Machines," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 5765 – 5772, 2018.

47. F. Lorenz, J. Rudolph, R. Werner, "Design of 3D printed High Performance Windings for Switched Reluctance Machines," International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2451 – 2457, 2018.

48. (2018, July). "GKN Powder Metallurgy identifies potential of metal AM for production of copper induction coils," Metal Additive Manufacturing, vol. 4, no. 3, pp. 32.

49. C. Silbernagel, I. Ashcroft, P. Dickens, M. Galea, "Electrical Resistivity of Additively Manufactured AlSi10Mg for Use in Electric Motors," Additive Manufacturing, Elsevier, vol. 21, pp. 395 – 403, May 2018.

50. A. Bandyopadhyay, B. Heer "Additive manufacture of multi-

material structures," Material Science and Engineering Reports, vol. 129, pp. 1 – 16, April 2018.

51. "Multi-material 3D printing," [Online], Available: <https://www.tuchemnitz.de/etit/ema/AMMM/index.php>

[52. J. Krishnasamy and M. Hosek, "Spray-formed hybrid-field traction motor," SAE World Congress Experience, pp. 1 – 7, 2017.

53. R. Wrobel, N. Simpson, P. H. Mellor, J. Goss, D. A. Staton, "Design of a Brushless PM Starter-Generator for Low-Cost Manufacture and High-Aspect -Ratio Mechanical Space Envelope," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 2, pp. 1038 – 1048, March/April 2017.

54. R. Abebe, G. Vakil, G. L. Calzo, T. Cox, S. Lambert, M. Johnson, C. Gerada, B. Mecrow, "Integrated Motor Drives: State of the Art and Future Trends," IET Electric Power Applications, vol. 10, no. 8, pp. 757 – 771, September 2016.

55. T. M. Jahns, H. Dai, "The Past, Present, and the Future of Power Electronics Integration Technology in Motor Drives," CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 2, no. 3, pp. 197 – 216, September 2017.

56. D. C. Hopkins, H. Ke, "Additive Manufacturing in Power Electronics Packaging," IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), pp. 1-8, April 2015.

57. M. Conrad, R. W. De Doncker, M. Schniedenharn, A. Diatlov, "Packaging for Power Semiconductors based on the 3D Printing Technology Selective Laser Melting," 16th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1 – 7, August 2014.

58. H. Ke, A. Morgan, R. Aman, D. C. Hopkins, "Investigation of Rapid-Prototyping Methods for 3D Printed Power Electronic Module Development," 47th International Conference and Exhibition on Microelectronics, pp. 1 – 6, October 2014.

59. J. Hoerber, J. Glasschroeder, M. Pfeffer, J. Schilp, M. Zaeh, J. Franke, "Approaches for Additive Manufacturing of 3D Electronics Applications," 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, pp. 806 – 811, April 2014.

60. M. Chinthavali, C. Ayers, S. Campbell, R. Wiles, B. Ozpineci, "A

10- kW SiC Inverter with a Novel Printed Metal Power Module with Integrated Cooling Using Additive Manufacturing," IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications, pp. 48 – 54, October 2014.

61. J. J. Lewandowski, M. Seifi, "Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties," Annual Review of Materials Research, vol. 46, no. 1, pp. 151 – 186, July 2016.

62. T. M. Mower, M. J. Long, "Mechanical Behaviour of Additive Manufactured, Powder-Bed Laser-Fused Materials," Material Science and Engineering A, Elsevier, vol. 651, pp. 198 – 213, January 2016.

63. A. Vevers, A. Kromanis, E. Gerins, J. Ozolins, "Additive Manufacturing and Casting Technology Comparison: Mechanical Properties, Productivity and Cost Benchmark," Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, no. 2, pp. 56 – 63, April 2018.

64. T. Hussain, D. G. McCartney, P. H. Shipway, D. Zhang, "Bonding Mechanisms in Cold Spraying: The Contributions of Metallurgical and Mechanical Components," Journal on Thermal Spray Technology, vol. 18, no. 3, pp. 364 – 379, September 2019.

65. W. Sixel, M. Liu, G. Nellis, B. Sarlioglu, "Ceramic 3D Printed Direct Winding Heat Exchangers for Improving Electric Machine Thermal Management," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 769 – 776, 2019.

66. A. Safin, T. Petrov "Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors," E3S Web of Conferences, Saint-Petersburg, Vol. 220. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2020. – p. 01040.

Сафин Альфред Робертович

Родился в 1981 году. В 2004 году окончил Казанский государственный энергетический университет. В 2020 году защитил докторскую диссертацию по теме «Методы проектирования и создание синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов». Опыт работы – 19 лет. В настоящее время является Главным научным сотрудником Казанского государственного энергетического университета. Доцент кафедры. Имеет 180 научных статей и тезисов, 20 патентов. Почетный работник сферы образования РФ. Имеет Почетную грамоту Министерства науки и ВО РФ и Благодарность Министерства образования и науки Республики Татарстан.

Шакурова Зумейра Мунировна

Родилась в 1965 году. В 1991 году окончила Московский ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции энергетический институт, по специальности «Электрические станции». В 2002 году защитила диссертацию по теме «Технологии реализации преемственности профессиональной подготовки специалистов в системе ССУЗ – ВУЗ (на примере энергетических специальностей)». Опыт работы – 38 лет. В настоящее время является доцентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. Имеет 49 публикаций. Почетный работник сферы образования РФ. Имеет Почетную грамоту АО «Татэнергосбыт».

Safin Alfred Robertovich

Was born in 1981. In 2004 he graduated from Kazan State Energy University. In 2020, he defended his doctoral dissertation on the topic "Design methods and creation of synchronous electrical machines with permanent magnets as part of generating and drive complexes." Work experience – 19 years. Currently he is the Chief Researcher of the Kazan State Energy University. Associate Professor of the Department. Has 180 scientific articles and theses, 20 patents. Honorary worker of the education sector of the Russian Federation. He has a Certificate of Honor from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and a Letter of Gratitude from the Ministry of Education and Science of the Republic of Tatarstan.

Shakurova Zumeira Munirovna

Was born in 1965. In 1991 she graduated from the Moscow Order of Lenin and Order of the October Revolution Energy Institute, with a degree in Electric Power Plants. In 2002, she defended her dissertation on the topic "Technologies for implementing continuity of professional training of specialists in the Secondary Secondary Educational Institution – University System (using the example of energy specialties)." Work experience – 38 years. Currently, he is an associate professor at the Department of Electrical Supply of Industrial Enterprises at Kazan State Energy University. Has 49 publications. Honorary worker of the education sector of the Russian Federation. Has a Certificate of Honor from JSC Tatenergosbyt.

Коэффициенты теплопередачи в транзисторах на основе гетеропереходов: исследование слоев с теплопроводящими добавками для повышения эффективности

//HEAT TRANSFER COEFFICIENTS IN TRANSISTORS BASED ON HETEROJUNCTIONS: INVESTIGATION OF LAYERS WITH HEAT-CONDUCTING ADDITIVES TO INCREASE EFFICIENCY//

**Аветисян А.С.,
Иркутский национальный
исследовательский
технический университет,
г. Иркутск**

Одной из ведущих проблем, ограничивающих эффективность полевых транзисторов, изготовленных на основе нитрида галлия (GaN), является явление самоподогрева, которое приводит к нерегулярному распределению мощности и снижению основных электрических характеристик устройств. Данная работа направлена на разработку полевого транзистора с усовершенствованной системой охлаждения, а также на исследование тепловых процессов, происходящих в таких устройствах, с использованием методов численного моделирования. В ходе исследования рассматриваются транзисторы, выполненные на сапфировой подложке, в которых интегрирован графеновый элемент, предназначенный для эффективного отвода тепла. Кроме того, в конструкции предусмотрены теплопроводящие материалы, размещенные в канавках пассивационного слоя, что должно способствовать улучшению теплоотводящих свойств устройства. Оцениваются как электрические, так и тепловые характеристики данных структур. Результаты численного моделирования подтверждают эффек-

тивность предложенной системы охлаждения, что, в свою очередь, значительно снижает влияние эффекта самоподогрева и улучшает эксплуатационные характеристики полевых транзисторов. Новая концепция интегрирует систему охлаждения с элементом, отвечающим за поглощение тепла, что позволяет эффективно удалять избыточное тепло из области максимальной температуры через высококачественную теплопроводную канавку в слое пассивации. Полученные в результате исследования данные могут быть использованы для оптимизации проектирования силовой электроники на основе нитрида галлия и могут найти применение в электронной промышленности России, способствуя развитию более эффективных и надежных полевых транзисторов.

Ключевые слова: полевые транзисторы, нитрид галлия (gan), самоподогрев, эффективность, электроника, тепловые процессы, численное моделирование.

One of the leading problems limiting the efficiency of field-effect transistors made on the basis of gallium nitride (GaN) is the phenomenon of self-heating, which leads to irregular power distribution and a decrease in the basic electrical characteristics of the devices. This work is aimed at the development of a field-effect transistor with an improved

cooling system, as well as at the study of thermal processes occurring in such devices using numerical modeling methods. In the course of the study, transistors made on a sapphire substrate are considered, in which a graphene element is integrated, designed for efficient heat dissipation. In addition, the design provides heat-conducting materials placed in the grooves of the passivation layer, which should help improve the heat-dissipation properties of the device. Both the electrical and thermal characteristics of these structures are evaluated. The results of numerical simulation confirm the effectiveness of the proposed cooling system, which, in turn, significantly reduces the effect of the self-heating effect and improves the operational characteristics of field-effect transistors. The new concept integrates the cooling system with an element responsible for heat absorption, which effectively removes excess heat from the maximum temperature area through a high-quality heat-conducting groove in the passivation layer. The data obtained as a result of the study can be used to optimize the design of power electronics based on gallium nitride and can be used in the Russian electronics industry, contributing to the development of more efficient and reliable field-effect transistors.

Keywords: field effect transistors, gallium nitride (gan), self-heating, efficiency, electronics, thermal processes, numerical modeling.

Введение

Проблема саморазогрева является критически важной для эффективности функционирования устройств на основе нитридов галлия, включая мощные электронные и оптоэлектронные системы. Неравномерный

тепловой поток и повышение средней температуры в полевых транзисторах на нитриде галлия с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) приводят к образованию локализованных зон с высокими температурами вокруг проводящего канала.

Актуальность повышения надежности и эффективности работы таких устройств остается приоритетной задачей научного и инженерного сообщества.

В этой связи разрабатываются различные технологические подхо-

ды, направленные на минимизацию влияния саморазогрева и улучшение теплопроводных характеристик полупроводниковых структур. Одним из эффективных решений является использование метода перевернутого кристаллического роста с установкой приборной структуры на подложках с высокой теплопроводностью, таких как нитрид алюминия. Другое перспективное направление заключается в применении атомарного присоединения поликристаллического алмаза, полученного методом осаждения из газовой фазы (CVD), к эпитаксиальной структуре в качестве замены традиционной стравленной кремниевой подложки, что также позволяет минимизировать эффект саморазогрева и повысить надежность функционирования устройства.

Рекомендуется использовать методику осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы для роста эпитаксиальных структур на монокристаллических подложках алмаза, что повышает стабильность и эффективность транзисторов. Также следует создавать микроканавки в кремниевых подложках, покрытых алюминидой алюминия и меди, что улучшает теплопроводность и снижает температуру устройства. Интеграция твердотельных приборов с элементами для отвода тепла из алмазоподобных материалов увеличивает стабильность и надежность работы устройств. Все вышеупомянутые технологии направлены на улучшение характеристик полупроводников, снижение деградации тока и выходной мощности, а также на повышение общей надежности. При тщательной реализации этих методов можно достичь значительного эффекта, обеспечивая долговечность современных электронных устройств.

Ширина запрещенной зоны в нитриде галлия составляет 3,4 эВ, что определяет его высокую пробивную способность. Скорость насыщения электронов в нитриде галлия в два раза выше, чем у кремния, что позволяет транзисторам достигать высоких плотностей мощности. Однако омическое нагревание ухудшает характеристики устройств, что делает проблему саморазогрева актуаль-

ной и требующей дальнейшего изучения и совершенствования технологий.

В исследовании [1] представлены результаты моделирования транзисторов на основе нитрида галлия с графеновым теплоотводом. Проведены расчёты электрических и тепловых характеристик транзисторов. Предложена новая конструкция с активной системой теплоотведения, которая включает графеновый элемент, соединённый с теплопоглощающим узлом. Этот узел эффективно выводит тепло через канавку в слое пассивации с материалом высокой теплопроводности. Система показывает более высокую эффективность по сравнению с традиционными методами. Разработка конструкции улучшает термодинамические характеристики транзисторов и открывает новые перспективы для использования в высокоомощных и высокочастотных устройствах. В исследовании акцентируется внимание на термальной системе отвода тепла, основанной на канавках с материалом высокой теплопроводности, что улучшает эксплуатационные характеристики и надежность устройства.

В данном исследовании изучаемая структура основана на сапфире толщиной 20 мкм, включающем буферный слой из GaN (1,5 мкм), спейсер из AlN (2 нм), барьерный

слой $\text{AlO}_2\text{Ga}_{0,8}\text{N}$ (20 нм) и слой пассивации из Si_3N_4 (0,2 мкм). Для улучшения теплопроводности рассматриваются три материала для канавок: арсенид бора, нитрид бора и CVD-алмаз. Геометрия канавок составляет 4,8 мкм в длину и 0,19 мкм в толщину, с промежутками по 0,1 мкм. Графеновый теплоотвод имеет размеры 5,9 мкм на 10 нм, затвор – 0,5 мкм на 0,1 мкм, общая ширина конструкции – 0,1 мм. Сравниваются электрические и тепловые характеристики двух архитектур: одна без канавки (вариант В), другая с канавкой и теплоотводом (вариант А). Канавка формируется методом реактивного ионно-лучевого травления с использованием $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{O}_2$, что обеспечивает почти вертикальные стенки и плоское дно. Нитрид кремния выбран за аналогичный коэффициент теплового расширения для осаждения CVD-алмаза, однако создание графенового теплоотводящего элемента связано с технологическими сложностями. Предлагается использовать вспомогательные мембраны из полиметилметакрилата [2].

Для симуляции многочисленных конструкций твердотельных приборов на основе нитрида галлия были использованы классическая диффузионно-дрейфовая теория и модель подвижности с учетом подхода Коэ-Томаса. Для анализа тепловых

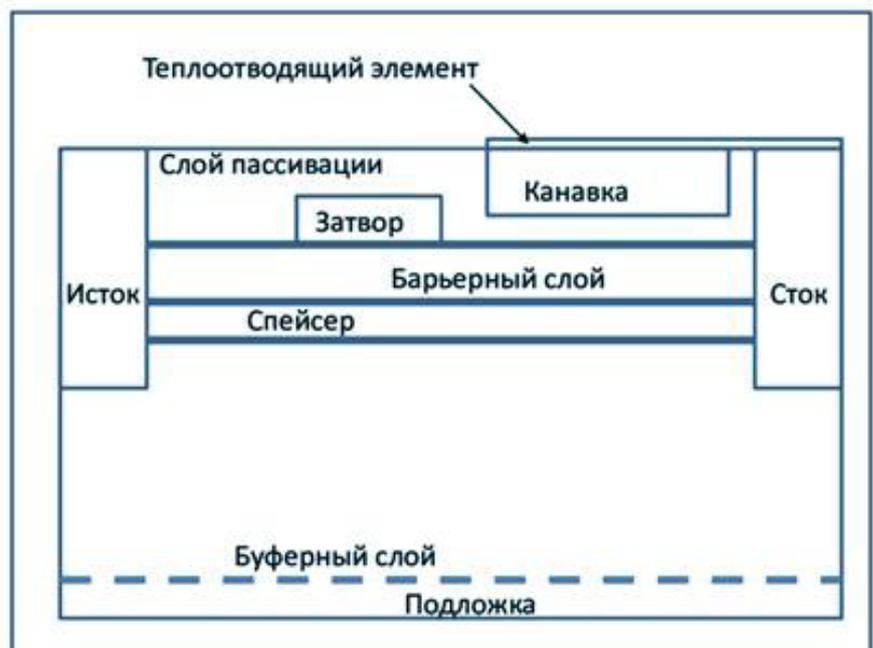


Рисунок 1 – Структура транзистора на основе нитрид-галлия с инновационной системой теплоотвода на базе канавки в пассивационном слое

процессов, возникающих в транзисторе в процессе его функционирования, был применён метод само согласованного решения системы дифференциальных уравнений. Эта система включает уравнение Пуассона, уравнения сохранения заряда и уравнение теплового потока. В условиях динамического равновесия уравнение, описывающее тепловой поток, принимает следующий вид:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T) + H = 0 \quad (1)$$

где C – теплоемкость, T – температура, κ – теплопроводность, H – скорость тепловыделения.

Модель, предназначенная для оценки теплопроводности материалов, таких как AlN, GaN, Si₃N₄, BAs, BN и CVD-алмаз, в зависимости от температуры, имеет следующий алгоритм:

$$\kappa(T) = \kappa(300K) \left(\frac{T}{300}\right)^\alpha \quad (2)$$

где α – коэффициент температурной зависимости.

Исследования коэффициента теплопроводности алюминиевого нитрида (AlN), галлиевого нитрида (GaN) и нитрида кремния (Si₃N₄) в температурном интервале от 20 до 1000 K проводились с помощью методики моделирования на основе первых принципов, а также с применением линеаризованного уравнения переноса Больцмана для фононов. На основании полученных данных были разработаны степенные функции, наиболее точно описывающие теплообменные характеристики указанных материалов в зависимости от температуры [3].

Определение теплопроводности алюминиево-галлиево-нитридного соединения (AlGaN) осуществляется по следующей формуле:

$$\kappa(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = \left(\frac{x}{\kappa(\text{AlN})} + \frac{1-x}{\kappa(\text{GaN})}\right) + (3,649 \cdot 10^{-5}T - 2,21 \cdot 10^{-3})x(1-x)^{-1}, \quad (3)$$

где x – содержание алюминия.

Теплопроводность Al₂O₃ определяется по формуле $\kappa(\text{Al}_2\text{O}_3) = 51292T^{-1,2868} + 1,7688 \cdot 10^{-3}T$. (4)

В таблице 1 приведены параметры модели, используемые для расчета теплопроводности.

В процессе проведения расчетов электрических и тепловых параметров были учтены следующие предпосылки:

Таблица 1 – Параметры модели, применяемые для расчета теплопроводности.

Параметр / Parameter	Материал / Material					
	AlN	GaN	Si ₃ N ₄	BAs	BN	CVD-алмаз
κ (300 K) (Вт/(мК))	389	258	86	1433	837	2174
α	-1,28	-1,03	-1,2	-1,63	-0,97	-1,17

Отсутствие донорной примеси в барьерном слое, что позволяет сосредоточиться на чистых свойствах полупроводникового материала без влияния дополнительных доноров, которые могут изменять электронную структуру.

Внедрение акцепторных ловушечных центров в буферный слой. Уровни этих центров расположены ниже дна зоны проводимости на величину 0,7 эВ, что подразумевает наличие специфических энергетических уровней, влияющих на транспортные характеристики носителей заряда. Распределение плотности состояний было выбрано в соответствии с профилем "Low-Fe", представленным в работе [4], что обеспечивает корректное моделирование полупроводниковых свойств.

Нулевое контактное тепловое сопротивление между подложкой и окружающей средой, а также между правой стороной теплоотводящего элемента и окружающей средой. Данная оптимизация предназначена для поддержания постоянной температуры как на нижней поверхности подложки, так и на правом крае теплоотводящего элемента, что существенно влияет на стабильность тепловых характеристик системы.

В системе компьютерного проектирования были обнаружены ограничения по данным о графене, что вынудило рассматривать материал теплоотводящего элемента в качестве проводника с высокой теплопроводностью, равной 5000 Вт/(м·К) [5]. Данное приближение играет ключевую роль в точности тепловых расчетов, влияя на эффективность отвода тепла.

На рисунке 2 представлена сток-затворная характеристика и зависимость передаточной проводимости (крутизны) от напряжения затвор-исток (VЗИ) транзистора на основе нитрида галлия при фиксированном напряжении сток-исток (VСИ), равном 0,1 эВ. Данные результаты критично важны для понимания механики работы полупроводниковых устройств на основе нитрида галлия и могут быть использованы для дальнейших исследований в области микроэлектроники и оптоэлектроники.

При низком напряжении между стоком и истоком температура силового транзистора, как правило, приближается к температуре окружающей среды. В таких условиях входные электрические характеристики остаются неизменными для

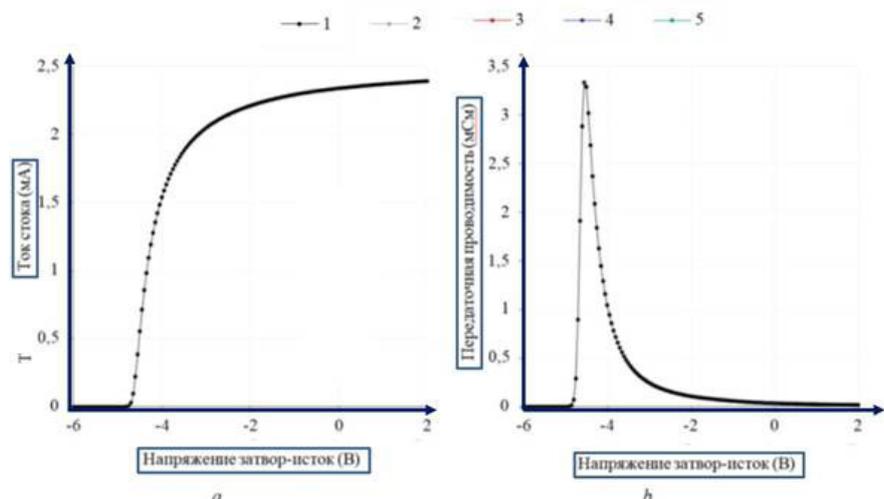


Рисунок 2 – Исследование входных характеристик полевых транзисторов с напряжением VСИ = 0,1 В: а) Сток-затворная характеристика; б) Влияние напряжения затвор-исток на передаточную проводимость.

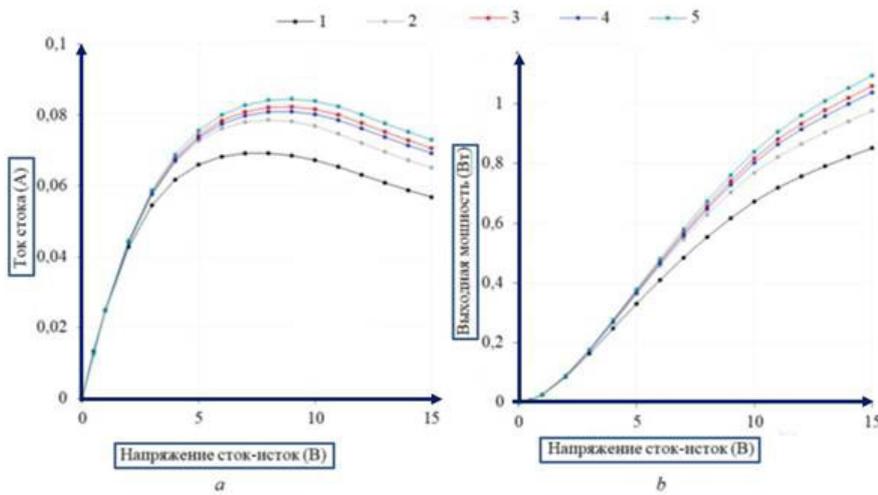


Рисунок 3 – Научное исследование выходных характеристик транзисторных конструкций с заданным уровнем выходного напряжения ($V_{ЗИ} = 2 \text{ В}$): Сравнительный анализ сток-истоковых характеристик и зависимости выходной мощности от сток-истокового напряжения для конструкций А, В, С, D и Е.

всех рассмотренных конструктивных решений.

На рисунке 3 представлены характеристики между стоком и истоком, а также зависимости выходной мощности от напряжения сток-исток ($V_{ЗИ} = 2 \text{ В}$) для выбранных конфигураций транзисторов на основе нитрида галлия. Использование CVD-алмаза в качестве материала для осаждения в канавке слоя пассивации приводит к заметному увеличению тока стока и, соответственно, выходной мощности. При фиксированных значениях $V_{ЗИ} = 2 \text{ В}$ и $V_{СИ} = 15 \text{ В}$ наблюдается прирост выходной мощности на 28,5% по сравнению с устройствами, не обладающими системой теплоотведения. Конкретные значения демонстрируют рост тока стока с 0,057 А до 0,073 А, в то время как выходная мощность увеличивается с 0,852 Вт до 1,095 Вт.

Аналогично, для транзисторов, в конструкции которых используются слои арсенида бора и нитрида бора, приросты составляют 24,3% и 21,8% соответственно. Для этих конструкций были получены значения тока стока 0,071 А и 0,069 А, а выходные мощности составили 1,059 Вт и 1,038 Вт. Однако, в случае системы теплоотведения, состоящей только из теплоотводящего элемента на основе графена, наблюдается более скромное увеличение тока стока и выходной мощности, составившее 14,6%.

Эти результаты подчеркивают значимость выбора материалов и конструктивных решений для оптимизации параметров работы тран-

зисторов на основе нитрида галлия, а также влияние эффективных теплоотводящих систем на их характеристики.

Результаты исследования тепловых характеристик конструктивных вариантов транзисторов на основе нитрида галлия (GaN) представлены на рисунке 4. В данной работе продемонстрированы фрагменты профилей распределения тепловыделения, полученные расчетным путем в непосредственной близости к затвору при офисном напряжении между стоком и истоком ($V_{ЗИ}$) равном 2 В и напряжении на затворе ($V_{СИ}$) равном 15 В. Координата $x = 3,5 \text{ мкм}$, отмеченная на рисунке, соответствует правой границе затвора [6].

Зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток

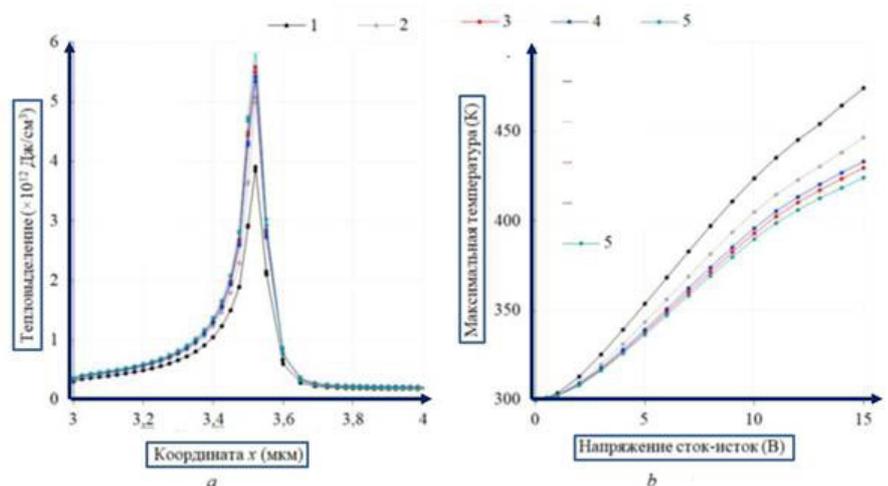


Рисунок 4 – Исследование тепловых характеристик: профили распределения тепловыделения вдоль канала при различных напряжениях и зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток.

проиллюстрированы на рисунке 4, а. Визуально заметны пики тепловыделения, расположенные на границе затвора со стороны стока. Использование CVD-алмаза в качестве материалы, осаждаемого в канавке слоя пассивации, приводит к увеличению максимального локального омического нагрева на 52,5% по сравнению с устройством, не имеющим системы теплоотвода, с $3,906 \cdot 10^{12}$ до $5,957 \cdot 10^{12}$ Дж/см³. При этом фиксируется снижение максимальной температуры на 50,2 К (с 474,3 до 424,1 К).

Также, при осаждении слоев арсенида бора (GaAs) и нитрида бора (BN) было отмечено увеличение максимального омического нагрева на 42,8% и 38,7% соответственно, достигая значений $5,578 \cdot 10^{12}$ и $5,419 \cdot 10^{12}$ Дж/см³. В этих случаях наблюдается сокращение максимальной температуры на 44,7 К и 41,1 К, снижаясь до 429,6 К и 433,2 К соответственно. Если система теплоотвода включает лишь теплоотводящий элемент на графеновой основе, максимальный омический нагрев возрастает на 29,8%, достигая значения $5,072 \cdot 10^{12}$ Дж/см³, а максимальная температура уменьшается на 27,5 К, достигая 446,8 К.

Таким образом, проведенное исследование подчеркивает важность выбора материалов для систем теплоотвода и их влияния на тепловые характеристики транзисторов на основе нитрида галлия, что может существенно повлиять на эффективность и надежность таких устройств в практических приложениях.

Заключение

В данном исследовании представлена инновационная архитектура твердотельного устройства (ТВПЭ), основанного на нитриде галлия, с усовершенствованной системой теплового отвода. Ключевой особенностью данной конструкции является использование специально сконструированной канавки в слое пассивации, в которую внедрён материал с высокой теплопроводностью.

Для количественной оценки электрических и тепловых характеристик предложенной модели было проведено численное моделирование трёх вариантов, в которых в качестве материала заполнения канавки использовались: арсенид бора, нитрид бора и CVD-алмаз. Результаты этих вычислений подтвердили высокую эффективность новой системы теплового отвода, которая существенно снижает влияние эффекта саморазогрева и значительно улучшает характеристики транзистора.

В процессе исследования было выявлено, что оптимальные результаты работы системы теплоотведения были получены при использовании CVD-алмаза. При установленных входном напряжении $V_{ЗИ} = 2$ В и коллекторном напряжении $V_{СИ} = 15$ В наблюдалось увеличение выходной мощности на 28,5%, в то время как максимальная температура устройства снижалась на 50,2 К. Эти данные свидетельствуют о высоком потенциале применения исследуемой конструкции телевыпускающих устройств в современных электронных системах.

Список литературы

Нитрид-галлиевый транзистор с высокой подвижностью электронов с эффективной системой теплоотвода на основе графена. Доклады БГУИР. 2020;18(3):72-80. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-3-72-80. Volcheck V.S., Lovshenko I.Yu., Shandarovich V.T., Dao Dinh Ha. [Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor with an Effective Graphene-Based Heat Removal System]. Doklady BGUIR = Doklady BGUIR. 2020;18(3):72-80. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-3-72-80.

Кобальт-цеолитные катализаторы синтеза Фишера-Тропша, содержащие металлический алюминий различных типов / Е. Ю. Асалиева, Л. В. Синева, В. З. Мордкович // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2023. – Т. 66, № 10. – С. 44-51. – DOI 10.6060/ivkkt.20236610.12y.

Optimization of heterostructure transistor parameters for the monolithic integrated circuits of the amplifying path of a medical radiothermograph / V. G. Tikhomirov, S. V. Chizhikov, A. G. Gudkov [et al.] // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2022. – Vol. 15, No. S3.2. – P. 326-330. – DOI 10.18721/JPM.153.260.

Dao Dinh Ha, Trung Tran Tuan, Volcheck V.S., Stempitsky V.R. Iron-Induced Acceptor Centers in the Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor: Thermal Simulation and Analysis. 2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). 2019:308-312. DOI: 10.1109/ATC.2019.8924506.

Гетероструктурный транзистор для энергоэффективного малошумящего усилителя радиотермографа на основе монолитных интегральных схем / А. Г. Гудков, В. Г. Тихомиров, С. В. Чижиков // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 3. – С. 166-173. – DOI 10.18127/j00338486-202303-16.

Исследование влияния погрешностей изготовления на параметры транзисторов для монолитных интегральных схем СВЧ и выявление ключевых факторов, определяющих стабильность их работы в составе миниатюрного радиотермографа / В. Г. Тихомиров, С. В. Чижиков // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. – 2022. – Т. 14, № 4. – С. 25-36. – DOI 10.18127/j22250980-202204-03.

Аветисян Артур Сергеевич

Родился в 1999 году. В 2022 году окончил Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрНИТУ), по специальности «Электроснабжение». В настоящее время является магистрантом кафедры «Электроснабжения и электротехники». Опыт работы 6 месяцев. Имеет 2 публикации ВАК, 25 РИНЦ.

Avetisyan Artur Sergeevich

Born in 1999. In 2022, he graduated from the Irkutsk National Research Technical University (IRNTU), majoring in Electrical Supply. Currently he is a master's student in the Department of Electrical Supply and Electrical Engineering. Work experience 6 months. Has 2 publications of the Higher Attestation Commission, 25 RSCI.

Исследование вопроса влияния технологических отклонений на работоспособность машин постоянного тока, работающих в составе бортовых электротехнических комплексов

// STUDY OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL DEVIATIONS ON THE PERFORMANCE OF DC MACHINES OPERATING AS PART OF ON-BOARD ELECTRICAL SYSTEMS //

Саксонов А.С., к.т.н., Самарский государственный технический университет, г. Самара

Козловский В.Н., д.т.н., Самарский государственный технический университет, г. Самара

Корольчук Д.С. Самарский государственный технический университет, г. Самара

В последние десятилетия происходит насыщение бортового электротехнического комплекса (БЭК) транспортных средств (ТС) новыми электрокомпонентами, работающими в составе систем, нацеленных на повышение комфорта, безопасности и эксплуатацион-

ной эффективности [1, 2], причем, значительная часть внедряемых электрокомпонентов основана на электромеханических преобразователях энергии представленных в виде электродвигателей постоянного тока [3]. Как итог – массовость выпуска электродвигателей постоянного тока для транспортного машиностроения неуклонно увеличивается. Статистически можно предположить, что увеличение объема выпуска транспортных электрических машин постоянного тока приведет к увеличению количества таких типов дефектов как конструкционные, технологические и эксплуатационные.

Ключевые слова: транспорт; электромеханические преобразователи энергии; отказоустойчивость машин постоянного тока.

In recent decades, the on-board electrical complex (OEC) of vehicles (TS) has been saturated with new electrical components operating as part of systems aimed at increasing comfort, safety and operational efficiency [1, 2], and a significant part of the introduced electrical components are based on electromechanical energy converters presented in the form of DC electric motors [3]. As a result, the mass production of DC electric motors for transport engineering is steadily increasing. Statistically, it can be assumed that an increase in the production volume of DC electric transport machines will lead to an increase in the number of such types of defects as structural, technological and operational.

Key words: transport; electromechanical energy converters; fault tolerance of DC machines.

К конструкционным дефектам электрических машин можно отнести, например, выбор подшипников качения с несоответствующей расчету грузоподъемностью, к технологическим – несовпадение геометрических осей ротора и статора вследствие некачественной механической обработки поверхностей подшипниковых щитов и вала, некачественной зачеканкой подшипников; к эксплуатационным – тепловой пробой статорной обмотки машины из-за нарушений условий эксплуатации (завышение фактического превышения температуры статорной обмотки над температурой окружающей среды).

Коллективом авторов ранее проведен ряд исследований, направленных на установление связи между технологическими дефектами в конструкции синхронных электриче-

ских машин, работающих в качестве автомобильных генераторов и их выходными электротехническими и электромеханическими параметрами. В работах [4-7] последовательно показано, что несоосность между статором и ротором синхронного автомобильного генератора возникает как следствие некачественной механической обработки элементов конструкции ряда деталей, таких как подшипниковые щиты, вал ротора, подшипники качения; нарушением технологии изготовления этих деталей, а также ошибками при задании полей допусков размерных геометрических параметров элементов конструкции, которые ключевым образом влияют на формирование несоосности статора и ротора. В результате воздушный зазор синхронной электрической машины стано-

вится неравномерным, что приводит к тому, что поток вектора магнитной индукции в пространстве воздушного зазора также становится неравномерным (изменяется сопротивление магнитной цепи машины, изменяются синхронные индуктивные сопротивления). В итоге неравномерное распределение потока вектора магнитной индукции выливается в возникновение электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору, которая постепенно разрушает подшипники [7].

Согласно [8, 9] в машинах постоянного тока также возможно возникновение электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору, которая способна повлиять на работоспособность подшипниковых узлов и щеточно-коллекторного узла.

Для прояснения картины обратимся к теории математического моделирования электрических машин [10].

Запишем основные уравнения, описывающие процессы электро-механического преобразования энергии (1), (2), (3):

$$-u_{я} = -e_{\text{рез}} + 2\Delta u_{\text{щ}} + R_{\text{ц}я} i_{\text{ц}я} + L_{\text{ц}я} \frac{d}{dt} i_{\text{ц}я} - M_{e0} \frac{d}{dt} i_{\text{цв}} \quad (1)$$

где $e_{\text{рез}}$ – ЭДС вращения, В; $\Delta u_{\text{щ}}$ – падение напряжения на щеточном контакте, В; $R_{\text{ц}я}$ – активное сопротивление цепей якоря, Ом; $i_{\text{ц}я}$ – ток якоря, А; $L_{\text{ц}я}$ – индуктивность якорных цепей, Гн; M_{e0} – обратный коэффициент между цепью возбуждения и обмоткой якоря; $i_{\text{цв}}$ – ток индуктора, А.

$$u_{\text{в}} = R_{\text{цв}} i_{\text{цв}} + L_{\text{цв}} \frac{d}{dt} i_{\text{цв}} - M_{eп} \frac{d}{dt} i_{\text{ц}я} \quad (2)$$

где $L_{\text{цв}}$ – индуктивность обмотки возбуждения, Гн; $M_{eп}$ – прямой коэффициент между цепью возбуждения и обмоткой якоря.

$$M_{\text{эм}} = C_e n \Phi_{\text{рез}} \quad (3)$$

где C_e – машинная постоянная Арнольда; n – частота вращения якоря, об/мин; $\Phi_{\text{рез}}$ – результирующий магнитный поток машины, Вб.

Теперь запишем выражение для определения ЭДС якоря (4):

$$E_a = \frac{2p}{2a} \sum B_{\delta} l_{\delta} v \quad (4)$$

где p – число полюсов машины; a – число параллельных ветвей якорной обмотки; B_{δ} – индукция в воздушном зазоре, Тл; l_{δ} – активная длина якоря, м; v – окружная скорость вращения якоря, м/с.

Приняв то, что природа электромагнитных процессов, происходящих в активной зоне машины постоянного тока близка к природе этих процессов в активной зоне синхронной машины можно предположить, что неравномерный воздушный зазор повлечет за собой неравномерное распределение индукции в его пространстве, и как следствие – возникновение электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору. Вдобавок, как видно из формул (1)-(3), возникнет пульсация якорного напряжения, произойдет изменение индуктивностей обмоток

якоря и индуктора, возникнет пульсация электромагнитного момента, последнее может существенно сказаться на эксплуатационных показателях машины.

Если рассматривать несоосность статора и ротора применительно к мощным транспортным электрическим машинам, таким как тяговые двигатели локомотивов, трамваев и электромобилей, последняя повлияет на условия коммутации, определяющаяся величиной реактивной ЭДС якоря, которая зависит от линейных геометрических размерных параметров, таких как число витков в коммутируемой секции, так и от параметров рассеяния это проследивается из нижеприведенной формулы [8] (5):

$$E_p = 2\omega_c l_i A u \lambda \cdot 10^{-5} \text{ В} \quad (5)$$

где ω_c – число витков в коммутируемой секции якорной обмотки; l_i – активная длина индуктора, м; A – линейная нагрузка машины, А/м; u – окружная скорость вращения коллектора, м/с; λ – проводимость рассеяния, См.

Проводимость рассеяния λ существенно зависит от геометрии зубцов якоря, а также от конфигурации воздушного зазора, а значит и реактивная ЭДС изменит свое значение, что в итоге может вылиться в повышенное искрение, и как следствие приведет к ускоренному выходу из строя коллектору.

Проведя аналитику, можно заметить, что несоосность между подвижной и неподвижной частями машины постоянного тока способна нанести куда больший вред, чем в случае с синхронной машиной, работающей в составе автомобильной генераторной установки; в случае с автомобильной генераторной установкой, несоосность приводит только к разрушению подшипников, в случае с машиной постоянного тока несоосность способна привести не только к разрушению подшипников, но и к преждевременному выходу из строя щеточно-коллекторного узла.

Для того, чтобы исследовать механизм формирования несоосности в машине постоянного тока, работающих в составе транспортных электрокомпонентов, а также установить

взаимосвязи между несоосностью и электротехническими и электро-механическими характеристиками необходимо провести анализ доступных источников. Авторами этой статьи выделено две работы, затрагивающие вопросы технологических дефектов электрических машин.

В работе [11] авторы затрагивают вопрос влияния несоосности статора и ротора вентильного двигателя с постоянными магнитами. С использованием конформных преобразований ими разработана математическая модель, позволяющая установить связь между величиной несоосности и изменением магнитной индукции в воздушном зазоре машины (6):

$$t = \frac{(A+1)z - (z'_1 A + z_1)}{(A-1)z - (z'_1 A - z_1)} \quad (6)$$

где $A = \sqrt{\frac{r_2^2 - (d+r_1)^2}{r_2^2 - (d-r_1)^2}}$ описывает

положение смещение ротора относительно статора; z и z'_1 – диаметральные точки внутренней и наружной окружностей, м; r_1 и r_2 – радиусы внутренней и наружной окружностей, м; d – смещение центров окружностей, м.

Выражение магнитной индукции можно записать следующим образом (7):

$$B(z) = B(t) \cdot \frac{(A+1) \cdot [(A-1)z - (z'_1 A - z_1)] - (A-1) \cdot [(A+1)z - (z'_1 A + z_1)]}{[(A-1)z - (z'_1 A - z_1)]^2} \quad (7)$$

где $B(t)$ – индукция в воздушном зазоре машины в функции времени, Тл.

Несоосность статора и ротора, как это было видно выше приводит к пульсации электромагнитного момента, авторами выведено выражение, позволяющее определить величину пульсации электромагнитного момента в зависимости от величины несоосности статора и ротора (8):

$$M(\varphi) = \frac{1}{2\omega} \left[e_{A0}(\varphi) i_a(\varphi) + e_{A0} \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \cdot i_a \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) + e_{A0} \left(\varphi - \frac{4\pi}{3} \right) i_a \left(\varphi - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \quad (8)$$

где p – число полюсов машины; ω – угловая частота вращения якоря, рад/с; $e_{A0}(\varphi)$ – мгновенное значение фазного напряжения статорной обмотки в функции угла поворота якоря, В; $i_a(\varphi)$ – мгновенное значение тока статора в функции угла поворота якоря, А; φ – угол поворота якоря, рад.

Стоит отметить, что разработанная авторами статьи математическая модель хорошо проработана с точки зрения математики, с помощью нее можно понять связь между несоосностью статора и ротора вентильного двигателя, но в ней не учтены технологические факторы, влияющие на формирование несоосности, а также в ней не отражена связь между проектированием машины и возникновением несоосности статора и ротора. Тем не менее математическая модель имеет научную ценность и будет использована авторами данной работы в своих исследованиях.

Теперь рассмотрим работу [12]. В этой работе автором разрабатывается комплекс вопросов, касающийся обеспечения рационального проектирования и технологической подготовки производства синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов и асинхронных машин с массивным ротором. В ходе работы автор решает ряд конструкционных, технологических и материаловедческих проблем путем разработки комплекса инструментов для проектирования электрических машин. Одним из вопросов, который рассматривает автор в работе является разработка инженерных инструментов учета влияния электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору синхронной машины с постоянными магнитами при проектировании электрической машины в режимах холостого хода и под нагрузкой. Результаты работы, полученные автором, могут быть полезны при исследованиях несоосности машин постоянного тока.

Таким образом, проанализировав аналитические соотношения, а также две работы, касающиеся этой проблемы, следует заключить, что несоосность статора и ротора в машине постоянного тока может привести к ряду негативных последствий, таких как разрушение подшипников и выход из строя щеточно-коллекторного узла. Для подтверждения вынесенной гипотезы, коллективом авторов будет проведен ряд научно-исследовательских работ, цель которых – понимание связи между технологическими по-

грешностями, ошибками при проектировании в машинах постоянного тока, используемых в транспортных средствах с их отказоустойчивостью.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Semiconductors – the Next Wave. — Текст: электронный // Deloitte: [сайт]. — URL: <https://www2.deloitte.com/tw/en/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/semiconductor-next-wave.html> (дата обращения: 08.08.2024)

2. Козловский, В. Н. Комплексная программа улучшений автосборочного производства / В. Н. Козловский, Д. И. Благовещенский, О. Д. Ибрагимов // Автомобильная промышленность. – 2023. – № 10. – С. 1-6.

3. Ютт, В.Е. Электрооборудование автомобилей: учебник для студентов автомобильных специальностей высших учебных заведений / В.Е. Ютт. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2006. – 319 с.

4. Инженерный инструмент управления влиянием несимметрии магнитной цепи синхронной машины на силу одностороннего притяжения / Ю. А. Макаричев, В. Н. Козловский, А. С. Саксонов, Я. А. Ратцев // СТИН. – 2023. – № 7. – С. 19-22.

5. Козловский, В. Н. Компьютерное моделирование электромагнитной силы, возникающей вследствие неравномерности воздушного зазора электромеханического преобразователя / В. Н. Козловский, А. С. Саксонов, Е. В. Стрижакова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 165-168.

6. Саксонов, А. С. Расчетно-статистический эксперимент по методу Монте-Карло как основа инструмента управления качеством транспортных электромеханических преобразователей / А. С. Саксонов, В. Н. Козловский, А. В. Крицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 6. – С. 286-292.

7. Компьютерное моделирование как инструмент обеспечения качества проектирования транспортных генераторных установок / А. С. Саксонов, В. Н. Козловский, У. В. Брачу-

нова, В. А. Губанов // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении : III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, Тула, 06–08 апреля 2022 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2022. – С. 253-255.

8. Вольдек, А.И. Электрические машины переменного тока: учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов – Санкт-Петербург: Питер, 2010. – 350 с.

9. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И.П. Копылов, – Москва: Юрайт, 2011. – 767 с.

10. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебное пособие / И.П. Копылов, – Москва: Высшая школа, 2001. – 327 с.

11. Решение задач диагностики электрических машин с использованием SCADA-системы / А. А. Афанасьев, В. С. Генин, Л. Н. Васильева [и др.] // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности : Материалы V Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 03 декабря 2021 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2021. – С. 311-319.

12. Кручинина, И. Ю. Высокоиспользованные электрические машины для современной энергетики (проблемы создания и исследований) : специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кручинина Ирина Юрьевна. – Санкт-Петербург, 2012. – 34 с.

Саксонов Александр Сергеевич

Родился в 1966 году. В 2020 году окончил Тольяттинский государственный университет по специальности «Электроэнергетика и электротехника». В 2023 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Совершенствование инструментальной обеспечения качества автомобильного генератора при проектировании и в производстве». Опыт работы – 7 лет. В настоящее время является доцентом ФГБОУ ВО Самарский государственного техническо-

го университета, на кафедре «Теоретическая и общая электротехника». Автор 36 статей в изданиях ВАК, 5 статей в базах Scopus/WoS, 2 свидетельства на регистрацию программы для ЭВМ. Награжден нагрудным знаком «За успехи в высшем образовании и научной деятельности»

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.

Корольчук Дарья Сергеевна

Родилась в 2002 году. Является студентом ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет. Специальность – «Электроэнергетика и электротехника».

Saxonov Alexander

Was born in 1966. In 2020, he graduated from Tolyatti State University with a degree in Electric Power Engineering and Electrical Engineering. In 2023, he defended his PhD thesis on the topic «Improving the tools for ensuring the quality of an automobile generator in design and production.» Work experience – 7 years. Currently, he is an associate professor at the Samara State Technical University, at the Department of Theoretical and General Electrical Engineering. He is the author of 36 articles in the publications of the Higher Attestation Commission, 5 articles in the Scopus/WoS databases, 2 certificates for the registration of a computer program. He was awarded the badge «For achievements in higher education and scientific activity»

Kozlovskiy Vladimir

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.

Korolchuk Daria

Was born in 2002. He is a student at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Samara State Technical University. Specialty – “Power engineering and electrical engineering”.

О некоторых мерах по исключению максимально допустимых износов контактирующих поверхностей узла пятник-подпятник и элементов узла гашения колебаний длиннобазных вагонов-платформ

// TO THE ISSUE OF MEASURES TO EXCLUDE THE MAXIMUM PERMISSIBLE WEAR OF THE CONTACTING SURFACES OF THE CENTER PLATE UNIT AND THE DAMPING UNIT ELEMENTS OF LONG-BASE FLATCARS //

**Петров Г.И., д.т.н., профессор,
Российский университет
транспорта,
г. Москва, РФ**

**Сергеев И.К., к.т.н., доцент,
Российский университет
транспорта,
г. Москва, РФ**

**Пищик А.В.,
Российский университет
транспорта,
Москва, РФ**

Износ контактирующих поверхностей узлов и деталей является актуальной проблемой практически для всех отраслей народного хозяйства. Ученые-железнодорожники особое внимание уделяют вопросам износа узлов и деталей вагонов, включая износ гребней колесных пар, контактирующих поверхностей узла пятник-подпятник, фрикционных гасителей колебания тележек, а также центрирующих балочек.

Процессы износа узлов и деталей рассмотрены с учетом трибологических характеристик взаимодействия пар трения. Приведен актуальный случай схода вагона по причине износа контактирующих поверхностей узла пятник-подпятник и фрикционных гасителей

колебаний тележек. Обобщены и проанализированы требования, предъявляемые к владельцам железнодорожного подвижного состава в части его технического состояния в Российской Федерации, Республике Беларусь и Республике Казахстан.

Предложены и обоснованы различные меры, которые позволят исключить (минимизировать) случаи схода подвижного состава по причине износа узла пятник-подпятник и узла гашения колебаний длиннобазных вагонов-платформ. Выводы по проводимому в статье исследованию базируются на анализе эксплуатации длиннобазных вагонов-платформ, что обеспечивает выстраивание цепочки «производство-наука».

Ключевые слова: безопасность движения поездов, вагонное хозяйство, износ, коэффициент трения, трибология, пятник-подпятник, фрикционный клин, центрирующая балочка, сход вагонов, правила технической эксплуатации железных дорог.

Abstract: The wear of the contacting surfaces of assemblies and parts is an urgent problem for almost all sectors of the national economy. Railway scientists pay special attention to the issues of wear of components and parts

of wagons, including wear of wheelset ridges, contacting surfaces of the center plate unit, friction dampers of bogies, as well as centering beams.

The wear processes of assemblies and parts are considered taking into account the tribological characteristics of the interaction of friction pairs. An actual case of a wagon derailment due to wear of the contacting surfaces of the center plate unit and friction dampers of bogies is presented. The requirements for owners of railway rolling stock for their technical condition in the Russian Federation, the Republic of Belarus and the Republic of Kazakhstan are summarized and analyzed.

Various measures are proposed and justified that will eliminate (minimize) cases of rolling stock derailment due to wear of the center plate unit and the damping unit of long-wheelbase flatcars. The conclusions of the research conducted in the article are based on the analysis of the operation of long-wheelbase flatcars, which ensures the establishment of the production-science cycle.

Keywords: train safety, carriage facilities, wear, coefficient of friction, tribology, center plate unit, friction wedge, centering beam, derailment of wagons, rules of technical operation of railways.

Введение

Безопасность движения поездов – ключевая составляющая успешного функционирования железнодорожного транспорта [1]. За время, прошедшее с момента появления первой железной дороги, в вопросе обеспечения безопасности движения накоплен значительный опыт.

Особая роль в обеспечении безопасности перевозочного процесса отводится вагонному хозяйству. С момента образования самостоятельной отрасли железнодорожного транспорта вагонного хозяйства, прошло более 90 лет. За это время было внедрено большое количество передовых методов выявления

неисправностей вагонов, ежегодно совершенствуются подходы в сфере вагоностроения и вагоноремонта, происходит кратное увеличение количества приборов контроля технического состояния вагонов на ходу поезда (особое внимание этому вопросу уделяет холдинг ОАО «Российские железные дороги»). В насто-

ящее время накопленный вагонным хозяйством опыт и все технические средства должны применяться для повышения безопасности движения поездов. Особое внимание, на наш взгляд, должно уделяться тем грузовым вагонам, которые максимально интенсивно эксплуатируются на сети железных дорог (имеют наибольший показатель оборота вагона). К такому подвижному составу традиционно относят длиннобазные вагоны-платформы для перевозки крупнотоннажных контейнеров.

Основная часть

Железнодорожные контейнерные перевозки показывают ежегодный стабильный рост, поэтому на инфраструктуре ОАО «Российские железные дороги» наблюдается постоянный прирост парка длиннобазных вагонов-платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров. Вагоностроители Российской Федерации выпускают достаточно широкий модельный ряд указанных вагонов, при этом все они подвержены возникновению аналогичных неисправностей. Анализ неисправностей длиннобазных вагонов-платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров показывает, что большинство неисправностей связано с износом контактирующих поверхностей узлов и деталей, а именно: износ гребней колесных пар [2], износ контактирующих поверхностей узла пятник-подпятник (рис.1а), износ фрикционных клиньев тележек (рис.1б), износ центрирующих балочек (подпружиненных) (рис.1в).

В данной статье более подробно остановимся на процессах износа контактирующих поверхностей узла

пятник-подпятник. Учеными Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)) [3, 4, 5] проводилась и проводится значительная научно-исследовательская работа по решению проблем износа контактирующих поверхностей узла пятник-подпятник, в т.ч. путем математического и компьютерного моделирования. В ходе исследований определены основные причины и механизмы износа, а также предложены мероприятия по снижению его интенсивности.

Причинами износа контактирующих поверхностей узла пятник-подпятник является:

- эксплуатация грузовых вагонов на участках железных дорог, где допускаются отклонения в содержании верхнего и нижнего строения пути;
- образование абразива и коррозии на контактирующих поверхностях;
- отсутствие необходимого количества смазки (отсутствие лубрикации);
- характерность конструкции вагона (длинная база);
- сверхнормативный пробег вагона в период между плановыми ремонтами (особенно – длиннобазных вагонов-платформ).

Одним из авторов [6] проводился анализ работы узла пятник-подпятник длиннобазных вагонов-платформ. В процессе исследования установлено, что пробег значительной части длиннобазных вагонов-платформ с момента постройки до поступления в первый плановый ремонт в среднем составляет 350 тыс. км. (при норме не более 210 тыс.км.) [7]. К моменту достижения указанного пробега большинство вагонов

имеет сверхнормативный износ контактирующих поверхностей. Это сопряжено с тем, что определенная часть вагонов долгое время эксплуатируется без выполнения текущего отцепочного ремонта (ТР-1, ТР-2), что исключает возможность выявления износа узла пятник-подпятник.

По данным Проектно-конструкторского бюро вагонного хозяйства – филиала ОАО «РЖД» [8] за 2023 год в неплановый ремонт (ТР-1, ТР-2) по неисправности «ослабление крепления пятника» (код 607 отраслевого Классификатора «Основные неисправности грузовых вагонов» К ЖА 2005 05) отцеплено 2,3 тыс. грузовых вагонов парка Российской Федерации, что на 23% больше, чем за аналогичный период прошлого года. Следует отметить, что указанный код неисправности применяется при выявлении обрыва (отсутствия, ослабления) болта или заклепки крепления пятника. Износ опорных поверхностей узла пятник-подпятник можно выявить при выполнении текущего отцепочного ремонта с выкаткой тележек и плановых видов ремонта (деповской и капитальной). В связи с тем, что износ опорных поверхностей узла пятник-подпятник не выявляется в эксплуатации, учет возникновения указанных отклонений (предельного износа опорных поверхностей) может проводиться только при выполнении вышеуказанных видов ремонта.

Износ контактных поверхностей узла пятник-подпятник может рассматриваться с учетом трибологических параметров материалов контакта, которые оказывают значительное влияние на коэффициент трения (пары трения «металл-ме-



а

б

в

Рис. 1. Неисправности длиннобазных вагонов-платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров, связанные с износом контактирующих поверхностей узлов и деталей:

а – износ контактирующей поверхности пятника, б – сверхнормативный износ фрикционного клина тележки, в – износ ограничительных выступов центрирующей балочки (подпружиненной)

талл», «чугун-металл»). Вопросы закономерностей и условий трения изучает специальная наука – трибология (от греч. *tribo* – растираю). В глобальном смысле трибология рассматривает два явления: трение и изнашивание. В трибологии закон трения (закон Амонтона) трактуется следующим образом (1): сила трения (F_s) прямо пропорциональна контактной нагрузке (F_N), т. е.:

$$F_s = f \cdot F_N \quad (1)$$

где f – коэффициент трения.

При росте контактной нагрузки F_N сила трения F_s увеличивается так, что соотношение F_s/F_N (2) остается постоянным [9]:

$$F_s/F_N = f = \text{const.} \quad (2)$$

При рассмотрении некоторых случаев схода грузовых вагонов устанавливается, что одной из причин транспортных происшествий является неудовлетворительное состояние геометрических параметров узла пятник-подпятник.

Так, например, 04.02.2024 года на станции Кежемская Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги» допущен сход вагона № 91780460, который следовал в составе организованного грузового поезда. В ходе расследования транспортного происшествия установлено, что причиной схода послужила эксплуатация грузового вагона за пределами установленного заводом-изготовителем ресурса тележек модели 18-9896 (фактический пробег вагона на момент схода составил 361 753 км., при норме – не более 210 000 км), которая привела к превышению предельного состояния параметров узла пятник-подпятник и элементов узла гашения колебаний, предусмотренных конструкторской документацией [10].

Эксплуатация грузовых вагонов за пределами установленных заводами-изготовителями тележек назначенных ресурсов тележки назначенных ресурсов тележки по пробегу (от постройки до первого деповского ремонта) в настоящее время возможна по причине отсут-

ствия логического контроля (запрета) в системах ГВЦ (ИВЦ ЖА), который исключает эксплуатацию вагонов при достижении предельного допустимого пробега на сети железных дорог. Указанное обстоятельство может позволять владельцам вагонов использовать вагоны с превышением установленных пробегов, при условии выбора при постройке вагона единичного критерия календарной продолжительности эксплуатации вагона (критерий выражен в годах и не учитывает пробег) [11].

Пункт 130 Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [12] определяет, что ответственность за содержание в исправном техническом состоянии железнодорожного подвижного состава и соблюдение назначенного срока службы (ресурса) железнодорожного подвижного состава являются его владельцы. Схожие требования содержатся в Правилах технической эксплуатации железных дорог Республики Беларусь и Республики Казахстан [13, 14], в таблице 1 приводятся требования по ответственности за содержание подвиж-

Таблица 1

Требования, предъявляемые к владельцу железнодорожного подвижного состава в части ответственности за техническое состояние в Российской Федерации, Республике Беларусь, Республике Казахстан

Железнодорожная администрация (государство)	Нормативный документ	Требования, предъявляемые к владельцу железнодорожного подвижного состава
ОАО «Российские железные дороги» и др. (Российская Федерация)	Приказ Министерства транспорта РФ от 23 июня 2022 г. № 250 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации»	Ответственными за содержание в исправном техническом состоянии железнодорожного подвижного состава, соблюдение периодичности выполнения планово-предупредительных ремонтов, за соблюдение назначенного срока службы (ресурса) железнодорожного подвижного состава являются владельцы железнодорожного подвижного состава.
ГО «Белорусская железная дорога» (Республика Беларусь)	Постановление Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 25 ноября 2015 г. № 52 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь»	Ответственными за исправное техническое состояние, техническое обслуживание, ремонт и обеспечение установленных сроков службы железнодорожного подвижного состава являются владельцы железнодорожного подвижного состава, работники железнодорожного транспорта, непосредственно его обслуживающие.
АО «Национальная компания «Казахстан темир жолы» (Республика Казахстан)	Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 30 апреля 2015 г. № 544 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железнодорожного транспорта»	Владельцы железнодорожного подвижного состава и работники железнодорожного транспорта, непосредственно его обслуживающие, обеспечивают исправное техническое состояние, техническое обслуживание, ремонт и соблюдение установленных сроков службы железнодорожного подвижного состава.

ного состава в технически исправном состоянии на территории указанных государств. Как видно из таблицы 1, схожесть требований указывает на то, что к ответственности владельцев железнодорожного подвижного состава, курсирующему по железным дорогам упомянутых государств, предъявляются практически единые требования. Указанное обстоятельство позволяет выстраивать единые подходы в вопросе решения задач по обеспечению безопасности движения поездов.

Особую обеспокоенность, как упоминалось ранее, вызывает техническое состояние длиннобазных вагонов-платформ, так как они имеют один из самых больших пробегов на сети. Данное положение вещей приводит к повышенному износу контактирующих поверхностей узлов и деталей грузового вагона.

Актуальность поднятой темы подтверждает тот факт, что 14-15.02.2024 года в Дирекцию Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества (далее – ЦСЖТ) экспертная группа по нормативно-техническому регулированию вопросов безопасности движения комиссии по безопасности движения направила информацию о необходимости рассмотрения вопроса об отмене единичного критерия проведения плановых видов ремонта грузовых вагонов и переходе на комбинированный критерий. Комбинированный критерий предусматривает, что в процессе эксплуатации вагона учитывается фактически выполненный объем работ, выраженный в километрах пробега, и календарная продолжительность, выраженная в годах, эксплуатации вагона от постройки (планового ремонта) до момента подачи вагона в первый (последующий) плановые ремонты. При эксплуатации вагона по указанному критерию вывод его в ремонт осуществляется при достижении одного из двух указанных показателей.

05-07.03.2024 на семьдесят седьмом заседании Комиссии вагонного хозяйства ЦСЖТ (далее – КВХ ЦСЖТ) принято решение включить указанный вопрос в повестку для очередного заседания Рабочей группы КВХ ЦСЖТ [15].

В случае принятия КВХ ЦСЖТ решения об отмене единичного критерия и переходе на комбинированный, предполагается, что ситуация с обеспечением безопасности движения поездов в вагонном хозяйствекратно возрастет. Это позволит предотвратить случаи возникновения транспортных происшествий на железнодорожном транспорте, причиной которых является отклонение в техническом содержании подвижного состава и его базовых элементов, которое возникает при перепробеге грузовых вагонов.

Дополнительным механизмом контроля за техническим состоянием длиннобазных вагонов-платформ является выполнение планового текущего отцепочного ремонта (ТР-3) или технического обслуживания с диагностированием (ТОД), при которых будет обеспечиваться контроль узла пятник-подпятник и других узлов/деталей вагона, которые наиболее подвержены отказу по причине износа контактирующих поверхностей. В настоящее время ТР-3 выполняется только некоторым моделям вагонов, которые эксплуатируются по комбинированному критерию. Считаем, что в текущих реалиях ТОД наиболее адаптирован для применения его в решении задач контроля износа узлов и деталей грузовых вагонов. В отраслевом классификаторе «Основные неисправности грузовых вагонов» К ЖА 2005 05 имеются коды 200 («диагностирование деталей тележек») и 600 («диагностирование рамы вагона»), которые позволяют переводить вагон в нерабочий парк для выполнения ТОД с выполнением утвержденных регламентных операций и при необходимости выполнять ремонт узлов и деталей грузовых вагонов.

Восстановление изношенного узла пятник-подпятник подразумевает выполнение наплавки и станочной обработки пятника рамы и подпятника надрессорной балки тележки. Данные технологические операции приводят к дополнительным трудозатратам, а также увеличению нахождения вагона в ремонте. Полагаем, что отмена единичного критерия выполнения плановых видов ремонта, а также рассмотрение возможности реализации дополни-

тельных механизмов контроля (ТР-3, ТОД) позволит обеспечить предиктивную диагностику возникновения износа контролируемых узлов. Данная мера позволит исключить длительный простой грузовых вагонов и необходимость выполнения работ по наплавке и станочной обработке пятника и подпятника на значительной части длиннобазных вагонов.

Основным научным и техническим обоснованием мер, предложенных для исключения максимально допустимых износов контактирующих поверхностей узла пятник-подпятник и элементов узла гашения колебаний длиннобазных вагонов-платформ, является то, что все они базируются на принципах предиктивной диагностики узлов и деталей подвижного состава. Например, АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКИ») в процессе НИОКР уделяет особое внимание предиктивной диагностике узлов и деталей железнодорожного подвижного состава. Для целей предиктивной диагностики широко применяется программный продукт «Универсальный механизм», а также расчетные комплексы MSC.Software (Marc, Patran, Fatigue) и Cadfem Ansys.

Отмена единичного критерия выполнения плановых видов ремонта грузовых вагонов и/или выполнение ТР-3 (ТОД) позволит обеспечить раннее выявление износа контактирующих поверхностей (отказа узлов и деталей, рассматриваемых в данной статье), что в свою очередь позволит значительно повысить эффективную работу тележек и взаимодействие их с рамой грузового вагона. Свяжем это с тем, что будет исключена возможность эксплуатации грузовых вагонов за пределами значений пробега, которые назначены изготовителями тележек и/или вагонов. Дополнительно, предложенные меры положительно скажутся на процессе ведения рекламационной работы по отказавшим узлам и деталям грузовых вагонов. При наступлении отказа узла/детали комиссия сможет учесть факт эксплуатации подвижного состава в пределах допустимых пробегов значений. Также предложенные меры, по мнению ав-

торов, позволят снизить объем претензионно-рекламационной работы в цепочке «владелец железнодорожного подвижного-вагоноремонтное предприятие (завод-изготовитель вагона и/или узла/детали)» и повысить её качество.

Выводы

Содержание железнодорожно-подвижного состава в технически исправном состоянии является важнейшей задачей владельцев подвижного состава, а контроль за его техническим состоянием владельца железнодорожной инфраструктуры. В вагонном хозяйстве безопасность движения зависит от множества факторов, которые так или иначе связаны с качеством технического обслуживания и выполнения всех видов ремонта вагонов. Не лишним будет отметить, что многое зависит и от вагоностроителей, которые на стадии проектирования и изготовления подвижного состава могут предупредить возникновение определенных неисправностей. Значимую роль в обеспечении безопасности движения поездов играют научно-исследовательские институты и транспортные университеты, которые объединяют ученых-железнодорожников, занимающихся актуальными проблемами железнодорожного транспорта. Научно-исследовательская деятельность ученых-вагонников считается одной из самых востребованных, так как от технического состояния подвижного состава напрямую зависит обеспечение безопасности движения поездов и сохранность перевозимых грузов. В статье рассмотрена актуальная для вагонного хозяйства тема, которая требует постоянного внимания со стороны заинтересованных сторон (владельцев железнодорожного подвижного состава и инфраструктуры, а также научного сообщества). Внимание государственных и межгосударственных органов к проблеме износа контактирующих поверхностей узла пятник-подпятник и фрикционных гасителей колебания тележек, свидетельствует о том, что комплексные мероприятия по повышению безопасности движения поездов в вагонном хозяйстве имеют действенный

эффект. Предложенные альтернативные механизмы контроля за техническим состоянием длиннобазных вагонов-платформ могут быть рассмотрены профильными органами как альтернатива основному решению, так и дополнительный механизм обеспечения безопасности движения поездов в вагонном хозяйстве. Работа по указанной проблематике будет продолжена в рамках научно-исследовательской и изыскательской деятельности, в т.ч. с применением программного продукта «Универсальный механизм».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Безопасность движения на железнодорожном транспорте / В. И. Гапеев, Ф. П. Пищик, В. И. Егоренко. – Минск: Полымя, 1996. – 360 с.: ил. + 1 л. схема. – ISBN 985-07-0149-8.
2. Взаимодействие пути и подвижного состава / под ред. М.Ф. Вериги. – Москва: Транспорт, 1986. – 559 с.
3. Филиппов В.Н. Особенности расчета, анализа и пути улучшения динамических показателей перспективных большегрузных вагонов: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук / Филиппов Виктор Николаевич; Моск.инст.инж.жд.тр-та (МИИТ). – Москва, 1986. – 384 с. – Библиогр.: с. 343-363.
4. Воронин Н.Н. Разработка метода оценки ресурса пятникового узла вагона по критерию износа: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук / Воронин Николай Николаевич; Моск.инст.инж.жд.тр-та (МИИТ). Москва, 1999. 16 с.
5. Курзина А.М. Способы снижения интенсивности износа гребней колесных пар грузовых вагонов: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Курзина Ангелина Михайловна; Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)). – Москва, 2021. – 171 с.
6. Васильев С.М. Анализ поврежденный узла пятник – подпятник ваго-

нов-платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров / С.М. Васильев, А.В. Пищик // Механика. Исследования и инновации. – 2021. – Вып. 14. – С. 24–28.

7. Васильев С.М., Пищик А.В. Особенности работы узла «пятник-подпятник» в вагонах-платформах для перевозки крупнотоннажных контейнеров // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XI международного науч.-практ. конф. Гомель, 2021. Ч. 1. С. 93–94.

8. Отцепки грузовых вагонов в неплановый ремонт за 2023 г. / М.С.Агафонов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2024.– №1. – С.12–13. – ISSN 1817-6089.

9. Сосновский, Л. А. Механика износоусталостного повреждения / Л. А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.

10. Информационное письмо Ространснадзора от 27.04.2024 № 2 «О контроле за межремонтным пробегом при эксплуатации грузовых вагонов» // Ространснадзор. URL:<https://rostransnadzor.gov.ru/storage/Госжелдорнадзор/Информационное%20письмо%20№2%20от%2027.04.24.pdf> (дата обращения 03.05.2024).

11. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении: утверждено на 57 заседании Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от 16-17 октября 2012 г. N 57. – 2012. – 18 с.

12. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: приказ М-ва транспорта Рос. Федерации от 23.06.2022 № 250 // НИЦ ИНФРА-М. – 2024. – 561 с.

13. Об утверждении Правил технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь: Постановление М-ва транспорта и ком-ций Рес. Беларусь от 25 ноября 2015 г. № 52 // ЭНЕРГОПРЕСС – 2022. – 762 с.

14. Об утверждении Правил технической эксплуатации железнодорожного транспорта: приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 30 апреля 2015 г. № 544 // Институт законода-

тельства и правовой информации Республики Казахстан. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011897/links> (дата обращения 03.05.2024).

15. Протокол 77 (семьдесят седьмого) заседания Комиссии вагонного хозяйства // ООО «Инженерный Центр вагоностроения Сервис». URL: https://wagon-cargo.ru/protocols_sng/protokol-77-semdesyat-sedmogo-zasedaniya-komissii-vagonnogo-khozyaystva/ (дата обращения 03.05.2024).

REFERENCES

1. Traffic safety in railway transport / V. I. Gapeev, F. P. Pishchik, V. I. Egorenko. – Minsk : Polymya, 1996. – 360 p.: ill. + 1 l. scheme. – ISBN 985-07-0149-8.

2. Interaction of track and rolling stock / edited by M.F. Verigo. – Moscow : Transport, 1986. – 559 p.

3. Filippov V.N. Features of calculation, analysis and ways to improve the dynamic performance of promising heavy-duty wagons: specialty 05.22.07 «Railway rolling stock, train traction and electrification»: dis. for the degree of Doctor of Technical Sciences / Filippov Viktor Nikolaevich; Moscow Institute of Engineering.zh.d.tr-ta (MIIT). – Moscow, 1986. – 384 p. – Bibliogr.: pp. 343-363.

4. Voronin N.N. Development of a method for assessing the resource of a Pyatnik node of a wagon according to the criterion of wear: specialty 05.22.07 «Rolling stock of railways, train traction and electrification»: abstract of a dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Voronin Nikolay Nikolaevich; Moscow Institute of Railway Engineering-ta (MIIT). Moscow, 1999. 16 p.

5. Kurzina A.M. Ways to reduce the intensity of wear on the ridges of wheel sets of freight cars: specialty 05.22.07 «Rolling stock of railways, train traction and electrification»: dis. for the degree of Candidate of Technical Sciences / Kurzina Angelina Mikhailovna; Russian University of Transport (RUT (MIIT). – Moscow, 2021. – 171 p.

6. Vasiliev S.M. Damage analysis of the pyatnik – podpyatnik node of platform wagons for the transportation of large-capacity containers / S.M. Vasiliev, A.V. Pishchik // Mechanics.

Research and innovation. – 2021. – Vol. 14. – С. 24–28.

7. Vasiliev S.M., Pishchik A.V. Features of the operation of the Pyatnik–podpyatnik node in platform wagons for the transportation of large-capacity containers // Problems of transport safety: materials of the XI International. scientific and practical conf. Gomel, 2021. Part 1. pp. 93-94.

8. Uncoupling freight wagons for unplanned repairs in 2023 / M.S.Agafonov // Wagons and wagon economy. – 2024. No. 1. pp.12-13. ISSN 1817-6089.

9. Sosnovsky, L. A. Mechanics of wear-fatigue damage / L. A. Sosnovsky. Gomel: BelGUT, 2007. – 434 p.

10. Information letter of Rostransnadzor dated 04/27/2024 No. 2 «On the control of inter-repair mileage during the operation of freight wagons» // Rostransnadzor. URL: <https://rostransnadzor.gov.ru//storage/Goszheldornadzor/Information%20pismo%20No.2%20ot%2027.04.24.pdf> (accessed 05/03/2024).

11. Regulations on the system of maintenance and repair of freight wagons admitted to circulation on public railways in international traffic: approved at the 57th meeting of the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol dated October 16-17, 2012 N 57. – 2012. – 18 p.

12. On approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation: Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation. Federation dated 06/23/2022 No. 250 // SIC INFRA-M. – 2024. – 561 p.

13. On approval of the Rules of technical operation of the railway in the Republic of Belarus: Resolution of the Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus dated November 25, 2015 No. 52 // ENERGOPRESS – 2022. – 762 p.

14. On approval of the Rules of technical operation of railway transport: Order of the Minister for Investment and Development of the Republic of Kazakhstan dated April 30, 2015 No. 544 // Institute of Legislation and Legal Information of the Republic of Kazakhstan. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011897/links> (accessed 05/03/2024).

15. Minutes of the 77th (seventy-seventh) meeting of the Wagon Industry Commission // LLC «Engineering Center of car building Service». URL: https://wagon-cargo.ru/protocols_sng/protokol-77-semdesyat-sedmogo-zasedaniya-komissii-vagonnogo-khozyaystva/ (accessed 05/03/2024).

Петров Геннадий Иванович

Родился в 1957 году. В 1980 году окончил Московский институт инженеров железнодорожного транспорта, по специальности вагоностроение и вагонное хозяйство. Доктор технических наук, профессор, академик Российской академии транспорта, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта. Тема диссертации – «Оценка безопасности движения вагонов при отклонениях от норм содержания ходовых частей и пути». Имеет 102 публикации в РИНЦ

Сергеев Иван Константинович

Родился в 1997 году. В 2019 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», по специальности подвижной состав железных дорог. Вагоны. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта. Тема диссертации – «Моделирование продольных сил, возникающих при взаимодействии порожних и малозагруженных вагонов в грузовых поездах». Имеет 31 публикацию в РИНЦ

Пищик Александр Всеволодович

Родился в 1996 году. В 2020 году окончил Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», по специальности подвижной состав железных дорог. Место работы: с 2015 года прикрепленный для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук без освоения программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта. Имеет 11 публикаций в РИНЦ

Petrov Gennady Ivanovich

Born in 1957. In 1980 he graduated from the Moscow Institute of Railway Transport Engineers with a degree in carriage building and carriage maintenance. Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Transport, Head of the Department of "Wagons and Carriage Management" of the Russian University of Transport. The topic of the dissertation is "Assessing the safety of carriages in the event of deviations from the standards for the maintenance of running gears and tracks." Has 102 publications in the RSCI.

Sergeev Ivan Konstantinovich

Born in 1997. In 2019, he graduated from the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport", majoring in railway rolling stock. Cars. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Wagons and Carriage Facilities" of the Russian University of Transport. The topic of the dissertation is "Modeling of longitudinal forces arising during the interaction of empty and lightly loaded cars in freight trains." Has 31 publications in the RSCI

Pishchik Alexander Vsevolodovich

Born in 1996. In 2020, he graduated from the Educational Institution "Belarusian State University of Transport", majoring in railway rolling stock. Place of work: since 2015, assigned to prepare a dissertation for the academic degree of Candidate of Sciences without mastering the training program for scientific and scientific-pedagogical personnel in the graduate school of the Department of Cars and Carriage Facilities of the Russian University of Transport. Has 11 publications in the RSCI

Внедрение наилучших доступных технологий для снижения экологического воздействия тепловых электрических станций на окружающую среду

// INTRODUCTION OF THE BEST AVAILABLE TECHNOLOGIES TO REDUCE THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF THERMAL POWER PLANTS ON THE ENVIRONMENT //

**Рыжова Е.Л., доцент, к.т.н.,
Петербургский
государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург**

В статье рассматривается актуальная проблема загрязнения окружающей среды тепловыми электростанциями, представлен анализ факторов, отрицательно влияющих на экосистему. Описаны основные пути повышения эффективного снижения негативного экологического воздействия энергообъектов. Рассмотрены методы по сокращению токсичных веществ в выбросах с помощью внедрения

наилучших доступных технологий и оптимизации использования природных ресурсов в процессе производства тепловой и электрической энергии с целью гармонизации природоохранного законодательства России с функционированием объектов электроэнергетики.

Ключевые слова: электроэнергетика, тепловая электростанция, окружающая среда, экология, наилучшие доступные технологии, золоулавливание, золошлаковые отходы, выбросы, электрофильтры.

Annotation. The article deals with the actual problem of environmental pollution by thermal power plants, presents

an analysis of factors that negatively affect the ecosystem. The main ways of increasing the effective reduction of the negative environmental impact of energy facilities are described. The methods for reducing toxic substances in emissions through the introduction of the best available technologies and optimization of the use of natural resources in the production of thermal and electric energy in order to harmonize the environmental legislation of Russia with the functioning of electric power facilities are considered.

Keywords: electric power industry, thermal power plant, environment, ecology, the best available technologies, ash collection, ash and slag waste, emissions, electrofilters.

Электроэнергетика России – одна из ключевых отраслей промышленности страны, и ей принадлежит определяющая роль в организации надежного энергообеспечения различных отраслей экономики, предприятий и организаций бюджетной сферы и населения. Человечество для осуществления нормальных потребностей в своей деятельности использует тепловую и электрическую энергии, которые получают в результате сжигания различных видов топлива, или за счет использования движения воды рек, или атомной энергии распада ядер атомов тяжелых изотопов. На сегодняшний день в России существует 376 действующих тепловых электростанций (ТЭС), которые расположены в Центральном регионе, в Сибири, в регионе Средней Волги, на Урале, Северо-Западе, Юге и Востоке. В РФ на данный момент установлен процент ТЭС, работающих на газе, который составляет почти 70%,

угольные станции – 28%, станции, работающие на жидком топливе – 1-2%. При сжигании органических топлив на тепловых электростанциях образуются вредные вещества, выбрасываемые в атмосферный воздух. Электроэнергетика должна развиваться опережающими темпами для безусловного обеспечения ее вредного влияния на окружающую среду, которое обусловлено технологическими особенностями энергетического производства и не может быть полностью исключено. Однако функционирование энергопредприятий не должно приводить к недопустимой деградации окружающей среды в зоне влияния, что является наиважнейшей задачей [1].

Производство тепловой энергии относится к обеспечивающим отраслям российской экономики. Тепловые электростанции производят не только электроэнергию (около 90% общего объема электроэнергии), но

и тепловую энергию. Учитывая климатические особенности, связанные с расположением Российской Федерации преимущественно в высоких и средних широтах, а также достаточно суровые климатические условия в большинстве регионов страны, необходимы значительные затраты тепловой энергии, в том числе на нужды отопления [2]. На долю тепловой энергетики приходится около 16% объема загрязняющих веществ. Поэтому теплоэнергетика стоит на первом месте и по масштабам воздействия на окружающую среду, что создает угрозу экосистеме и здоровью людей. Следовательно, значимой проблемой на территории России остаётся повышение экологической безопасности работы тепловых электростанций, гармонизация тепловой энергетики с окружающей средой. Необходимость анализа видов негативных воздействий ТЭС на окружающую среду, возможных методов сокраще-

ния выбросов токсичных веществ, современных технологий уменьшения вредного влияния тепловых электростанций на экосистему страны для выработки конкретных решений по уменьшению опасного экологического воздействия ТЭС на окружающую среду, практических рекомендаций по использованию для этих целей наилучших доступных технологий актуально и в настоящее время.

Негативное воздействие ТЭС на экосистему

Вторыми по загрязнению атмосферы после автомобильного транспорта называют тепловые электростанции, которые при выработке тепловой и электрической энергии в качестве топлива применяют природный газ, а также продукты нефтепереработки, каменный и бурый уголь, сланцы горючие и торф. Наибольшие выбросы вредных веществ имеют место у крупных конденсационных электростанций, расположенных, как правило, в относительно малонаселенных местностях с ограниченным количеством других источников загрязнения атмосферы. Эти электростанции, имея громадные мощности, потребляют наименее ценные сорта топлива, являются источниками огромных выбросов продуктов сгорания органического топлива.

В целом можно выделить следующие основные виды негативных воздействий ТЭС на окружающую среду: загрязнение атмосферы взвешенными частицами и химическими веществами, «парниковый эффект», гигантское потребление кислорода, снижающее его концентрацию в атмосфере, загрязнение литосферы твердыми отходами (шлаки, золоотвалы), осаждение на поверхности почвы вредных выбросов и миграция их в глубь литосферы, непомер-

ное возрастание потребления воды, загрязнение «сточными водами», «кислотные дожди», «тепловые выбросы», а также другие негативные воздействия, в том числе шумовое и электромагнитное.

Основными компонентами, выбрасываемыми в атмосферу при сжигании различных видов топлива, являются более 300 видов веществ, среди которых основную долю составляют вредные газы, такие как оксиды азота и диоксида серы, углерода, а также сажа и зола. При сгорании, особенно при неполном, имеют место выбросы углеводородов (метана, этана), полициклических углеводородов (в том числе бензапирена), формальдегида, оксида ванадия. В выбросах ТЭС также присутствуют токсичные элементные примеси – тяжелые металлы и естественные радионуклиды [3–5]. Выбросы губительно влияют на здоровье человека, животных, растительный мир. Газообразные загрязнители вызывают у человека болезни легких, сердца, способствуют развитию онкологических заболеваний. Кислотные дожди, выпадающие на земную поверхность, убивают растения и животных, отравляют почву, делая ее непригодной для сельского хозяйства, а также вызывают коррозию и разрушение металлических конструкций. В совокупности эти факторы влекут колоссальный материальный ущерб, величина которого может быть соизмерима с уровнем валового внутреннего продукта отдельных государств.

Наиболее объемными побочными продуктами энергетического производства на твердотопливных ТЭС являются золошлаки – пылевые аэрозоли – это многотоннажный отход энергетики, имеющий радиоактивный характер, который требует обязательной утилизации. По данным [6] объем накопленных

золошлаковых отходов (ЗШО) на российских ТЭС оценивается в 1,5 млрд. т. Золошлаковые отвалы многих угольных ТЭС переполнены, а дополнительный землеотвод при этом невозможен или проблематичен. Ежегодно утилизируется не более 8 % (2,1 млн. т.) выхода ЗШО. Более 2/3 золоотвалов угольных ТЭС исчерпали свои проектные мощности, у остальных – емкостей хватит не более чем на 10 лет. Если подобная тенденция сохранится, то ряд угольных ТЭС России придется остановить и вывести из энергобаланса. Золошлаковые отвалы ТЭС Золоотвалы ТЭС, кроме отчуждения земель, могут загрязнять и атмосферу – пылением хранящейся золы и гидросферу – фильтрацией водорастворимых тяжелых металлов через ложе золоотвала в грунтовые воды, оказывая угнетающее воздействие на окружающую среду не только в зоне их расположения, но и далеко за пределами [7]. Их токсичность напрямую воздействует с живыми организмами, что ведет к торможению развития и вымиранию экосистемы, а также негативно влияет на здоровье человека. Таким образом, низкий уровень утилизации ЗШО – это серьезный барьер на пути функционирования и развития угольной генерации в России.

В таблице 1 приведено количественное содержание компонентов вредных веществ в зависимости от вида топлива.

Самое распространенное ископаемое топливо на нашей планете – уголь. Специалисты считают, что его запасов хватит на 400–500 лет. В энергетической стратегии России на период до 2035 г. намечено опережающее развитие угольной генерации в России. Увеличение объемов использования угля на ТЭС, соответственно приведет и к увеличению экологических проблем. В

Таблица 1.

Годовые выбросы ТЭС на органическом топливе мощностью 1000 МВт

Вид топлива	Вещество, т/год							
	NO2	CO	SO2	Твердые частицы	V ₂ O ₅	Бенза пирен, C ₂₀ H ₁₂	Формальдегид HCOH	Всего
Природный газ	13 888	14 681	–	2	–	0,0009	–	28 564
Мазут (топочный)	23 242	27 975	153 786	1 090	2 150	0,018	1 200	209 442
Уголь (бурый)	45 114	530 405	269 864	134 366	–	0,13	2 850	982 600

России отмечается низкий уровень улавливания и хранения золы и золошлаков. Это является важной проблемой больших городов, особенно городов Урала и Сибири. Таким образом, наиболее экологически несовершенным видом топлива является уголь, т.к. при его сжигании образуются больший ассортимент вредных выбросов, по сравнению с другими видами топлива.

Жидкое топливо (мазут, бензин, керосин) более «экологично», чем твердое. При этом полностью исключается проблема золоотвалов, которые занимают значительные территории и являются источником постоянного загрязнения атмосферы в районе станции из-за уноса части золы ветрами. Перевод установок на жидкое топливо существенно уменьшает золообразование, но практически не влияет на выбросы SO₂ и азота, так как мазуты, применяемые в качестве топлива, содержат больше двух процентов серы.

Многим ТЭС удалось уменьшить выбросы золы и оксидов серы благодаря использованию вместо твердого топлива наиболее «экологичного» газа, при сгорании которого выделяется наименьшее количество вредных загрязнителей. Поэтому сегодня в приоритете перевод действующих ТЭС с угля на природный газ. При сжигании природного газа существенными загрязнителями атмосферы являются оксиды азота, содержание которых не меньше, чем при сжигании угля, оксид серы и монооксид углерода [8]. Оксиды азота, однако, практически исключаются при применении экологически чистых технологий его сжигания.

Источниками загрязнения атмосферы являются производственные стоки в природные водоёмы и водостоки. Сбросные воды ТЭС значительно загрязнены взвешенными веществами, имеют повышенную минерализацию и в большинстве случаев повышенную щелочность. Кроме того, в них могут содержаться соединения фтора, мышьяка, ртути, ванадия. Отклонение экосистемы от равновесного состояния, вызванное сбросом сточных вод, может привести к отравлению и гибели определенного вида живых организмов, которое приведет к цепной реакции

угнетения всего биоценоза. Так как сбросы воды из систем охлаждения оборудования ТЭС несут в основном «тепловое» загрязнение, следует иметь в виду, что температура оказывает мощное воздействие на биоценоз в водоеме.

Стоит отметить акустическое и электромагнитное воздействие ТЭС. С развитием энергетики и ростом единичной мощности, увеличивается и звуковая мощность электроустановок и агрегатов. Шум, как вид загрязнения окружающей среды, оказывает воздействие на здоровье людей, особенно если ТЭС расположена в черте города. Электромагнитное же воздействие ТЭС на окружающую среду проявляется в виде генерируемых воздушными линиями высокого напряжения электромагнитных полей, которые в больших дозах также несут значительную угрозу здоровью человека.

Способы по снижению образования вредных примесей при сжигании топлива, применяемые на ТЭС, очень сложны, понижают КПД агрегатов, малоэффективны и не могут одновременно уменьшить выброс всех или основных самых токсичных элементов примеси. Так же возможно, что уменьшение объема одного компонента приведет к увеличению нескольких других.

Вышеуказанные проблемы являются не единственными, которые несут в себе тепловые электростанции, однако целью российских энергетических объектов должна стать минимизация ущерба, который наносится экологии. Ограничения выбросов вредных веществ в атмосферу осуществляются с помощью технических мероприятий. К ним относятся:

1. переход на нетрадиционную энергетику;

2. замена сырья теми его видами, при сгорании которых образуется меньшее количество вредных веществ;

3. предварительная обработка топлива (десульфуризация, газификация);

4. изменение технологии производства:

а) изменение конструкции пылеугольной горелки, которая формирует факел и определяет процессы горения в факеле;

б) применение различных схем ступенчатого сжигания (по вертикали, горизонтали, трехступенчатое и т.п.);

в) создание замкнутых производственных циклов;

5. применение установок и технологий золоочистки, а также очистка дымовых газов от серы, исключая попадание её оксидов в атмосферу.

6. повышение степени распределения вредных веществ на большую площадь путем применения более высоких дымовых труб

7. создание и совершенствование эффективного оборудования очистных сооружений и технологий очистки, загрязненных нефтепродуктами, щелочными растворами сточных вод, а также вод от химической очистки оборудования, повторное использование очищенных сточных вод.

Энергосбережение позволит при небольших вложениях снизить энергопотребление, что позволит ТЭС работать с меньшей нагрузкой и, следовательно, сжигать меньше топлива. Заметно уменьшится выброс вредных веществ в атмосферу [9, 10].

Внедрение наилучших доступных технологий

В настоящее время предлагают различные пути решения проблемы загрязнения атмосферного воздуха. Первый подход – «управление качеством воздуха» (air quality management) предполагает наличие стандарта качества воздуха, основным нормативом которого является предельно допустимая концентрация (ПДК) загрязнений. Для обеспечения ПДК предельно допустимые выбросы (ПДВ) для каждого конкретного предприятия не должны превышать его норму, для чего выполняются необходимые мероприятия, вплоть до ограничения мощности предприятий. Второй подход, получивший название «наилучших практически достижимых мер» (the best practicable means), состоит в том, что независимо от степени загрязнения атмосферного воздуха внедряются наилучшие технологические меры борьбы с загрязнением, достижимые на современном уровне развития техники [11].

Внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) является ключевым аспектом всего природоохранного законодательства. В соответствии с Федеральным законом «Об охране окружающей среды» [12] наилучшей доступной технологией является технология, определяемая на основе современных достижений науки и техники при условии наличия технической возможности её применения и обеспечивающая наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду и экономическую эффективность от ее внедрения и эксплуатации с приемлемым периодом внедрения. Применительно к ТЭС технология должна быть не только наилучшей одновременно по всем экологическим показателям, включая энергоэффективность и потребление ресурсов, но и доступной с учетом всех затрат и выгод, интересов операторов, а также обеспечивать реальность предъявляемых требований [13].

Для минимизации выбросов от предприятий теплоэнергетики, согласно «Справочника по наилучшим доступным технологиям...» [14] в качестве наилучших доступных технологий рекомендуется применять следующие:

- для минимизации выбросов пыли: электрофильтры, тканевые фильтры, циклоны, но лишь для предварительной очистки перед электро- или тканевыми фильтрами;

- для снижения выбросов оксидов серы рекомендуется использовать топливо с низким содержанием серы и котлоагрегат кипящим слоем, а также применять скрубберы (сухой и мокрой очистки);

- для уменьшения выбросов оксидов азота рекомендуется использовать ступенчатую подачу воздуха горения, рециркуляцию дымовых газов.

В качестве ограничения при внедрении НДТ на предприятиях теплоэнергетики выступают: вид сжигаемого топлива, его объемы, мощность предприятия. Реализация некоторых технологий может привести к увеличению риска коррозии стенок котла и трубопроводов. Поэтому при выборе НДТ необходимо провести предварительный экологоэкономический анализ технологи-

ческого процесса конкретного предприятия

Внедрение НДТ затруднено в связи с тем, что в экономической эффективности природоохранных мероприятий не учитывается их основная экономическая составляющая – снижение ущерба окружающей среде, а учитывается только уменьшение стоимости платежей за выбросы. При нынешней системе платежей за выбросы подавляющее количество природоохранных мероприятий не являются и не могут быть самокупаемыми. Поэтому внедрение НДТ относится, как правило, к вынужденной реконструкции энергообъекта по доведению экологических показателей его эксплуатации до современных нормативов [15]. В этом случае прироста прибыли, как правило, нет, а результатом внедрения является снижение затрат на возмещение ущерба от загрязнения окружающей среды, распределенное по всей территории, на которой имело место снижение концентраций вредных веществ. Тем не менее, как указано в [16], на энергообъектах I категории стационарные источники должны быть оснащены автоматическими средствами измерения и учета показателей выбросов вредных (загрязняющих) веществ, а также техническими средствами фиксации и передачи информации о показателях выбросов вредных (загрязняющих) веществ в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. То есть на них должны быть произведены внедрение НДТ, которое в соответствии с [17] признается ограниченным во времени процессом, в результате чего показатели воздействия на окружающую среду не должны превышать технологические показатели наилучшей доступной технологии.

Необходимым условием эффективного внедрения НДТ в энергетику России является соответствие квалификации инженерного персонала энергопредприятий современным требованиям в области охраны окружающей среды, информационное обеспечение природоохранной деятельности, без чего энергокомпаниям невозможно эффективно

проводить оценку, выбор и идентификацию НДТ [11].

В [18] сформулированы основные положения технической политики в области экологии электроэнергетики на период до 2030 года, а именно:

- применение типовых технических и технологических мероприятий по обеспечению экологической безопасности объектов электроэнергетики, используя дифференцированный подход к действующим и проектируемым объектам электроэнергетики;

- применение НДТ при проектировании и размещении, строительстве новых и реконструкции действующих энергопредприятий с учетом экологического благополучия региона, обеспечивая приоритет сохранения биоразнообразия и охраны особо охраняемых природных территорий;

- обеспечение полной и своевременной компенсации ущерба водным биологическим ресурсам при сочетании общесистемных и технологических природоохранных мер.

Общесистемные меры включают в себя:

- использование новых более эффективных технологий производства электроэнергии на базе органических видов топлива, обеспечивающих значительное уменьшение расхода топлива на выработку энергии и негативного воздействия на окружающую среду;

- совершенствование структуры топливного баланса ТЭС за счет уменьшения доли использования высокозольных и высокосернистых топлив;

- оптимизация структуры генерирующих мощностей с учетом состояния окружающей среды в местах их размещения.

Таким образом, основным направлением технической политики в области экологии электроэнергетики на период до 2030 г. для проектируемых объектов является внедрение НДТ, что позволит достичь соответствия технологических нормативов и показателей экологической эффективности отечественных энергоустановок. Применение комплексных технологий снижения загрязнения окружающей среды тепловыми элек-

тростанциями, перспективных технологий и энергоустановок для производства тепловой и электрической энергии позволит существенно улучшить удельные экологические показатели при производстве электро- и теплоэнергии, оптимизировать затраты на организацию надежного централизованного энергоснабжения отдаленных относительно небольших промышленных объектов и населенных пунктов, а также эффективно решать вопросы улучшения экологических показателей и повышения надежности работы энергогенерирующих установок при дефиците водных ресурсов.

Перспективные технологии сжигания топлива

Как показывают результаты исследования [13, 19], современная угольная генерация – это инновационный сегмент энергетики, где системно и поступательно внедряются новые технологии перехода на энергетику с нулевыми выбросами вредных металлов и золы, азота и серы. В соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации до 2035 года [19], основу электроэнергетики большинства стран мира в прогнозируемом периоде будут составлять существующие системы централизованного электроснабжения, базирующиеся на крупных угольных электростанциях, которые занимают 82,2 % в общем объеме генерации. Накопленный позитивный опыт позволяет угольной энергетике быть не только надежной, эффективной и доступной, но и экологичной. Сокращение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу происходит за счет внедрения современных технологий очистки выбросов (применение электрофильтров), введения в строй высотных дымовых труб, модернизации оборудования ТЭС и ТЭЦ, закрытия малых угольных котельных, оптимизации тепловых сетей. Этому способствует как масштабная программа экологической модернизации ТЭС с внедрением наилучших доступных воздухоохраных технологий, так и используемое на ТЭЦ топливо – бурый уголь, он по своим исходным характеристикам является одним из наиболее чистых в стране.

Наиболее эффективным технологическим методом подавления оксидов азота является трехступенчатое сжигание, или по западной терминологии – ребенинг (reburning). При реконструкции действующих пылеугольных котлов этот метод особенно применим, если кроме основного топлива (угля), котел может использовать 10-15% природного газа. Первый в Европе опыт внедрения трехступенчатого сжигания (1992 г., Ладжинская ГРЭС, блок №4 мощностью 300 МВт на Донцком ГСШ) позволил снизить концентрацию NOx в дымовых газах с 1100-1200 до 400-570 мг/м³. Таким образом, внедрение НДТ позволило гарантированно снизить выбросы маркерных загрязняющих веществ до уровня ниже установленных в ИТС 38-2022 технологических показателей [20].

Новая технология удаления двуокиси серы, которая пока проходит стадию испытания – это сжигание угля в кипящем слое. При новом способе уголь по-прежнему сжигается в топках котлов, однако предварительно он смешивается с гранулированным известняком и насыпается слоями на металлические поддоны. Воздух для поддержания процесса горения подается снизу, через отверстия в поддонах, и происходит через слои угля. Поток подаваемого воздуха настолько силен, что кусочки угля и известняка поднимаются над поддоном, как бы всплывая, подобно пене на поверхности кипящей воды (отсюда и название «кипящий слой»). Известняк реагирует с двуокисью серы, образующейся при горении угля, в результате чего образуются мельчайшие частицы сульфата кальция, которые перехватываются потоком отходящих газов и удаляются вместе с летучей золой в электростатических пылевых камерах. Температура горящего угля в кипящем слое ниже, чем температура горящего угля в топке; поэтому при сгорании в кипящем слое образуется меньше оксидов азота. В итоге сжигание в кипящем слое уменьшает содержание оксидов серы и оксидов азота по сравнению с обычной топкой [21].

На сегодняшний день наиболее перспективной технологией, позволяющей снизить выбросы ТЭС

при работе котлов, является низкотемпературный вихревой метод (НТВ-метод) защиты окружающей среды, реализуемый на стадии сжигания топлива, который в сравнении с применением других технологий очистки продуктов сгорания в десятки раз дешевле. Основным отличием НТВ-метода от традиционной технологии пылеугольного факела является организация в топочном устройстве котла нижней вихревой зоны, в которой циркулирует и сгорает основная масса топлива. В этой зоне создаются условия для значительного снижения генерации токсичных продуктов сгорания – оксидов азота и оксидов серы за счет протекающих в ней физико-химических процессов. Одним из основных преимуществ НТВ-метода является повышение КПД котлов ТЭС до 90–93 процентов, что приводит к экономии топлива и одновременно к снижению выбросов оксидов азота до 60 процентов, оксидов серы – до 70 процентов. Пройдя апробацию практически на всей гамме твердых органических топлив, включая низкосортные, в том числе местные топлива, такие как сланец, торф и другие, на котлах паропроизводительностью от 75 до 1600 т/ч в России и за рубежом (Китае, Эстонии и других странах), НТВ-метод внедрен на ряде отечественных энергетических объектов.

Внедрение НТВ-метода в энергетику возможно при новом строительстве, что позволяет сократить затраты на сооружение котельного цеха ввиду уменьшения высоты здания по сравнению с традиционной технологией пылеугольного сжигания. При реконструкции действующего оборудования на энергообъектах, когда замена котельного оборудования, выработавшего свой ресурс, позволяет устанавливать новые котлы с применением низкотемпературного вихревого сжигания в существующие строительные ячейки, что резко сокращает затраты на строительство нового здания, при этом имеется возможность увеличения мощности котельной установки на 10-20 процентов в существующих габаритах. Таким образом, относительно невысокие затраты при реконструкции действующего оборудо-

дования, значительные резервы при реализации нового строительства, жесткие требования к уровню выбросов вредных веществ тепловых станций дают основания для внедрения НТВ-технологий [22].

Несмотря на финансовые и санкционные ограничения в части технологий, поставляемых в Россию, теплоэнергетики добились достаточно серьезных результатов в соответствии с российскими информационно-техническими справочниками по наилучшим доступным технологиям. Однако важный вопрос об улавливании твердых частиц в дымовых газах угольных станций остается актуальным. Наиболее опасным является экибастузский уголь, который сжигают на ТЭС Урала. Основной современной технологией снижения выбросов золы твердого топлива на Урале является применение электрофильтров (ЭФ) (при эффективности не менее 99,5%). Перспективным является применение высокоэффективной технологии золоулавливания – рукавных фильтров, которые отличаются высокой степенью очистки (99,9%), поэтому стали востребованы на станциях, работающих на экибастузском угле. Единственным недостатком является срок эксплуатации, который не превышает и года. Существует немало способов повышения КПД золоуловителей до 99%, например, увеличение габаритов электрофильтра, способ кондиционирования, настройка системы встряхивания электродов и замена блоков питания на более мощные агрегаты. Все мероприятия очень трудны в исполнении и требуют больших затрат, а увеличение габаритов ЭФ выполнить крайне сложно на действующей ТЭС [21]. Существует два способа уменьшения выбросов оксидов азота на угольных станциях, которые возможно осуществить на действующих ТЭС при малых затратах. Первый способ представляет собой реконструкцию газового горелочного устройства, что позволяет уменьшить выбросы NOx на 15-20%. При этом подача вторичного воздуха будет осуществляться по ступеням с уменьшением температуры факела. Второй способ заключается в рециркуляции дымовых газов в топку, но применим

для тепловых станций, сжигающих твердое топливо с удалением шлаков жидким методом. Наибольший эффект снижения выбросов NOx достигается при сжигании угля в циркулирующем кипящем слое (ЦКС), но он в России не нашел применения, так как новые котлоагрегаты сегодня не вводятся, реконструкция старых требует значительных затрат. Способ сжигания угля ЦКС позволяет решить проблему выбросов в целом, так как уменьшение температуры ядра факела снижает выбросы NOx, а использование дробленого угля вместо пыли обеспечивает золоулавливание до максимальных величин [23].

Сегодня экологическая модернизация производства с применением наилучших доступных технологий продолжается, что вносит весомый вклад в достижение целевых показателей по сокращению выбросов маркерных загрязняющих веществ. Безусловный приоритет в производстве тепловой и электрической энергии – экологизация российской угольной промышленности посредством внедрения НДТ, благодаря которой видна положительная динамика сокращения выбросов в атмосферный воздух:

- замена на котлах циклонных уловителей на современные электрофильтры с эффективностью улавливания твердых частиц от 97 до 99 %, обеспечивающих выбросы золы существенно ниже технологических показателей ИТС 38-2022;
- замена старых дымовых труб высотой от 105 до 120 м новой трубой высотой 275 м, что позволяет улучшить рассеивание выбросов загрязняющих веществ в воздухе и снизить в разы их приземные концентрации в городской черте;
- применение технологии низкотемпературного уровня сжигания топлива, что обеспечивает снижение образования оксидов азота;
- возведение башенных градирнь, назначение которых – снизить тепловую нагрузку при охлаждении оборудования;
- замещение малых угольных котельных централизованными источниками электрической и тепловой энергии (ТЭЦ), что позволяет снизить на 30% объёма сжигаемого топлива;

• использование малосернистого бурого угля, благодаря чему выбросы диоксида серы на всех ТЭС не превышают технологических показателей. В перспективе возможно внедрения НДТ сероочистки газов на уже действующих котлах с использованием технологий десульфуризации дымовых газов;

- организация эффективного факельного сжигания топлива в виде пылевоздушных смесей в топках котлов позволяет сделать выбросы монооксида углерода существенно ниже технологических показателей;
- использование прямоточных горелочных устройств и реализации двух- и трехступенчатого сжигания топлива снижает выбросы оксидов азота на большинстве котлов;
- замена старых неэффективных золоуловителей на новые электрофильтры, благодаря чему на большинстве котлов удалось снизить выбросы золы твердого топлива ниже установленных технологических показателей.

На станциях установлены приборы непрерывного автоматического контроля и осуществляется периодический инструментальный контроль выбросов маркерных загрязняющих веществ. Эффективность очистки выбросов можно оценить с помощью онлайн-мониторинга специальных устройств, фиксирующих данные по основным веществам. Данные онлайн-мониторинга – информация о выбросах ТЭЦ в атмосферный воздух в режиме реального времени автоматически передаются в Росгидромет и министерство экологии [24].

Практические рекомендации по использованию наилучших доступных технологий для ТЭС

Учитывая невозможность достаточно полного и точного прогнозирования результатов влияния хозяйственной деятельности на окружающую среду, необходимо применять принцип предотвращения загрязнений, т.е. снижать уровни антропогенного воздействия настолько это технически достижимо и экономически возможно, не останавливаясь на уровне, необходимом для обеспечения нормативов качества окружающей среды. Применение

различных подходов к нормированию и контролю за выбросами в атмосферу, сбросами в водную среду или почву скорее способствует перемещению загрязнения между разными природными средами, чем защите окружающей среды в целом. Экологическая безопасность производства должна обеспечиваться на всех стадиях жизненного цикла производственного объекта, включая этапы проектирования, на которых закладываются основные экологические характеристики объекта и наиболее эффективные природоохранные меры, строительства, эксплуатации и аварийных режимов, пусков и остановов, вывода из эксплуатации. Для достижения цели устойчивого развития приоритет должен отдаваться не мероприятиям «на конце трубы» (очистным сооружениям, установке электрофильтров и сероочисток), а мерам, предотвращающим возникновение загрязнений. Этот принцип переносит внимание экологов с традиционных для них объектов (очистные сооружения) непосредственно на производственные технологические объекты, т.к. именно там образуются потери и загрязнения, и именно в изменении технологий производства кроются возможности более полного и рационального использования природных ресурсов и сырья. Наравне с традиционными показателями – объемами выбросов и сбросов – необходимо вводить показатели энергоэффективности и эффективности использования сырья, т.е. применять принцип предотвращения загрязнений [25].

Предельные величины и параметры выбросов или соответствующие им меры технического характера должны определяться на основе наилучших доступных технологий, без предписания использовать какую-либо определенную технологию или метод, но с учетом технических характеристик соответствующего объекта, его географического расположения и местных условий окружающей среды, требований по обеспечению высокого уровня охраны окружающей среды в целом. Для более эффективного решения этой проблемы следует использовать комплексный подход, который включает в себя: внедре-

ние новых технологий сжигания топлива; создание нового газоочистного оборудования с высоким КПД; использование предварительно обработанного топлива; применение замкнутых водооборотных циклов и паводковых стоков; усовершенствование технологий очистки сточных вод; переоборудование электроустановок, для снижения уровня шума; введение прогрессивных производств переработки золошлаков; контроль всех необходимых экологических и нормативных актов. При этом актуальным является создание новых учебно-методических материалов и разработка рекомендаций по использованию основных НДТ при планировании деятельности в электроэнергетике.

Заключение

Выделив основные экологические проблемы, прямо или косвенно связанные со сжиганием традиционных топлив (угля, мазута, газа) на ТЭС, установлено, что угольные ТЭС являются наиболее опасными для природы, здоровья и жизни населения. Особенно масштабно влияние ТЭС проявляется в Китае, Индии, США и России. В ближайшей перспективе прогнозируется увеличение доли использования угля в топливном балансе при производстве тепловой и электрической энергии, что потребует введения более совершенных мер по предупреждению роста загрязнения атмосферы вредными выбросами ТЭС.

Выполненный анализ современных наилучших доступных технологий очистки дымовых газов, обеспечивающих значительное снижение выбросов оксидов азота и серы в атмосферу на ТЭС, показывает, что пока недостаточно теоретической и экспериментальной информации об энергетических, экологических и экономических характеристиках внедряемых НДТ. Целесообразно разработать методологию выбора НДТ, применение которых предполагает решение группы масштабных топливных задач в сфере экологии, энергетики и экономики в соответствии с приоритетами и внешними условиями.

К 2026 году комплексный план мероприятий по снижению выбро-

сов загрязняющих веществ в атмосферный воздух предполагает 20% снижения совокупного объема выбросов загрязняющих веществ и 20% снижения объема выбросов опасных загрязняющих веществ [25]. Экологический приоритет для ТЭС должен стать наиболее актуальным, так как он может обеспечить и экономические выгоды в будущем. Для выполнения экологического законодательства должны быть внедрены мероприятия по снижению вредных выбросов на действующих ТЭС, внедрены новые перспективные технологии освоена их промышленная эксплуатация.

Библиографический список

1. Крылов Д.А. Воздействие микроэлементов от угольных ТЭС на окружающую среду и здоровье людей // Энергия: экономика, техника, экология. 2012. № 8. С. 9-16.
2. Климат России – типы, общая характеристика и особенности распределения. – URL: <https://nauka.club/geografiya/klimat-rossii.html> (дата обращения: 22.08.2024).
3. Ядутов В.В., Петров Т.И., Зацаринная Ю.Н. Воздействие ТЭС на окружающую среду // Вестник Казанского технологического университета. 2013. – Т. 16. № 19. – С. 78-79.
4. Гаак В.К., Квитко Г.В. Воздействие ТЭС на окружающую среду и способы его снижения // Современная наука: тенденции развития. 2016. № 15. С. 144-149.
5. Шорохова, В. О. Пути снижения отрицательного влияния энергетики на окружающую среду на примере ПАО «Россети» / В. О. Шорохова. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2022. № 40 (435). С. 12-14. – URL: <https://moluch.ru/archive/435/95244/> (дата обращения: 22.08.2024).
6. Кожуховский И.С. Перспективы развития угольной энергетики России // Энергетик. 2013. № 1. С. 3-10.
7. Сидорова Г.П., Крылов Д.А., Якимов А. А. Экологическое воздействие угольных ТЭС на окружающую среду // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 9 (124). С. 28-38.
8. Виноградов А.Ю. Экологические аспекты размещения и строительства тепловых электростанций //

Приволжский научный вестник. 2016. №2(54). С. 40-42.

9. Тупаева, А. С. Традиционная энергетика и проблемы развития в современных условиях / А. С. Тупаева // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 6. – С. 269-271.

10. Энергосбережение – актуальное направление экологической политики/ Ю.Н. Зацаринная, Н.А. Староверова, Ф.Г. Келеш, Р.Н. Рахмаев, А.В. Чечков, Ю.С. Десятникова// Вестник технологического университета. 2015. – Т. 18, № 12. – С. 182-184.

11. Грибков, Александр Михайлович. Наилучшие доступные технологии при использовании топлива на ТЭС : учебное пособие / А. М. Грибков. – Казань : КГЭУ, 2022. – 219 с.

12. Об охране окружающей среды: Федеральный закон№7-ФЗ: принят Государственной Думой 20 декабря 2001 года : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года. – URL: https://rpn.gov.ru/upload/iblock/abd/bur4cxwx76yqdmrslcjdv724rloaiyvH/Federalnyuzakon-ot-10.01.2002-N-7_FZ-_red.-ot-25.12.2023_.pdf (дата обращения: 22.08.2024).

13. Наилучшие доступные технологии – современный инструмент повышения энергоэффективности и снижения негативного воздействия энергопредприятий на окружающую среду / Сапаров М.И., Нечаев В.В., Путилов В.Я. и др. / Труды Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» – ЭНЕРГО–2010, Москва, 1–3 июня 2010 г. В 2 томах. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – т.2., С. 235-238.

14. Справочник по наилучшим доступным технологиям для крупных топливосжигающих установок М.: ОАО «ЭНИН», 2009. – 20 с.

15. Экономика энергетики : учебное пособие для вузов / Н. Д. Роголев, А. Г. Зубков, И. В. Мастерова [и др.] ; под редакцией Н. Д. Роголева.

– Москва : Издательство МЭИ, 2005. – 288 с.

16. «Перенаселение планеты как экологическая проблема». – URL: <http://greenrussia.ru/news/ekologiya/4543-perenaselenie-planety-kak-ekologicheskaya-problema.html> (дата обращения: 22.08.2024).

17. ИТС 38-2022. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии: Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. – Москва : Бюро НДТ, 2022. – 318 с.

18. Основные положения (концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г // Новое в российской электроэнергетике. 2008. № 2. С. 5-14.

19. Стратегия развития теплоснабжения и когенерации в Российской Федерации до 2035 года. – URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3140 (дата обращения: 22.08.2024).

20. Коробкин В.И. Экология: учебник для студентов бакалаврской ступени многоуровневого высшего профессионального образования/ Коробкин В.И., Передельский Л.В. – Ростов н/Д: Феникс, 2012. – 601 с.

21. Пермьякова, Д. К. Влияние угольных ТЭС на экологию окружающей среды / Д. К. Пермьякова, Н. К. Пермьякова // Аллея науки. – 2019. – Т. 1, № 1(28). – С. 341-346.

22. Инновации в российской энергетике для ТЭЦ. – URL: <https://ekovestnik.ru/whitepages/386516/> (дата обращения: 22.08.2024).

23. Гаак В.К., Квитко Г.В. Воздействие ТЭС на окружающую среду и способы его снижения// Современная наука: тенденции развития. 2016. № 15. С. 144-149.

24. Крылов, Д. А. Пути снижения экологического воздействия на окружающую среду угольных ТЭС России / Д. А. Крылов, Г. П. Сидорова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 11. С. 277-285.

25. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» от 09.06.2020 № 1523-р СПС «Консультант плюс». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/ (дата обращения: 22.08.2024).

Рыжова Елена Львовна

Родилась в 1967 году. В 2000 году окончила Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте. В 2006 году защитила диссертацию по теме «Создание компьютерного тренажера-имитатора для обучения безопасным приемам труда». Кандидат технических наук. доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, доцент, к.т.н. Имеет 88 публикации, из них 19 учебно-методических и 69 научных работ; патент – свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Имеет благодарность Министра транспорта РФ

Ryzhova Elena Lvovna

Born in 1967. In 2000, she graduated from St. Petersburg State University of Transport with a degree in automation, remote control and communications in railway transport. In 2006, she defended her dissertation on the topic "Creation of a computer simulator for teaching safe work practices." Candidate of Technical Sciences. Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Thermal Power Engineering, St. Petersburg State University of Transport of Emperor Alexander I, Associate Professor, Ph.D. Has 88 publications, of which 19 are educational and methodological and 69 scientific works; patent – certificate of state registration of a computer program. Has the gratitude of the Minister of Transport of the Russian Federation.

Электрооборудование транспортно-технологических средств – книги по дисциплине



Силовая электроника электромобилей. Управление инверторной генерацией энергии

В пособие включены фрагменты ГОСТ Р 59102-2020, приведены источники электрической энергии автомобилей, основы электронного преобразования электроэнергии, компоненты силовой электроники, электронные преобразователи энергии в электромобилях, основные компоненты электромобилей, перспективы развития топливных элементов и водородной инфраструктуры электротранспорта, генерирующие установки малой распределенной энергетики как объекты управления, системы синхронизации синхронного генератора и трехфазного мостового автономного инвертора напряжения, исследование системы синхронизации и распределения нагрузок посредством математического моделирования.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Техника и технологии наземного транспорта», «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», «Наземные транспортно-технологические средства», «Сервис» с дисциплиной «Электромобили и гибридные автомобили», «Управление в технических системах» с профилем «Системы и технические средства автоматизации и управления».

Год издания: 2022

Авторы: Смирнов Ю. А.,
Детистов В. А.



Устройство и диагностика топливных и моторных систем, двигателей внутреннего сгорания и электрооборудования автомобилей

В учебное пособие включены разделы устройства и диагностики деталей, узлов изделий, топливных и моторных систем, двигателей внутреннего сгорания и электрооборудования легковых и грузовых автомобилей.

Пособие предназначено для студентов колледжей, обучающихся по специальностям «Мастер по ремонту и обслуживанию автомобилей», «Техническое обслуживание и ремонт двигателей, систем и агрегатов автомобилей» и соответствует современным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным квалификационным требованиям.

Год издания: 2024

Автор: Смирнов Ю. А.



Основы теории и эксплуатации судовых электроприводов

В работе приведены краткие исторические сведения, связанные с созданием и развитием судовых электроприводов. Изложены вопросы теории и эксплуатации основных судовых электроприводов. Особое внимание уделено явлениям, которым подвержены исполнительные органы механизмов, создающие посредством передаточных устройств или напрямую нагрузки на валах двигателей судовых электроприводов. Рассмотрены основные методы расчета и выбора силовых (приводных и исполнительных) электродвигателей основных электроприводов судов торгового и рыбного флота.

Учебник предназначен для студентов (курсантов) высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики». Кроме курсантов и студентов книга будет полезна инженерно-техническим работникам в области судового электрооборудования.

Год издания: 2024

Авторы: Бурков А. Ф.



Техническая диагностика подвижного состава. Контроль главной изоляции тяговых электродвигателей

Рассмотрены теоретические предпосылки для перехода обслуживания и ремонта тягового подвижного состава Российских железных дорог от системы планово-предупредительного ремонта по пробегу к новой энергосбере-

гающей системе обслуживания по реальному техническому состоянию. Рассмотрены механизмы старения электрической изоляции. Проведен анализ абсорбционных процессов в многослойной неоднородной изоляции тяговых электродвигателей.

Предложены новые диагностические параметры — напряжение саморазряда и возвратное напряжение. Дана методика определения остаточного ресурса изоляции тяговых электродвигателей. Приведены технические решения для реализации новых способов диагностирования изоляции.

Рассчитана на инженеров и техников, занимающихся проектированием, монтажом и эксплуатацией электрооборудования тягового подвижного состава железных дорог, а также будет полезна студентам и аспирантам высших учебных заведений железнодорожного транспорта.

Год издания: 2024

Автор: Серебряков А. С.



Электродвигатели электрических приводов

В пособии изложены основы теории и эксплуатации электродвигателей как основных составных частей электроприводов.

Соответствует современным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным квалификационным требованиям.

Предназначено для студентов средних специальных учебных заведений, изучающих электроприводы, а также для профессорско-преподавательского состава и инженерно-технических работников в этой области.

Год издания: 2024

Авторы: Бурков А. Ф., Сериков А. В.



Основы автоматизации дорожного строительства и строительно-дорожных машин

В книге представлены основы автоматизации технологических процессов и машин в строительстве, применение в автоматизации средств вычислительной техники и микропроцессорных систем управления, математические модели и автоматизация управления в дорожном строительстве. Структура электронных систем управления и системы автоматизации строительно-дорожных машин на базе электронной и микропроцессорной техники.

Соответствует современным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным квалификационным требованиям.

Пособие предназначено для студентов средних специальных учебных заведений.

Год издания: 2024

Авторы: Смирнов Ю. А., Детистов В. А.



Экологическая безопасность объектов внутреннего водного транспорта

Рассмотрены вопросы обеспечения экологической безопасности объектов внутреннего водного транспорта. Применительно к ним и охране окружающей среды при их функционировании дан анализ требований недавно изданных нормативно-технических документов. Приведены примеры использования документов на практике для решения природоохранных задач.

Предназначено для студентов вузов, изучающих портовые и гидротехнические сооружения водного транспорта. Может быть полезно при решении вопросов обеспечения экологической безопасности объектов инженерами-практиками.

Год издания: 2024

Авторы: Керро Н. И.

Международная выставка по электротранспорту "ЭлектроТранс"



"ЭлектроТранс" – первая в мире и единственная в России выставка, посвященная **всему комплексу вопросов развития электрической мобильности в городах**. Цель выставки – предоставить эффективную коммуникационную площадку для общения специалистов, заинтересованных в сохранении и развитии городского электрического транспорта – от электросамоката до электрички.

В 2025 году 14-я международная выставка "ЭлектроТранс 2025" пройдет **28-30 апреля** в ЦВК "Экспоцентр" на Красной Пресне, павильон 2.1, в рамках Российской недели общественного транспорта и городской мобильности.

13-я международная выставка "ЭлектроТранс 2024" успешно прошла 26-28 июня 2024 г.

Выставка "ЭлектроТранс" организуется **с 2011 года** при содействии отраслевых ассоциаций, общественных движений, профсоюзов, федеральных и муниципальных органов власти. Экспозиция и деловая программа интересны руководителям и специалистам предприятий городского общественного транспорта, муниципальных образований, федеральных органов исполнительной и законодательной власти, а также экспертам из проектных организаций, учебных заведений, поставщи-

кам подвижного состава, продукции и услуг.

Общественный транспорт – **основа транспортной сети** современного города. Электрический общественный транспорт работает в 500+ городах мира. В нашей стране действуют 7 метрополитенов и более 100 трамвайных и троллейбусных предприятий. 75% населения России пользуются общественным транспортом, ежегодный пассажиропоток которого – 18.7 млрд поездок. 90% ВВП формируют урбанизированные территории: то есть города генерируют львиную долю благосостояния, а их экономический потенциал во многом определяется качеством городской транспортной системы.

Электрический общественный транспорт – трамвай (ЛРТ), троллейбус, электробус, метрополитен, фуникулер, канатная дорога, городская и пригородная электричка, с недавних пор – речные электрические суда – это самый экологичный и во многих случаях – самый эффективный способ обеспечения мобильности и устойчивого развития городов. Придет время, когда он будет доминировать в транспортном потоке наряду с другими видами электрической мобильности.

В нашей стране, как и во всем мире, активно развивается **коммерческий, служебный, комму-**

нальный, корпоративный электротранспорт, появляется все больше зарядных станций. С каждым годом расширяются соответствующие разделы выставки "ЭлектроТранс".

С 2019 года оргкомитет Российской недели общественного транспорта ежегодно выпускает информационный сборник "Российский общественный транспорт и городская мобильность".

Начиная с 2021 года, оргкомитет выставки проводит **Всероссийские совещания по развитию электротранспорта и сопутствующей инфраструктуры**:

- 2025: 5-е Всероссийское совещание и выставка "Электротранспорт Юга России", г. Пятигорск, 29-30 октября 2025 г.
- 2024: 4-е Всероссийское совещание и выставка "Электротранспорт Урала", г. Екатеринбург, УрФУ, 26-27 сентября 2024 г.
- 2023: 3-е Всероссийское совещание и выставка "Электротранспорт Юга России", г. Сочи
- 2022: 2-е Всероссийское совещание, г. Москва, ТПП РФ
- 2021: 1-е Всероссийское совещание, г. Казань, КГЭУ

Источник: <https://electrotrans-expo.ru/>

Выставка Электротранспорт Урала

26–27 сентября 2024 | Свердловская область, Екатеринбург

4-е Всероссийском совещании по развитию электрического транспорта и сопутствующей инфраструктуры прошло 26–27 сентября 2024 года в Екатеринбурге на базе Уральского федерального университета. В работе совещания приняли участие более 350 специалистов.

- Пострелиз
- Фоторепортаж
- Презентации участников

Цель совещания – оценить перспективы развития как электрического транспорта общего пользования, так и новых видов электрической мобильности, наметить пути взаимодействия и сотрудничества властей, заказчиков транспортных услуг, перевозчиков с поставщиками транспортных средств, зарядной инфраструктуры, оборудования и комплектующих.

Среди обсуждаемых вопросов:

- Каковы перспективы развития электрического транспорта в УФО?
- Что нужно предпринять для сохранения и расширения действующих сетей ГЭТ?
- Как механизмы концессии и ГЧП могут содействовать модернизации ГЭТ?
- Каковы особенности транспортного планирования с учетом электрификации городской мобильности?
- В каких сферах намечается опережающее развитие электротранспорта?
- Информационное поле – как получать достоверную информацию и бороться с домыслами?
- Как сделать развитие зарядной инфраструктуры выгодным для всех участников рынка?
- Безопасность электротранспорта – что нужно предусмотреть с учетом имеющегося отечественного и зарубежного опыта?
- Какие формы поддержки востребованы отраслью "электрическая мобильность"?

- Что предлагает отечественное транспортное машиностроение?
- Какие системы климат-контроля должны использоваться на электротранспорте?
- Подготовка каких кадров необходима для ремонта и обслуживания электрического транспорта?

Всероссийское совещание организуется ежегодно с 2021 г. Организатор – оргкомитет выставки "ЭлектроТранс" и Российской недели общественного транспорта и городской мобильности, при поддержке Научно-экспертного совета по мониторингу реализации законодательства в области энергетики, энергосбережения и повышения энергетической эффективности при Комитете по экономической политике Совета Федерации ФС РФ (рабочая группа «Импортозамещение для нужд энергетики, ЖКХ и потребителей энергоресурсов»), Союза Российских Городов (приветствие), ассоциации МАП ГЭТ, Екатеринбургского метрополитена (приветствие),

Национального объединения организаций в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности (НОЭ), администраций городов и регионов по месту проведения.

В России к 2030 году планируется выпускать не менее 150 тысяч электромобилей в год. К этому времени доля электромобилей может составить 10% от всего парка.

За достаточно короткий промежуток времени необходимо сформировать развитую инфраструктуру зарядных станций, прежде всего – так называемых быстрых зарядных станций. Согласно утвержденной Концепции по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в России на период до 2030 года, сбалансированный сценарий развития инфраструктуры электрочарядных станций к 2030 году потребует наличия 144 тысяч зарядных станций.

Источник: <https://ural.electrotrans-expo.ru/>



Уральский форум «Электротранспорт Урала»
Всероссийское совещание по развитию электрического транспорта и зарядной инфраструктуры в Уральском федеральном округе
26–27 сентября 2024 | Свердловская область, Екатеринбург