

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



**НГТУ  
НЭТИ**

Новосибирск  
2019

Всероссийская научная  
конференция молодых ученых

# НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ

Сборник  
научных трудов

Часть 5

г. Новосибирск, 02-06 декабря 2019 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

---

# **НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ**

---

---

**Сборник  
научных трудов**

**г. Новосибирск, 02-06 декабря 2019 г.  
в 9-и частях**

**Часть 5**

НОВОСИБИРСК  
2019

УДК 62(063)  
ББК 72.5я431  
НЗ4

**НЗ4 НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ** //Сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. Гадюкиной А.В. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019.

ISBN 978-5-7782-4006-3  
Часть 5: – 278 с.  
ISBN 978-5-7782-4011-7

В сборнике публикуются материалы по научным направлениям:  
*«Электротехника, электромеханика и электротехнологии»*

---

---

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

### **Председатель Оргкомитета:**

Батаев А.А., д.т.н., профессор, ректор НГТУ

### **Зам. председателя Оргкомитета:**

Вострецов А.Г., д.т.н., профессор, проректор по научной работе НГТУ  
Филатова С.Г., к.т.н., доцент, директор ИТЦ

### **Программный комитет:**

Драгунов В.П., д.т.н., профессор, начальник ОПК ВК  
Корель И.И., к.ф.-м.н., доцент, декан ФТФ  
Осьмук Л.А., д.соц.н., профессор, директор ИСТР  
Рева И.Л., к.т.н., доцент, декан АВТФ  
Мелехина Е.А., к.п.н., доцент, декан ФГО  
Саленко С.Д., д.т.н., профессор, декан ФЛА  
Тимофеев В.С., д.т.н., доцент, декан ФПМИ  
Хайруллина М.В., д.э.н., профессор, декан ФБ  
Хрусталеv В.А., д.т.н., профессор, декан РЭФ  
Вильбергер М.Е., к.т.н., доцент, декан ФМА  
Янпольский В.В., к.т.н. доцент, декан МТФ  
Чернов С.С., к.э.н. доцент, декан ФЭН

УДК 62(063)  
ББК 72.5я431

ISBN 978-5-7782-4011-7 (Ч.5)  
ISBN 978-5-7782-4006-3

© Коллектив авторов, 2019  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2019

# НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ – ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

## Секция ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

### ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСИЛИЦИЯ

**Н.К. Бадашкова, А.И. Алиферов**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, ninabadashkova@mail.ru**

*Статья посвящена повышению энергоэффективности руднотермической печи путем снижения неравномерности распределения мощности фаз вторичного токоподвода. Предложен метод симметрирования индуктивности трубошин круглой руднотермической печи без изменения размеров вторичного токоподвода.*

*The article is devoted to energy efficiency increasing of ore-thermal furnace by decreasing nonuniform distribution of power of the secondary current lead phases. New types of bus bar stacks inductance balancing in round ore-thermal without changes to the overall size of bus bar stacks are proposed.*

В Российской Федерации среди производимых ферросплавов основным сегментом является ферросилиций. По прогнозам на 2030 год производство ферросилиция достигнет 1300,0 тыс. тонн (Таблица 1) [1].

**Таблица 1 – Производство ферросилиция в России, тыс. т**

2007	2011	2012	2013	2020	2025	2030
Фактическое значение				Прогноз		
896, 1	1031, 9	1047, 5	1018, 3	1100, 0	1200,0	1300, 0

Исходя из прогнозируемых данных, проблема повышения энергоэффективности руднотермических печей, которые используются при производстве ферросилиция, является актуальной.

На технико-экономические показатели работы руднотермической печи (РТП) влияют электрические параметры токоподвода. В силу большой площади контура токоподвода, РТП имеет значительное реактивное сопротивление, которое при токах порядка 170кА формирует большую реактивную мощность. Эту реактивную мощность РТП необходимо компенсировать.

В большинстве мощных круглых РТП содержится 3 электрода, каждый из которых подключен к фазе одного трехфазного или трех однофазных трансформаторов. Фазы имеют разную длину (Рисунок 1) [2], что приводит к асимметрии вторичного токоподвода и, следовательно, к неравномерному выделению мощности в рабочем пространстве печи. Неравномерное распределение мощности в ванне печи снижает производительность и ускоряет износ футеровки.

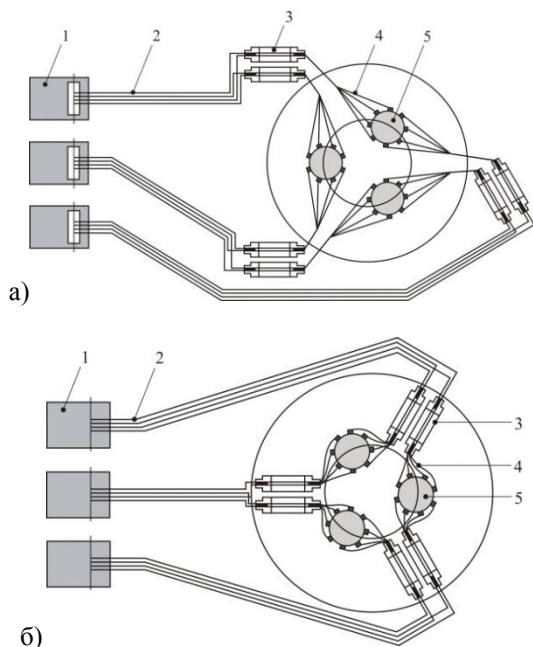


Рис. 1 – Схема короткой сети трехэлектродной руднотермической печи

1 – трансформатор; 2 – шихтованный шинопакет; 3 – гибкий токоподвод; 4 – трубошины токоввода электрода; 5 – электрод.

Для выравнивания мощности каждой фазы вторичного токоподвода необходимо уменьшить индуктивное сопротивление крайних фаз или увеличить индуктивное сопротивление средней фазы.

Изменение индуктивного сопротивления без изменения габаритов токоподвода достигается способом перешихтовки. Применяемые классические способы перешихтовки проводников в шинопакете показаны на рис. 2.

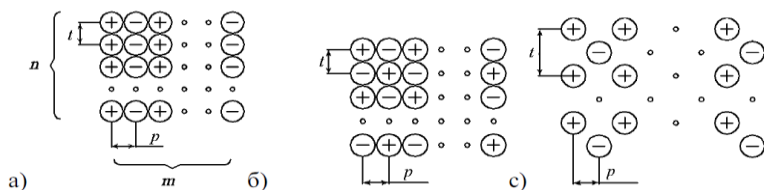


Рис. 2 – Стандартные варианты перешихтовки трубошин.  
а – коридорный, б – шахматный, с – коридорный со сдвигом.

Каждый вариант перешихтовки характеризуется своим собственным уровнем индуктивного сопротивления: минимальное сопротивление достигается при шахматном варианте, а максимальное – обеспечивается коридорным вариантом.

При использовании классических методов перешихтовки не удастся обеспечить оптимальный уровень сопротивления для выравнивания фаз токоподвода. Поэтому в исследовании приводятся новые способы перешихтовки, отличающиеся от традиционных, без изменения габаритов шихтованного пакета.

На рис. 3 показаны несколько вариантов перешихтовки, являющихся комбинацией шахматного и коридорного типов.

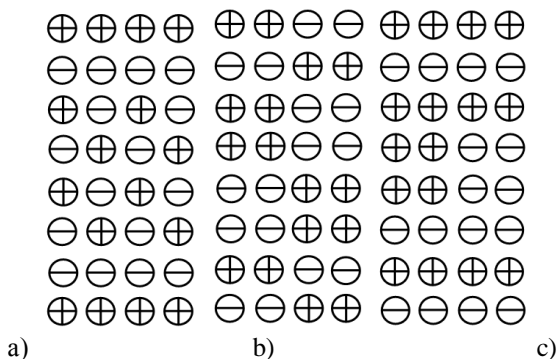


Рис. 3 – Новые типы перешихтовки

Расчет новых вариантов перешихтовок производился путем моделирования электромагнитного поля системы проводников с током в ПО Ansys. Распределение электромагнитного поля в моделируемой системе определяется с помощью уравнений Максвелла, которые в ПО Ansys решаются методом конечных элементов.

Очевидно, что расчеты были проведены для РКЗ-80 (руднотермическая круглая закрытая мощностью 80 МВА), которые показывают, что индуктивное сопротивление увеличивается при сосредоточении проводников с однонаправленным движением тока.

Минимальное индуктивное сопротивление для крайних фаз при шахматном варианте перешихтовки, равное 4,1 мкОм/м, выравнивается индуктивным сопротивлением 8,16 мкОм/м модели, показанной на рисунке 3-с для средней фазы.

Таким образом, симметрирование фаз короткой сети руднотермической печи мощностью 80 МВА возможно без изменения габаритов шихтованного пакета.

Аналогичное исследование может быть проведено для шинопакетов в печах различной мощности и, соответственно, разного количества и диаметров трубошин [3].

#### *Литература:*

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС-26-2017 "ПРОИЗВОДСТВО ЧУГУНА, СТАЛИ И ФЕРРОСПЛАВОВ" [Электронный ресурс] – дата публикации в интернет: 01.07.2018. – 23 с. – URL: <https://mooml.com/d/dokumenty-sistemy-normativnykh-dokumentov-v-stroitelstve/1-organizatsionno-metodicheskie-normativnye-dokumenty/k-12-proizvodstvo/45877/> (дата обращения: 10.10.2019).

2. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей / Я.Б. Данцис, Л.С. Кацевич, Г.М. Жилов, Н.М. Митрофанов, В.Л. Розенберг, И.М. Черенкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1987. – 320 с.

3. A. I. Aliferov, R. A. Bikeev, L. P. Goreva, N. K. Badashkova. Methods for balancing of secondary current lead of ore-thermal furnaces [Electronic resource] // 20 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2019: conf. proc., Altai Republic, Erlagol, 29 June – 3 July, 2019. – IEEE, 2019. – P. 716-719. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8823269/> (accessed: 10.10.2019)

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПАКЕТОВ ТРУБОШИН РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

А.В. Битюцких, Л.П. Горева

Новосибирский Государственный Технический Университет,  
Новосибирск, [andre972232@gmail.com](mailto:andre972232@gmail.com)

*Проведен расчет активного и индуктивного сопротивлений вторичного токоподвода круглой руднотермической печи методом численного моделирования. Для симметрирования шинопакетов предложены несколько вариантов перешихтов.*

*The active and inductive resistances of the secondary current supply of a circular ore-thermal furnace are calculated by numerical simulation. Several variants of busbars are proposed for busbars symmetry.*

Современные мощные рудно термические печи (РТП) в конструкции вторичного токоподвода имеют жесткий неподвижный участок, выполняемый в виде пакета медных прямоугольных шин или медных водоохлаждаемых трубошин.

Токи, протекающие по токоподводам мощных РТП, достигают нескольких десятков килоампер. По одному проводнику такой ток канализировать не представляется возможным, поэтому каждую фазу токоподвода расщепляют на несколько параллельных проводников. В печах небольшой мощности жесткий токоподвод может быть выполнен прямоугольными шинами. На одну фазу может приходиться до 16-и прямоугольных шин ( $n$ ). Их располагают в ряд длинными сторонами друг к другу. В печах большой мощности на этом участке применяют водоохлаждаемые трубошины, на каждую фазу может приходиться до 32 трубошин. Их располагают несколькими вертикальными рядами (рис. 2, а, б).

При оценке возможности и целесообразности применения трубчатого токоподвода необходимо учитывать следующее: токоведущие трубы, по сравнению с прямоугольными шинами, обладают повышенной индуктивностью. В то же время активное сопротивление водоохлаждаемой трубы за счёт более низкой температуры нагрева заметно ниже по сравнению с шинами.

В большинстве случаев в коротких сетях имеет место симметрия относительно средней фазы, что приводит к явлению электромагнитного переноса мощности, когда одна из фаз электропечи становится «мертвой» (с пониженной мощностью), а другая фаза становится «дикой» (с повышенной мощностью). В связи с тем, что перенос мощности, связанный с асимметрией пропорционален квадрату



тока, вопрос о симметричности короткой сети особенно важен для мощных руднотермических печей, рабочие напряжение которых низкие, а токи очень большие.

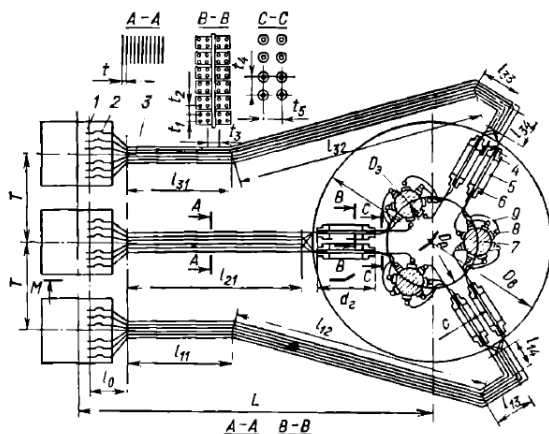


Рис.1 – Схема короткой сети круглой РТП (треугольник на электродах) с односторонним расположением трех однофазных трансформаторов [1]

Неравномерное распределение мощностей между фазами электропечи - явление нежелательное, так как оно приводит к ускоренному разрушению участков футеровки, находящихся возле «дикой» фазы, что приводит к увеличению простоев и расходов на ремонт. Помимо этого, снижается общая производительность электропечи, так как снижение производительности под электродом «мертвой» фазы не компенсируется увеличением производительности «дикой» фазы. Следовательно, задача выравнивания мощностей под электродами имеет большое практическое значение и ее решению нужно уделить особое внимание. Одно из решений – выравнивание индуктивных сопротивлений отдельных фаз.

Самым точным методом определения электрических параметров вторичного токоподвода является их моделирование.

Суть этого метода заключается в следующем. Вместо того чтобы исследовать натурный объекта – оригинал, производится исследование модели – копии оригинала. Модель проектируется таким образом, чтобы явления, которые протекают в оригинале и модели, были подобными, т.е. в сходственных точках пространства отношения соответствующих переменных модели и оригинала были постоянны.

Существуют традиционные варианты перешихтовки - «коридорный» (рис. 2,а), «шахматный» (рис. 2,б) [1].

Для примера рассмотрим шинопакеты средней и крайней фаз электропечи РКЗ-33М2. Рабочий ток электрода электропечи РКЗ-33М2 имеет величину порядка 90 кА. Её токоподвод является полностью водоохлаждаемым. Шинопакет выполнен из трубошин. Шинопакет средней фазы в 2,5 раза короче шинопакета крайней фазы, а его конструктивное исполнение (сечение, а так же расстояние между трубошинами) одинаково по фазам. Наблюдаем резкую асимметрию сопротивлений на этом участке.

В пакете электропечи 20 трубошин (по 10 на полюс-фазу). Исходным вариантом перешихтовки является «коридорный», изображенный на рисунке 1,а ( $t=100$  мм - расстояние между двумя горизонтальными рядами,  $p=80$  мм - расстояние между двумя вертикальными рядами,  $n=10$  - число горизонтальных рядов,  $m=2$  - число вертикальных рядов).

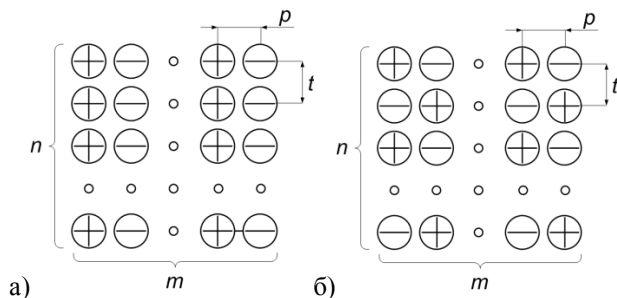


Рис. 2 – варианты перешихтовок трубошин печи РКЗ-33М2  
а – коридорный, б – шахматный

Базируясь на традиционных вариантах, были разработаны несколько новых вариантов перешихтовок.

В качестве программного средства использовался пакет ANSYS, который позволяет решать совместно тепловую и электромагнитную задачу. При использовании данного пакета существенно уменьшается время на программирование при создании моделей, что дает возможность провести расчеты для большего числа перешихтовок и получить более оптимальный вариант.

Однако, индуктивное сопротивление зависит не только от геометрии, но и способа перешихтовки. Так как «шахматный» вариант перешихтовки, при  $t=80$  мм, обеспечивает минимальное индуктивное сопротивление, то его целесообразнее использовать для шинопакетов крайних фаз. Исходный вариант – «коридорный» (рис.2,а) дает значительно большее индуктивное сопротивление, поэтому для

выравнивания индуктивного сопротивления фаз электропечи РКЗ-33М2, «коридорным» способом целесообразней перешихтовывать среднюю фазу.

Добиться симметрирования фаз электропечи РКЗ-33М2 можно изменяя габариты шихтованного пакета и изменяя способ перешихтовки. Применяв коридорный вариант перешихтовки, изменив  $n, m, t$  ( $n=5, m=4, t=80$  мм), оставив прежнее количество проводников на полу - фазу, то можно добиться лучших результатов, чем при исходном количестве проводников по вертикали и горизонтали.

При исходном варианте перешихтовки индуктивное сопротивление средней фазы и крайних равнялось 0,099 мОм и 0,256 мОм соответственно. Коэффициент асимметрии при этом равнялся 88% . Применяв «шахматный» вариант перешихтовки крайних фаз, при этом оставив прежнее количество проводников по вертикали и горизонтали, удалось уменьшить коэффициент асимметрии с 88% до 10% . При этом индуктивное сопротивление средней фазы осталось прежним – 0,099 мОм, а крайних фаз стало равным 0,11 мОм. До 5% коэффициента асимметрии удалось снизить путем применения для крайних фаз «шахматного» варианта перешихтовки с  $n=5, m=4, t=p=80$  мм. Индуктивное сопротивление крайних фаз при этом стало равным 0,105 мОм.

#### *Литература:*

1. Данцис Я. Б., Кацевич Л. С., Жилов Г. М. и др. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1987. 320 с.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НА ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОПРОВОДАХ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ**

**А.С. Бондарь, О.В. Стрельцова, С.А. Галунин, А.Н. Никаноров**  
**Санкт-Петербургский государственный электротехнический**  
**университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),**  
**г. Санкт-Петербург, [bonda3005@gmail.com](mailto:bonda3005@gmail.com)**

*Создана численная двухмерная модель индукционной системы, состоящей из индуктора с магнитопроводом и нагреваемой стальной заготовки, проведено исследование влияния различных параметров системы на распределение температуры в магнитопроводе, в результате которого были определены параметры, позволяющие снизить температуру магнитопровода.*

*In this work 2D numerical model was created for investigation of thermal processes in inductor with flux concentrator. Investigations of the effect of various system parameters on the temperature field distribution in a flux concentrator have been carried out, as a result of which parameters have been identified that allow reducing the temperature in the concentrator.*

С целью улучшения эффективности и скорости нагрева заготовки, уменьшения рассеивания магнитного поля, получения определенного распределения температуры применяют индуктор с магнитопроводом.

При использовании магнитопровода улучшается качество нагрева, однако существует также ряд проблем, связанных с устойчивостью магнитопроводов к влиянию на них сильных электромагнитных полей, а также устойчивостью магнитопроводов к высоким температурам [1].

В ходе поиска решения данных проблем рассмотрено влияние таких параметров системы, как частота тока, питающего индуктор, толщина магнитопровода, расстояние между витками индуктора, ширина верхнего витка индуктора.

Внешний вид индуктора с магнитопроводом показан на рисунке 1, а. На рисунке 1,б представлена геометрия созданной модели, на которой цифрой 1 обозначена охлаждающая индуктор вода, 2 – индуктор, 3 – магнитопровод, 4 – клей, соединяющий индуктор с магнитопроводом, 5 – нагреваемая заготовка.

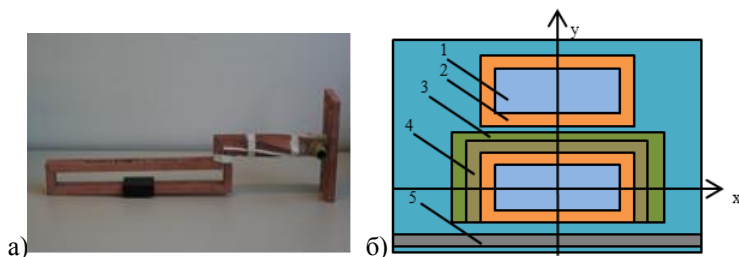


Рис. 1 – а) внешний вид индуктора с магнитопроводом;  
б) геометрия модели

В качестве материала магнитопровода был выбран FLUXTROL50, нагреваемая заготовка – сталь, индуктор – медь.

Для материала FLUXTROL50 максимальная допустимая температура составляет 250 °С.

Выбор определенной частоты тока зависит от требуемой глубины проникновения, скорости нагрева и производительности процесса. Помимо стремления к улучшению качества нагрева не стоит забывать о влиянии частоты на магнитопровод. Исследование влияние частоты на

тепловые процессы в магнитопроводе проводилось для частот 20, 100 и 500 кГц.

Как видно из рисунка 2, при увеличении частоты тока температура в концентраторе увеличивается. При увеличении мощности, выделяемой в нагрузку, будет расти и температура, которая может превысить максимальную допустимую длительную температуру магнитопровода, что в результате приведет к его разрушению.

Дальнейшие исследования проводились для разных величин токов, а именно 1, 2, 3 и 4 кА. Это было сделано с целью показать влияние величины тока на нагрев магнитопровода.

Другим параметром системы, влияющими на нагрев магнитопровода является его толщина. На рисунке 3 представлена зависимость температуры в магнитопроводе от его толщины.

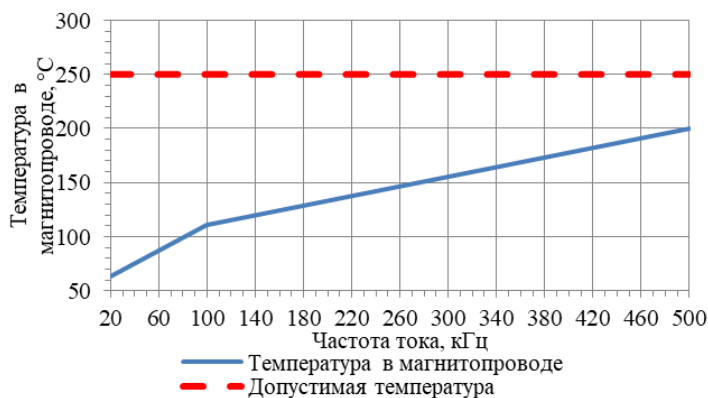


Рис.2 – Зависимость температуры магнитопровода от частоты тока, питающего индуктор

Как видно (рис. 3), с увеличением толщины магнитопровода максимальная температура в нем уменьшается, это объясняется тем, что при малой толщине магнитопровода силовые линии поля концентрируются на малой площади, из-за чего и происходит нагрев магнитопровода.

Другими параметрами, влияющими на температуру магнитопровода, являются расстояние между витками индуктора и ширина верхнего витка, так как магнитопровод перегревается в основном в верхней части, а увеличение расстояния между витками позволит уменьшить влияние магнитного поля верхнего витка индуктора на магнитопровод. На рис. 4 приведена зависимость температуры магнитопровода от расстояния между витками (20 мм и 40 мм). Изменение ширины

верхнего витка индуктора приводит к уменьшению его влияния на магнитопровод за счет того, что большая часть силовых линий поля верхнего витка не будет пронизывать магнитопровод. В таблице 1 представлена зависимость температуры магнитопровода от ширины верхнего витка.

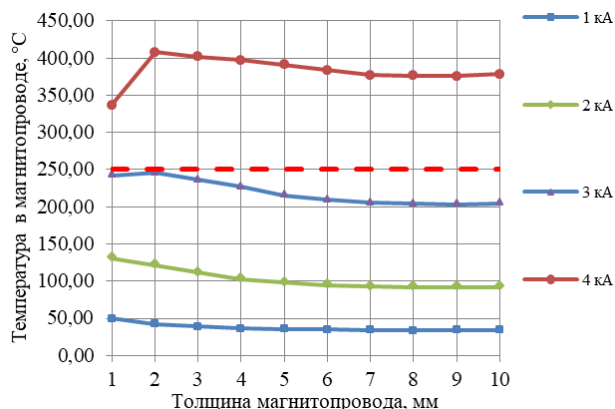


Рис.3 – Зависимость температуры магнитопровода от его толщины

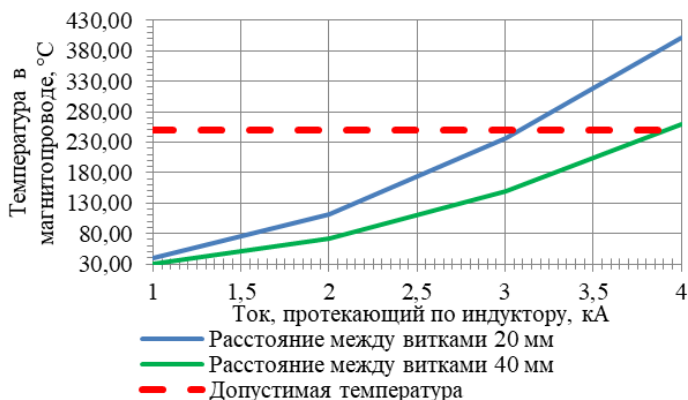


Рис.4 – Зависимость температуры магнитопровода от расстояния между витками индуктора

**Таблица 1 – Изменение ширины верхнего витка индуктора**

Ширина верхнего витка, мм	20	40	60	80	95	100
Температура в магнитопроводе, °C	402	358	312	273	248	238

Как видно из рис. 4, увеличение расстояния между витками позволяет уменьшить температуру магнитопровода. Увеличение ширины верхнего витка, также позволяет добиться уменьшения температуры магнитопровода.

В результате исследования были выявлены параметры, позволяющие уменьшить температуру магнитопровода (толщина магнитопровода, расстояние между витками индуктора и ширина верхнего витка индуктора). При уменьшении нагрева магнитопровода температура нагреваемой заготовки увеличивалась из чего следует, что увеличивалось и КПД нагрева.

#### *Литература:*

1. Nemkov V. Magnetic Flux Control in Induction Systems [Electronic resource] // International Magazine for Industrial Furnaces Heat Treatment & Equipment. – 2014. – URL: [https://fluxtrol.com/inc/pdf/magnetic\\_flux\\_control\\_in\\_induction\\_systems.pdf](https://fluxtrol.com/inc/pdf/magnetic_flux_control_in_induction_systems.pdf) (accessed: 10.09.2019).

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК**

**Д.В. Брюсов, В.В. Кибартас**

**Павлодарский государственный университет  
имени С. Торайгырова,  
г. Павлодар, [xivpvl@gmail.com](mailto:xivpvl@gmail.com)**

*В докладе представлены результаты анализа литературных источников по проблеме энергетической эффективности применения индукционного нагрева металлических изделий. Показано преимущество индукционного нагрева по сравнению с технологиями нагрева в электрических и газовых печах.*

*The report presents the results of the analysis of literature on the problem of energy efficiency of the use of induction industrial products. The advantage of induction measurement in comparison with the technology of preparation in gas and gas furnaces is shown.*

Для повышения эффективности процессов индукционного нагрева необходимо принимать во внимание множество факторов. Важен правильный выбор частоты в соответствии с размерами и материалом загрузки и задачей нагрева. Точное согласование и хорошая связь между индуктором и нагрузкой обеспечивают более высокий электрический КПД. Для получения коэффициента мощности  $\cos\varphi$ , близкого к единице, и снижения дорогой и неэффективной реактивной

мощности необходимы конденсаторы. Эта компенсация обеспечивает более высокий общий КПД. Более экономичное и рациональное использование электрической энергии достигается также за счет уменьшения электрических потерь в индукторе. Один из методов, используемых в промышленности, состоит в применении многослойных индукторов, имеющих более низкое электрическое сопротивление.

При создании новой нагревательной установки, прежде всего, необходимо решить, какая технология нагрева, электрическая или газовая, предпочтительна с позиций экономики, экологии и качества изделия. Было принято решение в пользу индукционной нагревательной установки. Исследования показывают, что потребление энергии,  $\text{CO}_2$ -эмиссия и стоимость могут быть снижены при использовании электрического нагрева вместо газового.

Как пример, камерная газовая печь сравнивалась с кузнечным индукционным нагревателем. Общая (совокупная) энергия, требуемая для всего процесса нагрева, учитывалась путем анализа каждого этапа процесса. В результате этих расчетов было установлено, что конечная энергия, необходимая для технологии индукционного нагрева, составляет половину потребности технологии газового нагрева (Рис.1). Для газового нагрева очень высока доля энергии, необходимой для возмещения потерь металла (окалина). Кроме того, для газового нагрева должно использоваться большее количество сырья из-за более сильного окисления материала. Потребность в первичной энергии для индукционного нагрева иногда может быть несколько выше, чем для традиционных технологий, но множество преимуществ компенсируют этот недостаток.

Другой пример снижения энергопотребления и  $\text{CO}_2$ -эмиссии дает сравнение различных технологий нагрева кромок стальных полос (рис. 2). Благодаря эффективности индукционного нагрева при его применении необходимая конечная энергия снижается на 80 % по сравнению с роликовой печью камерного типа и на 73% по сравнению с газовой печью. Таким образом, этой технологии индукционного нагрева должно быть отдано предпочтение.

Среди различных процессов электронагрева для нагрева под ковку, наиболее эффективными являются электроконтактный и индукционный. На рис. 3 изображены зависимости расхода энергии для различных диаметров и длин заготовок, которые показывают, что при индукционном нагреве оптимальный КПД и соответствующий ему минимальный расход энергии, равный приблизительно 350 кВт·ч/т, может быть получен только тогда, когда активный диаметр индуктора максимально приближен к диаметру заготовки.



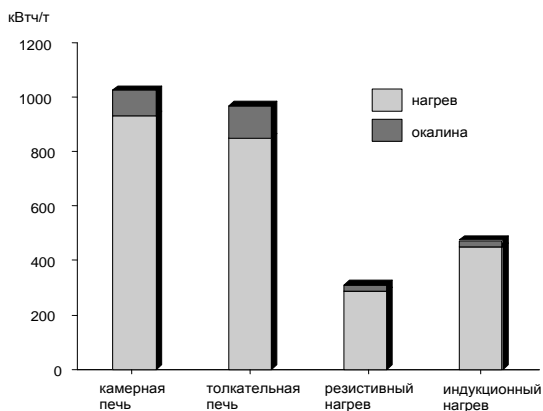


Рис. 1– Сравнение необходимой конечной энергии для нагрева материала различными технологиями для последующей кузнечной обработки

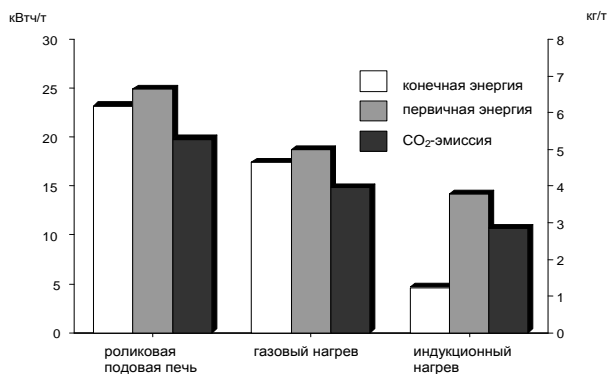


Рис. 2 – Сравнение необходимой конечной и первичной энергии, а также CO<sub>2</sub>-эмиссии при нагреве стальной ленты

Так как часто для того, чтобы выполнить производственную программу, приходится в одном индукторе нагревать заготовки различных диаметров, необходимо иметь в виду, что вышеупомянутый минимум расхода энергии может быть получен только для самых больших диаметров заготовок, которые могут пройти через катушку индуктора. Расход энергии растет с уменьшением диаметра заготовки. Диаграмма, приведенная на рисунке 3, характеризуют применение трех

индукторов (с активными диаметрами 70 мм, 100 мм и 130 мм) для нагрева стальных заготовок, имеющих диаметры от 40 мм до 130 мм. В установках индукционного нагрева расход энергии увеличивается от 350 до 450 кВт·ч/т при работе на полном уровне мощности индукционного нагревателя.

Работа индукционного нагревателя на меньших уровнях мощности приводит к дальнейшему увеличению расхода энергии до 500 кВт·ч/т, соответствующему 50% нагрузке от величины номинальной мощности (показано пунктирными линиями на рисунке 3).

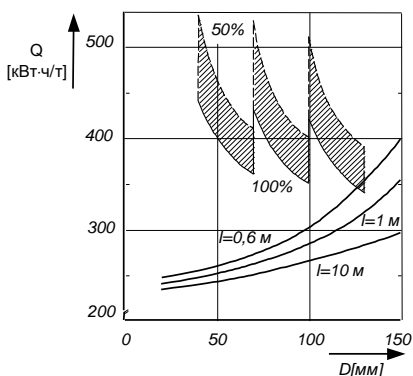


Рис. 3– Зависимости удельного расхода энергии установок электроконтактного нагрева от диаметра и длины заготовки (заштрихованные области соответствуют характеристикам индукционного нагрева)

Анализ литературных источников показал более высокую эффективность применения индукционного нагрева металлических изделий под обработку давлением по сравнению с электрическими и газовыми печами.

#### *Литература:*

1. Алифёров А.И, Лупи С, Индукционный и электроконтактный нагрев металлов: монография: Изд-во НГТУ –2011. – 411 с.
2. Rudnev V, Loveless D, Cook R, Black M, Handbook of induction heating. New York: Marcel Dekker inc– 2003. – 850p.
3. Алифёров А.И, Бааке Э, Барглик Дидр, Технологии индукционного нагрева. Интенсивный курс Специализация I. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» –2013. – 172 с.

4. Baake E, Jörn U: «Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emission industrieller Prozeßwärmeverfahren», Vulkan-Verlag Essen, 1996
5. Алифёров А.И., Бааке Э, Барглик Д и др, Теоретические основы и аспекты электротехнологий. Физические принципы и реализация. Интенсивный курс. Основы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» –2013. – 359 с.
6. Davies E.J. Conduction and Induction Heating. - London (UK): Ed. Peter Peregrinus Ltd– 1990.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ВАКУУМНО-КОМПРЕССИОННОЙ КОЛПАКОВОЙ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ С КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

**Е.П. Васильева, А.И. Алиферов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [ekaterinavasileva01@gmail.com](mailto:ekaterinavasileva01@gmail.com)**

*Доклад посвящен исследованию влияния различных геометрических и теплофизических параметров комбинированной тепловой изоляции на энергетические показатели вакуумно-компрессионной колпаковой печи сопротивления*

*The report is devoted to the study of the influence of various geometric and thermophysical parameters of combined thermal insulation on the energy performance of vacuum-compression bell furnace.*

Вакуумно-компрессионная колпаковая печь предназначена для термообработки рулонов титанового листа. Режим работы выполняется в два этапа: нагрев в вакууме и охлаждение в среде инертного газа (гелия). Такой подход позволит достичь высокого качества продукции и позволит сократить время охлаждения рулонов, за счет интенсивной циркуляции инертного газа внутри печи.

На рис. 1 представлена конструктивная схема рабочей камеры вакуумной компрессионной печи сопротивления с комбинированной тепловой изоляцией, которая представляет собой: 1 - водоохлаждаемый кожух из нержавеющей стали, 2 - нагреватели из тонкого молибденового листа, 3 - металлический короб с насыпной изоляцией, 4 - пакет металлических экранов, 5 - рулон титанового листа, 6 - поддон для установки рулона.

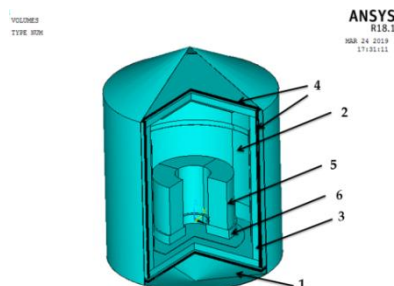


Рис. 1 - Эскиз расчетной модели

На рис. 2 представлена циклограмма отжига в печи, согласно которой после выдержки рулона, охлаждение до 450°C необходимо проводить в вакууме, затем охлаждение с гелием до 40°C в течение 50 ч. Использование конвекторных колец позволяет существенно сократить время охлаждения в среде инертного газа. В проведенных расчетах были рассмотрены разные варианты расположения конвекторных колец.

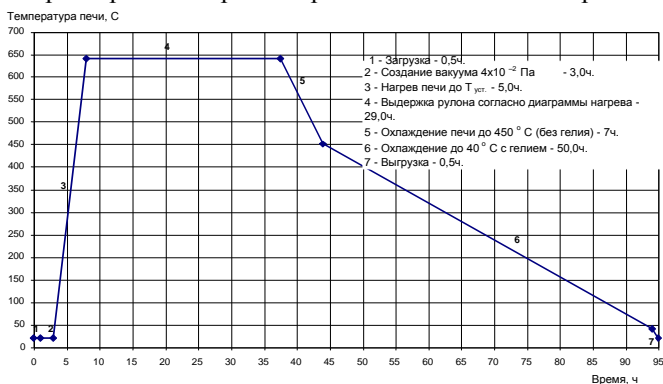


Рис. 2 -Циклограмма отжига

Математическое моделирование проведено в программном комплексе ANSYS для двух рулонов титана (установленных стопкой один на другом) с охлаждением до 450 °C в вакууме с последующим охлаждением до температуры 40 °C в среде потока гелия, для различных вариантов давления и скоростях газового. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Расчеты произведены при следующих допущениях.

**Таблица 1 - Исходные данные для расчета вариантов  
охлаждения двух рулонов титана и расчетное время охлаждения**

№	Скорость газового потока, м/с	Давление в камере, мм.рт.ст	Наличие конвекторных колец	Расчетное время, час
1	6	460	между рулонами	40
2	6	460	сверху и между рулонами	39
3	6	460	сверху, посередине, снизу	38
4	10	460	между рулонами	38
5	10	460	сверху и между рулонами	37
6	10	460	сверху, посередине, снизу	36
7	6	760	между рулонами	38
8	6	760	сверху, посередине, снизу	37
9	10	760	между рулонами	35
10	10	760	сверху, посередине, снизу	34
11	10	608	между рулонами	37
12	10	608	сверху, посередине, снизу	36

1) Реальный титановый рулон, имеющий слоистую структуру, заменяется сплошным полым цилиндром, имеющим геометрические размеры рулона и обладающим анизотропией физических свойств.

2) Реальный нагреватель, выполненный в виде проволочного зигзага заменяется сплошной поверхностью.

3) Нагрев в вакууме осуществляется излучением; плотность теплового потока в пределах одной тепловой зоны определяется мощностью нагревателя этой зоны и площадью поверхности футеровки, на которой он расположен.

4) Охлаждение в среде гелия осуществляется излучением и конвекцией.

5) Теплопередача в вакууме в пространстве между рулонами и футеровкой, а также между футеровкой и экранами, экранами и водоохлаждаемым корпусом осуществляется излучением.

6) Теплопередача через слой теплоизоляции осуществляется теплопроводностью.

7) Поверхность водоохлаждаемого корпуса печи имеет постоянную температуру  $t=35^{\circ}\text{C}$ .

Анализ полученных результатов показывает:

- Применение конвекторных колец приводит к существенному снижению времени охлаждения рулонов в среде гелия, особенно при использовании двух колец и более;

- Увеличение скорости циркуляции гелия приводит к уменьшению времени охлаждения, однако увеличению скорости гелия более 10 м/с не приводит к существенному снижению времени охлаждения;

- Повышение давления гелия приводит к значительному уменьшению времени охлаждения.

Таким образом, для дальнейшего изучения влияния конвекторных колец на снижение времени технологического процесса и уменьшение потребления электроэнергии выбран вариант использования двух конвекторных колец, при скорости газового потока 10 м/с и давлении 760 мм.рт.ст.

#### *Литература*

1. Теплопередача / В.П.Исаченко, В.А.Осипова, А.С.Сукомел.- 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1975. - 488с.

2. Чередниченко В.С. Синицын В.А. Алиферов А.И. Основа теории теплопередачи. В 2 ч. Ч.1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. - 374 с.

3. Электротехнологические установки и системы. Теплопередача в электротехнологии. Упражнения и задачи: учеб. пособие для вузов / В.С Чередниченко [и др.] ; под ред. В.С Чередниченко, А.И. Алиферова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 571 с.

## **АНАЛИЗ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ**

**Э.Р. Винтер, В.Н. Тимофеев**

**ФГОУ ВО Сибирский федеральный университет  
г. Красноярск, [eduard.vinter@gmail.com](mailto:eduard.vinter@gmail.com)**

*Работа содержит аналитический анализ несинусоидального электромагнитного поля в индукционных установках металлургического*

назначения. Рассматривается плоская катушка на поверхности проводящего тела и магнетогидродинамический (МГД) перемешиватель жидких металлов. Решение получено в виде ряда Фурье комплексным способом. Были получены дифференциальные и интегральные свойства. Получены зависимости электромагнитных параметров от значения постоянной времени в обмотке индуктора. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных для электромагнитных характеристик установок при подаче на них несинусоидального тока.

*The paper contains the analytical analysis of nonsinusoidal electromagnetic field in induction units of metallurgical designation. It considers a pancake coil on the surface of conductive body and magnetohydrodynamic (MHD) stirrer of liquid metals. The solution is obtained in the form of a Fourier series in a comprehensive way. There have been obtained differential and integral properties. There have been obtained the relations of electromagnetic parameters to the value of time constant in the inductor winding. The reconciliation analysis has been completed for the results obtained for the electromagnetic characteristics of the units at supplying them with nonsinusoidal current.*

В современной промышленности широко применяются технологии обработки материалов с помощью переменных электромагнитных полей [1]. К наиболее распространенным технологиям относятся индукционный нагрев [2], индукционная плавка [3] и электромагнитное перемешивание жидких металлов [4]. Как правило, источником переменного электромагнитного поля является синусоидальный ток низкой, промышленной или высокой частоты. Однако, в настоящее время, с развитием силовой преобразовательной техники, стало возможным применение несинусоидальных токов [5–8].

Рис.1 иллюстрирует зависимость относительной поверхностной активной мощности на поверхности проводящего полупространства от относительной постоянной времени индуктора. Как видно из графика, с понижением постоянной времени индуктора повышается поверхностная плотность мощности. Рис. 2 иллюстрирует график зависимости активной мощности, выделяющейся в слое глубины проникновения  $\delta$ , отнесенной к активной мощности на поверхности проводящего тела, от  $\hat{\tau}$ . Видно, что чем ближе форма магнитного поля к прямоугольной, тем больше активной мощности выделяется в слое  $\delta$  (до 90% от всей активной мощности). С увеличением постоянной времени индуктора значение активной мощности снижается и при значениях  $0,15 \div 0,2$  перестает изменяться. При этом, во всем исследуемом диапазоне в слое  $\delta$  выделяется большее количество активной мощности, по сравнению с плоской волной синусоидального поля.

На рис. 3 и 4 представлены графики мгновенных значений электромагнитной мощности и силы при различных значениях  $\tau$ . На графиках черной сплошной линией показаны мгновенные значения

электромагнитной силы и мощности для случая синусоидального тока в индукторе, которые представляют собой постоянные значения, так как симметричная многофазная система с синусоидальными токами является уравновешенной [9]. В случае несинусоидальных токов, напротив, мощность и сила изменяются во времени и при этом имеют резко несинусоидальный характер. Форма и амплитуда мгновенной мощности меняется в зависимости от величины  $\tau$ .

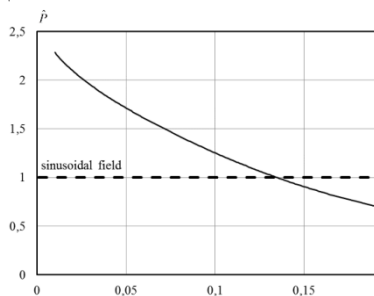


Рис. 1. Зависимость относительного потока активной мощности на поверхности полупространства от величины  $\hat{\tau}$

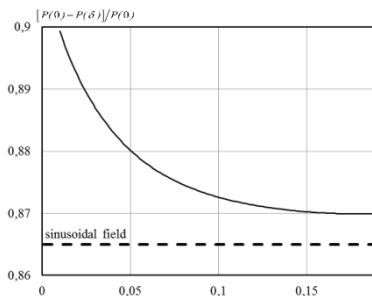


Рис. 2. Зависимость выделяющейся в слое глубины проникновения  $\delta$ , отнесенной к активной мощности на поверхности полупространства, от величины  $\hat{\tau}$

Величина и характер изменения электромагнитной силы также зависит от  $\tau$ . При этом видно, что среднее за период значение электромагнитной силы выше, чем в случае питания обмоток индуктора синусоидальным током. Следует также отметить что, подобный характер изменения ЭМ силы дает возможность создавать в расплаве ударное механическое воздействие, что позволит осуществлять перемешивание и гомогенизацию расплава на уровне микро неоднородностей.

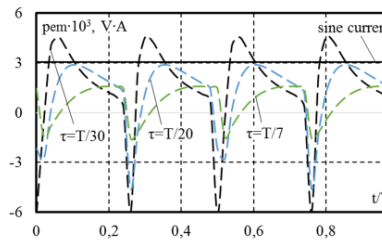


Рис. 3. Мгновенные значения электромагнитной мощности

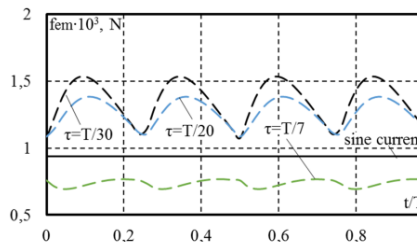


Рис. 4. Мгновенные значения электромагнитной тянущей силы



### *Литература*

1. Nacke B. Theoretical Background and Aspects of Electrotechnologies: Physical Principles and Realization: Intensive Course. Basic I. Publishing house of ETU; 2012.
2. Rudnev V. Induction Heating and Heat Treating for Aerospace Applications. Adv Mater Process. 2018 Feb-Mar;176(2):58-61. PubMed PMID: WOS:000426999300018; English.
3. Pavlovs S. et al. LES modelling of turbulent flow, heat exchange and particle transport in industrial induction channel furnaces //Magneto hydrodynamics. – 2011. – Т. 47. – №. 4. – С. 399-412.
4. Fdhila R., Sand U., Eriksson JE, et al. A. stirring history. ABB Review. 2016;3:45-48.
5. Branover H. et al. Novel potentialities of electromagnetic stirring of melts in metallurgy //Proceedings of the joint. – 2005. – С. 31-34.
6. Eckert S, Nikrityuk P., Rabiger D., et al. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part I. Flow field in a liquid metal column. Metall Mater Trans B.
7. Ma X., Yang Y., Wang B. Effect of pulsed magnetic field on superalloy melt //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – Т. 52. – №. 23-24. – С. 5285-5292.
8. Wang X. et al. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: Part I. Experiments with GaInSn //Metallurgical and Materials Transactions B. – 2009. – Т. 40. – №. 1. – С. 82.
9. Нейман Л. Р., Демирчан К. С. Теоретические основы электротехники; В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1 – 3-е изд. перераб.и доп. Л. Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 536 с

## **АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕЧИ**

**В.В. Вологин, В.А. Сериков**

**Новосибирский государственный технический университет  
г. Новосибирск, vologlvadimir@mail.ru**

*В докладе представлен результат анализа литературных источников по тематике акустических и вибрационных характеристик дуговой сталеплавильной печи. Показаны мероприятия по снижению шума и акустические характеристики ДСП.*

*The report presents the result of an analysis of literary sources on the topic of acoustic and vibrational characteristics of an electric arc furnace. Shown measures to reduce noise and acoustic characteristics of particleboard.*

Среди первичных мероприятий по снижению шума, т.е. мероприятий, касающихся непосредственно работающей печи как источника шума, можно отметить следующие: предварительный подогрев лома в бадье или газо-кислородными горелками в печи; повышение устойчивости горения дуги вследствие уменьшения потенциала ионизации при введении в шихту ионизирующих добавок, например, извести. Кроме того, значительный эффект обеспечивают: использование полых электродов; введение в зону горения дуги инертных газов (аргона, азота и др.); введение через полые электроды в зону дуги легко ионизирующихся материалов или применения электродов со специальными добавками, например, титана; применение тиристорных регуляторов вместо электромашинных и комплекса автоматизации процессов выплавки стали с использованием быстродействующих самонастраивающихся систем автоматического регулирования; переход к дугам постоянного тока, что позволит снизить уровень шума по сравнению с дугой переменного тока не менее чем на 20 дБ[1]. Вторичные мероприятия по снижению уровня шума направлены на предотвращение его распространения и отрицательного воздействия на обслуживающий персонал и окружающую среду. Одним из способов снижения уровня шума дуговой печи является использование стального кожуха с огнеупорной футеровкой (не менее чем на 50 дБ) [2].

Неотъемлемой частью горения мощных дуговых разрядов является шумообразование. Дуга большой мощности – интенсивный источник нагрева шихты, а также генератор акустического излучения в рабочем пространстве печи. На данный момент этот факт остается еще малоизученным, так же отсутствует теория преобразования электрической энергии в акустическую[3].

Модель дуги как магнитогидродинамического насоса была разработана Г. Меккером [4]. В работах [5] показано, что в электрических дугах атмосферного давления скорость движения плазмы в столбе дуги постоянного тока при величине тока 2160 А составляет 1500 м/с, а при токе 20 кА достигает 6300 м/с. Областью формирования плазменных струй является конусная часть столба дуги, которая находится вблизи поверхности катода и является генератором конвективного теплообмена в дуге и основным источником акустических излучений. В этой области разряда происходит всасывание в дугу паропылегазовой среды из рабочего пространства печи, нагрев газа до плазменного состояния и формирование катодных струй. Как следует из теории дугового разряда [6], тепловая и кинетическая энергии осевого потока плазмы в столбе

дуги зависят от параметров плазмы в граничном сечении, разделяющем конусную и цилиндрическую части дугового разряда. Шум в катодных струях обусловлен пульсациями давления плазмы, создаваемого магнитным полем дуги. Сопряженно и последовательно в конусной части разряда с осевой протяженностью 3,5-5 диаметров цилиндрической части столба дуги [7] возникают изменения скорости плазмы на границах смешения струи с окружающим газом. Одновременно происходят скачки уплотнений в струе и взаимодействие между скачками уплотнения и турбулентными пульсациями. Начальный участок катодной струи имеет большой градиент скорости плазмы, вызывающими мелкомасштабную локальную турбулентность, которая становится источником высокочастотных и ультразвуковых колебаний в газах. По данным [8] до 35 % энергии дуговых разрядов переносится плазменными осевыми струями в область анода. Эта энергия обеспечивает конвективный нагрев металла и генерацию шумовой энергии на аноде в основном в низкочастотном диапазоне.

От мгновенных значений токов в дуговом разряде зависит интенсивность акустических характеристик. Наивысшая плотность звуковой энергии фиксируется в первый период расплавления металла при проплавлении колодцев. Дестабилизация процесса возникает при возникновении многочисленных электрических разрядов между частями шихты в местах их соприкосновения. Они идентифицируются как последовательно включенные дуги с основной дугой. Протекающие токи в этот период имеют несинусоидальный характер, который определяет мощность искажения величиной до 30 % от номинальной мощности дуговых разрядов с частотной характеристикой от 1-2 Гц до 8000 Гц. Движение дуговых разрядов имеет импульсный характер, что в результате приводит к возникновению широкополосного спектра шума. прямое решение задачи переноса энергии и массы в дугах, в процессе которого генерируется акустическая энергия, становится невозможным в связи со сложностью сопряжения электрогазодинамических процессов, наблюдаемых в дуговых разрядах атмосферного давления. Это значит, что на данном этапе исследований для изучения влияния виброакустических процессов на теплообмен в рабочем пространстве ДСП целесообразнее использовать метод получения результатов, который изложен в [8].

Анализ литературных источников дает понять, что исследование акустических характеристик и создание системы автоматического управления на их основе является актуальным и целесообразным.

#### *Литература:*

1. Хэринг, Г.У. Снижение шума в электросталеплавильных цехах/ Г.У. Хэринг, К. Польшнер, Ю. Шмитц// Черные металлы. - 1980.- № 2. - С. 3 – 8.
2. Antoine, J. Le bruit et L'insonorisation industrielle. Application au cas des acieries electriques / J. Antoine, P. Le Lourer// Revue de Metallurie. - 1984. - № 8 – 9. - P. 667 - 682.
3. Graf, G. Meinshausen G. Moglichkeiten einer leistungs fahigen und umweltfreundlichen Stahlerzeugung Im Lichtbogenofen/ G. Graf, F. Josten // Stahl und Eisen. - 1976. - Bd. 96. - S. 607 – 611.
4. Maecker, H. Plastmastromungen in Liichtbogen infolge eidenmagnetischer Kompression / H. Maecker // Z. fur Physik. – 1955. – No. 141. – S. 198-216.
5. Bowman, B. Measurements of plasma velocity distributions in free-burning DC ares up to 2160 A / B. Bowman // J. Phys. D.: Appl. Phys. – 1972. – No. 5. – S. 1422-1432.
6. Кручинин, А.М. Теплообменная модель дуги дуговой печипостоянного тока. Ч. 2./ А.М. Кручинин// Электрометаллургия. - 2012. - № 4. – С. 39-48.
7. Анахов, С.В. Плазмотроны: проблема акустической безопасности. Теплофизические и газодинамические принципы профилирования газовоздушных трактов малощумных плазмотронов/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин. - Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. – 224 с.
8. Чередниченко, В.С. Акустические характеристики дуговыхсталеплавильных электропечей/ В.С. Чередниченко, Р.А. Бикеев, А.В.Чередниченко// Электрометаллургия. - 2015. - № 10. – С. 2-12.

## **ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОСФЕР НА ОСНОВЕ ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

**О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов, Р.Е. Гафаров**  
**Томский государственный архитектурно-строительный**  
**университет, г. Томск, GreexRayne@gmail.com**

*Разработка новых энергоэффективных методов получения строительных материалов всегда является актуальной. Одним из таких материалов является микросфера, которую можно получить с помощью энергии плазмы. Сегодня промышленности требуется широкий спектр плазмотронов по мощностям, энthalпии и роду нагреваемого газа. Установление оптимальных параметров и технических особенностей электроплазменной установки позволит получать*

высококачественные микросферы. Проведен анализ потока испускаемой плазменной струи при различном расходе плазмообразующего газа.

*The development of new energy-efficient methods for obtaining building materials is always relevant. One such material is the microsphere, which can be obtained using plasma energy. Today, industry needs a wide range of plasmatrons by capacities, enthalpy and the kind of heated gas. Establishment of optimal parameters and technical features of an electroplasma installation will make it possible to obtain high-quality microspheres. An analysis of the flow of the emitted plasma jet at various flow rates of the plasma-forming gas is carried out.*

С развитием технологий растет и потребность в высококачественных технологических материалах. Сегодня микросферы широко применяются при производстве огнеупорных материалов в строительстве и тампонажных растворов в нефтегазодобывающей промышленности. Основными требованиями, предъявляемыми к микросферам, является термическая и кислотная стойкость. К сырью для производства микросфер, можно отнести высококремнеземистые и глиноземистые материалы [1]. Температура плавления (1993/2350 К) данных материалов повышает требования к источникам тепловой энергии [2]. Перспективным источником нагрева-плавления тугоплавких материалов является плазменные генераторы позволяющие реализовывать высококонцентрированные среды с среднемассовой температурой до 10000 К [3]. Разрабатываемые плазмотроны и плазмохимические реакторы должны иметь большой ресурс работы, высокую стабильность и регулируемость процессов. С учетом возрастающих требований к плазменной технике разработан экспериментальный электроплазменный стенд для получения микросфер на основе тугоплавких оксидов и силикатов [4]. На рис. 1 представлены его и фотография процесса работы.

Производительность электродугового плазмотрона определяется расходом плазмообразующего газа и тепловой мощностью плазменной дуги. В ходе работы произведена разработка измерительной системы теплофизических характеристик электродугового плазмотрона. Фиксация плазмообразующего газа ( $G_g$ ) осуществляется ротаметром марки LZT-06 (США), погрешность измерения составляет  $\pm 4\%$ . Сила тока ( $I$ ) и напряжение ( $U$ ) определяется цифровым вольт-амперметром марки PVA400, точность измерения  $\pm 1\%$ .

По установленным параметрическим характеристикам методом калориметрирования определялась среднемассовая температура ( $T_g$ ) и скорость ( $u_g$ ) воздушно-плазменной струи. Оценка режимов истечения плазменной струи определяется ламинарным или турбулентным состоянием. Данное явление описывается безразмерным соотношением (число Рейнольдса)  $Re = (\rho_g u_g d_s) / \mu_g$ , где  $\rho_g$ ,  $u_g$ ,  $\mu_g$  – плотность, скорость и вязкость нагретого газа (плазма),  $d_s$  – диаметр сопла (10 мм). На рис.2

представлены снимки воздушно-плазменной струи при различном расходе плазмобразующего газа (воздух).

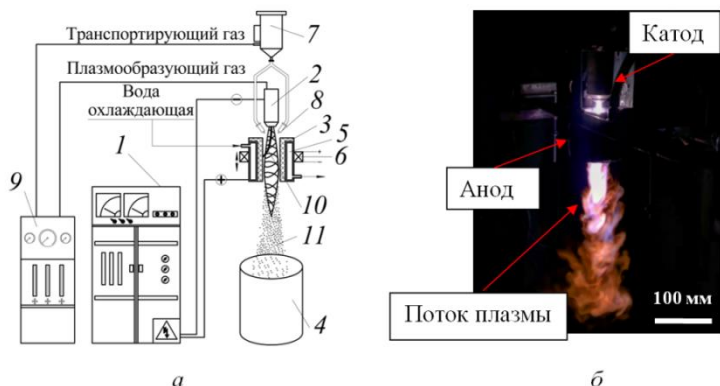


Рис. 1 – Экспериментальный электроплазменный стенд для получения микросфер: а – Принципиальная схема электроплазменного стенда:

1 – источник питания; 2 – плазменный генератор (катод); 3 – полая графитовая трубка (анод); 4 – камера сбора; 5 – водоохлаждаемый медный корпус; 6 – регулируемый соленоид; 7 – порошковый дозатор; 8 – инжекторы; 9 – шкаф управления; 10 – плазменная дуга; 11 – частицы.

б – процесс работы электроплазменного стенда

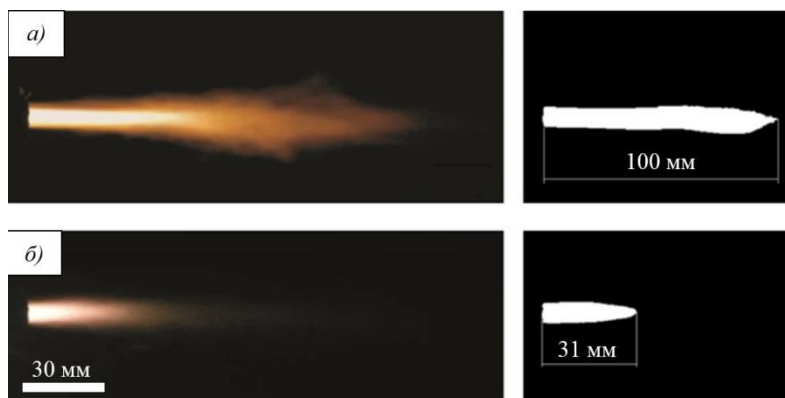


Рис. 2– Снимки формы плазменной струи при различном расходе плазмобразующего газа:

а – ламинарное истечение плазменной струи  $Re=1300$ ,  $G_g=1,0$  г/с;

б – турбулентное истечение плазменной струи  $Re=2600$ ,  $G_g=1,5$  г/с

В зависимости от расхода плазмобразующего газа плазменная струя может находиться в ламинарном или турбулентном состоянии. При

сравнении турбулентной и ламинарной струи видно, что зона активного нагрева (ядро) у ламинарного потока в два раза длиннее. Также стоит отметить, что ламинарный поток стабилен и позволяет обеспечить интенсивную обработку вводимых в него частиц.

*Литература:*

1. Navid R., Carsten K. Cenospheres: A review // Fuel. – 2017 – Vol. 207. – No. 1. – P. 1–12.
2. Shelby J.E. Introduction to glass science and technology // Cambridge: The Royal Society of Chemistry. – 2005. – 312 P.
3. Донской А.В., Клубников В.С. Электродплазменные процессы и установки в машиностроении / Ленинград: Машиностроение, 1979. – 221 с.
4. Шеховцов В.В., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Чибирков В.К. Устройство для получения микросфер и микрошариков из оксидных материалов // Патент на изобретение №2664287. Оpubл. 16.08.2018 Бюл. №23.

## **ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА**

**С.С. Гринько, А.П. Кислов**  
**Павлодарский государственный университет**  
**им. С. Торайгырова**  
**г. Павлодар, grinko-sergey96@mail.ru**

*Среди процессов электронагрева, применяемых для нагрева под ковку, наиболее эффективными являются электроконтактный и индукционный. В частности электроконтактный нагрев имеет высокие энергетические показатели для нагрева прутков стержней с отношением длины к диаметру, большим 4, и для непрерывного нагрева тонких деталей, таких, как проволока и лента.*

*Among the various processes of electric heating, the most effective are electric contact and induction. In particular, electric contact heating has high energy performance for heating rods of bars with a ratio of length to diameter greater than 4, and for the continuous heating of thin parts, such as wire and tape.*

На рис. 1 приведены зависимости полного КПД установок электроконтактного и индукционного нагрева, получаемого при нагреве стальных цилиндрических заготовок перед обработкой давлением до температуры 1250°C.

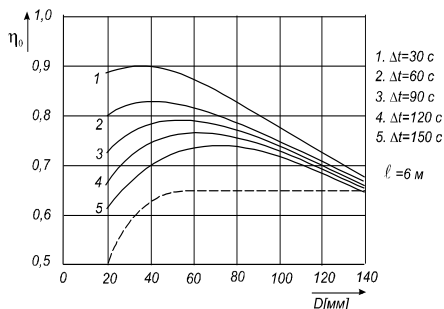


Рис. 1 – Зависимость полного КПД нагрева цилиндрической заготовки (сталь 45) от диаметра и времени нагрева до конечной температуры  $1250^{\circ}\text{C}$ :  $l=6\text{ м}$ ;  $X_e/R_0=2$ ; сплошная линия – электроконтактный нагрев; пунктирная линия - индукционный нагрев

Полный КПД установок электроконтактного нагрева зависит от времени нагрева и диаметра заготовки, достигая величин 75-80%, и в большом диапазоне диаметров нагреваемых деталей (до 120-140 мм) он превышает значения общего КПД установок индукционного нагрева

Расход удельной энергии, затрачиваемый в установках электроконтактного нагрева, зависит от нескольких переменных, наиболее важными из которых являются время нагрева, длина и диаметр заготовки. Влияние этих параметров на нагрев стали показано на рис. 2. Из рис. 2 видно, что для заданной длины заготовки существует оптимальное время нагрева, которое дает минимальный расход энергии.

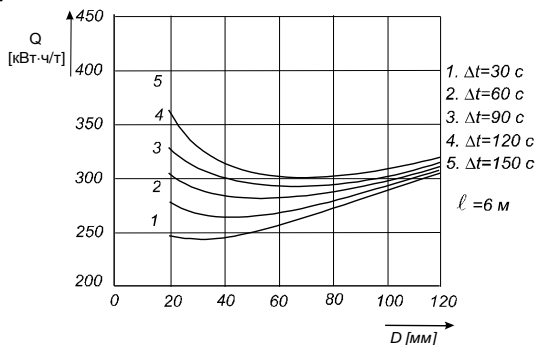


Рис. 2 - Зависимости удельного расхода энергии установок электроконтактного нагрева от диаметра заготовки при различном времени нагрева: длина  $l=6\text{ м}$ .; сталь 45;  $X_e/R_0=2$ ; температура нагрева  $1250^{\circ}\text{C}$



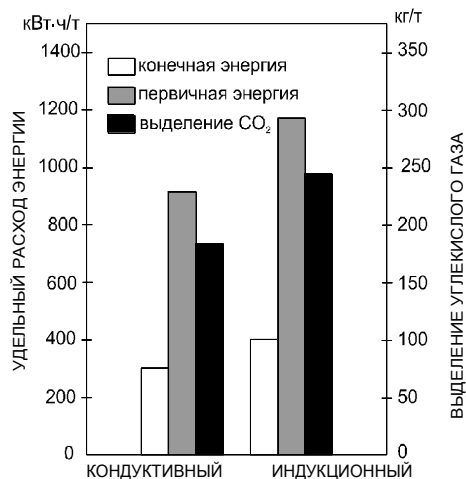


Рис. 3 - Сравнение конечного и первичного удельного расхода энергии и выделения CO<sub>2</sub> для стали, нагреваемой под ковку до температуры 1250<sup>0</sup>С в различных электронагревательных установках

Установки электроконтактного нагрева имеют существенные преимущества по сравнению с установками индукционного нагрева по таким параметрам, как первичная энергия, требуемая для выполнения технологического процесса, и выделение углекислого газа. Тенденции изменения парка ковочного оборудования в сторону установок электронагрева в мире усиливаются и подтверждают то, что во многих случаях электроконтактный нагрев может рассматриваться как наиболее экономичный и экологичный вид нагрева.

#### *Литература:*

1. Д. И. Романов. Электроконтактный нагрев металлов. - М.: Машиностроение, 1981.
2. Современные энергосберегающие технологии: Учеб. Пособие для вузов/ Ю. И. Блинов, А. С. Васильев, А. Н. Никаноров и др. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000.-564 с.: ил.
3. Электроконтактный нагрев металлов : монография / А. И. Алиферов, С. Луки. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - 224 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ИНЖЕКТОРА СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ

К.А. Гришина<sup>1,2</sup>

Новосибирский государственный технический университет<sup>1</sup>,  
Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН<sup>2</sup>,  
г. Новосибирск, grishinakristina21@gmail.com

Данная работа посвящена расчету электродинамических характеристик ускоряющих структур типа диафрагмированный волновод. В работе получены параметры, определены источники погрешностей при производстве ускоряющих структур источника СКИФ, которые приводят к росту энергетического разброса в ускоряющих структурах инжектора. Из полученных данных будет выработано техническое задание на изготовление ускоряющих структур инжектора СКИФ и на группирующую систему.

This work is devoted to the calculation of electrodynamic characteristics of accelerating structures of the diaphragm waveguide type. In this paper, the parameters are obtained, the sources of errors in the production of accelerating structures of the source SKIF, which lead to an increase in the energy spread in the accelerating structures of the injector. From the obtained data, the technical task for the manufacture of accelerating structures of the SKIF injector and for the grouping system will be developed.

В настоящее время в Новосибирске принят к реализации проект по созданию современного источника синхротронного излучения – Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ). Предполагается, что основное кольцо источника будет иметь энергию электронов 3 ГэВ с эмиттансом около 60 пм. На рис. 1 представлена общая схема Новосибирского источника СИ

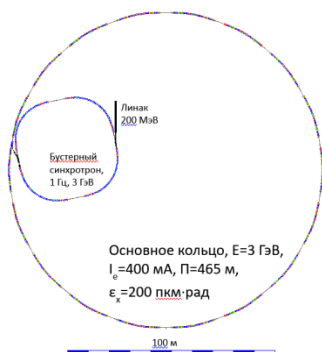


Рис. 1 -общая схема Сибирского кольцевого источника фотонов

Для этих целей в качестве инжектора планируется использовать линейный ускоритель электронов и бустерный накопитель. Линейный ускоритель с энергией в районе 200 МэВ будет состоять из регулярных ускоряющих структур с частотой ускоряющего поля 2856 МГц. Предполагается использовать трехметровые ускоряющие структуры на основе диафрагмированного волновода с бегущим типом волны с модой колебания  $2\pi/3$ , с постоянным импедансом. Данный тип структур давно и успешно используется во многих ускорителях мира, в том числе и в Институте ядерной физики на инжекционном комплексе ВЭПП-5. Тем не менее, для инжекционного комплекса «СКИФ» необходимы параметры пучка, сильно отличающиеся от инжекционного комплекса ВЭПП-5.

Данная работа посвящена определению характеристик ускоряющих структур и определению критериев точности параметров ускоряющих структур.

Для получения формул для расчета необходимо диафрагмированный волновод представить в виде схемы для бесконечной цепочки одинаковых связанных резонаторов.

С помощью уравнения Кирхгофа для  $n$ -го контура, получено дисперсионное уравнение:

$$-\frac{\omega_0^2}{\omega^2} + 1 - i \frac{\omega_0}{Q_0 \omega} + k_c \cos(\theta) = 0, \quad (1)$$

где  $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$  – собственная частота резонатора,  $Q_0 = \frac{\omega_0 L}{R}$  – собственная добротность резонатора,  $\theta = \beta d$  – набег фазы на ячейку.

Окончательно дисперсионное уравнение для связанных резонаторов имеет вид

$$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + k_c \cos(\theta)}}. \quad (2)$$

Фазовая и групповая скорости с учетом  $v_\phi = \frac{\omega}{\beta}$  и  $v_{гр} = \frac{\partial \omega}{\partial \beta}$  равны

$$v_\phi = \frac{\omega_0 d}{\theta} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + k_c \cos \theta}}. \quad (3)$$

$$v_{гр} = k_c \omega_0 d \cdot \frac{\sin \theta}{2(1 + k_c \cos \theta)^{3/2}}. \quad (4)$$

С помощью анализатора S-параметров, получена полоса отраженного сигнала, и с помощью этих данных посчитаны некоторые электродинамические параметры ускоряющей структуры.

1. Коэффициент связи между ячейками  $k_c$  определяется выражением

$$|k_c| \approx \left| \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \right| = 0.23 \quad (5)$$

2. Фазовая  $v_\phi$  и групповая  $v_{гр}$  скорости из уравнения Кирхгофа равны

$$v_\phi = 2.994 \times 10^8 \text{ м/с}, \quad (6)$$

$$v_{гр} = 0.018c. \quad (7)$$

3. Постоянная времени  $\tau_0$  учувствует в описании переходных процессы в волноводе, и с ее помощью можно найти добротность  $Q_0$

$$\tau_0 = \frac{2Q_0}{\omega} = 1.46 \text{ мкс}. \quad (8)$$

4. Коэффициент затухания по полю  $\alpha$  показывает, что поле в волноводе затухает пропорционально  $e^{-\alpha z}$ .

$$\alpha = \frac{1}{\tau_0 v_{гр}} = 0.126 \text{ 1/м}. \quad (9)$$

Время заполнения ускоряющей структуры  $\tau$ - это время, за которое время мощность проходит от начала до конца структуры.

$$\tau = \frac{L}{v_{гр}} = 0.276 \text{ мкс}. \quad (10)$$

В работе сделана оценка допусков параметров ускоряющей структуры – определено отклонение фазы колебания в ускоряющей структуре на основе диафрагмированного волновода

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta d}{d} - \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \frac{\Delta f}{f_0}. \quad (11)$$

Для ускоряющие структуры, производимой в ИЯФ СО РАН, имеем

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta R} = -0.136^\circ/\text{мкм}, \quad (12)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta f} = 2^\circ/\text{МГц}, \quad (13)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta d} = 0.0034^\circ/\text{мкм}, \quad (14)$$

Если в качестве регулярной ускоряющей струкутры использовать диафрагмированный волновод с модой колебания  $\theta_0 = 2\pi/3$ , то при заданной входной мощности суммарное оклонение от рабочего вида колебания, не должно превышать

$$\Delta\theta = 14^\circ. \quad (15)$$

Отклонение в  $14^\circ$  достигается при эффективном суммарном изменении радиуса ускоряющих ячеек на 103 мкм или на 4.1 мм для периода. Видно, что суммарная ошибка периода не так существенна, как

ошибка радиуса изготовления ускоряющих ячеек. Достижение вышеуказанных механических точностей является достаточно трудной задачей.

В результате работы готов стенд для тестирования ускоряющих структур и сделан пользовательский интерфейс для настройки и запуска измерений. Определены основные электродинамические характеристики тестового макета структуры ВЭПП – 5. Определены параметры, необходимые для достижения заданного качества пучка.

Таким образом, из полученных данных будет выработано техническое задание на изготовление ускоряющих структур инжектора СКИФ и на группирующую систему. С учетом проделанных измерений на макете и полученных фазовых ошибок в ускоряющих ячейках, можно заключить, что для источника СКИФ необходимо вносить изменения в производственный процесс для уменьшения фазовых ошибок с целью не допустить роста энергетического пучка в инжекторе из-за энергетического акцептанса последующего кольца накопителя.

#### *Литература*

1. Институт ядерной физики имени Г.И.Будкера СО РАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.inp.nsk.su/nauka/issledovatelskaya-infrastruktura/proekty/sibirskij-istochnik-si/> (дата обращения: 15.06.2019).
2. J.W. Wang RF Properties of Periodic Asselerating Structuries for Linear Colliders//Stanford, California, 1989. – 138p.
3. Александров А.В., Авилов М.С. Антошин А.В. Испытание прототипа форинжектора ВЭПП-5. Препринт ИЯФ// Н.: ИЯФ\_НГТУ, 1997. – 23 с.
4. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т.1// М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.
5. Лоусон Дж.. Физика пучков заряженных части// М.: «Мир»,1980 – 439 с.
6. Левичев А.Е., Павлов В.М. Линейные СВЧ ускорители: электродинамика ускоряющих структур. Учебное пособие//Н.: ИЯФ\_НГТУ, 2014. – 158 с.

# **ИНДУКЦИОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ РАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА КОНЦОВ ТРУБ С ЦЕЛЬЮ СНЯТИЯ НАПРЯЖЕНИЙ**

**В.В. Золотарев, А.И. Алиферов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, zolotoy200896@yandex.ru**

*Данный доклад посвящен созданию новой конструкции индуктора и концентратора переменного магнитного поля для термообработки торцов толстостенных труб с равномерным распределением температурного поля при помощи моделирования и определения оптимальных размеров индуктора, что позволит улучшить качество термообработки, а также увеличит время службы трубопроводов.*

*This report is devoted to the creation of a new design of inductor and concentrator of alternating magnetic field for heat treatment of thick-walled pipe ends with a uniform distribution of the temperature field by modeling and determining the optimal size of the inductor, which will improve the quality of heat treatment, as well as increase the service life of pipelines.*

Индукционный нагрев применяется в различных областях: металлургии, машиностроении, строительстве, сельском хозяйстве, нефтяной промышленности, быту. Им обеспечиваются такие разнообразные технологические процессы, как нагрев металлов и сплавов под работку давлением, различные виды термической обработки металлических изделий различной формы, прочностные испытания деталей машин и тд.

Одной из особенностей индукционного нагрева является возможность обеспечения мощности в определенных зонах нагреваемых металлических изделий. Сегодня он широко применяется в промышленности, где необходимо нагревать только определенные части заготовки, например, конец трубы. Примером может служить: отпуск концов стальных труб для нефтяной промышленности, где перед сваркой осуществляется снятия остаточных напряжений. Существующие методы отпуска не могут обеспечить необходимое равномерное температурное поле на этой заготовке. Решение этой проблемы можно реализовать посредством индукционного нагрева со специальным конструктивным исполнением, как индуктора, так и концентратора переменного магнитного поля.

Для исследования выбран режим нагрева торцевой области трубы из стали 40 длиной 300мм для заданной температуры отпуска  $600^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ . Для исследования выбран метод численного моделирования с использованием ПО ANSYS. На рис. 1 приведена схема индукционной установки. Решена совместная тепловая и электромагнитная двумерная осесимметричная задача. В работе проведены исследования по

нахождению оптимальной конструкции индукционной установки путём выбора расстояний между: нагреваемой трубой и индуктором, между трубой и магнитопроводом, межвиткового расстояния, и определения размеров конструкции.

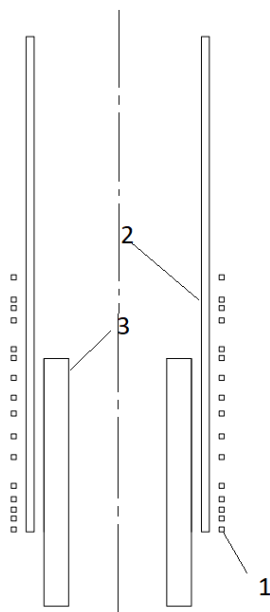


Рис. 1 – Схема индукционной установки: 1 – индуктор, 2 – нагреваемая труба, 3 – магнитопровод.

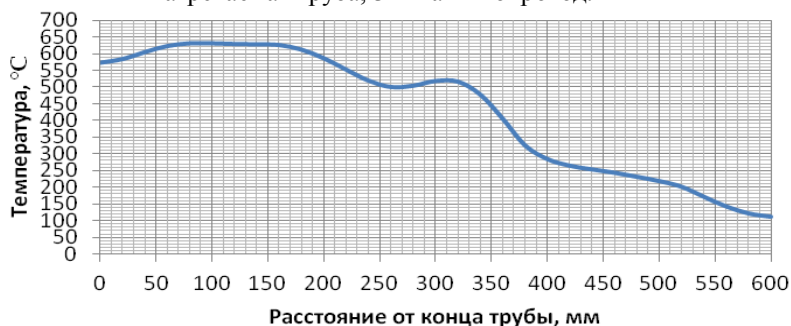


Рис. 2 – Температура по длине от торца трубы.

Получены различные распределения температурного поля по длине нагреваемого участка трубы. Установлена оптимальная геометрия и электрические характеристики индуктора. На рис. 2 показано температурное поле наиболее близкое к равномерному на длине 300мм

от торца трубы. Температурный перепад в области термообработки не превышает  $600 \pm 70^\circ\text{C}$ . Электрический КПД данной установки составил 74,5%.

Исследованная зависимость температурного поля от параметров индукционной установки позволит спроектировать индукционную установку с лучшими качеством термообработки и КПД самой установки.

#### *Литература:*

1. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева / Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева. – М.: Наука, 2012.
2. Электротехнологические установки и системы. Теплопередача в электротехнологии. Упражнения и задачи: учеб. Пособие для вузов.// под ред. В.С. Чердниченко и А.И. Алиферов, - Новосибирск: НГТУ, 2011.
3. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи / А.Д. Свенчанский. – М.: Металлургиздат, 1975.
4. Алиферов А. И., Луи С., Форзан М.. Электротехнологические установки и системы. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие.- Новосибирск: НГТУ, 2017.

## **НИЗКОЧАСТОТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ**

**С.П. Зув, Р.А. Бикеев, В.С. Чердниченко**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, 7407359@mail.ru**

*Исследованы причины возбуждения и динамика составляющих рабочих токов в дуговых сталеплавильных электропечах; проанализированы причинно-следственные связи появления в рабочих токах гармоник с частотами 6-20 Гц.*

*The causes of the excitation and dynamics of the components of the working currents in electric arc furnaces are investigated; the analysis of cause-effect relationships of the appearance in working currents, components with frequencies of 6-20 Hz.*

Дуговые стали плавильные печи (ДСП) являются основными электрометаллургическими комплексами для получения стали из вторичного сырья и предварительно восстановленной окиси железа (металлизированных окатышей).



Известно [1, 2], что при переменном токе форма тока и напряжения на дуге отличается от синусоиды. Для разных условий горения дуги и тепловых режимов в ДСП эти отклонения от синусоидальной формы тока и напряжения на дуге могут меняться в широких пределах. Работу ДСП необходимо рассматривать на основании общей теории полигармонических электрических и энергетических режимов цепей с другой с учетом активной, реактивной мощностей и мощности искажения.

В результате обобщения проведенных исследований и анализа частотного спектра тока дуги установлено существование амплитудных пиков при низких частотах, отличающихся от основной частоты (50 Гц).

Пик в области сверхнизких частот (0,1–6 Гц) связан с электромеханическими колебаниями системы электрод–электрододержатель–стойка и участка гибкого токоподвода [3]. В этом же диапазоне частот происходит изменение тока при вертикальном перемещении электрода под действием регулятора мощности. Пик составляющих рабочего тока в диапазоне частот 16–20 Гц связан с процессами, протекающими на поверхности электродов. Увеличение температуры электродов в течение плавки снижает эту составляющую тока по амплитуде и частоте с перемещением в область частот 5–6 Гц до полного исчезновения.

В качестве базового варианта рассматриваются процессы на графитированном электроде. При учете термоэлектронной эмиссии с поверхности катода, наличии ионного тока и тока обратных электронов из плазмы на катод на поверхности катода соблюдаются соотношения, определяемые уравнением энергетического баланса, которое имеет вид

$$q_i + q_e^{обp} + q_R + q_{\delta} = q_{эм} + q_{исп} + q_r + q_{\lambda}, \quad (1)$$

где  $q_i$  – плотность потока энергии, приносимого ионами;  $q_e^{обp}$  – плотность потока энергии, приносимого на катод обратными электронами из плазмы,  $q_R$  – радиационный поток излучения с поверхности расплавленного металла на электрод;  $q_{\delta}$  – плотность радиационного и конвективного потоков энергии от дуги на электрод;  $q_{эм}$  – плотность потока энергии, уносимого с катода электронами термоэмиссии;  $q_{исп}$  – плотность потока энергии, затрачиваемой на испарение материала катода;  $q_r$  – плотность теплового излучения с наружной поверхности электрода;  $q_{\lambda}$  – плотность потока энергии, отводимого за счет теплопроводности по оси катода.

Для точной количественной оценки баланса энергии необходимо знание условий на поверхности привязки разряда к катоду и в области пространственного заряда, которые зависят от многих факторов:

температуры электрода, материала, геометрии, условий охлаждения катода, уровня тока, самоустанавливающейся плотности плазмы, плотности тока термоэмиссии и тока обратных электронов и других факторов. Поэтому проведем качественный анализ прикатодных явлений с выявлением механизмов, определяющих саморегулирование токопереноса и энергообмена.

Подстановка составляющих энергетического баланса в уравнение (1) даст следующее уравнение

$$j_i(1-S)(\beta V_k + V_i - \varphi_{эф}) + \frac{e \cdot n}{4} \alpha_e \langle V_e \rangle \left( \frac{2kT_e}{e} + \varphi_{эф} \right) \cdot \exp\left(-\frac{eV_k}{kT_e}\right) =$$

$$= K_1 \varepsilon \sigma T_k^4 + K_2 A_0 \varphi_{эф} T_k^2 \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_{эф}}{kT_k}\right) + K_3 \lambda (\partial T_k / \partial z), \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент аккомодации ионов – доля кинетической энергии, передаваемой катоду;  $S$  – доля электронного тока;  $V_k$  – катодное падение потенциала;  $V_i$  – потенциал ионизации атомов;  $\varphi_{эф} = (\varphi - \sqrt{eE})$  – эффективная работа выхода материала катода;  $E$  – напряженность электрического поля на поверхности катода;  $T_k$  – температура катода;  $V_k$  – приэлектродное падение напряжения;  $\lambda$  – теплопроводность графитированного электрода.

Уравнение (2) дает возможность путем численного анализа получить качественную зависимость прикатодного падения потенциала  $V_k$  от температуры катода  $T_k$ . Эта зависимость показана на рис. 1.

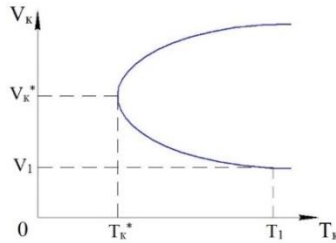


Рис. 1 – Зависимость прикатодного падения потенциала от температуры катода

Уравнение (2) имеет два решения для температуры  $T_k$ . Положение точки  $(V_k^*, T_k^*)$  определяется из условия минимума левой части уравнения (2) по потенциалу  $V_k$ . Значение температуры  $T_k^*$  лежит в области начала интенсивной термоэмиссии. Полученное качественное

решение уравнения (2) позволяет сделать вывод, что для каждой температуры катода могут существовать два режима, существенно отличающиеся механизмами протекания катодных процессов. Верхняя ветвь решения (2) соответствует растущей (устойчивой) вольтамперной характеристики прикатодной области ( $dV_K/dj > 0$ ), а нижняя – падающей ( $dV_K/dj < 0$ ). В стационарном состоянии сумарный тепловой поток на поверхность катода равен нулю ( $q_\Sigma = 0$ ). Для верхней зависимости имеет место неравенство  $dq_\Sigma/dT_K < 0$ , а для нижней  $-dq_\Sigma/dT_K > 0$ . Следовательно, верхняя ветвь решения уравнения (2) устойчива как электрически, так и энергетически, и соответствует диффузной, (распределенной) форме катодной привязки дуги. Нижняя ветвь определяет процессы, протекающие в контрагированном катодном пятне. При этой форме катодного пятна в области температур катода  $T_K$ , близлежащих к точке  $T_K^*$ , катодное пятно может существовать только в подвижной форме из-за большого значения ( $dq_\Sigma/dT_K$ ).

Для контрагированного катодного пятна для поддержания большой плотности тока необходимо изменение температуры катодного пятна для увеличения плотности тока термоэмиссии  $j_{эм}$  и охлаждающего теплового потока  $q_{эм}$ . Как показано в [4], изменяется соотношение удельных потоков  $q_{эм} \gg q_r$ . Это приводит к существенному изменению параметров прикатодной плазмы и соотношения тока обратных электронов и ионного тока. Потенциал  $V_K$  снижается до минимального значения, динамика изменения нагревающего теплового потока  $q_\Sigma = q_i + q_{oe}$  становится положительной ( $dq_\Sigma/dT_K > 0$ ) и за счет роста удельного теплового потока ( $dq_\Sigma/dj_\Sigma > 0$ ) температура катодного пятна растет. В течение этого времени может изменяться площадь и градиент температуры катодного пятна. Рабочая точка перемещается по нижней ветви характеристики в сторону увеличения температуры  $T_K$  до тех пор, пока не нарушается баланс энергии в катодном пятне ( $q_i = q_e^{обp} = q_{эм} + q_r$ ) за счет изменения баланса токов ( $j_i + j_e^{обp} = q_{эм}$ ) и снижается  $V_K$ .

В это мгновение катодное пятно скачком перемещается в область поверхности катода с меньшей температурой с параметрами на характеристике  $V_K(T_K)$ , соответствующей точке  $(V_K^*, T_K^*)$ . Это сопровождается изменением мгновенного значения интегрального тока, что и наблюдается на осциллограммах тока (диапазон частот колебаний тока от 16 до 90 Гц). Максимум амплитуды и частоты соответствует режимам в начале плавки, когда рабочий конец электрода ещё не разогрет. По мере разогрева всей поверхности электрода до температур  $T_K > T_K^*$  амплитуда колебаний мгновенного значения тока за счет перемещения катодного пятна уменьшается. Одновременно снижается частота перемещения катодного пятна до полного исчезновения

перемещений, так как скачки рабочей точки на характеристике  $V_k(T_k)$  происходят на более пологих участках этой характеристики так, что изменение  $\Delta V_k(T_k) \rightarrow 0$ . При разогреве всей поверхности рабочего конца электрода до температур, близких к температуре  $T_l$ , при которой  $(dq_{\Sigma}/dT_k) \rightarrow 0$ , перемещение катодного пятна не наблюдается и на осциллограмме мгновенных значений исчезает эта низкочастотная составляющая тока. Эти режимы стационарного состояния катодного пятна можно формализовать как переход множественных катодных пятен в стационарное пятно с ячеистой структурой (групповые пятна).

#### *Литература:*

1. Бикеев Р.А., Чередниченко В.С., Кузьмин М.Г. Электромагнитные и тепловые процессы в рабочем пространстве сверхмощных дуговых сталеплавильных печей. // Электрометаллургия. – 2013. – №9. – С. 34–40.
2. Плазменные электротехнологические установки / В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин. – М.: Инфра-М, 2019. – 601 с.
3. Электродинамика дуговых сталеплавильных печей / В.С. Чередниченко, А.Н. Ведин, и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 52 с.
4. Чередниченко В.С., Павленко Л.К., Галкин С.Г. Тепловой критерий диффузной привязки дугового разряда с полым катодом // Теплофизика и аэромеханика. – 1994. – Т. 1, №4. – С. 341–345.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАВКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ**

**С.П. Зуев<sup>2</sup>, А.В. Чередниченко<sup>1</sup>, В.С. Чередниченко<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>ОАО «СКБ Сибэлектротерм», <sup>2</sup>Новосибирский  
государственный технический университет, г. Новосибирск,  
7407359@mail.ru**

*Приведены результаты экспериментальных плавок в рабочих режимах вакуумной плазменной электропечи с полым катодом тантала, вольфрама, молибдена, циркония и титана с определением температуры поверхности жидких металлов в зависимости от подводимой энергии нагрева.*

*The results of experimental melts in the operating conditions of a vacuum plasma furnace with a hollow cathode of tantalum, tungsten, molybdenum, zirconium and titanium with the determination of the surface temperature of liquid metals depending on the input heating energy are presented.*

Для оценки интенсивности технологических процессов при обработке металлов в вакуумных плазменных электропечах с полыми катодами необходимо установить зависимости температур нагрева поверхности переплавляемых металлов от удельной мощности нагрева.

Для получения этих зависимостей проведены исследования процессов плавки слитков тантала, вольфрама, молибдена, циркония и титана в плазменных вакуумных электропечах. Эксперименты проводились на лабораторной установке мощностью 120 кВт и промышленной электропечи мощностью 800 кВт. Лабораторная печь позволяла проводить переплав компактных заготовок порошкового или таблеточного исходного материала и комбинированной шихты (заготовка, таблетки, порошок). На промышленной установке проводилась плавка порошка тантала с фракциями до 150 мкм, полученного натриетермическим восстановлением. Специальная конструкция катода позволяла обеспечивать ионно-электронный нагрев порошка в столбе плазмы с введением порошка в расплав и 100 %-ной технологической обработкой порошка. Кристаллизатор на лабораторной установке имел диаметр 100 мм, на промышленной установке – 250 мм [1]. Обе электропечи оборудованы магнитной системой управления величиной максимальной плотности энергии, выделяющейся на поверхности нагрева в кристаллизаторе. Питание электропечей осуществлялось от тиристорного источника питания [2].

Вакуумная система электропечи позволяла обеспечивать предпочтительный с технологической точки зрения диапазон давлений от 0,1 до 100 Па. Плавильная камера лабораторной установки имела диаметр 0,7 м и высоту 0,55 м. Для стабилизации рабочих давлений в камере электропечи вакуумная система включала форвакуумный насос ВН-6Г, паромасляный насос БН-4500, который подсоединён параллельно-последовательно с бустерным насосом ДВН-1500. Плавильная камера имела водоохлаждение, позволяющее совместно с водоохлаждением кристаллизатора, поддона и катододержателя проводить измерение энергетического баланса плавки методом калориметрирования. В крышке плавильной камеры соосно с кристаллизатором устанавливался катододержатель, соединённый с цилиндрическим катодом с внутренним диаметром  $2 \cdot 10^{-2}$  м. Катоды выполнялись из тантала или вольфрама. Плавки проводились с использованием аргона повышенной чистоты. Расход аргона изменялся в диапазоне от  $2,5 \cdot 10^{-5}$  до  $3,1 \cdot 10^{-5}$  кг/с.

Измерение температуры расплавленного металла в кристаллизаторе в зависимости от вводимой мощности проводилось оптическим методом. Как известно, применение оптического пирометра, дающего

значение яркостной температуры, приводит к большой систематической погрешности вследствие зависимости коэффициента излучения металлов от качества поверхности и длины волны, на которой ведётся наблюдение температуры. Применение пирометра, дающего значение цветовой, температуры, также приводит к большой погрешности вследствие зависимости ширины наблюдаемого спектрального интервала от длины волны. Поэтому для уменьшения погрешности температура поверхности расплава определялась по методу цветовой температуры при фотоэлектрической системе регистрации. В качестве регистрирующего элемента был использован монохроматор с дифракционной решеткой, дающей одинаковые спектральные интервалы на различных длинах волн. Считая, что интенсивность излучения определяется законом Вина, имеем для отношений интенсивностей на разных длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ :

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{\lambda_2^5}{\lambda_1^5} \exp \left[ \frac{C_2}{T} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right]. \quad (1)$$

В уравнении (1)  $J_1$  и  $J_2$  – отброс пера самопишущего прибора при фотоэлектрической регистрации излучения на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;  $C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$  м·К;  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты преобразования интенсивности оптического излучения в электрический сигнал.

Логарифмируя уравнение (1), получаем

$$T = C_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \left( \ln \frac{J_1}{J_2} + 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + \ln \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + \ln \frac{k_2}{k_1} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  определялись из тарировки системы измерения по излучению эталонной ленточной лампы типа СИ-2-10. Длины волн  $\lambda_1 = 5 \cdot 10^{-7}$  м,  $\lambda_2 = 4 \cdot 10^{-7}$  м выбраны вследствие того, что на этих длинах волн  $k_1 = k_2$ . Излучательные способности металлов  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  определялись из справочных данных. При этом, так как  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  зависят от длины волны и температуры  $\varepsilon = f(\lambda, T)$ , задача решалась итерационным методом. Вначале определялась цветовая температура из выражения (2) при  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ . Затем при найденной цветовой температуре определялись значения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  и вычислялось новое значение температуры, по которой находилось новое значение  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  и т.д.

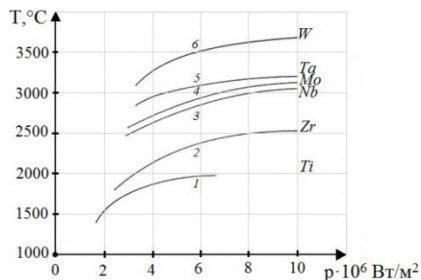


Рис.1—Зависимость температуры поверхности жидкого металла от подводимой удельной мощности

Результаты измерений температуры ванны жидкого металла приведены на рис. 1 в зависимости от средней удельной мощности нагрева. Как видно, величина нагрева металлов зависит от вводимой мощности, теплофизических свойств нагреваемого металла и от тепловых потерь ванны расплава. Вследствие увеличения потерь на излучение и теплопроводностью в кристаллизаторе увеличение температуры нагрева требует непропорционального увеличения мощности нагрева [1]. Ввиду интенсивного движения жидкого металла за счет взаимодействия магнитных полей и токов растекания в жидком металле происходит выравнивание температур на поверхности слитка, что подтверждается замерах температуры по радиусу зеркала расплава. Поэтому температуру, измеряемую в центре ванны, можно считать близкой к средней температуре поверхности жидкого металла.

В таблице 1 приведены численные значения удельной и суммарной мощностей, при которых поверхность металлов в кристаллизаторе оказывалась расплавленной по всей площади и температуры перегрева выше температуры плавления. Измерение температуры и построение зависимостей  $T = f(q)$ , приведенных на рисунке, проводились в установившихся тепловых режимах через 10-12 минут после изменений мощности плазменной системы нагрева. В связи с этим переход температуры от твердого состояния металлов на поверхности к расплавленному не имеет разрывов за счёт затрат энергии на расплавление. Эксперименты по измерению температуры проводились на наплавленных слитках в кристаллизаторе без загрузки шихты в период измерений.

**Таблица 1 – Численные значения удельной и суммарной мощностей**

Материал плавки	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_\lambda^*$	$P_{пл}, \text{кВт}$	$p, \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Номер характеристики на рис. 1
Вольфрам	3420±50	0,461/0,447	60	5,3	270	6
Тантал	2996±50	0,498/0,460	52	4,6	280	5
Молибден	2620±50	0,419/0,403	42	3,7	480	4
Ниобий	2469±15	0,368-0,348	38	3,3	580	3
Цирконий	1852±40	0,450-0,403	32	2,8	690	2
Титан	1608±20	0,503-0,444	26	2,3	400	1

\* – диапазон изменения в области перегрева металлов; числитель при  $\lambda_1$ , знаменатель при  $\lambda_2$ .

Полученные зависимости температуры поверхности ванны жидкого металла от подводимой удельной мощности могут быть использованы для определения оптимального режима плавки и расчета кинетических режимов рафинирования металлов [3]. Кроме этого, установленная связь температуры нагрева и поверхностной мощности определяет режимы в установках для оплавления поверхности промышленных слитков для дегазации и повышения их качества.

#### *Литература:*

1. Чердниченко В.С., Юдин Б.И. Вакуумные плазменные электропечи. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 583 с.
2. Чердниченко М.В., Грамолин А.В., Шкрет С.П. Согласование параметров источников питания и электрических режимов работы вакуумных плазмотронов с полыми катодами // Электротехника, –2003. –№9. – С. 48-53.
3. Чердниченко М.В. Рабочий процесс вакуумных дистилляционных электропечей / Научный вестник НГТУ, –1999. – №1. – С. 106-116.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТАВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКАХ**

**Р.А. Ким, А.И. Алиферов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, karligorev@mail.ru**

*Основной задачей, выполняемой практической работы является создание учебно-исследовательского лабораторного стенда для экспериментального*



исследования явления поверхностного эффекта.

*The main task of the practical work is the creation of an educational research laboratory stand for the experimental research of the skin effect phenomena*

В процессе лабораторного исследования экспериментально будут определяться:

а) изменение плотности тока по периметру боковой поверхности цилиндрического проводника на постоянном и переменном токе промышленной частоты для различных металлов (алюминий, немагнитная нержавеющая сталь, ферромагнитная сталь) при разном проявлении поверхностного эффекта (классический поверхностный эффект, эффект близости, эффект паза);

б) зависимости активного и индуктивного сопротивлений проводников от магнитной проницаемости, удельного сопротивления материала проводника при разном проявлении поверхностного эффекта.

в) для ферромагнитного стержня кругового сечения будут построены кривые, выражающие зависимости его активного и индуктивного сопротивлений от величины пропускаемого по нему переменного тока.

Объектами экспериментального исследования являются цилиндрические образцы, изготовленные из алюминия, нержавеющей стали, ферромагнитной стали. Длина исследуемых проводников 1500 мм, диаметр 50 мм. Такая длина необходима для того, чтобы в средней части проводников ток распределялся так же, как и в случае бесконечно длинных проводов, т.е. чтобы можно было значительно уменьшить влиянием концевого эффекта. Большой диаметр проводника необходим, чтобы на частоте 50 Гц в них можно было обеспечить ярко выраженный поверхностный эффект.

Электрическая цепь питается от специального трансформатора, рассчитанного на большой ток во вторичной цепи при малом напряжении. Номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора 20 В, а номинальный ток 1950 А. Первичная обмотка рассчитана на номинальное напряжение 220 В.

К выводам вторичной обмотки трансформатора присоединяются исследуемые проводники при помощи гибких медных водоохлаждаемых кабелей и специальных водоохлаждаемых контактных узлов. Во вторичную цепь включается трансформатор тока. При больших силах тока обычно измерительные трансформаторы тока выполняются проходного типа, так что достаточно пропустить подводящий ток кабель сквозь окно такого трансформатора. Первичная обмотка питающего трансформатора подключается к сети через автотрансформатор. Этим достигается возможность регулировать ток во вторичной цепи трансформатора.

Помимо электрической цепи, подводящей к испытуемым образцам

ток промышленной частоты, на стенде устанавливается диодный мост, с помощью которого возможно подключение образцов к цепи выпрямленного постоянного тока.

Для каждого из испытуемых образцов экспериментально определяется полное электрическое сопротивление на частоте 50 Гц, используя следующее выражение:

$$Z = r + jx = \dot{U} / \dot{I} = r / \sin\varphi = x / \cos\varphi.$$

Это сопротивление вычисляется по значениям модулей падения напряжения на образце и тока, протекающего в нем. Они измеряются с помощью вольтметра и амперметра, включенных в силовую вторичную цепь питающего трансформатора. Фазный угол  $\varphi$  между током и напряжением будет измеряться посредством двухлучевого осциллографа.

Эта методика измерения позволяет для металлических образцов измерить их активное сопротивление и суммарное индуктивное, включающее в себя как внутреннее, так и внешнее индуктивное сопротивления.

Для немагнитных образцов активное и индуктивное сопротивление не зависит от величины силы тока, а сопротивления ферромагнитного проводника - зависит. Такое явление определяется зависимостью относительной магнитной проницаемости магнитного материала от напряженности магнитного поля  $\mu_r = f(H)$ . Как показано Нейманом Л.Р. [1], эту зависимость удобно рассматривать для относительной магнитной проницаемости, получаемой на поверхности ферромагнитного проводника,  $\mu_{re}$ , которая определяется по величине амплитудного значения напряженности магнитного поля на поверхности проводника  $H_{me} = I_m / (2\pi R)$ , где  $I_m$  - амплитуда тока,  $R$  - наружный радиус образца.

Распределение напряженности электрического поля и плотности тока по периметру цилиндрического проводника будет получено посредством методики, представленной в [2]. Методика основана на определении действующего значения напряженности электрического поля  $E_e$  и действующего значения плотности тока  $\delta_e$  на поверхности испытуемого образца в соответствии со следующими выражениями:

$$E_e = \frac{\sqrt{2}U}{l};$$

$$\delta_e = \frac{\sqrt{2}U}{l \cdot \rho},$$

где  $U$  - падение напряжения, получаемое вдоль линии напряженности электрического поля, измеренное с помощью специального датчика между точками, расположенными на выбранной линии напряженности электрического поля на расстоянии  $l$  друг от друга;  $\rho$  – удельное электросопротивление материала испытуемого металлического цилиндрического образца.

Измерение активного сопротивления испытуемых проводников при протекании по ним постоянного тока будет выполняться по выражению:

$$r_0 = \frac{U}{I},$$

где  $U$  и  $I$  - падение напряжения на испытуемом образце и ток, протекающий в образце, измеренные посредством вольтметра и амперметра.

Оценка проявления поверхностного эффекта (а также эффекта близости и эффекта паза) будет проводиться путем сравнения экспериментальных результатов, полученных для каждого образца на переменном и постоянном токе.

#### *Литература:*

1. Нейман Л.Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. - Л.: Гостехиздат, 1949.- 190.
2. Электроконтактный нагрев металлов: монография / А.И. Алифиров, С.Лупи. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - 224 с.

## **СТУПЕНЬ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**С.С. Кондратьев, В.М. Алексеев, А.А. Жерлицын**  
**Институт силовоточной электроники СО РАН,**  
**г. Томск, kondratiev@oit.hcei.tsc.ru**

*Описаны конструкция и основные параметры ступени линейного импульсного трансформатора для электроразрядных технологий разрушения материалов. Зарядное напряжение емкостного накопителя ступени до 40 кВ. На высокоомной нагрузке ступень позволяет формировать импульсы напряжения с фронтом 100 нс и амплитудой, равной удвоенному зарядному напряжению. В режиме короткого замыкания ток разряда ступени составляет более 10 кА, время до максимума около 400 нс.*

*The design and basic parameters of a linear pulse transformer stage for electric-discharge materials destruction technologies are described. The charging voltage of*

*the capacitive storage of the stage is up to 40 kV. At a high-impedance load, the stage allows the formation of voltage pulses with a front of 100 ns and an amplitude equal to twice the charging voltage. In the short circuit mode, the stage discharge current is more than 10 kA, the time to a maximum of about 400 ns*

В электроразрядных технологиях разрушения материалов рабочим инструментом является сильноточный канал разряда в жидкости или в твердом теле, что дает ряд технологических преимуществ: снимаются ограничения, связанные с износостойкостью разрушающего инструмента; при импульсном нагружении высокие механические напряжения в материале создаются при относительно низкой энергии в импульсе; процесс разрушения регулируется и управляется. В настоящее время исследуется возможность использовать электроразрядные технологии для дезинтеграции и раскрытия руд, выделения ограночного кристаллосырья [1, 2]; разрушения бетона и железобетонных конструкций [3]; утилизации композитных материалов и изделий [4] и др. Для производственного освоения электроразрядных технологий актуальна разработка новых технических решений и создание средств генерирования высоковольтных импульсов, обеспечивающих высокие удельные энергетические и массогабаритные характеристики установок.

Требования к параметрам генераторов для электроразрядных технологий достаточно серьезные, что связано с характером нагрузки, которой является канал разряда. На начальных этапах фрагментации кускового материала до характерных размеров в несколько миллиметров наиболее эффективным является электроимпульсный режим с пробоем через твердое тело. При этом, одним из определяющих условий внедрения канала разряда в твердое тело, находящееся в жидкости, является высокая скорость нарастания напряжения  $\sim 1$  кВ/нс, а для эффективного дробления кусков крупностью несколько десятков миллиметров необходимая амплитуда импульсов напряжения составляет 100–500 кВ. После пробоя сопротивление плазменного канала быстро падает до единиц Ом и менее за время  $\sim 100$  нс, в течение которого происходит вложение основной доли энергии в канал разряда. Необходимым условием эффективного вложения энергии является малое внутреннее сопротивление генератора  $\sim 1$ –10 Ом. Определяющим для удельных энергетических и массогабаритных характеристик генераторов является выбор схемы формирования высоковольтных импульсов. Ряд преимуществ дает использование линейных импульсных трансформаторов [5] вместо более распространенных генераторов Аркадьева-Маркса: удастся существенно снизить объем высоковольтной изоляции и повысить удельную энергоемкость емкостного накопителя энергии, упростить

контроль и обслуживание конденсаторов и коммутаторов накопителя, избежать использования трансформаторного масла.

В представленной работе приведены конструкция и результаты исследования ступени линейного трансформатора, предназначенной для использования в прикладных целях. Принципиальная схема ступени приведены на рис. 1. Единичная ступень – это трансформатор с двумя витками в первичном и одним витком во вторичном контурах.

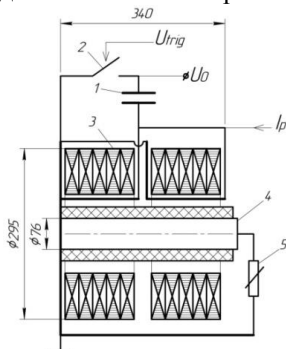


Рис. 1 – Схема ступени.  $U_0$  – зарядное напряжение,  $U_{trig}$  – пусковое напряжение разрядника,  $I_p$  – ток размагничивания сердечников

Первичный контур ступени состоит из емкостного накопителя энергии 1 и управляемого искрового газового разрядника 2. Разрядник коммутирует емкостной накопитель на два параллельно включенных индуктора. Каждый индуктор содержит пять сердечников 3, намотанных лентой из электротехнической стали ЭТ-3425 толщиной 0.05 мм, шириной 18 мм. Длина средней линии сердечника 0.65 м. Размагничивание сердечников осуществляется от дополнительного генератора (100 мкФ, 3 кВ), обеспечивающего ток размагничивания амплитудой ~0.6 кА с временем нарастания 80 мкс. Разрядник запускается в момент достижения током размагничивания амплитудного значения при напряженности магнитного поля ~1 кА/м и магнитной индукции  $B_s \approx 1.8$  Тл. При полном перемагничивании сердечников импульсом ступени максимальный перепад индукции составляет  $\Delta B = 2B_s \approx 3.6$  Тл. Вольт-секундный интеграл сердечников 2-х индукторов, соответствующий полному перемагничиванию, ~40 мВ·с. Вторичный контур ступени образован внутренним изолированным токопроводом диаметром 76 мм (4) и корпусом ступени. Один конец внутреннего токопровода соединен с корпусом на заземленном конце трансформаторной ступени. Высоковольтный конец токопровода соединяется с нагрузкой (5). Вторичный виток, пропущенный через два индуктора, позволяет удвоить зарядное напряжение на выходе ступени.

Важной особенностью ступени является отказ от масляной изоляции и использование воздуха атмосферного давления в качестве изоляции и рабочей среды разрядников.

Ступень испытана при зарядном напряжении до 40 кВ. Параметры ступени определены из опыта короткого замыкания. В Таблице 1 приведены индуктивность  $L$ , активное сопротивление  $R$  и волновое сопротивление  $\rho$  разрядного контура, а также четверть периода тока разряда  $T/4$  для двух вариантов емкостного накопителя  $C$ . В первом варианте емкость накопителя  $C=510$  нФ (три конденсатора ИК100-0.17), во втором варианте –  $C=240$  нФ (два конденсатора ИКЧ-50-0.12).

**Таблица 1 – Параметры ступени трансформатора**

№	$C$ , нФ	$L$ , нГн	$R$ , Ом	$\rho$ , Ом	$T/4$ , нс
1.	510	410	0.32	1.8	400
2.	240	1070	1.8	4.2	420

Пример осциллограмм напряжения и тока ступени с накопителем  $C=240$  нФ при зарядном напряжении 40 кВ показан на рис. 2. Ступень разряжается на воздушный промежуток длиной 3 см, имитирующий нагрузку с нелинейным сопротивлением. На выходе ступени формируется импульс напряжения со скоростью нарастания  $\sim 1$  кВ/нс и амплитудой около 80 кВ, равной удвоенному зарядному напряжению. Через 120 нс происходит пробой промежутка, и начинает протекать ток разряда с фронтом 400 нс, амплитудой более 10 кА.

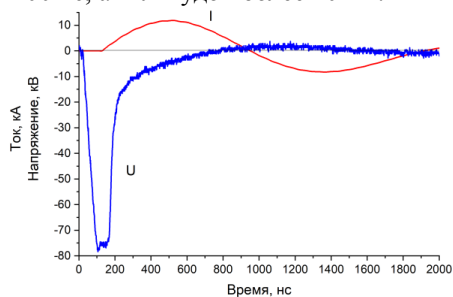


Рис. 2 – Осциллограммы тока  $I$  и напряжение  $U$  ступени

Результаты испытаний позволяют рекомендовать ступень для создания линейных импульсных трансформаторов для нагрузок с переменным сопротивлением со временем высокоомного состояния  $\leq 200$  нс. Например, при последовательном включение трех ступеней на общий вторичный виток амплитуда выходного напряжения составит более 300 кВ при фронте импульса  $\sim 100$  нс.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №19-08-00115а).

*Литература:*

1. *Andres U.* Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses // Intern. Journal of Mineral Processing. – 2010. – 97. – P.31–38.
2. *Wang E., Shi F., Manlapig E.* Mineral liberation by high voltage pulses and conventional comminution with same specific energy levels // Minerals Engineering. – 2012. – 27-28. – P.28–36.
3. *Linb E., Mueller A.* High-performance sonic impulses – an alternative method for processing of concrete // Int. J. Miner. Process. – 2004. – 74S. – S199–208.
4. Liberation of valuable materials in waste printed circuit boards by high-voltage electrical pulses / C.L. Duan, Z.J. Diao, Y.M. Zhao, W. Huang // Minerals Engineering. – 2015. – 70. – P.170–177.
5. Мощный импульсный трансформатор / В.А. Визирь, А.С. Ельчанинов, Ф.Я. Загулов, Н.Ф. Ковшаров, С.А. Сорокин, В.Ф. Федущак // ПТЭ. – 1986. – №5. – С.95–98.

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА  
ДЛЯ ОПЛАВЛЕНИЯ НАПЫЛЕННОГО  
КОРОЗИОННОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ**

**С.С. Кондрашов, М.А. Федин, А.О. Кулешов,**  
**НИУ Московский энергетический институт,**  
**г. Москва, SSKondrashov@yandex.ru**

*Разработан алгоритм решения электромагнитной задачи методом конечных элементов. Создана математическая модель на основе геометрии и физических свойств исследуемой индукционной установки и оплавляемого изделия. Проведен анализ распределения параметров электромагнитного поля в заготовке с применением пакета ELCUT. Получены зависимости интегральных электрических характеристик индукционной установки от частоты и температуры. Разработан экспериментальный стенд, проведено физическое моделирование и осуществлена верификация результатов теоретических исследований.*

*An algorithm for solving the electromagnetic problem by the finite element method is developed. A mathematical model is created on the basis of the geometry and physical properties of the investigated induction unit and the product being melted. The analysis of the distribution of the electromagnetic field parameters in the workpiece using the ELCUT package is carried out. The dependences of the integrated electrical characteristics of the induction installation on the frequency and temperature are obtained. An experimental stand was developed, physical modeling was carried out, and the results of theoretical studies were verified.*

В настоящее время предъявляются все более высокие требования к эксплуатации технологического оборудования и металлоконструкций. Это заставляет осуществлять поиск технологий, которые бы обеспечивали существенное повышение ресурса работоспособности металлических деталей в агрессивных средах.

Одним из самых простых в реализации, эффективных, и экономичных способов является газопламенное порошковое напыление. Однако этот способ имеет и свои недостатки. При приложении высоких контактных давлений, невысокая адгезионная прочность может стать причиной нарушения сплошности поверхности, проявляясь в виде отслоений и сколов частиц покрытия в процессе эксплуатации, применение ацетиленовой горелки при нанесении покрытия на цилиндрические поверхности диаметром от 170 мм и более невозможно из-за больших тепловых потерь пламени [1]. Для нанесения защитных покрытий на детали диаметром более 170 мм, а также для увеличения адгезионной прочности, уменьшения пористости, ликвидации нерасплавленных частиц порошка в структуре покрытий и обеспечения равномерного распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя данную технологию предлагается дополнить индукционной установкой.

В процессе индукционного нагрева в заготовке из-за неравномерного распределения выделяющейся мощности возникает неравномерное распределение температуры, что приводит к термонапряжениям сжатия и термонапряжениям растяжения. Если их значения превышают предел упругости (или предел текучести) материала, то изделие деформируется, а при превышении предела прочности на сжатие или растяжение - разрушается.

Исходя из этого, применение индукционного нагрева для оплавления напыленного покрытия предполагает исследование термических напряжений, возникающих в заготовке в процессе нагрева.

В качестве объекта исследования и моделирования выбрана индукционная установка, которая используется для оплавления напыленного коррозионностойкого покрытия Castolin Eutalloy RW 12496 цилиндрической заготовки из стали 45. Геометрические размеры заготовки: диаметр – 16 мм, общая длина – 120 мм, длина защитного покрытия, наносимого на заготовку – 100 мм, толщина наносимого покрытия – 1 мм, твёрдость HRC заготовки до нанесения защитного покрытия – 21.

При моделировании процесса нанесения защитного покрытия в программах ELCUT и Induction Systems, примем следующие допущения:



1. Деталь вращается со скоростью 20 об/мин и это обеспечивает равномерное распределение покрытия.

2. Так как производитель Castolin не приводит никаких данных о

электропроводности и магнитной проницаемости порошка Eutalloy RW 12496, обратимся к данным современных исследований аналогичных порошков системы Ni-Cr-B-Si-Fe [2, 3] и примем удельное электрическое сопротивление порошкового покрытия равным  $2 \cdot 10^{-6}$  Ом·м.

Для разработки температурного режима, учитывающего возникновение температурных напряжений, проведем анализ распределения электромагнитного и температурного поля в процессе нагрева заготовки. Для этого воспользуемся универсальным конечно-элементным пакетом программ ELCUT.

Рис. 1 – Алгоритм расчета термонапряжений



Алгоритм расчета термонапряжений (рис. 1) основывается на использовании данных, полученных в ходе решения дифференциальных уравнений электромагнитных и тепловых процессов.

Электрические параметры для электромагнитной задачи: частота – 35 кГц, ток индуктора – 380 А, электропроводность индуктора –  $5,6 \cdot 10^7$  См/м, электропроводность покрытия –  $5 \cdot 10^5$  См/м.

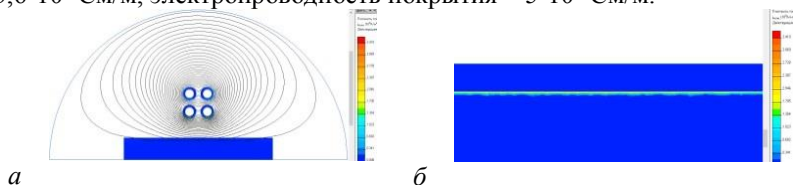


Рис. 2 – Результаты решения электромагнитной задачи:

а – для всей расчетной области, б – увеличенный фрагмент

Как видно из результатов моделирования (рис. 2), максимальная плотность тока наблюдается на стыке покрытия с деталью. Плотность тока, наводящегося в покрытии и в изделии, существенно ниже значения плотности тока в зоне сцепления.

В ПО ELCUT было произведено моделирование на частотах 1 кГц, 35 кГц, 100 кГц и 1 МГц для выбора рациональной частоты оплавления с учетом свойств материала детали и напыляемого материала.

При анализе графиков плотности тока (рис. 3) в режимах нагрева на частоте 100 кГц и 1 МГц наглядно просматривается преимущество применения повышенных частот. Плотность тока максимальна в месте сплавления поверхностей материалов на частотах 35 кГц, 100 кГц, 1 МГц. Значение тепловыделения в этих случаях также максимально в зоне сцепления. Однако, анализ тепловых процессов в программе Induction Systems показал, что применение нагрева при таких частотах нецелесообразно ввиду возникновения больших температурных напряжений в стальной заготовке. В связи с этим предлагается использовать частоту 35 кГц.

Результаты моделирования показывают, что покрытие достигло нужной температуры оплавления 1100 °С. Несмотря на это, необходимо провести проверку на термические напряжения.

Расчеты термонапряженного состояния в программе Induction Systems показывают, что максимум термонапряжений приходится на момент времени  $\tau = 20$  с, когда  $\sigma = 295$  МПа, при этом  $\sigma_z < \sigma_{\text{текуч.}}$  – значение напряжения меньше предела текучести. Напряжения на поверхности во время нагрева не превышают половины предела текучести.

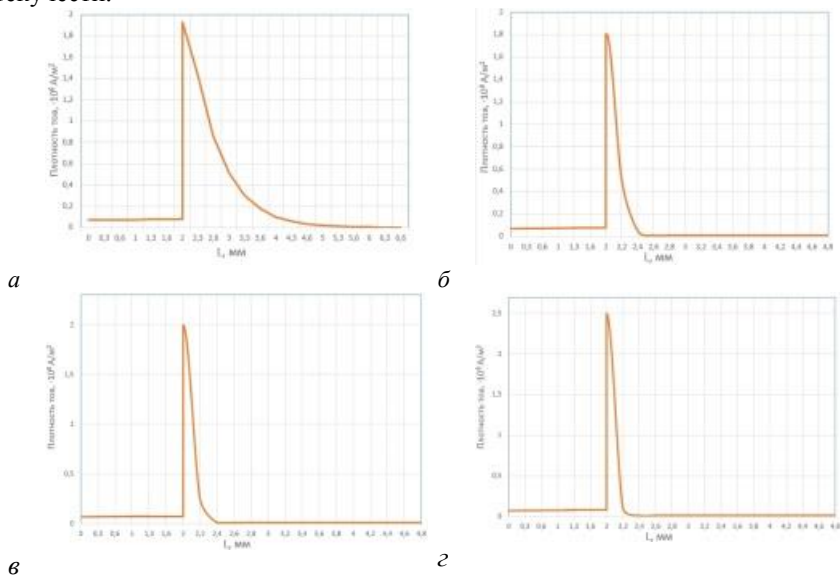


Рис. 3 – Результаты решение электромагнитной задачи:  
а – 1 кГц; б – 35 кГц; в – 100 кГц; г – 1 МГц;

Для уменьшения возникающих термонапряжений нагрев выполняется в две стадии непрерывно-последовательным способом:

1) нагрев с 20 °С до 770 °С при удельной поверхностной мощности 200 кВт/м<sup>2</sup> в течение 45 с при частоте 35 кГц;

2) нагрев с 770 °С до 1100 °С при удельной поверхностной мощности 350 кВт/м<sup>2</sup> в течение 60 с при частоте 35 кГц.

После оплавления заготовки было произведено измерение твердости покрытия. Твердость покрытия равна 53 HRC.

#### *Литература:*

1. Кудинов В. В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.

2. Антошин Е. В. Газотермическое напыление покрытий. — М.: “Машиностроение”, 1974.

3. Балдаев, Л.Х. Газотермическое напыление: учебное пособие/Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов, В.А. Вахалин; под общ. ред. Л.Х. Балдаева. — М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЬ РАСПЛАВА В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ И ВАКУУМА**

**Е.В. Конюшенко, Н.А. Сабайкин, Д.Ю. Соловьев**  
**Национальный исследовательский университет «МЭИ»,**  
**г. Москва, Konyushenko.elizaveta@yandex.ru**

*В данной работе рассматривается система электромагнитного перемешивателя расплава в условиях космической невесомости и вакуума, а также осуществляется оптимизации магнитной системы трехфазного индуктора по критерию минимума потребляемой мощности.*

*Также в работе представлен результат моделирования преобразовательного устройства – инвертора напряжения, и электромагнитного перемешивателя расплава, которые будут работать в условиях космического пространства. Предложенный инвертор питается от бортовой сети 27 В постоянного тока и должен обеспечить на выходе переменное напряжение с переменной частотой, находящейся в диапазоне 50 – 400 Гц. Частота изменяется дискретно с частотой 50 Гц.*

*In this work, we consider a system of an electromagnetic melt mixer under conditions of space zero gravity and vacuum and optimize the magnetic system of a three-phase inductor according to the criterion of minimum power consumption.*

*Also, the work presents the simulation result of a conversion device - a voltage inverter, and an electromagnetic melt mixer, which will work in outer space. The proposed inverter is powered by an on-board network of 27 V DC and must provide*

*an alternating voltage with a variable frequency in the range of 50 - 400 Hz at the output. The frequency changes discretely with a frequency of 50 Hz.*

Прогресс полупроводниковой техники повышает требование к качеству структуры непрерывнолитых кристаллов и стремится увеличить ассортимент получаемых материалов, а также повысить производительность устройств перемешивателя расплава. Качество непрерывнолитых заготовок зависит от многих технологических параметров литья, конструктивных параметров оборудования и т.д. В процессе изготовления присутствуют процессы усадочные, ликвидационные и кристаллизации, из-за этого в макроструктуре сплава есть дефекты, которые невозможно устранить даже при рациональных технологических и конструктивных параметрах.

Для получения технически чистых полупроводниковых кристаллов без примесей, систему электромагнитного перемешивателя расплава помещают на орбитальную высоту. Установка состоит из высокотемпературной печи и перемешивателя расплавов. Перемешиватель расплава представляет собой асинхронный двигатель, который состоит из статора-индуктора, вместо ротора — расплав[1]. Расплав подается в капсуле при помощи установки барабанного типа (рис. 1).

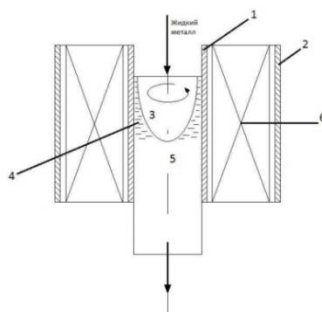


Рис. 1 – Схема установки статора ЭМП в кристаллизаторе:

- 1 – медная водоохлаждаемая гильза; 2 – наружный стальной кожух;
- 3 – жидкий металл; 4 – оболочка слитка; 5 – слиток-кристалл;
- 6 – электромагнитный перемешиватель - индуктор

В оболочке кристалла появляются такие дефекты слитка, как наружные продольные и поперечные трещины, поверхностные складки и ужимины, искажение профиля. Эффективным средством предотвращения таких дефектов является устройство ЭМП — электромагнитного перемешивателя расплава (фактически статор —

индуктор асинхронной машины) [2]. Технические требования к данному изделию приведены в таблице 1.

**Таблица 1 - Технические характеристики индуктора**

Напряжение питания, В	27 $\pm$ 4
Максимальная потребляемая мощность, Вт	$\leq$ 120
Диапазон частот работы индуктора с шагом 50 Гц	50...400
Напряженность магнитного поля в центре индуктора, кА/м	$\geq$ 4
Сопротивление изоляции между обмотками индуктора и корпусом при н.у., МОм	$\geq$ 20
Максимальная температура в месте расположения индуктора, С°	$\leq$ 500
Внутренний диаметр индуктора, мм	152
Наружный диаметр индуктора, мм	200
Высота индуктора, мм	190
Масса индуктора, кг	18 $\pm$ 2

В работе получены зависимости напряженности электромагнитного поля в центре электромагнитного индуктора от углов раскрытия полюса и полюсного наконечника. Проведена оптимизация магнитной системы трехфазного индуктора по критерию минимума потребляемой мощности, также по итогам расчета сделан выбор конструкции системы с углом раскрытия полюса равному 25° и с углом раскрытия полюсного наконечника равному 34°. Потребляемая мощность из сети трехфазным индуктором, при данных углах раскрытия составила  $P_{\phi}$  =24,58 Вт.

В настоящее время полупроводниковые приборы плотно вошли в нашу жизнь. Одним из многочисленных устройств на базе полупроводников является инвертор напряжения (ИН), преобразующий энергию постоянного тока в энергию переменного. Системы, построенные на основе ИН, находят широкое применение: источники бесперебойного питания для ответственных потребителей; управление электроприводами; бортовые системы электроснабжения подвижных объектов и т.д.

Одной из областей применений инвертора является питание электромагнитного перемешивателя расплава, в условиях космического пространства. Поэтому к этим установкам предъявляются высокие массогабаритные показатели и высокая надежность.

В работе рассмотрена схема трёхфазного инвертора напряжения (рис. 2). На вход однофазного высокочастотного инвертора напряжения 1, частота равна 40 кГц, подаётся постоянное напряжение 27 В, его высокая частота позволит снизить габариты и массу следующего за ним

трансформатора 2, необходимого для повышения уровня входного напряжения. Далее напряжение подаётся на выпрямитель 3, а затем во избежание искажений поступает на Г-образный LC-фильтр 4. Следом подключается низкочастотный трехфазный инвертор напряжения 5, на выходе которого формируется требуемое напряжение. Для обеспечения требуемого качества напряжения на выходе стоит 2-ой Г-образный сглаживающий LC-фильтр 6[3].

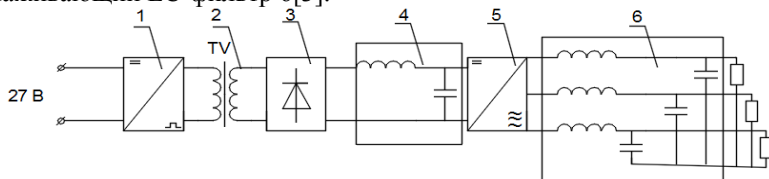


Рис.2 – Структурная схема источника питания

Изначально предполагалось, что регулирование напряжения будет происходить только в ВЧ инверторе широтным способом, а формирование напряжения в трехфазном инверторе происходило за счет биполярной ШИМ по трапецеидальному закону, что позволяет снизить динамические потери в ключах [4]. Для определения параметры фильтра была использована упрощенная методика. Сначала по требуемому коэффициенту гармоник были рассчитано произведение LC, затем с помощью моделирования проведен подбор необходимых значений.

Полученные параметры оказались большими, и фильтр с такими параметрами был массивным, поэтому было решено составить вторую модель, где регулирование напряжения производилось в высокочастотном инверторе и в трехфазном инверторе. Параметры фильтров в обоих моделях приведены в таблице 2.

**Таблица 2 - Параметры фильтров**

Регулирование напряжения в ВЧ инверторе			
Первый LC-фильтр (4)		Второй LC-фильтр (6)	
L, мГн	0.4	L, мГн	10
C, мкФ	350	C, мкФ	40
Регулирование напряжения в ВЧ и в трехфазном инверторах			
Первый LC-фильтр (4)		Второй LC-фильтр (6)	
L, мГн	9	L, мГн	0.005
C, мкФ	250	C, мкФ	50

*Литература:*

1. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать первая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2015.-166 с.
2. Власов Н.Н., Корроль В.В., Радя В.С. Разливка черных металлов: Справ. изд. – М.: Металлургия, 1987.-272 с.
3. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: уч. для вузов / 2-е изд., стереотипное. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.
4. Мыцык Г.С. Методология структурно-алгоритмического синтеза и анализа маломощных устройств силовой электроники для электротехнических комплексов автономных объектов: дис. док. техн. наук: 05.09.12 - Силовая электроника; 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы – М.: 2001. – 520с.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ КОНТРОЛЯ ДЮРАЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**В.Н. Маликов, А.А. Григорьев, В.М. Леис**  
**Алтайский государственный университет**  
**г. Барнаул, osys11@gmail.com**

*На основе вихретокового преобразователя трансформаторного типа разработан анализатор, позволяющий исследовать пластины из дюралюминия и сплавов алюминий-магний на наличие дефектов.*

*On the basis of the eddy current transformer type transducer, an analyzer is being developed that allows examining plates from duralumin and aluminum-magnesium alloys for defects.*

Важное место в современном машиностроении занимают сплавы из дюралюминия и АМГ (алюминий-магний).

Дефекты в данных сплавах могут возникать как на стадии литья, так и на стадии последующего изготовления деталей, например, в результате некачественной сварки. Однако особенно актуальной задачей является поиск дефектов глубокого залегания [1].

Было установлено важное требование к методам решения данной задачи – миниатюризация вихретокового преобразователя (ВТП). Сейчас описаны датчики, размеры которых составлял 5 на 5 мм, при этом диаметр используемой проволоки – 0,15 мм. Данные датчики не способны обеспечить необходимую глубину проникновения поля, а также его локализацию в различных неоднородных средах.

Сверхминиатюрный ВТП [1] использовался в данной работе для дефектоскопии физических параметров при исследовании свойств пластин из алюминиевых сплавов и сварных швов.

Специальный генератор создает сигнал, направляемый на ВТП, предварительно пройдя усилитель сигнала.

Усиленный сигнал поступает на возбуждающие обмотки вихретоковых преобразователей и создает магнитное поле, частота и интенсивность которого зависят от частоты и амплитуды сформированного сигнала соответственно. Магнитное поле, проникая в объект контроля, формирует на измерительных обмотках сигнал, несущий информацию об объекте. Данный сигнал обладает достаточно малой амплитудой (порядка 0,005-0,02 В, в зависимости от интенсивности поля и параметров исследуемого объекта), что приводит к необходимости значительного усиления сигнала для того, чтобы он был надежно зарегистрирован. Для этой цели применяется специальный «микрофонный» усилитель, обеспечивающий усиление в 100 раз. Усилитель построен на основе К548УН1А, имеющей отношение сигнал/шум – 60 Дб.

Эксперименты по исследованию алюминиевых сплавов производились на образцах, изготовленных из дюралюминия марки Д16Т. На первой пластине располагались три дефекта в виде поверхностных трещин, их глубина - 1, 3 и 4 мм, ширина - 1 мм. Сканирование осуществлялось с бездефектной стороны образца. Данные исследования пластин представлены на рис. 1.

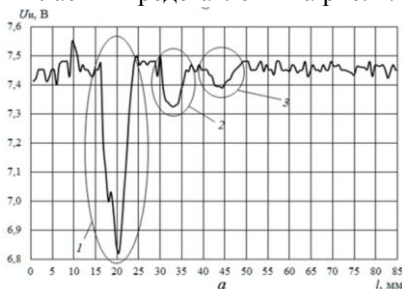


Рис. 1 – Результаты исследования дюралюминиевого сплава

При исследовании пластины при частоте  $\omega = 500$  Гц удалось обнаружить все три прорези. Для этого возможно использование такого приема, как уменьшение амплитуды выходного сигнала  $U_{и}$ . Изменение амплитуды сигнала  $U_{и}$  на первом дефекте составило 0,75 В, на втором – 0,2 В, на третьем – 0,1 В.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00272 «Исследование сплавов,



композиционных и полупроводниковых материалов, сверхтонких проводящих пленок с помощью миниатюрных и сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей».

*Литература:*

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль. М.: Машиностроение, 2003. Том 2. Книга 1, 2

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА БАЗЕ КАРБИДКРЕМНИЕВЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА**

**В.Д. Марченко, Ю.Ю. Перевалов**

**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),  
г. Санкт-Петербург, Mda200751@gmail.com**

*В докладе описан прототип высокочастотного генератора на базе инвертора напряжения, разработанный с применением карбидкремниевых (SiC) высокоскоростных силовых транзисторов. Спроектированы функциональная и принципиальная схемы, произведен расчет электрических компонентов и выполнено моделирование работы схемы в условиях изменяемой нагрузки. На основе этой работы был создан макет генератора на основе карбидкремниевых транзисторов.*

*The article describes a prototype of a high-frequency generator based on a voltage inverter, developed using silicon carbide (SiC) high-speed power transistors. Functional and circuit diagrams were designed, electrical components were calculated, and the operation of the circuit was modeled under conditions of variable load. Based on this work, a generator model based on silicon carbide transistors was created.*

С появлением силовых карбидкремниевых транзисторов (SiC), появилась возможность создания на их базе мощных, высокоэффективных преобразователей частоты, обладающих значительными преимуществами по сравнению с теми, которые были построены ранее на кремниевых полевых транзисторах [1] и генераторных лампах. Этот новый тип генераторов обладает расширенным частотными характеристиками – они способны работать на частотах 440 кГц и выше.

Преобразователи частоты на базе карбидкремниевых транзисторов должны обладать высокой надежностью, компактностью и энергоэффективностью. Введение такого преобразователя в производственный цикл может существенно повысить производительность и качество продукции. Эти особенности могут позволить легко и эффективно внедрить

преобразователи такого типа в линии непрерывной индукционной термообработки деталей, такие как индукционная пайка и сварка. При индукционной пайке часто необходимо иметь компактное и легкое устройство, обладающее высокой мощностью, которое человек способен легко держать в одной руке – высокочастотный генератор на базе карбидкремниевых полевых транзисторов.

При проектировании было произведено сравнение двух силовых транзисторов. Оба транзистора обладают одинаковым корпусом TO – 247 и в каком-то смысле могут считаться аналогами - C2M0080120D (карбидкремниевый транзистор (SiC)) и IRFPE50 (кремниевый MOSFET транзистор). Транзистор C2M0080120D во многом превзошел обычный MOSFET транзистор. Основные преимущества, которые показал SiC транзистор, заключаются в следующем: пониженные потери на коммутацию на высоких частотах более 100кГц, повышенном напряжении между истоком и стоком, величине тока между ними и увеличенная теплопроводность кристалла, что увеличило диапазон рабочих температур. К недостаткам можно отнести дороговизну и диапазон управлявшего напряжения -10 В, +25 В ( $\pm 30$  у аналогов), что требует применение специализированных драйверов.

Разработка генератора начинается с функциональной и принципиальной схем. Основные элементы: С – бытовая электросеть; Ф1 – фильтр синфазных помех; В – мостовой выпрямитель; Ф2 – сглаживающий фильтр; ДТН – датчик тока и напряжения; ИН – полумостовой инвертор напряжения; СЦ – согласующая цепь, представленная в виде снабберной цепи и дросселя (Lc); ФД – фазовый детектор; Н – параллельный резонансный контур; ЭК – электронный ключ (драйвер); МК – микроконтроллер. На рис. 1 представлена функциональная схема.

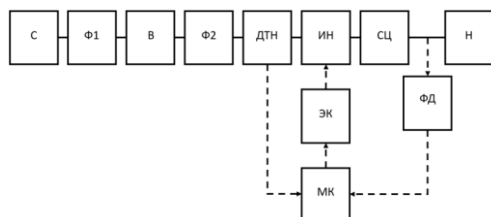


Рис. 1 – функциональная схема генератора

Главными особенностями схемы стало апробирование карбидкремниевых транзисторов и современных систем управления.

Использование драйвера UCC21520DW помогает совместить плюсы аналоговой и удобство программного метода. Драйвер имеет отдельный вход DISABLE, который отвечает за формирование цепи аналоговой

защиты. На рис. 2 представлена принципиальная электрическая схема генератора.

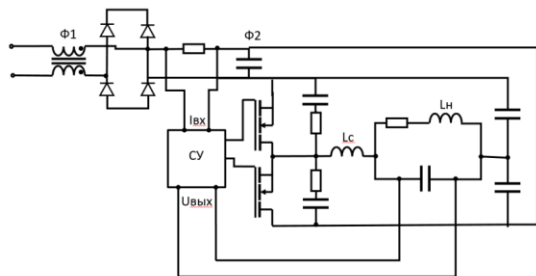


Рис. 2 – Принципиальная электрическая схема

В работе был выполнен расчёт электрических компонентов и моделирование электрических схем с помощью симулятора LTSpice [2]. В результате были выполнены следующие стадии разработки: разработка функциональной и принципиальной схем, моделирование электрической схемы в среде LTSpice, выбор компонентов и разводка печатной. Разработка управляющего контроллера не вошла в состав проекта. Завершающим этапом разработки стало создание опытного образца, который сейчас проходит стадию отладки.

#### *Литература:*

1. Окснер Э. С. Мощные полевые транзисторы и их применение / Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1985
2. Володин В.Я. LTSpice: компьютерное моделирование электронных систем. Издательство, СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 389 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА И РАЗМЕРА ВИТКОВ ИНДУКТОРА НА КАЧЕСТВО ИНДУКЦИОННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО НАГРЕВА СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ**

**А. Омарова, Т.П. Козулина**

**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),  
г. Санкт-Петербург, [oskemen-piter@mail.ru](mailto:oskemen-piter@mail.ru)**

*В данной работе представлены результаты численного моделирования и исследования процесса индукционного поверхностного нагрева стального цилиндра в двухвитковом и трехвитковом индукторах одинаковой высоты и*

диаметра. По полученному распределению температуры в заготовке была выявлена конфигурация индуктора, обеспечивающая наиболее равномерный нагрев заготовки.

*This paper describes the results of numerical simulation and investigation of induction surface heating process of the steel cylinder in the two-wind and three-wind inductors with the same height and diameter. Due to the obtained temperature distribution in the workpiece, the configuration of the inductor was revealed, which provides the most uniform heating of the workpiece.*

На сегодняшний день индукционный поверхностный нагрев является самым эффективным способом поверхностного нагрева в серийном и массовом производстве, поскольку данный метод позволяет получить высокое качество продукции и гарантирует стабильные результаты по сравнению с другими методами нагрева.

Нагрев происходит в индукторе посредством передачи энергии от источника питания в нагреваемую металлическую заготовку. К важным факторам процесса индукционного нагрева относятся скорость нагрева, глубина проникновения тока в металл и температура нагрева. Путем изменения частоты тока можно добиться любой глубины проникновения тока в металлическую заготовку, чтобы прогреть ее на определенную глубину. Изменением силы тока в индукторе регулируется температура в заготовке и скорость ее нагрева.

В рамках данной работы было проведено исследование влияния конфигурации индуктора на нагрев стальной цилиндрической заготовки диаметром 40 мм и высотой 45 мм.

В первом случае был исследован процесс нагрева заготовки в трехвитковом медном индукторе высотой 51 мм из прямоугольного профиля 15×15 мм, с толщиной стенки 2 мм и зазором между витками 3 мм. Во втором случае – в двухвитковом индукторе из прямоугольного профиля 24×15 мм с теми же значениями толщины стенки, зазора между витками и высотой индуктора. В обоих случаях зазор между заготовкой и индуктором составил 5 мм.

Поскольку обе системы симметричны относительно оси вращения, то в коммерческом пакете ANSYS были разработаны две численные двумерные модели  $\frac{1}{2}$  части исследуемых систем, применяя методы, описанные в литературе [1, 2].

Геометрические параметры исследуемых моделей представлены на рис. 1 и 2.

Электромагнитный и электротепловой расчеты были проведены в обоих численных моделях при значениях силы тока в индукторе 5,5 кА, частоте тока 2,4 кГц, времени нагрева 6 с.

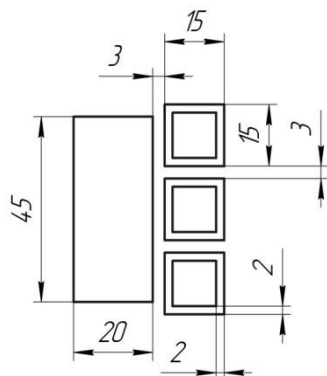


Рис. 1 – Геометрические параметры  $\frac{1}{2}$  части системы с трехвитковым индуктором

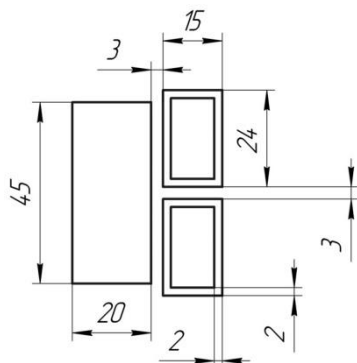


Рис. 2 – Геометрические параметры  $\frac{1}{2}$  части системы с двухвитковым индуктором

Результаты расчетов представлены в виде распределения температуры в заготовке при нагреве в трехвитковом и двухвитковом индукторах на рис. 3 и 4 соответственно.

По результатам моделирования из рисунка 3 видно, что при нагреве в трехвитковом индукторе наблюдается перегрев на поверхности заготовки: в верхней и нижней частях, а также в центральной части напротив расположения среднего витка.

На рис. 4 перегрев заготовки происходит только в верхней и нижней частях, и уровень температуры практически в два раза ниже, чем при нагреве заготовки в трехвитковом индукторе. Таким образом, чтобы нагреть заготовку до температуры закалки в двухвитковом индукторе,

следует увеличить время нагрева и значение тока в индукторе, что энергетически менее выгодно.

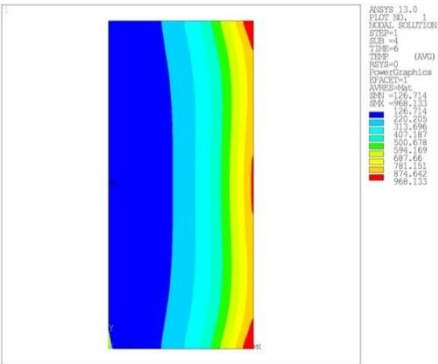


Рис. 3 – Распределение температуры в стальной заготовке в системе с трехвитковым индуктором

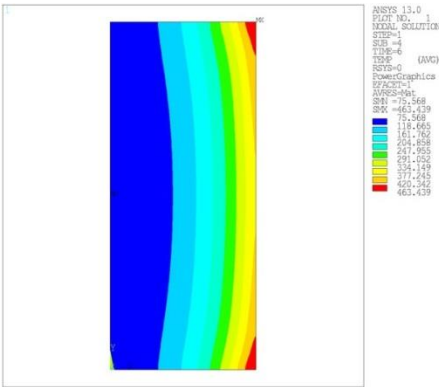


Рис. 4 – Распределение температуры в стальной заготовке в системе с двухвитковым индуктором

Сравнивая результаты исследований, можно сделать вывод, что нагрев цилиндрической заготовки в трехвитковом индукторе наиболее эффективен, чем в двухвитковом индукторе той же высоты и диаметра, поскольку распределение температуры на поверхности заготовки при нагреве в трехвитковом индукторе более равномерное, а температура закалки достигается за более короткий промежуток времени.

### *Литература:*

1. Schlesselmann D., Nacke B., Nikanorov A., Galunin S. Coupled numerical multiphysics simulation methods in induction surface hardening // 6th International conference on computational methods for coupled problems in science and engineering, COUPLED PROBLEMS 2015, 18-20 may 2015: Proceedings. – Venice, 2015. – P. 392-403.
2. Galunin S., Kudryash M., Blinov K., Kozulina T. Numerical simulation and optimization of heater for induction hardening of leading wheel gear // 2015 IEEE North West Russia section young researchers in electrical and electronic engineering conference, ELCONRUSNW 2015, 2-4 feb. 2015: Proceedings. – St. Petersburg, 2015. – P. 192-195.

## **ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО НАГРЕВА ДЛЯ ГРАФИТИЗАЦИИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА**

**Ю.Ю. Перевалов, О.В. Демидович, В.Д. Марченко**  
**Санкт-Петербургский государственный электротехнический**  
**университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),**  
**г. Санкт-Петербург, yuperevalov@yandex.ru**

*В работе излагаются особенности построения электромагнитных моделей установки непрерывного нагрева для графитизации углеродного волокна. Дается краткое описание установки. Приводятся результаты моделирования и расчета оптимальной конструкции магнитопроводов для экранирования корпуса печи. Определены активные сопротивления индукторов, активные и реактивные мощности, КПД, коэффициент мощности и т. д. Анализ устройства на модели позволяет определить его работоспособность, качественные показатели, в том числе эффективность технологического процесса. В процессе анализа проведена оптимизация и выявлены способы улучшения работы установки непрерывного нагрева.*

*The paper describes the features of constructing electromagnetic models of a continuous heating installation for graphitization of carbon fiber. A brief description of the installation is given. The results of modeling and calculation of the optimal design of magnetic cores for shielding the furnace body are presented. The active resistances of the inductors, active and reactive powers, efficiency, power factor, etc. are determined. Analysis of the device on the model allows determining its operability, quality indicators, including the efficiency of the technological process. In the process of analysis, optimization was carried out and ways to improve the operation of the continuous heating installation were identified.*

Применение углеродных волокон благодаря их уникальным свойствам находит широкое применение в промышленности. В

строительстве углеродные ткани применяются в системе внешнего армирования. Использование углеродной ткани при ремонте несущих конструкций позволяет проводить реконструкцию важных объектов в сжатые сроки. Вакуационные углеродные материалы используются для создания цельных композитных деталей. Сочетание легкости и прочности получаемых изделий позволяет заменить алюминиевые сплавы углепластиковыми. Ватомной промышленности углепластики используются при создании энергетических реакторов, где основным требованием к используемым материалам является их стойкость к высоким температурам, высокому давлению и радиационная стойкость.

Высокий спрос на углеродное волокно требует новых, высокопроизводительных промышленных технологий и установок, позволяющих гибко управлять свойствами и качеством получаемого материала.

Современное промышленное технологическое оборудование для графитации строится по принципу высокотемпературных проходных печей, в которых достигается требуемый уровень температур, а также может быть обеспечено заданное температурное распределение по длине печи [1].

Конструкция высокотемпературной индукционной печи косвенного нагрева непрерывного действия для термообработки углеродных волокон показана на рис. 1. Печь состоит из трех индукторов овальной формы, трех источников питания (общая мощность 600 кВт, частота напряжения на выходе 500 Гц), графитового тигля.

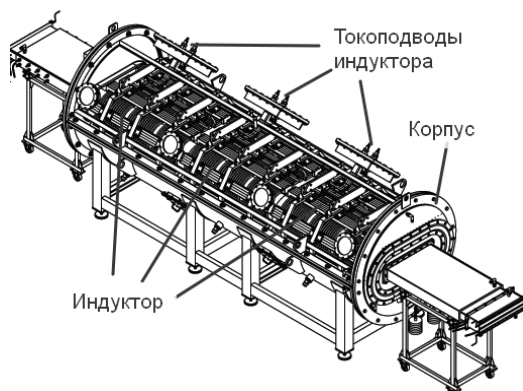


Рис. 1 - Конструкция высокотемпературной индукционной печи косвенного нагрева непрерывного действия для термообработки углеродных волокон



Индукторы в печи расположены на достаточно близком расстоянии, относительно корпуса, поэтому необходимо использовать специальные меры для электромагнитной защиты корпуса от поля индуктора.

Один из возможных способов – использование магнитопроводов [2]. Первоначальный вариант – расположение магнитопроводов по внутреннему периметру корпуса показал низкую эффективность. Исследовалось влияние магнитопроводов, расположенных на внешней поверхности индукторов. Возможно использовать специальную форму магнитопроводов для того, чтобы ослабить магнитную связь между индукторами, что в свою очередь, способствует повышению надежности работы преобразователей частоты.

На рис. 2 показан эскиз сечения печи, на котором представлен один из возможных вариантов расположения магнитопроводов.

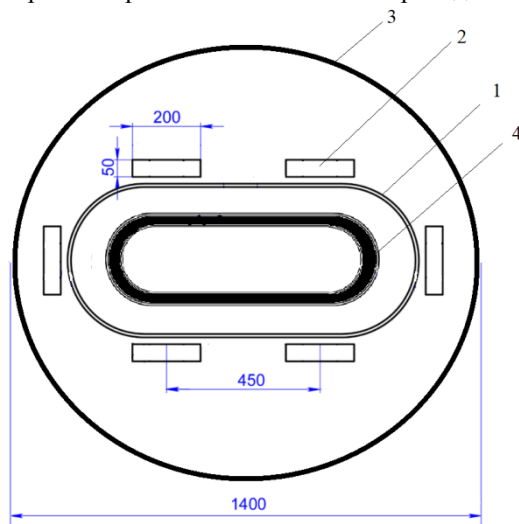


Рис. 2 - Сечение индукционной печи: 1 – индуктор; 2 – магнитопровод из шихтованной стали; 3 – корпус печи; 4 – графитовый тигель.

Использование магнитопроводов для электромагнитной защиты корпуса может быть очень эффективным, однако этот способ не лишен недостатков. Лучший способ защитить корпус печи – покрыть внешнюю поверхность индуктора магнитопроводом на 100%. Однако, использование такого количества магнитопровода повлечет за собой резкое увеличение массы индуктора и его стоимости, помимо этого такое решение конструктивно сложно реализовать, поскольку у реального индуктора есть токоподводы, штутцеры и подставки, на которых он

стоит. Эти факторы не позволят покрыть все 100% внешней площади индуктора магнитопроводом. Было проведено исследование, целью которого было определить какой процент внешней поверхности индуктора необходимо покрыть магнитопроводом, для достаточной защиты корпуса. Были исследованы различные пакеты магнитопроводов, отличающиеся количеством и шириной. Примеры размеров пакетов магнитопроводов: 50×50 мм, 100×50 мм, 120×50 мм, 200×50 мм. На рис. 3 представлены результаты исследования зависимости потерь в корпусе от коэффициента заполнения (1 – магнитопровод покрывает 100% внешней площади индуктора, 0 – магнитопровода нет).

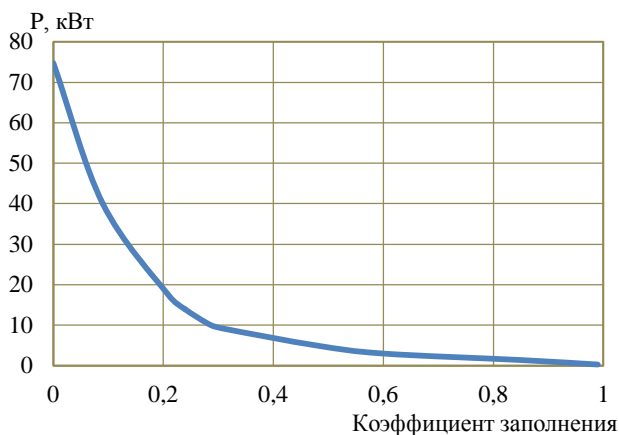


Рис. 3 - Потери в корпусе печи в зависимости от коэффициента заполнения

Было установлено, что использование 30% покрытия индуктора магнитопроводом способствует резкому снижению потерь в корпусе – с 75кВт до 10кВт.

#### *Литература:*

1. Yu. Perevalov, S. Zhambalova, V. Demidovich, V. Lugantsev Simulation of a High-temperature Induction Furnace for Heating Carbon Fibers // hes-19 international conference on heating by electromagnetic sources: материалы докладов международной науч.-техн. конф. - Padova 22-24 мая, 2019г.
2. А.Е.Слухоцкий, В.С.Немков, Н.А.Павлов, А.В.Бамунэр Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов - Л.: Энергоиздат, Ленинградское отд-ние, 1981.- 328с.

# **ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ИНДУКЦИОННАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК**

**М.Д. Ракина, А.И. Алиферов**

**Новосибирский государственный технический университет  
г. Новосибирск, masha-rabbit21@yandex.ru**

*В данной статье представлены исследования, устанавливающие взаимосвязи между удельной поверхностной мощностью, напряженностью магнитного поля на поверхности заготовки, температурой поверхности заготовки, временем нагрева и глубиной слоя, подверженного аустенизации. Даны методические указания по применению разработанных номограмм для расчета параметров индукторов. Проверка предложенных методических подходов выполнена посредством 2D - моделирования в программном комплексе ANSYS и экспериментального исследования.*

*This article presents studies that establish the correlations between the specific surface power, the magnetic field strength on the surface of the workpiece, the surface temperature of the workpiece, the heating time and the depth of the layer subjected to austenization. The guidelines for the use of the developed nomograms for calculating the parameters of inductors are given. Verification of the proposed methodical approaches was carried out by means of 2D modeling in the ANSYS software package and experimental research.*

В 1970-е годы были выполнены исследования, показывающие возможности ВЧ-импульсной индукционной поверхностной закалки стальных изделий [1]. Быстрый нагрев поверхностного слоя, осуществляемый за время от десятков до сотен миллисекунд, обеспечивался высокими удельными мощностями, выделяемыми в тонком поверхностном слое изделия, а процесс закалки - высокими скоростями охлаждения за счет передачи тепла теплопроводностью от тонкого нагретого поверхностного слоя в массив тела изделия. При этом специальные охлаждающие среды и спрей-устройства не применялись.

К настоящему времени такие закалочные системы нашли применение только для изделий и заготовок с небольшой площадью закаливаемой поверхности. Так как для упрочнения таких площадей требуется мощность высокочастотных генераторов в пиковых значениях до нескольких сотен и даже тысяч киловатт.

В 1980-е годы рядом авторов было выполнено исследование возможности применения импульсных высокочастотных генераторов с разрядным током конденсатора на нагрузке, включающей индуктор с заготовкой для импульсной поверхностной индукционной закалки [2].

Преимуществом этой системы электропитания является мощность импульсов тока, достигающая до 700 кВт при входной мощности, потребляемой из сети, в несколько десятков киловатт. Такие импульсы

мощности являются достаточными для поверхностной закали поверхности стальных заготовок размером в несколько десятков квадратных сантиметров. Кроме того, правильный выбор электрических параметров разрядного контура позволяет изменять характеристики импульса мощности, и, следовательно, динамичное распределение температурного поля в заготовке. Это дает возможность влиять на структуру закаливаемого слоя.

В настоящее время является интересным и актуальным расширение применения импульсной миллисекундной индукционной поверхностной закали для изделий с достаточно большой закаливаемой поверхностью. Возрастающий интерес к этим процессам связан также с наличием современных промышленных преобразователей частоты мощностью до 3 МВт, применение которых может обеспечить поверхностную закали площади поверхностей более 100 см<sup>2</sup>.

В результате выполненных расчетов получены графики температуры по радиусу заготовки. Анализ полученных зависимостей показал, что скорость охлаждения нагретого слоя достаточна для реализации его аустенизации за счет отвода тепла из него теплопроводностью в тело заготовки. Получена радиальная зависимость распределения плотности тока. Анализ данной зависимости показал, что плотность тока и удельная мощность в основном сосредотачиваются в слое, имеющем температуру более 750÷800 °С, т.е. мощность выделяется на глубине аустенизации в течение практически всего режима нагрева. Кроме того, получены зависимости интегральной активной мощности, выделяемой в заготовке.

Расчеты были выполнены по 2D взаимосвязанной модели электромагнитных и тепловых процессов в программном пакете ANSYS. Было проведено несколько экспериментальных исследований с различными типами сталей, в результате чего получены зависимости распределения тока индуктора и температуры поверхности в функции времени, а также радиальное распределение плотности тока в зависимости от времени, рассчитанное в ANSYS. Получена зависимость температуры поверхности заготовки от времени, рассчитанная при параметрах  $C = 130$  мкФ,  $R = 550$  Ом,  $L = 0,5$  Гн, которая хорошо воспроизводит условия нагрева заготовки, практически совпадая с экспериментальными данными, представленными авторами в источнике [3], как показано на рис. 1.

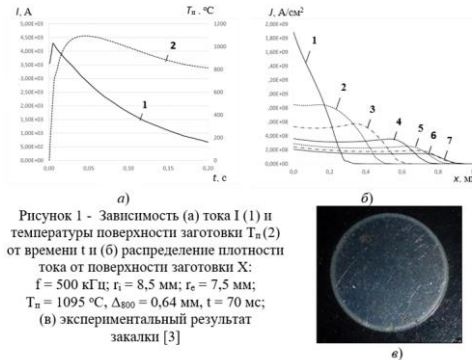


Рисунок 1 - Зависимость (а) тока I (1) и температуры поверхности заготовки  $T_s$  (2) от времени  $t$  и (б) распределение плотности тока от поверхности заготовки  $X$ :  
 $f = 500$  кГц;  $r_1 = 8,5$  мм;  $r_2 = 7,5$  мм;  
 $T_0 = 1095$  °C,  $\Delta_{800} = 0,64$  мм,  $t = 70$  мс;  
 (в) экспериментальный результат закалки [3]

### Литература:

1. Biasutti F., Krause C. // Experimental investigation of process parameters on contour induction hardening of gears. HES-10 Heating by Electromagnetic Sources, 18-21 May 2010, Padua, Italy, p.189-199.
2. Lupi, S., Di Pieri, C., Cappello, A. and Crepaz, G. // Capacitors-discharge induction heating installations for high-frequency pulse hardening. X UIE Congress, 18-22 June 1984, Stockholm- Sweden, n. 312.
3. Aliferov A. I. Milliseconds pulse induction hardening / A. I. Aliferov, M. Forzan, S. Lupi // International Journal of Microstructure and Materials Properties. - 2018. - Vol. 13, iss. 1-2. - P. 73-84. - DOI: 10.1504/IJMMP.2018.093287.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА КАБЕЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК

**О.В. Стрельцова, В.В. Ишин, А.С. Бондарь**  
**Санкт-Петербургский государственный электротехнический**  
**университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),**  
**г. Санкт-Петербург, streltsova-olga1995@mail.ru**

*В работе представлены результаты моделирования тепловых полей силового кабеля при наличии нелинейной нагрузки, потребляемый ток которой содержит в своем спектре гармонические составляющие, кратные трем.*

*The results of simulation the thermal fields of a power cable in the presence of a nonlinear load are presented in the paper. The consumption current contains in its spectrum harmonic components that are multiples of three.*

Проблема нагрева силовых кабелей распределительных сетей жилых домов и общественных зданий возникла с началом широкого

распространения нелинейных потребителей, например, освещения, источников бесперебойного питания, рефрижераторов в крупных магазинах, современной медицинской техники и т.д. Результатом разложения в ряд Фурье потребляемого тока такого оборудования будет являться спектр гармонических составляющих с высшими гармоническими составляющими. Гармонические составляющие, кратные трем, суммируются в нулевом проводнике и вызывают его нагрев, причем величина тока может достигать тока фаз, либо превышать его [1].

Задача моделирования теплового поля заключалась в получении распределения температур при наличии в нулевом проводнике различных гармоник, кратных трем.

Моделирование производилось в пакете программ ANSYS Multiphysics, где решалась сначала электромагнитная, а затем тепловая задача, причем условия были таковы, что в нулевом проводнике поочередно задавалась только одна гармоническая составляющая определенной частоты (150 Гц, 450 Гц и т.д.), а также проводились расчеты при различной величине третьей гармонической составляющей. Нагрузка была принята трехфазной.

В качестве объекта исследования выбран силовой пятижильный кабель ППГнг(А)-HF 5х35 мм<sup>2</sup>, который в настоящее время используется в сетях электроснабжения образовательных учреждений, офисах, аэропортах и в других зданиях с высоким требованием к пожарной безопасности. Кабель состоит из 5 медных токопроводящих жил сечением 35 мм<sup>2</sup>, три из которых являются фазными, одна играет роль нулевого проводника, а другая-жила заземления. Изоляция и оболочка кабеля, а также его заполнение, выполнены из безгалогенной композиции.

Допустимый ток при прокладке кабеля на воздухе равен 127 А. Максимальная допустимая температура перегрева оболочки, изоляции и заполнения может составлять от 80 °С до 100 °С в зависимости от состава материала.

В таблице 1 показаны допустимые температуры кабеля.

**Таблица 1 – Параметры кабеля**

Параметр	Значение
Длительно допустимая температура нагрева жил	70 °С
Предельная температура нагрева жил	160 °С
Допустимая температура в режиме перегрузки	90 °С

На этапе создания модели были введены физические свойства материалов кабеля, такие как:

- удельное электрическое сопротивление (для медных жил составляет  $2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, для изоляции, оболочки и заполнения –  $10^{12}$  Ом·м);
- относительная магнитная проницаемость (для всех материалов равна 1);
- коэффициент теплопроводности (для медных жил составляет 393 Вт/(м·К), для изоляции, оболочки и заполнения 1,7 Вт/(м·К)).

В результате расчетов получили картины теплового поля, с которых были взяты значения температур для построения зависимостей. Распределение температур при отсутствии токов в нулевом проводнике показано на рис. 1, а при присутствии девятой гармонической составляющей, величина которой составляет 25 % от фазного тока, на рис. 2.

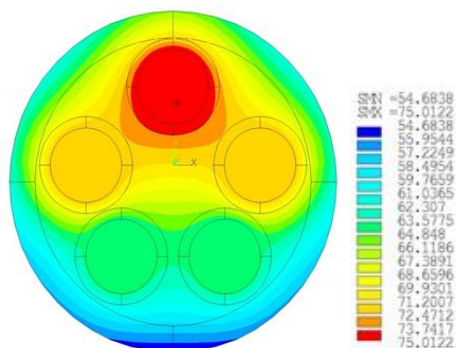


Рис. 1 – Температурное поле при отсутствии тока в нейтрали

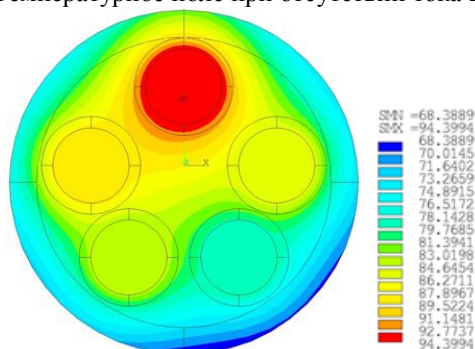


Рис. 2 – Температурное поле при наличии девятой гармоники (25 %)

На рис. 1, хотя видна несимметричность, но температуры жил отличаются всего на пару градусов, в то время как на рисунке 2 различие составляет на 10 градусов, причем полученные температуры жил характерны для работы кабеля в режиме перегрузки. Другие результаты представлены ниже в виде графиков.

На рис. 3 показана зависимость температуры фазной жилы и проводника нейтрали от процентного отношения значения девятой гармоники к первой, а на рис. 4 дана гистограмма, которая показывает величину температур фазной жилы и нулевой для гармоник, кратных трем, выраженных своими частотами.

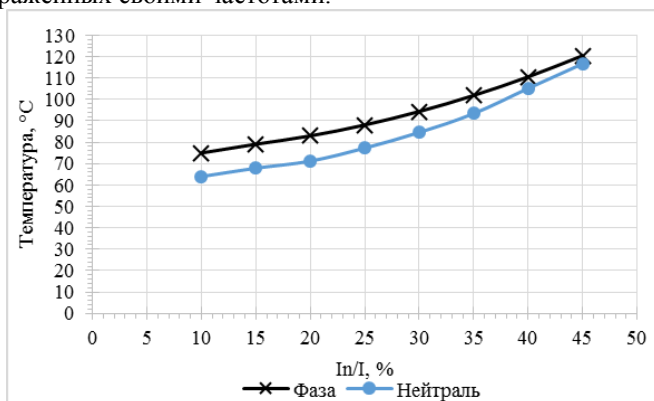


Рис. 3 – Зависимость температур от величины девятой гармоники

Из рисунков следует, что значительное влияние на рост температуры оказывает величина гармонической составляющей, в то время, как ее частота практически не влияет на температуру.

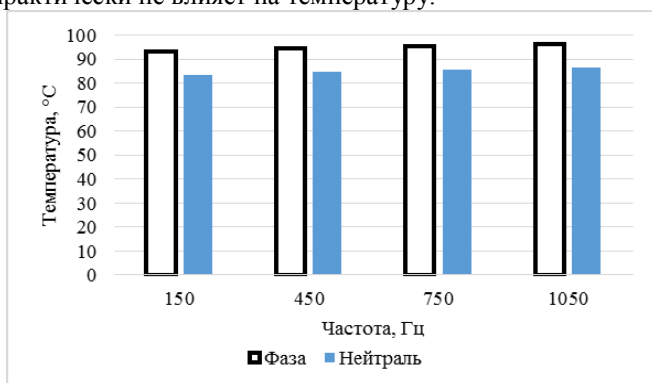


Рис. 4 – Величины температур при различных частотах



Также из рисунка 3 следует, что при большой величине гармонической составляющей, кратной трем (45%), температура проводника нейтрали и фазной жилы практически равны, что объясняется тем, что при этом условии ток в нейтрали даже больше фазного, поэтому внутри кабеля в связи с теплообменом между жилами устанавливается примерно одинаковая температура.

На основании результатов исследования можно сделать выводы о том, что уже при 25 % величине гармонической составляющей, кратной трем, температура жил может достигнуть предельно допустимой температуры в режиме перегрузки, что может повлечь за собой нагрев соседних кабелей или конструкций, быстрое старение изоляции и, как следствие, уменьшение срока службы кабелей [2]. Так как исследования проводились при наличии только одной гармонической составляющей, а в реальной ситуации гармонический состав может включать в себя несколько значимых высших гармоник, то температура будет еще выше, поэтому для нелинейных нагрузок необходимо использовать фильтры высших гармонических составляющих.

#### *Литература:*

1. ГОСТ Р 50571.5.52-2011/МЭК 60364-5-52:2009 Электроустановки низковольтные. Часть 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки.— Введ. 2013-01-01.— М.: Стандартинформ, 2013.— 71 с.
2. Кристиан Колломбет, Жан Марк Люпен, Жак Шонек Гармонические искажения в электрических сетях и их снижение// Техническая коллекция Schneider Electric.— 2008.— №22.— с.1-30.

## **ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**А.А. Шепелёв, Л.Е.Чередниченко**  
**Новосибирский государственный технический университет**  
**г. Новосибирск, misstarget2013@mail.ru**

*В данной работе рассмотрены классификация отходов и возможные методы их переработки, характеристика исходного сырья и возможные виды электротехнологий переработки различных отходов. Рассмотрены результаты экспериментальных плавов по переработке отходов ферросплавного производства в дуговой электропечи постоянного тока мощностью 140 кВт.*

*In this paper, the classification of wastes and possible methods for their processing are considered. The results of experimental swimming trunks for processing waste from ferroalloy production in a DC electric arc furnace with a capacity of 140 kW are considered.*

В процессе производства ферросплавов при загрузке руды в печь, а также при дроблении и расसेве образуются облака пыли и значительное количество мелочи, которая из-за ограниченной потребительской ценности не находит экономически оправданного сбыта. Особенно это относится к мелочи 75%-ного ферросилиция менее 3 мм, стоимость которой на 20-30% меньше, чем ферросилиция более крупных фракций.

По данным Серовского ферросплавного завода, при дроблении ферросилиция образуется до 20% мелких пылевидных фракций от общего количества ферросплава. Ферросилициевая пыль либо гидротранспортом отправлялась в шламонакопитель, либо складировалась на полигонах, чем существенно загрязняла окружающую среду. Челябинский электрометаллургический комбинат (ЧЭМК) столкнулся с такой же проблемой. Богатая металлами пыль фасовалась в большие капроновые мешки, чтобы затем снова отправиться в печь. Чтобы это стало возможным, в третьем блоке шихтового двора цеха №8 было налажено производство брикетов из марганцевых и хромовых руд фракции 0-10 мм. Однако, используемый метод уплотнения пыли не позволял эффективно и в полном объеме вовлекать ее в производство. Требовалось использование более совершенных технологий брикетирования [1].

Ферросилициевые отходы также представляют проблему: транспортировка на полигоны и обслуживание требует значительных затрат. С учетом объемов производства ферросилиция количество таких отходов ежегодно возрастает приблизительно на 20-30 тыс. тонн, а суммарно накопления ферросилициевой мелочи на сегодняшний день измеряются сотнями тысяч тонн. Цена такого материала может составлять до 80% от стоимости соответствующей марки ферросилиция. Накопление этой пыли в производственных помещениях создает предпосылки пожаровзрывоопасных ситуаций и нанесения ущерба здоровью обслуживающего персонала.

В условиях рыночной экономики перед промышленными предприятиями остро стоят проблемы энерго- и ресурсосбережения. По этой причине использование и вовлечение в производство ферросплавных отходов являются не только экономически выгодными процессами, но и способствуют уменьшению количества и площади полигонов промышленных отходов, таким образом, уменьшая экологическую нагрузку.

Так, на ЧЭМК пыль ферросилиция – микрокремнезем – активно используется при изготовлении собственного бетона. Активно покупают этот продукт и зарубежные партнеры, в частности из Японии и Арабских Эмиратов. Чтобы дозировать и транспортировать микрокремнезем было удобнее, на комбинате не так давно была построена современная установка по его гранулированию, мощностью 1400 тонн в месяц. Дошла очередь и до пыли газоочисток марганцевых сплавов. На комбинате был запущен американский комплекс по окомкованию - экструдер, который обеспечивает вовлечение мелких классов минерального сырья для производства ферросиликомарганца. Мощность нового производственного участка позволит выпускать до 260 тысяч тонн готовой продукции в год. Пыли газоочисток феррохрома и ферросиликохрома также планируется пустить в производство. Ввод в эксплуатацию нового участка по окомкованию позволит перерабатывать не только марганцевую пыль, но и другие виды мелкодисперсных отходов. За два года планируется избавиться от всех накопленных запасов – порядка 60 тысяч тонн.

В свою очередь, для разработки технологии и оборудования для переплава отходов ферросплавного производства Юргинский ферросплавный завод передал ОАО «Сибэлектротерм» 1500 кг отходов ферросилиция для проведения опытных плавов и формированию технических требований к новому переплавному оборудованию. По заказу ОАО «Сибэлектротерм» эти отходы были переработаны на опытном оборудовании исследовательского центра «Технологии ферросплавного производства и переработки техногенного сырья им. Академика Н.П. Лякишева». Входной контроль исследуемых отходов представлен в таблицах 1 и 2. Химический анализ материала проводился на рентгеновском спектроскане Макс-GV.

Одним из решений экономически выгодного переплава отходов ферросилиция может быть использование в качестве агрегата для переработки отходов дуговой печи постоянного тока (ДППТ), которая схожа с дуговой сталеплавильной печью (ДСП), но имеет существенные различия в компоновке конструкции, характере ведения плавки и в составе оборудования. Это вызвано различием в характере физических процессов и дугах постоянного и переменного тока с жидкометаллической ванной. Учет этих различий позволяет определить зоны наиболее эффективного применения печей ДППТ и ДСП.

**Таблица 1 – Фракционный состав отходов**

Содержание, %			
более 5 мм	от 2,5 до 5 мм	от 1 до 2,5	менее 1 мм
8	1	46	45

**Таблица 2 – Химический состав отходов**

Содержание, %								
Si	Mn	Cr	P	S	Al	Ca	Ti	Fe
78,0	0,5	0,2	0,035	0,005	2,5	0,9	0,2	ост

Экспериментальные плавки проводились в дуговой электропечи постоянного тока мощностью 140 кВт, диапазон изменения напряжения 0...140 В, тока 0...2000 А.

После образования «болота» переходили непосредственно к проведению опытов. Не отключая нагрузку, печь переводили в режим открытой дуги и повышали мощность до 120 кВт при напряжении 60 В и токе 2 кА, время плавления составило 40-50 минут, затем открывали летку и выпускали расплав в специально подготовленные футерованные изложницы, без наклона печи. Около 20% расплава оставалось в качестве «болота» за счет повышения уровня летки на 20 мм выше пода печи для проведения следующей плавки. В таблице 3 представлен химический состав полученного сплава.

По химическому составу выплавленный ферросилиций соответствовал существующему ГОСТу 1415-91. Установлено, что в переплавленном ферросилиции содержание алюминия на 0,14-0,37%, кальция на 0,14-0,48%, титана на 0,09% ниже. В проведенных плавках удельный расход электроэнергии составил 920 кВт·ч/т.

Для создания электротехнологии расплава мелкого сырья в промышленных масштабах необходимо проведение исследовательских работ для определения скорости нагрева частиц ферросилиция в условиях создаваемой в печи, скорости движения расплава в болоте для предотвращения спекания частиц [2, 3].

**Таблица 3 – Химический состав полученного сплава**

№ пробы	Состав шихты, кг		Вес металл а, кг	Содержание, %					
	Ферро-силиций	Флюс		Si	Al	Ca	Mn	Ti	P
1	50,0	2,5	47,3	69,7	1,79	0,76	0,42	0,11	0,03
2	50,0	2,5	44,9	72,7	1,94	0,63	0,40	0,12	0,03
3	50,0	5,0	46,0	74,6	1,90	0,60	0,38	0,12	0,03
4	50,0	5,0	46,9	74,2	1,73	0,42	0,42	0,15	0,03
5	50,0	2,5	47,1	75,0	1,96	0,47	0,40	0,12	0,03

Растущие объемы образования техногенных отходов в ферросплавной отрасли требуют целого ряда решений, направленных на

внедрение ресурсоэффективных технологий и утилизацию техногенного сырья. Одним из способов является разработка электротехнологии и строительство печей постоянного тока, позволяющих работать с неокискованным сырьем.

*Литература:*

1. Челябинский электрометаллургический комбинат [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chemk.ru> (датаобращения: 03.11.2019).
2. Bikeev R A and Cherednichenko V S 2015 Simulation of electromagnetic processes in three-phase electric arc furnaces *Russian Metallurgy (Metally)* **8** 454-470
3. Bikeev R A, Kuz`min M G and Cherednichenko V S 2014 Metal losses and the heat-and-mass transfer in the working space of superpower arc steelmaking furnaces *Russian Metallurgy (Metally)* **6** 466-470

## **СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА**

### **УЛУЧШЕНИЕ МАССА-ГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА БОРТУ САМОЛЁТА**

**М.В. Абрамов, А.Г. Приступ**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [abramov\\_mark@bk.ru](mailto:abramov_mark@bk.ru)**

*В публикации приводится описание принципа действия и сравнение различных типов синхронных генераторов с целью выявления наилучшего варианта для установки электрических машин на борту летательных средств. Описаны преимущества применения синхронного генератора с вращающимся выпрямителем с дробной зубцовой обмоткой.*

*The publication describes the principle and compares various types of synchronous generators in order to identify the most successful option for installing an electric machine on board aircraft. The advantages of using a synchronous generator with a rotating rectifier using fractional-tooth windings are described.*

Масса-габаритным показателям уделяется особое внимание при проектировании летательных аппаратов ввиду строгих ограничений, связанных с грузоподъёмностью и аэродинамическими параметрами самолета. В связи с этим вопрос о снижении массы и габаритов оборудования, устанавливаемого на борту, имеет актуальность.

Неотъемлемой частью любого современного транспортного или военного самолета являются электропотребители, включающие в себя систему управления, измерительные приборы, электрический привод и т.п. аппаратуру, требующую наличия источника электрической энергии.

Выбор типа генератора и его проектирование определяется из требований к самой электрической машине и условиям эксплуатации, изложенном в техническом задании. Для корректного выбора электрической машины для определенной задачи следует провести сравнение существующих типов синхронных генераторов и выбрать вариант, удовлетворяющий предоставленным условиям.

Применение кобальта Со для создания постоянных магнитов, в середине 60-х годов, позволило значительно увеличить удельные показатели магнитов, что привело к уменьшению массы и габаритов машины. Следствием этого стало широкое применение синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов в автономных системах электроснабжения, на передвижных электрических станциях, на авиационном и автомобильном транспорте, в автоматике и бытовой

технике. Несомненными преимуществами таких генераторов помимо независимости от источников электрической энергии, требуемой для возбуждения генератора, является простая конструкция, повышенная надёжность в следствие отсутствия щётчного узла, высокие значения КПД и ослабленная чувствительность машины к действию реакции якоря. Поскольку магнитный поток постоянных магнитов нельзя изменять в широких пределах, регулирование напряжения на зажимах генератора не представляется возможным. Это является существенным недостатком синхронных генераторов с постоянными магнитами и значительно сужает область их применения.

В автотракторном электрооборудовании широкое распространение получили синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением и когтеобразными полюсами. Ротор генератор выполняется с большим числом когтеобразных полюсов, это позволяет возбудить машину посредством одной катушки возбуждения. К плюсам генератора можно отнести снижение затрат на изготовление обмотки возбуждения, простоту устройства и технологичность. Однако, наличие контактных колец и щёток для питания ОВ снижает надёжность машины и увеличивает затраты на её обслуживание. К минусам данного генератора также относятся большие потоки рассеивания магнитного поля, которые значительно усиливаются с увеличением соотношения длины к радиусу и мощности машины.

В генераторах с комбинированным возбуждением применяются и постоянные магниты, и обмотка возбуждения. В классическом варианте ОВ расположена на роторе генератора и соединена с источником тока с помощью щеток и колец. Избавится от скользящих щётчных контактов, которые по статистике являются одним из узлов, вызывающих наибольшее число отказов электрической машины. Этого негативного эффекта можно избежать путём расположения обмотки возбуждения на статоре. Такие машины получили название бесконтактные.

При необходимости увеличения перегрузочной способности, уменьшения масса-габаритных показателей, увеличения уровня использования материалов и улучшения формы кривой напряжения, несмотря на высокую стоимость и сложность конструкции, встает вопрос о использовании синхронного генератора с вращающимся выпрямителем. Такие генераторы нашли применение на самолётах, серия ГТ. Генератор с вращающимся выпрямителем включает в себя три электрические машины: основной синхронный генератор с вращающимся явнополюсным индуктором классического типа, синхронного возбудителя с вращающимся якорем и с когтеобразными

или радиальными полюсами на статоре, трёхфазного магнитоэлектрического подвозбудителя. Обмотка возбуждения основного генератора питается от трёхфазного возбудителя через вращающийся выпрямитель. В цепи обмотки возбуждения с помощью регулятора осуществляется регулирование напряжения на выходе генератора. Роторы всех трёх машин находятся на валу основного генератора.

В НГТУ, кафедрой “Электромеханика” был разработан бесконтактный вентильный генератор с дробной зубцовой обмоткой, статор которого состоит из двух шихтованных пакетов с многофазной обмоткой, впрессованной в массивный магнитопровод, неподвижной обмоткой возбуждения, расположенной между шихтованными пакетами статора. Дробная зубцовая обмотка с  $q < 1$  позволяет увеличить использование активного объёма двигателя, повысить коэффициент заполнения паза за счет возможности увеличения площади паза и снижения площади корпусной изоляции. Это достигается за счет меньшего числа зубцов статора по сравнению с классическим исполнением обмотки при большом числе полюсов. Использование дробной зубцовой обмотки повышает уровень электромагнитного использования активных материалов, увеличивает эффективность применяя в магнитопроводе электротехнической стали и повышает допустимую плотность тока в проводниках. В данном генераторе магнитный поток обмотки возбуждения направлен аксиально, а магнитный поток, образованный постоянными магнитами, имеет радиальное направление. Два потока складываясь образуют результирующий поток, зависящий от направления протекания тока по обмотке возбуждения. Однако, для реализации аксиального магнитного потока требуется наличие соответствующего магнитопровода, что увеличивает массу и габариты такой машины, вследствие чего сужается область применения генератора.

Подтвержденные теоретически и экспериментально преимущества дробных зубцовых обмоток делают их перспективными для применения в генераторах с вращающимися выпрямителями, позволяя снизить вес и габариты машины, повысить надежность и упростить технологию изготовления электрического генератора. Улучшение перечисленных показателей всегда будет актуально в самолётостроении. Использование дробных зубцовых обмоток в синхронном генераторе с вращающимся выпрямителем позволит улучшить перечисленные показатели электрической машины, сохранив при этом все достоинства такого специального генератора. Поэтому, вопрос о разработке такой электрической машины с вращающимся выпрямителем и дробной



зубцовой обмоткой, как в самом генераторе, так и в его возбудителе актуален.

*Литература:*

1. Шевченко А. Ф., Приступ А. Г. Электрические машины с постоянными магнитами: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 60 с.
2. Балагуров, Владимир Александрович. Проектирование специальных электрических машин переменного тока : [Учеб. пособие для электромех. спец. вузов] / В. А. Балагуров. - М. : Высш. школа, 1982. - С. 8-19.
3. Шевченко А. Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными  $p$  меньше 1 зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов [Текст] / А. Ф. Шевченко // Электротехника. - 2007. – №9. - С. 3-9.

## **ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

**А.Н. Брынзова, Д.М. Топорков**  
**Новосибирский государственный технический университет**  
**г. Новосибирск**

Аксиальные индукторные машины, широко применяемые в качестве питания повышенной частоты и выпрямленного переменного тока в установках индукционного нагрева, электроснабжения транспортных средств, электродуговой сварки и т.д, относятся к аксиально-возбуждаемым электрическим машинам пульсационного класса с постоянным потоком. С целью уточнения и обобщения вопросов теории и расчета АИМ на основе решения краевых задач магнитного поля получена полная, с учетом высших гармоник индукции, система коэффициентов магнитных полей возбуждения и якоря.

Синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов (ГПМ) совместно с силовым электронным преобразователем (ЭП), обеспечивающим преобразование выходного напряжения генератора в стабильное напряжение, поступающее к потребителю, предназначен для применения в системах автономного электроснабжения.

Вырабатывать постоянное напряжение способны генераторы постоянного тока. В таких машинах присутствует щеточно-коллекторный узел. Из-за сложности конструкции коллектора, а также

частых коммутациях на пластинах, щеточно-коллекторный узел значительно снижает надежность машины, увеличивает ее стоимость и усложняет обслуживание.

Выступать в качестве источников постоянного тока способны и синхронные машины, работающие с выпрямителем. Синхронные генераторы в классическом исполнении оснащены обмоткой возбуждения, расположенной на роторе машины. Имея обмотку возбуждения, можно регулировать основной магнитный поток. Однако в этом случае в машине присутствует скользящий контакт, что снижает ее надежность и усложняет обслуживание. Проблема регулирования магнитоэлектрических машин в последние годы все чаще решается применением комбинированного возбуждения. Отсутствие универсального способа совмещения в общей магнитной системе обмоток возбуждения и постоянных магнитов, а также разнообразие требований обусловило тенденцию к разработке широкого ассортимента таких машин, каждая из которых имеет свои преимущества при определенных требованиях.

Исследуемый генератор имеет комбинированное возбуждение, что позволяет ему работать как с отключенной обмоткой возбуждения, так и с включенной. Обмотка возбуждения располагается на статоре между пакетами и не имеет скользящих контактов. Таким образом, данной машине характерны следующие преимущества:

1. Повышенная надежность относительно МПТ и синхронных машин в классическом исполнении.
2. Меньшая мощность обмотки возбуждения за счет наличия постоянных магнитов.
3. Повышенная степень использования магнитной индукции по сравнению с аксиальными индукторными машинами.
4. Возможность регулировать основной магнитный поток.
5. Обмотка возбуждения располагается на статоре между пакетами и не имеет скользящих контактов

Расчет проведен двумя способами, а именно :

- Методика Домбура эквив схема маг цепи
- Моделирование магнитного поля методом конечных элементов.

Методом конечных элементов для расчета электромагнитного поля проводилось моделирование исследуемого генератора проводилось в программе ANSYS. Модель исследуемого генератора представлена на рисунке

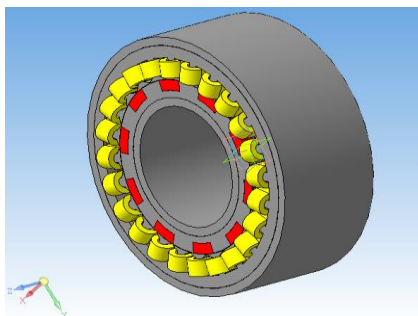


Рисунок1 .Модель генератора

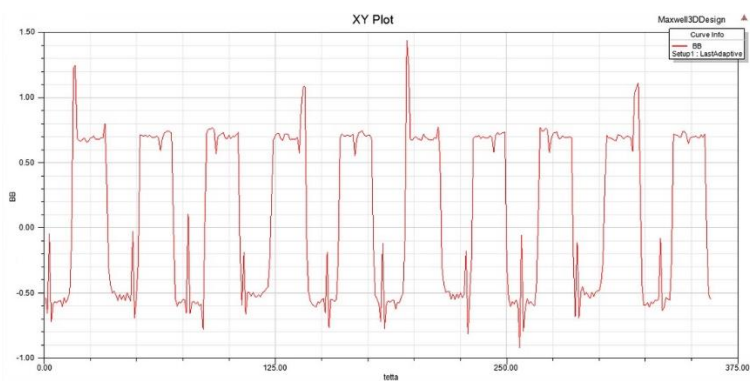


Рисунок 2. График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре

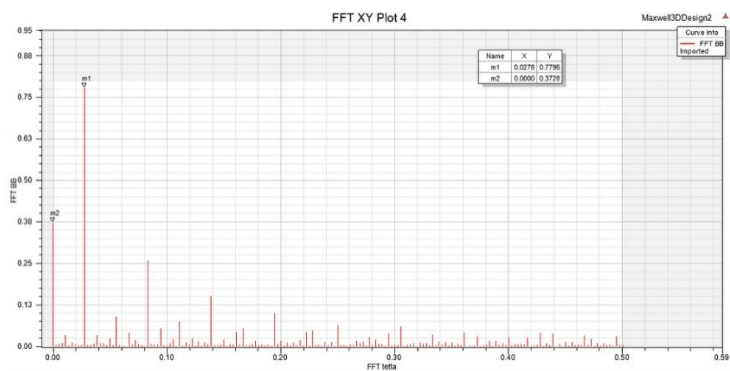


Рисунок 3. Гармонический состав индукции в воздушном зазоре

Значение основной гармоника индукции в воздушном поле составляет 0,7785Тл. Определенная аналитически в расчетах основная гармоника равнялась 0,8Тл. Погрешность составляет 2%.

Имея обмотку возбуждения, можно регулировать основной магнитный поток.

Предполагается, что данный генератор будет работать на выпрямитель и нагрузка его будет чисто активной. Но из-за наличия собственной индуктивности нагрузка генератора будет активно-индуктивной. Из-за необычной конструкции, а также наличия постоянной составляющей магнитной индукции в магнитопроводе.

При включенной обмотке возбуждения, созданный ею магнитный поток направлен встречно потоку от магнитов и проходит по контуру: станина-зубцы первого пакета статора-стальной полюс первого пакета ротора-втулка-стальной полюс второго пакета ротора-зубцы второго пакета. Таким образом, немного снижается поток постоянных магнитов, но усиливается поток, проходящий через полюс, и постоянная составляющая магнитной индукции в воздушном зазоре уменьшается. Изменяя МДС обмотки возбуждения можно обеспечивать регулирование магнитного потока, проходящего через полюс.

Исследуемый генератор будет работать на трехфазный мостовой выпрямитель (схема Ларионова). Преимущества такой схемы это обратное напряжение обладает небольшой амплитудой, выпрямитель можно включать непосредственно в сеть.

Для построения внешних характеристик была использована модель генератора в программе Mathlab. Внешние характеристики это зависимость напряжения от тока якоря. При постоянном токе возбуждения менялось потокосцепление, после чего было построено семейство внешних характеристик.

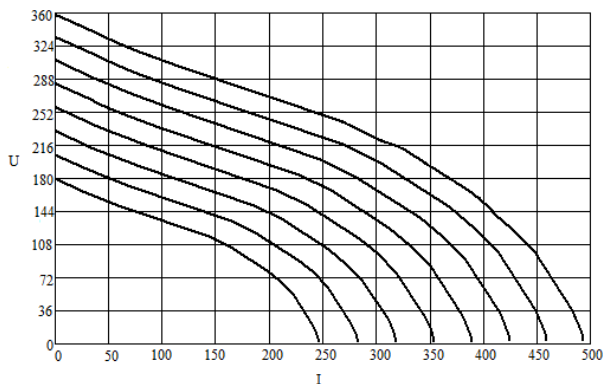


Рисунок 4. Семейство внешних характеристик

#### *Литература:*

1. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высших технических учебных заведений. – 3-е издание, перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с., ил.
2. Домбур Л. Э. Аксиальные индукторные машины / Л. Э. Домбур; Академия наук Латвийской ССР, Физико-энергетический институт. – Рига: Зинатне, 1984. – 247 с.

## **ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМЫ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**Б.С. Доржиева, Е.В. Бейерлейн, А.В. Киселев**  
Томский политехнический университет,  
г. Томск, [beligma.dorzhieva@mail.ru](mailto:beligma.dorzhieva@mail.ru)

*В статье представлено обоснование применения схемы испытаний тяговых асинхронных двигателей по методу взаимной нагрузки. Рассчитан коэффициент экономичности предложенной схемы, подтверждающий эффективность и целесообразность использования метода взаимной нагрузки для испытаний тяговых асинхронных двигателей.*

*The paper presents the feasibility demonstration of a back-to-back method for induction traction motors testing. The effectivity ratio of the test circuit has been calculated that confirm the effectiveness and application's feasibility of the back-to-back method for induction traction motors testing.*

В России парк тяговых электрических машин в различных отраслях исчисляется сотнями тысяч, средняя мощность этих машин составляет около 1000 кВт [1].

Согласно мировой тенденции производится замена коллекторных машин асинхронными, имеющими ряд преимуществ. К таким преимуществам относятся отсутствие коллекторного узла, высокие энергетические показатели, большая мощность при равных габаритах.

Рост доли асинхронных тяговых двигателей приводит к переоснащению существующих или созданию новых испытательных станций и ремонтных баз, при этом необходимо обеспечивать соответствие современных требованиям надежности и энергоэффективности. Это может быть достигнуто путем внедрения современных энергоэффективных методов и средств диагностирования и испытания асинхронных машин [2].

Испытания тяговых машин связаны с большими затратами на электроэнергию. В качестве решения данной проблемы предлагаются методика и схема испытаний асинхронных тяговых двигателей по схеме взаимной нагрузки [3].

Произведем сравнение применяемых в настоящее время схем для испытаний (табл. 1) [4]. Сравнение производится по коэффициенту экономичности и количеству вспомогательных машин. Коэффициент экономичности учитывает мощность дополнительного оборудования и представляет собой отношение:

$$k_E = \frac{P_1 - P_{сх.исп}}{P_1}, \quad (1)$$

где  $P_1$  – активная мощность, потребляемая испытуемой электрической машиной;  $P_{сх.исп}$  – мощность, потребляемая схемой в целом. Коэффициент экономичности показывает долю электроэнергии необходимой для испытания двигателя по сравнению с его номинальной мощностью.

**Таблица 1 – Применяемые схемы для испытания крупных машин переменного тока**

Схема испытаний	$k_E$	Кол-во вспомога- тельных машин
Электрическая схема непосредственной нагрузки бесконтактного тягового электродвигателя	0,25 ÷ 0,60	5
Схема испытаний АТЭД с возвратом энергии в сеть	0,65 ÷ 0,70	6

Схема возвратной нагрузки для испытаний АТЭД с покрытием потерь мощности от вольтодобавочного генератора	0,70 ÷ 0,60	5
Схема возвратной нагрузки для испытаний АТЭД с покрытием потерь мощности от двигателя постоянного тока	0,75 ÷ 0,65	4

Данные схемы характеризуются высокими значениями коэффициента экономичности, однако учитывая мощность испытуемых машин испытательные станции должны обеспечивать номинальной или превышающей её нагрузкой, при этом количество ступеней преобразования энергии должно быть минимальным. Предложенная схема соответствует всем выше перечисленным требованиям.

На рис. 1  $P_1$  – подводимая электрическая мощность;  $P_2$  – полезная мощность на валу испытуемого двигателя;  $P_{IG}$  – активная мощность, вырабатываемая двигателем, работающем в генераторном режиме.

Коэффициент экономичности для схемы взаимной нагрузки будет равен:

$$k_E = \frac{\frac{P_2}{\eta_{\partial\partial}} - P_2 \left( \frac{1 - \eta_{\partial\partial} \cdot \eta_{генер}}{\eta_{\partial\partial}} \right)}{\frac{P_2}{\eta_{\partial\partial}}} = \eta_{\partial\partial} \cdot \eta_{генер}, \quad (2)$$

где  $\eta_{\partial\partial}$  – КПД электрической машины, работающей в двигательном режиме,  $\eta_{генер}$  – КПД электрической машины, работающей в генераторном режиме. Коэффициент экономичности зависит от КПД испытуемых машин, потери мощности компенсируются в установке за счет питающей сети.

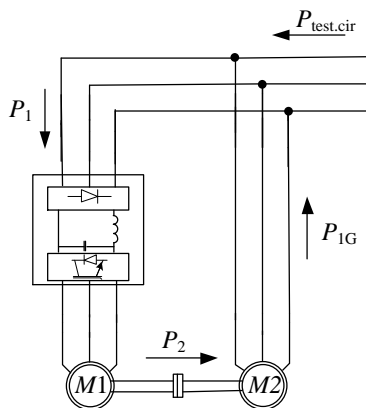


Рис. 1 –Схема испытаний по методу взаимной нагрузки

где  $\eta_{\text{ов}}$  - КПД электрической машины, работающей в двигательном режиме,  $\eta_{\text{генер}}$  - КПД электрической машины, работающей в генераторном режиме. Коэффициент экономичности зависит от КПД испытуемых машин, потери мощности компенсируются в установке за счет питающей сети.

Для оценки энергетической эффективности схемы испытания тяговых асинхронных двигателей по методу взаимной нагрузки была произведена проверка работоспособности данного метода на физической модели по схеме взаимной нагрузки (рис. 1) [5].

Стенд состоит из двух общепромышленных асинхронных двигателей, преобразователя частоты, датчиков тока и напряжения, аналого-цифрового преобразователя.

Эксперимент производился при повышении частоты и амплитуды питающего напряжения, в ходе которого были получены зависимости потоков энергии в системе.



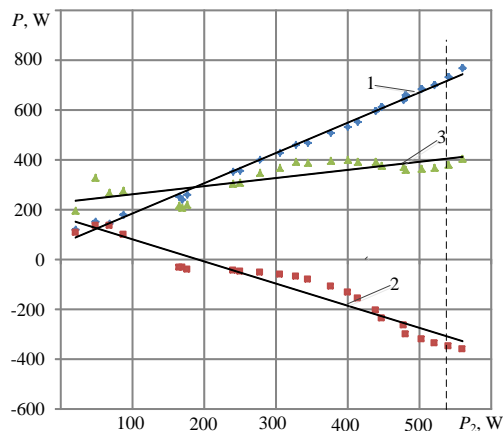


Рис. 2 – Потоки энергии в системе

На рис. 2 показаны следующие зависимости: 1 – зависимость потребляемой мощности, 2 – зависимость активной мощности, вырабатываемой нагрузочной машиной, 3 – зависимость потребляемой мощности из сети от полезной мощности испытуемого двигателя.

Полученные экспериментальные данные подтверждают зависимость коэффициента экономичности от КПД машин и позволяют сделать вывод о целесообразности применения схемы взаимной нагрузки для испытаний асинхронных двигателей большой и средней мощности, так как данные двигатели (мощностью около 1000 кВт) имеют более высокие энергетические показатели.

#### *Литература:*

1. Kachin O.S. Non-contact inspection of rotating machine elements / Kachin O.S., Kachin S.I. / *Experimental Techniques*. – 2009. – P.47 – 50.
2. Голдовская А.А., Дорохина Е.С., Рапопорт О.Л., Асланян Р.О. Актуальность создания и применения системы теплового контроля асинхронных тяговых электродвигателей // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2014. №. 2(32). С. 315-318.
3. Пат. на ПМ 80018 РФ. МПК8 G01R 31/04. Устройство для испытания тяговых электродвигателей / Е.В. Бейерлейн, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин. Заявлено 21.04.2008; Оpubл. 20.01.2009, Бюл. № 6. – 6 с.
4. В.Г. Щербаков Тяговые электродвигатели электровозов. – Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. – 672 с.

5. Бейерлейн, Е.В., Цукублин, А.Б., Рапопорт, О.Л. Схема испытания тяговых частотно – регулируемых асинхронных электродвигателей // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. - №3. – С. 46-48.

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ ЗУБЦОВО-ПАЗОВЫХ СТРУКТУР НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ**

**А.Д. Зимогляд, А.А. Темляков, З.С. Темлякова**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, zimoglyad\_94@mail.ru**

*Выполнен анализ влияния геометрических соотношений и размеров зубцово-пазовых структур статора и ротора на энергетические показатели. На примере асинхронного двигателя мощностью 18,5 кВт приводятся результаты расчета наилучших значений коэффициента полезного действия.*

*An analysis is made of the influence of geometric ratios and sizes of tooth-groove structures of the stator and rotor on energy indicators. Using an example of an 18.5 kW induction motor, the results of calculating the best values of the efficiency are given.*

Разработка асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 18,5 кВт отвечает следующим требованиям:

1. Вписыванию габаритов электрической машины в заданное месторасположение.
2. Ограничение по массе асинхронного двигателя.
3. Требование определенных значений конкретных характеристик.
4. Оценка теплового состояния электрической машины согласно условиям охлаждения в замкнутом пространстве энергоустановки.

Цель работы заключается в обеспечении требований по вышеуказанным пунктам. В данной работе приводятся результаты исследований с учетом первых трех пунктов. Алгоритм исследования включает в себя решение трех исследовательских задач. Цель достигается решением следующих задач:

1. Определение главных размеров, соответствующих объему предоставленного пространства для асинхронного двигателя.
2. Поиск рациональных геометрических форм и размерных соотношений поперечного сечения активного объема двигателя цилиндрического исполнения с целью удовлетворения требований выходных характеристик.

3. Выполнение оценочных приближенных тепловых расчетов в соответствии с особенностями охлаждающего тракта и напорных элементов системы охлаждения.

В качестве приемлемой модели используется Т-образная схема замещения асинхронного двигателя, изображенная на рисунке 1.

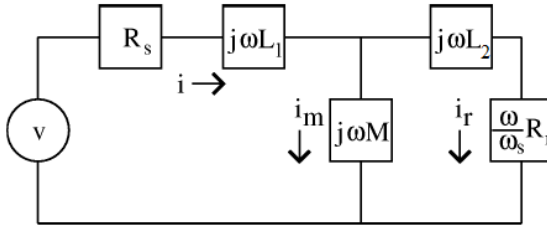


Рисунок 1. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Эта модель представляет собой схему замещения фазы двигателя, работающего в установившемся режиме (с постоянной электрической частотой и постоянной механической частотой вращения). В этой модели  $L_1$  – индуктивность рассеяния обмотки статора,  $L_2$  – индуктивность рассеяния обмотки ротора.  $M$  – взаимная индуктивность,  $R_s$  – активное сопротивление обмотки статора,  $R_r$  – активное сопротивление обмотки ротора,  $v$  – фазное напряжение,  $I$  – фазный ток.

Символ  $\omega$  представляет приложенную электрическую частоту (в радианах/секунду). Символ  $\omega_s$  представляет разницу между механической частотой вращения ротора и электрической частотой. Если статор имеет  $2p$  полюсов, то частоту скольжения  $\omega_s$  можно определить через электрическую частоту и механическую частоту вращения ротора  $\omega_r$  как (1):

$$\omega_s = \omega - p \cdot \omega_r. \quad (1)$$

Теперь, когда имеется модель двигателя, можно использовать эту модель, чтобы получить несколько полезных соотношений.

$$Z_g = Z_1 + \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2} \quad (2)$$

где  $Z_1$  – полное сопротивление обмотки статора,  $Z_2$  – полное сопротивление обмотки ротора, а  $Z_0$  – полное сопротивление взаимной индукции. Тогда напряжение связано с током как

$$U = Z \cdot I. \quad (3)$$

Формула (3) используется в качестве основы для определения параметров двигателя.

Для каждого участка магнитной цепи заданы свойства, соответствующие исследуемому асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором мощностью 18,5 кВт. Значение тока статора соответствует значению, полученному в ходе электромагнитного расчёта. Направление токов расставлено в соответствии со схемой обмотки. Все геометрические размеры взяты из электромагнитного расчёта.

Используя формулу (4), рассчитывают индуктивность рассеивания обмотки фазы статора (следует иметь ввиду, что здесь не учитываются лобовые части)

$$L_{\sigma s} = \frac{U_A - U_B - U_C}{w \cdot i}. \quad (4)$$

В выражении (4) обозначено:  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  – напряжения фазы А, В и С соответственно, которые получают при моделировании в FEMM, для случая, когда ток фазы А равен  $I_A = 1$  А, токи фазы В и С:  $I_B = I_C = 0$  А.

Индуктивность взаимоиндукции получают по формуле взятой из электромагнитного расчёта и адаптированной к расчёту в программе FEMM к виду (5).

$$L_M = \frac{U_H}{I_\mu} \cdot \frac{1}{2\pi f} - L_{\sigma 1}. \quad (5)$$

Расчетные модели на рисунке 2 представляют собой пазы статора и ротора.

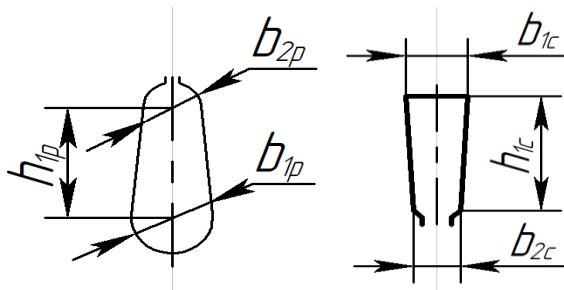


Рисунок 2. Эскизы пазов статора и ротора

Решение получается автоматически с применением программы FEMM. Для наглядности результаты представлены в виде диаграммы, показанной на рисунке 3. На диаграмме представлены результаты

расчета КПД для различных сочетаний 8размерных соотношений пазов статора и 4соотношений пазов ротора.

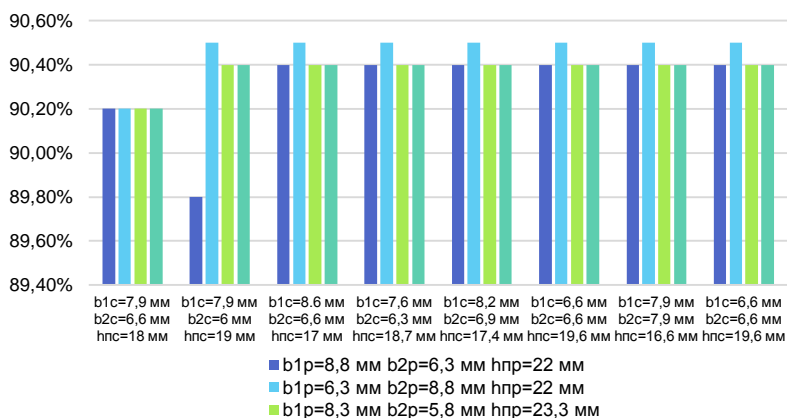


Рисунок 3. результаты расчета КПД для различных сочетаний пазов статора и ротора

#### Литература:

1. Темлякова З.С., Шевченко А.А., Гречкин В.В. Исследование эксплуатационных свойств асинхронного двигателя на основе численного моделирования // Электротехника. Электротехнология. Энергетика (ЭЭЭ-2015) = Electrical engineering. Electrotechnology. Energy (EEE-2015) : сб. науч. тр. 7 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 9–12 июня 2015 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 79-82.
2. Темлякова З.С., Гречкин В. В., Соловейчик Ю. Г., Персова М. Г. Компьютерная поддержка проектирования высоковольтных асинхронных двигателей // Электротехника, 2014. - № 12. - С. 33-35.
3. Зимоглад А. Д., Темляков А. А. Энергоэффективные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором напряжением до 1000 В // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 5. – С. 81-83.
4. Темлякова З.С. Анализ конструктивно-технических решения повышения энэргоеффективности асинхронных двигателей / З.С. Темлякова, М.Е. Вильбергер, П.В. Морозов, А.А. Темляков // Научное издание. Научные проблема транспорта сибери и дальнего востока. – 2018. – №2. – С. 219-222.

# ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОДШИПНИКОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

А.П. Исичко, З.С. Темлякова

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [nastya\\_386@mail.ru](mailto:nastya_386@mail.ru)

*В работе выполнена оценка теплового состояния активных частей высоковольтного асинхронного двигателя, охарактеризована надежность и долговечность работы его подшипников.*

*The paper assesses the thermal state of the active parts of a high-voltage induction motor, and describes the reliability and durability of its bearings.*

Допускаемая температура подшипников в значительной мере определяется нагревом стойкости смазки. В асинхронных двигателях используются главным образом подшипники качения с густой смазкой и только в крупных машинах применяются подшипники скольжения с жидкой смазкой. Потери от трения в подшипниках качения значительно меньше, чем в подшипниках скольжения. Повышенное нагревание подшипников вызывается недоброкачественным изготовлением электродвигателя и неудовлетворительными условиями эксплуатации.

Для электрических машин общего применения предельная допускаемая температура подшипников качения согласно ГОСТ 183-74 составляет 100° С. Повышенное нагревание может быть следствием неправильных размеров частей электродвигателя, определяющих положение подшипника. Для свободного удлинения вала при нагревании должна быть предусмотрена возможность осевого смещения обоих шарикоподшипников или одного из шарикоподшипников, если наружное кольцо второго подшипника закреплено. Если один из подшипников роликовый, то наружные кольца обоих подшипников закрепляются бортиками крышек, так как подшипник с цилиндрическими роликами допускает осевое смещение вала. Отсутствие осевого зазора между наружными кольцами обоих шарикоподшипников и крышками приводит к значительному увеличению трения в подшипниках и повышенному нагреванию их. Такое же действие оказывает и слишком тугая посадка наружного кольца подшипника в подшипниковом щите. Признаком этих недостатков изготовления является затрудненное вращение ротора, особенно в нагретом состоянии электродвигателя.

Под долговечностью подшипников качения понимают число оборотов или число рабочих часов при постоянной частоте вращения, которое совершит подшипник до появления первых признаков усталостного разрушения на одном из своих колец, дорожках или телах

качения. В том случае, если учитывается только усталость на рабочих поверхностях подшипника, нужно придерживаться следующих условий:

- Скорость и нагрузки, учитываемые при оценке подшипника, должны соответствовать фактическим условиям эксплуатации.
- Во время всего периода эксплуатации подшипник нужно обеспечить соответствующей смазкой.
- Опыт показывает, как отказ большей части подшипников вызван причинами, отличающимися от усталости материала, например: выбор подшипника несоответствующего типа, неисправная работа или неправильный тип смазки, наличие инородных частиц в подшипники и другое.

При расширенном расчете по методу достижимой долговечности учитываются следующие факторы:

- величина нагрузки на подшипник;
- предел усталости материала;
- степень разделения поверхностей вследствие применения смазки;
- чистота смазывающего слоя;
- наличие и состав присадок в смазочном веществе;
- внутреннее распределение нагрузки и трение в подшипнике.

Срок службы — это долговечность, достигнутая подшипником при его эксплуатации. Он может заметно отличаться от расчетной долговечности.

Возможные причины — износ или усталость вследствие:

- отклонения режимов эксплуатации;
- перекосов между валом и корпусом;
- слишком малого или слишком большого рабочего зазора;
- загрязнений;
- недостаточности смазывания;
- слишком высокой рабочей температуры;
- осциллирующих движений подшипника с очень малыми углами поворота (образование рифлений);
- вибрационных нагрузок и образования рифлений;
- сверхвысоких ударных нагрузок (статические перегрузки);
- повреждений при монтаже.

#### *Литература:*

1. Темлякова З.С., Шевченко А.А., Гречкин В.В. Исследование эксплуатационных свойств асинхронного двигателя на основе численного моделирования // Электротехника. Электротехнология.

Энергетика (ЭЭЭ-2015) = Electrical engineering. Electrotechnology. Energy (ЕЕЕ-2015) : сб. науч. тр. 7 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 9–12 июня 2015 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 79-82.

2. Темлякова З.С., Гречкин В. В., Соловейчик Ю. Г., Персова М. Г. Компьютерная поддержка проектирования высоковольтных асинхронных двигателей // Электротехника, 2014. - № 12. - С. 33-35.

3. Зимогляд А. Д., Темляков А. А. Энергоэффективные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором напряжением до 1000 В // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 5. – С. 81-83.

4. Зимогляд А. Д., Темляков А. А. Особенности проектирования низковольтного асинхронного двигателя специального назначения // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9ч., Новосибирск, 3-7 дек. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 5. – С. 107-110.

5. Темлякова З.С., Вильбергер М.Е., Морозов П.В., Темляков А.А. Анализ конструктивно-технических решений повышение энергоэффективности асинхронных двигателей / З.С. Темлякова, М.Е. Вильбергер, П.В. Морозов, А.А. Темляков // Научное издание. Научные проблемы транспорта Сибири и дальнего востока. -2018. - №2. – С 219-222

## **РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ В ПРОГРАММЕ FEMM**

**И.В. Кобобель, В.Ю. Нейман**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, i.kobobel@mail.ru**

*Рассмотрены возможности применения программного комплекса FEMM для расчета массива значений рабочих точек статических параметров линейной электромагнитной машины двойного действия. В качестве примера приведен расчет статической тяговой характеристики электромагнитной машины и представлен трехмерный график опорных точек электромагнитного усилия в зависимости от величины протекающего тока и рабочего воздушного зазора.*

*The possibilities of using the FEMM software package for calculating the array of operating points of the static parameters of a double-acting linear electromagnetic machine are considered. As an example, the calculation of the static traction characteristics of an electromagnetic machine is presented and a three-dimensional*



*graph of the reference points of the electromagnetic force is presented depending on the magnitude of the flowing current and the working air gap.*

При разработке различных ударных технологий в промышленности развитие получил ударный электромагнитный привод [1, 2]. Созданные методики проектирования электромагнитных машин позволяют существенно повысить их силовые и энергетические показатели и, не смотря на это постоянно совершенствуются [3–7]. Также развиваются и совершенствуются методы и подходы по динамическому расчету электромагнитных машин [8, 9]. Большие сложности при выполнении динамических расчетов вызывают вопросы, связанные с точностью в определении статических параметров электромагнитных машин (потокосцепления, электромагнитного усилия), зависящих от свойств нелинейных магнитных материалов и потоков рассеяния в магнитопроводе. Применение методов теории магнитных цепей, не позволяет точно учесть насыщение стальных участков, что является главным источником погрешностей [10].

Целью данного исследования является повышение точности расчета статических характеристик электромагнитной машины с помощью расчета магнитного поля активной зоны машины в программе FEMM (Finite Element Method Magnetics).

Суть данного подхода состоит в том, что с помощью численного расчета определяется массив значений рабочих точек статических параметров модели, которые затем представляются с помощью блока двумерной таблицы Look-Up Table (2D) в MatlabSimulink для динамических расчетов [9]. В качестве примера расчета статических параметров на рис. 1 рассматривается эскиз линейной электромагнитной машины двойного действия [2].

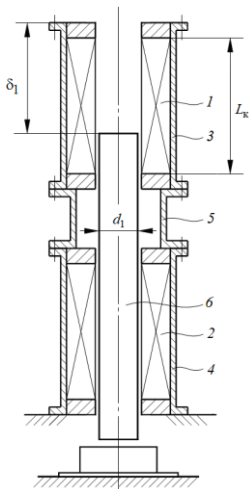


Рис. 1 – Электромагнитная машина двойного действия

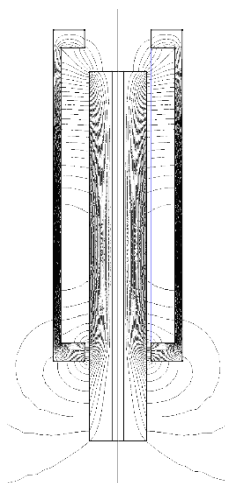


Рис. 2 – Картина поля линий магнитного потока активной зоны

Для реализации рабочего процесса машины применена двухкатушечная система, состоящая из катушек холостого 1 и рабочего 2 хода, заключенных в отдельные магнитопроводы 3, 4, которые соединены между собой звеном 5. Каждая из катушек обеспечивает перемещение бойка 6 в противоположных направлениях (вверх или вниз). Боек под действием электромагнитных сил, попеременно создаваемых катушками холостого и рабочего хода, может совершать возвратно-поступательные движения.

Для определения нелинейных статических параметров потোকосцепления  $\psi_1 = f(i_1, \delta_1)$  и электромагнитного усилия  $f_{эм1} = f(i_1, \delta_1)$  выполнялось решение полевой задачи по расчету магнитного поля в программе FEMM.

Следует отметить, что программу отличает простой в использовании графический интерфейс и ее доступность. Одним из достоинств программы является высокая точность учета геометрических размеров магнитной системы машины и возможность точного представления расчетной области картины поля на границе раздела кусочных сред.

На рис. 2 показана расчетная область модели и результаты построения картины поля линий магнитного потока. Линейные размеры

модели (рис. 1): диаметр бойка  $d_1 = 48$  мм, длина катушек холостого и рабочего хода  $L_k = 605$  мм; количество витков обеих катушек составляло  $w = 1420$ . Характеристика намагничивания элементов конструкции магнитопровода электромагнитной машины применялась, аналогичная характеристике стали марки «Ст. 3».

Расчет статических параметров для различных положений бойка осуществлялся через интегральные характеристики поля в режиме параметров блока по средневзвешенному тензору натяжения. При расчетах ограничились в рассмотрении только одним статическим параметром – электромагнитным усилием.

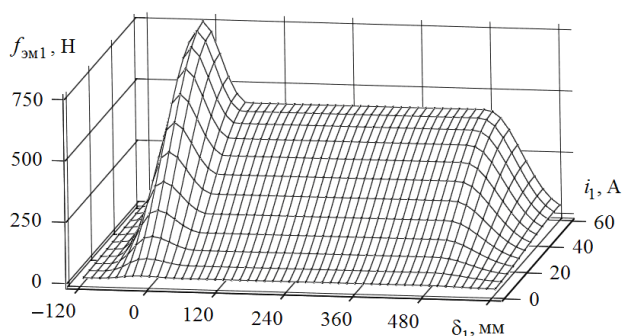


Рис. 3 – Трехмерный график расчета электромагнитного усилия

На рис. 3, в качестве примера, представлен трехмерный график статического электромагнитного усилия  $f_{эм1} = f(i_1, \delta_1)$  катушки холостого хода, полученные по результатам расчета массива значений статических параметров, содержащего 520 расчетных опорных точек.

По результатам расчета динамических характеристик электромагнитной машины двойного действия удалось установить, что точность при динамических расчетах в существенной степени определяется точностью воспроизведения расчетных опорных точек статических параметров электромагнитной машины.

#### *Литература:*

1. Ивашин В.В. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий / В.В. Ивашин, А.К. Кудинов, В.П. Певчев // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
2. Симонов Б.Ф. Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника/ Б.Ф. Симонов, В.Ю. Нейман, А.С. Шабанов // ФТПРПИ. – 2017. – № 1. – С. 118–126.

3. Нейман В.Ю. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей/ В.Ю. Нейман, А.А. Петрова // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
4. Нейман В.Ю. Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности/ В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Автоматизированные электромеханические системы: [сб. науч. тр.]. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.
5. Нейман В.Ю. Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля/ В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Транспорт: Наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 21–24.
6. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: Наука, техника, управление. – 2010. – № 8. – С. 29–31.
7. Нейман Л.А. Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе/ Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 73–78.
8. Нейман Л.А. Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями/ Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35–40.
9. Нейман Л.А. Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107.
10. Нейман Л.А. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита/ Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214–218.

## ДВИГАТЕЛЬ ШАХТНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

**А.Н. Копейко, О.И Новокрещенов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, anastassiyakopeiko@gmail.com**

*В публикации описываются преимущества использования синхронного двигателя с постоянными магнитами для рудничного электровоза.*

*The publication describes the benefits of using a permanent magnet synchronous motor for a mine electric locomotive.*

Синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, обладающие преимуществами в отношении массогабаритных показателей и потребления энергии, все чаще находят применение в тяговом приводе. За последние несколько лет от ведущих мировых поставщиков подвижного состава поступило много предложений, касающихся использования синхронных тяговых двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ). Основная причина расширения применения СДПМ в тяговом приводе — их существенные преимущества по сравнению с трехфазными асинхронными двигателями и машинами постоянного тока. В пределах примерно 80% рабочего диапазона КПД СДПМ больше на 1-2%, а удельная мощность — на 30-35%, вследствие чего при равной мощности габариты и масса СДПМ примерно на 25% меньше.

Существующие электроприводы рудничных электровозов в основном построены на базе электродвигателей постоянного тока. Основными проблемами таких приводов являются наличие щеточно-коллекторного узла, коммутационные перенапряжения в силовых цепях при переключении скоростей, невозможность идентифицировать аварийную ситуацию, по которой вышел из строя тот или иной элемент электровоза, сложность синхронизации ведущих осей и отсутствие автоматической защиты от пробуксовки. Совокупность существующих недостатков создает предпосылки к созданию более современных и функциональных электроприводов.

На кафедре электромеханики Новосибирского государственного технического университета по заказу Тульского завода горно-шахтного оборудования был разработан энергоэффективный магнитоэлектрический тяговый двигатель ДМТ-14. Данный двигатель предназначен для работы в составе рудничного электровоза, который используется для транспортировки угля и породы, тяжелой и высоковязкой нефти, доставки материалов, оборудования и совершения других операций в шахтах.

Конструктивно двигатель представляет собой синхронную электрическую машину с возбуждением от постоянных магнитов. Обмотка якоря, расположенная на статоре, выполнена по схеме дробной зубцовой обмотки с числом пазов на полюс и фазу  $q < 1$ . Постоянные магниты лежат в пазах ротора и намагничены тангенциально.

Характерной особенностью электрической машины стало взрывозащищенное исполнение. Специальная оболочка не позволяет взрыву выйти за пределы корпуса двигателя, тем самым обеспечивая безопасность проведения работ в шахтах. Несомненным преимуществом разработанного двигателя перед ранее использованным двигателем постоянного тока является отсутствие скользящих контактов, что способствует повышению долговечности и надежности электрической машины.

Также на электровозе были заменены аккумуляторы. Традиционные свинцово-кислотные или щелочные батареи, требовавшие частой доливки агрессивных кислот или щелочи, заменили на литий-ионный аккумулятор компании «Лиотех» суммарной энергоемкостью 70 кВт/час. Время зарядки новой батареи составляет 2—4 часа, при ее штатной эксплуатации не выделяются взрывоопасные газы.

По данным проведенных испытаний электровоза с тяговым синхронным двигателем с постоянными магнитами сделаны выводы о том, что новая технология позволила не только сократить массу и габариты тягового двигателя, но и, благодаря повышенному вращающему моменту, увеличить его грузоподъемность. Также из-за уменьшения потерь в двигателе и роста КПД до 90%, значительно возросла и энергоэффективность электровоза. При этом уменьшился разряд аккумуляторной батареи, и возросло время работы электровоза.

В заключении стоит отметить, что электрические машины, сконструированные по обновленной технологии, могут быть использованы как в общепромышленном электроприводе (в станках, вентиляционных системах), так и в специализированном (в автомобильной промышленности, авиации, электроприводе погружных насосов и т.д.), а также в качестве инверторных генераторов.

#### *Литература:*

1. Шевченко А. Ф., Приступ А. Г. Электрические машины с постоянными магнитами: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 60 с.
2. Шевченко А. Ф. Особенности конструкции и проектирования энергоэффективных магнитоэлектрических электродвигателей

общепромышленного назначения // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 41-44.

3. Шевченко А. Ф., Бухголец Ю. Г., Приступ А. Г. Асинхронный или синхронный, вот в чем вопрос // Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 121-127.

## **МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ И КАЧЕСТВА ОБМОТКИ**

**А.А. Манько, Г.А. Шаншуров**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [sanya-manko@mail.ru](mailto:sanya-manko@mail.ru)**

*В данной статье описаны методы матричного исследования обмоток индукционных электрических машин переменного тока. Приведены альтернативные методы определения коэффициентов дифференциального рассеяния и их электромагнитные свойства.*

*This article describes the methods of matrix research of windings of induction electric AC machines. Alternative methods for determining the differential scattering coefficients and their electromagnetic properties are presented.*

Для решения ряда инженерных задач существуют различные способы расчёта параметров обмоток электрических машин как графические, так и аналитические.

Матричное описание обмоток позволяет наглядно представлять новые технические решения в области обмоток переменного тока и проводить их анализ на работоспособность и качество.

Матричное представление структуры обмоток, состоящих из нескольких электромагнитно-связанных контуров, используется для описания обмоток индукционных машин переменного тока, как элемента матричной модели.

Предлагаемая методика позволяет оценить качества обмоток традиционного исполнения и специальных электрических машин на этапе поискового проектирования с помощью разработанных программных продуктов.

### ***Матричная модель обмотки***

Матричная модель обмотки состоит из ряда компонент:

- матрицы обмотки;
- матрицы звезды пазовых ЭДС;
- матрицы намагничивающей силы обмотки;

– матрицы диаграммы Гёргиса.

### **Методы определения коэффициента дифференциального рассеяния**

В основе расчёта коэффициента использования обмоткой якоря машины переменного тока лежат две величины: обмоточный коэффициент рабочей гармоники магнитного поля генерируемой этой обмоткой и коэффициент дифференциального рассеяния.

#### **1. Дифференциальный метод.**

Коэффициент дифференциального рассеяния  $\lambda_d$  определяется соотношением обмоточных коэффициентов  $K_{об\ v}$  высших и субгармоник (при их наличии) и рабочей гармоники поля генерируемых обмоткой якоря машины переменного тока.

Коэффициент использования обмотки:

$$K_{и}(\lambda_d) = K_{об1}(1 - \lambda_d) \quad (1)$$

Если субгармоники отсутствуют:  $v = 1$  – рабочая гармоника при любом числе пар полюсов  $p$  коэффициент дифференциального рассеяния определяется соотношением:

$$\lambda_d = \sum_{v \neq 1}^{v_{\max}} \left( \frac{K_{об\ v}}{v K_{об1}} \right)^2 \quad (2)$$

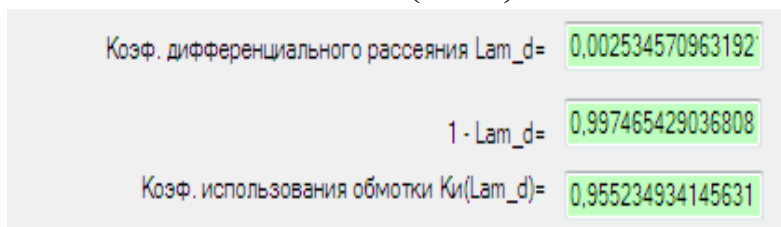


Рис. 1. Фрагмент рабочего окна программы «Калькулятор»

#### **2. Интегральным методом по диаграмме Гёргиса через матрицу намагничивающих сил.**

$$(f_i) = (f_{i-1} + a_{zi}), \quad (3)$$

где  $i$  – номер паза;  $a_{zi}$  – значение элемента матрицы токового слоя обмотки;  $f_i$  – значение матрицы намагничивающих сил;  $f_0 = 0$ . Центр диаграммы Гёргиса в матричной форме приводится к началу координат на комплексной плоскости

$$(f_i)_i = ((f_i) - r_0), \quad (4)$$



где  $r_0 = \frac{1}{Z_0} \sum_{i=1}^{Z_0} f_i$  – координата центра диаграммы Гёргеса на комплексной плоскости. Коэффициент дифференциального рассеяния  $\lambda_d = \left( \frac{R_d}{R_p} \right)^2 - 1$ , где  $R_d^2$  – момент инерции точек диаграммы Гёргеса в проекциях на комплексной плоскости;  $R_p = \frac{k_{об1}}{2\pi p_0} \sum_{i=1}^{Z_0} \text{mod}(a_{zi})$  – радиус диаграммы Гёргеса, соответствующий первой гармонической намагничивающих сил.

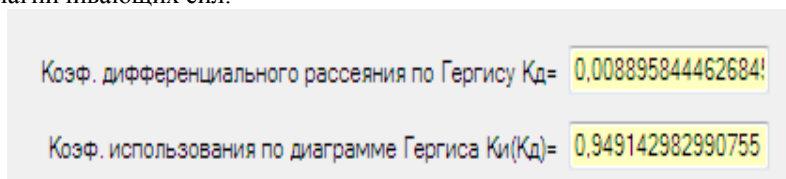


Рис. 2. Фрагмент рабочего окна программы «Калькулятор»

3. Метод на основе гармонического анализа намагничивающей силы  $m$  – фазной обмотки.

Двухзонная обмотка:

- характеристика

" $Z = 24$ ,  $AZBXY$  - структура двухзонной обмотки,  $P = 1$ ,  $m = 3$ , однослойная"

- матрица обмотки:

$Z/m$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1								-1	-1	-1	-1								
2								1	1	1	1									-1	-1	-1	-1	
3					-1	-1	-1	-1									1	1	1	1				

Рис.3. Разложение намагничивающей силы  $m$  – фазной обмотки в ряд Фурье

На основе матричного описания обмотки (рис.3) составляется матрица намагничивающей силы обмотки. Результаты гармонического анализа намагничивающей силы, представленной матрицей, с использованием программы «EXCEL» приведены на рис.3. Расчёт амплитуд НС выполняем по выражению:

$$F_v = \frac{2}{\nu \cdot Z_0} L_v \quad (5)$$

4. Метод на основе гармонического анализа намагничивающей силы (индукции магнитного потока)  $m$  – фазной обмотки и программного продукта «FEMM».

Из картины поля в воздушном зазоре, созданного обмоткой переменного тока (Двухзонная обмотка с характеристикой: "Z = 24, AZBXCУ - структура двухзонной обмотки, P = 1, m = 3, однослойная" )

выделяем гармонические составляющие магнитного поля.



Рис. 4. Гармонический состав индукции в воздушном зазоре

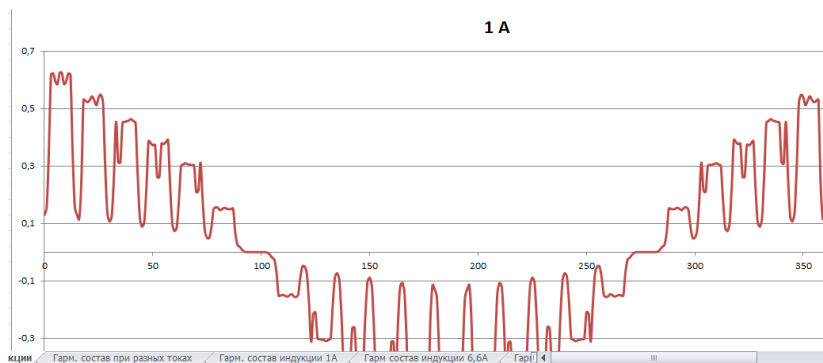


Рис.5. Распределение индукции в воздушном зазоре

Анализ поля с различной степенью насыщения дал результат по определению коэффициентов дифференциального рассеяния и качества

обмотки совпадающий с ранее разработанными методами. Оценка качества обмоток машин переменного тока на стадии проектирования позволяет определить целесообразность дальнейших разработок новых технических решений. Предложенный метод определения коэффициентов дифференциального рассеяния и качества обмотки может быть положен в основу инженерных методов расчёта параметров обмоток индукционных электрических машин.

#### *Литература:*

1. Пат. № 140530 РФ, МКИ<sup>7</sup>Н 02 К 3/28, 17/14. Обмотка электрической машины переменного тока/ Г.А. Шаншуров. Оpubл.20.11.2010, БЮЛ. № 32. Приоритет 30.06.10; Заявка № 2010126826.- С. 4
2. Шаншуров Г. А. Специальные электрические машины. Оценка качества обмоток машин переменного тока на стадии проектирования : учеб.пособие / Новосиб. гос. техн. ун-т ; Г. А. Шаншуров, Т. В. Дружинина, А. Ю. Будникова. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. - 40 с.
3. Шаншуров Г.А.Оценка качества обмоток машин переменного токaна стадии проектирования / Г.А. Шаншуров // Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 9–13.
4. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник/ И.П Копылов, В.П Морозкин, Б.К. Клоков и др. – М.: Изд-во Высшая школа, 2005. – 496 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ПИТАНИЯ НА МАССОГАБАРИТНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В УСЛОВИЯХ КОСМОСА**

**А.А. Маратканов, П.В. Тютеева**  
**Томский политехнический университет,**  
**г. Томск, maratkanov-2016@mail.ru**

*В данной работе было проведено оптимальное проектирование силового понижающего высокочастотного трансформатора на ферромагнитном сердечнике номинальной мощностью 1 кВт. На основе полученных данных проводилось исследование значений основных расчетных величин при изменении частоты питания трансформатора с использованием программного продукта MathCad. Моделирование выполнялось для спроектированной конструкции.*

*In this work, the optimal design of a power-down high-frequency transformer on a ferromagnetic core with 1 kW rated power was carried out. Based on the obtained data, the study of the base calculated values when the transformer frequency changed was made with the MathCad software. Modelling was performed for the designed structure.*

В последние годы космос является одной из ведущих отраслей народного хозяйства. Одним из важнейших показателей уровня развития страны являются достижения в исследовании и эксплуатации космоса. На протяжении последних десятилетий аэрокосмические технологии оказывают нарастающее влияние на экономическое и социальное развитие государства и общества, находя широкое применение в связи, сельском и лесном хозяйстве, картографии и геодезии, геологоразведке, гидрометеорологии, на транспорте, для предотвращения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Ключевым звеном обеспечения безопасности государства являются аэрокосмические и ракетные системы. На внешний вид, конструкцию, массу, срок активного существования космического аппарата непосредственно влияет система электропитания.

Электропитание космического аппарата заключается в использовании солнечных батарей в качестве первичного источника энергии ограниченной мощности и аккумуляторных батарей в качестве вторичного источника энергии и согласовании работы первичного и вторичного источников энергии, причем напряжение первичного и вторичного источников электроэнергии преобразуется в переменное и трансформируется в требуемые номиналы выходного напряжения.

Цель данной работы заключается в оптимальном проектировании силового высокочастотного ферромагнитного трансформатора и исследовании влияния частоты питания на максимальную проходную мощность к единице объема трансформатора при заданной допустимой температуре перегрева обмоток, сердечников и заданных энергетических характеристиках.

Вопросы оптимального проектирования высокочастотных трансформаторов, равно как и других подобных им устройств работающих на феррите, не являются в теории и практике новыми, но остаются актуальными. Использование хорошо развитой теории и методов проектирования маломощных высокочастотных трансформаторов обобщенных в единую систему приемов оптимального проектирования дает возможность спроектировать силовой высокочастотный ферромагнитный трансформатор с максимальной проходной мощностью на единицу объема. Оптимальная мощность проектируемого трансформатора составит 1 кВт, что

сравнимо с мощностью потребляемой небольшой ОКС с экипажем из одного – двух человек.

Силовая часть системы понижения постоянного напряжения – трансформатор подключен к однофазной мостовой схеме, которая характеризуется высоким коэффициентом использования трансформатора по мощности без вынужденного подмагничивания (Рисунок 1).

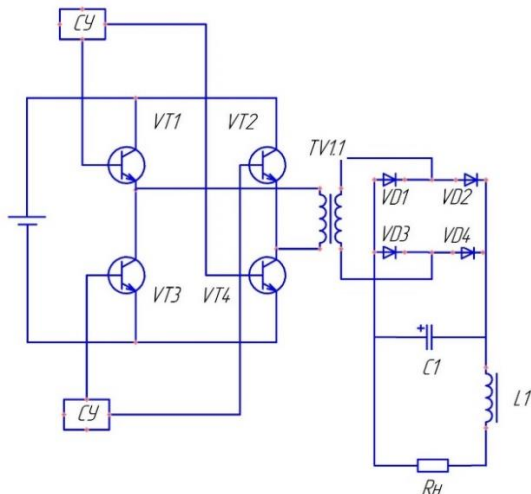


Рис. 1 – Система понижения напряжения

Рассмотрим случай системы электрического питания, где от солнечных батарей формируется единая шина питания постоянного напряжения бортовой сети 100 В. Проектирование трансформатора реализовано для КА с номинальными напряжениями 27 и 100 В.

Полученные результаты спроектированного трансформатора легко переводятся на другую частоту. Действительно, если мощность аппарата и конструктивное исполнение остаются прежними, то в использованных выражения значения всех параметров сохраняются и пересчет величин, соответствующих частоте  $f_1$  на новую частоту  $f_n$  осуществляются с помощью функций:

$$B_{pn}(f_n) = B_p \cdot \sqrt[12]{\frac{f_1^{7\gamma-2}}{f_n^{7\gamma-2}}}; S_{cn}(f_n) = S_c \cdot \sqrt[3]{\frac{f_1^{2-\gamma}}{f_n^{2-\gamma}}}; j_n(f_n) = j \cdot \sqrt[12]{\frac{f_n^{2-\gamma}}{f_1^{2-\gamma}}};$$

$$\omega_n(f_n) = \frac{\omega S_c B_p f_1}{S_c \cdot \sqrt[3]{\frac{f_1^{2-\gamma}}{f_n^{2-\gamma}}} \cdot B_p \cdot \sqrt[12]{\frac{f_1^{7\gamma-2}}{f_n^{7\gamma-2}}}}; \Delta\eta_n(f_n) = \Delta\eta \cdot \sqrt[3]{\frac{f_1^{2-\gamma}}{f_n^{2-\gamma}}};$$

$$\mathfrak{E}_{Gn}(f_n) = \mathfrak{E}_G \sqrt[3]{\frac{f_1^{2-\gamma}}{f_n^{2-\gamma}}}; \mathfrak{E}_{\text{цн}}(f_n) = \mathfrak{E}_{\text{ц}} \sqrt[3]{\frac{f_1^{2-\gamma}}{f_n^{2-\gamma}}}; \mathfrak{E}_{Vn}(f_n) = \mathfrak{E}_V \sqrt[3]{\frac{f_1^{2-\gamma}}{f_n^{2-\gamma}}};$$

Где  $B_{pn}(f_n)$  функция рабочей индукции,  $S_{cn}(f_n)$  функция основного сечения магнитопровода,  $j_n(f_n)$  функция плотности тока в проводниках,  $\omega_n(f_n)$  функция количества витков для создания напряжения 1 В,  $\Delta\eta_n(f_n)$  функция коэффициента потерь,  $\mathfrak{E}_{Gn}(f_n)$ ,  $\mathfrak{E}_{\text{цн}}(f_n)$ ,  $\mathfrak{E}_{Vn}(f_n)$  функции удельно экономических показателей веса, цены и объема.

Возможный диапазон работы для силового высокочастотного трансформатора спроектированного конструктивного исполнения на феррите 2000НМ лежит от 26,6 до 100 кГц (Таблица 1).

**Таблица 1 – Значение основных расчетных величин**

$f_n$ , кГц	30	40	50	60	70	80	90	100
$B_{pn}$ , Тл	0,186	0,157	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09
$S_{cn}$ , см <sup>2</sup>	2,3	2,18	2,05	1,97	1,9	1,84	1,79	1,75
$j_n$ , $\frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$	4,6	4,68	4,74	4,79	4,83	4,87	4,9	4,94
$\omega_n$ , В <sup>-1</sup>	0,193	0,184	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15
$\Delta\eta_n$ , %	2,9	2,71	2,58	2,47	2,38	2,3	2,25	2,19
$\mathfrak{E}_{Gn}$ , $\frac{\text{Г}}{\text{кВт}}$	225	203	188	176	167	159	153	147
$\mathfrak{E}_{\text{цн}}$ , $\frac{\text{руб}}{\text{кВт}}$	1010	914	846	793	752	717	688	663
$\mathfrak{E}_{Vn}$ , $\frac{\text{см}^3}{\text{кВт}}$	71	64	59	55	52	50	48	46

По полученным значениям таблицы 1 основных расчетных величин видно, что минимум удельно-экономического показателя цены, веса объема, рабочей индукции - рисунок 2, сечения магнитопровода,

количества витков и коэффициента потерь достигается при увеличении частоты питания.

В данной работе был спроектирован трансформатор, который был исследован в диапазоне частот от 26,6 до 100 кГц, и выявлена максимальная проходная мощностью на единице объема на частоте 100 кГц. Следует также отметить, что увеличение частоты на основе другого феррита не даст оптимального значения удельно-экономических показателей, так как плотность тока не рекомендуется брать больше принятой, это уменьшает надежность работы трансформатора, в то время как это не позволит уменьшить площадь окна, что в свою очередь не даст значительно уменьшить вес магнитопровода.

#### *Литература:*

1. Бальян Р. Х., Обрусник В. П. Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987.-168 с.
2. A Critical Comparison of Ferrites with Other Magnetic Materials, Magnetics Technology Center, 1990.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С УДЕРЖАНИЕМ БОЙКА**

**А.В. Марков, В.А. Аксютин**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, slen@ngs.ru**

*Рассматривается режим работы электромагнитного двигателя с предварительным накоплением магнитной энергии при неподвижном положении бойка. Сформулированы требования к управляемым устройствам удержания бойка, обеспечивающих увеличение энергии удара и коэффициента полезного действия электромагнитного двигателя при использовании в приводе машин ударного действия*

*The mode of operation of an electromagnetic motor with preliminary accumulation of magnetic energy with a stationary striker is considered. The requirements to controllable striking devices are formulated, which allow increasing the impact energy and the efficiency of the electromagnetic motor when used in the drive of shock machines*

Использование в электрических машинах ударного действия электромагнитных двигателей возвратно-поступательного движения позволяет повысить удельную энергию удара и КПД, снизить уровень

вибраций, повысить надежность привода машины и обеспечить высокую стабильность выходных характеристик [1–3].

Наиболее просто вопросы повышения КПД решаются при использовании линейных электромагнитных двигателей в синхронных электромагнитных машинах ударного действия [4–7].

Частота колебаний бойка для синхронных электромагнитных машин равна или кратна частоте питающей промышленной сети 50 Гц, а их работа в околорезонансных режимах позволяет достигать КПД для этих машин близких к 50% [8].

Гораздо сложнее обстоит вопрос с повышением КПД в одно- и редкоударных машинах использующих в качестве основного приводного устройства электромагнитный двигатель работающий в отличных от синхронных машин режимах с более низкими удельными показателями и КПД [9–11]. Связано это с тем, что работа подобных машин осуществляется в основном в режиме ожидания, где частота ходов бойка, как правило, не превышает 30...100 ударов в минуту. Анализ рабочих процессов электромагнитных двигателей таких машин показывает, что время для ускорения бойка в магнитном поле катушки с током существенно меньше (в два и более раз) скорости нарастания тока и достижение его величины установившегося значения.

Одним из перспективных направлений исследований в данной области является создание и совершенствование электромагнитных двигателей ударного действия с высокой энергией удара и КПД за счет реализации новых способов управления и режимов их работы. Одним из таких способов управления считается кратковременное удержание бойка в момент подачи напряжения на обмотку электромагнитного двигателя [12].

По мере удержания бойка внешними силами время трогания и ток трогания возрастают, а время движения бойка под действием электромагнитных сил катушки сокращается. Это позволяет существенно увеличить энергию удара бойка и увеличить КПД энергопреобразования.



Наиболее просто режим работы и способ управления электромагнитного двигателя с удержанием бойка можно осуществить с помощью управляемого электромагнитного удержания (рис. 1). Электромагнитный двигатель, содержит магнитопровод 1, катушку возбуждения 2, боек 3 и возвратную пружину 4. Устройство удержания бойка выполнено в виде управляемого электромагнита 5 с внешним притягивающимся якорем 6. Управление катушкой 7 электромагнита осуществляется при помощи специального устройства питания и управления (на рисунке не показано).

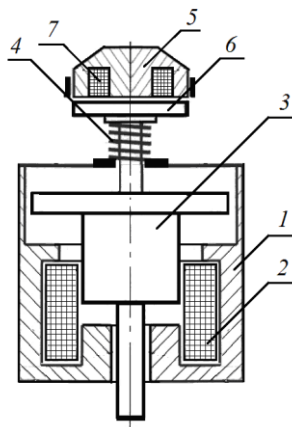


Рис. 1 – Электромагнитный двигатель с удержанием бойка

При подаче импульса напряжения на катушку 2 боек 3 сохраняет свою неподвижность за счет усилия удержания электромагнита 5. По мере увеличения тока в рабочей катушке 2 увеличивается электромагнитное усилие бойка. В случае, когда электромагнитное усилие бойка превысит усилие удержания, боек ускоренно перемещается и наносит удар. Регулируя ток катушки 7 управления можно менять усилие удержания бойка и его конечную скорость движения. Повышение энергии удара бойка в конце рабочего цикла связано с ростом тока трогания катушки рабочего хода и энергии накопленной в магнитном поле катушки при неподвижном состоянии бойка. Конечная скорость движения бойка для случая удержания его внешними силами определяется простым выражением [13].

$$V = \sqrt{\frac{2F_0 x_2 (k_L - 1)}{m}},$$

где  $k_L = L_2/L_1$ ;  $L_1$  – начальная индуктивность соответствующая начальному положению бойка с воздушным зазором  $\delta = \delta_{\max}$  и координатой положения  $x_1 = 0$ ,  $L_2$  – индуктивность катушки в конце рабочего хода бойка при  $\delta = 0$  и координатой положения  $x_2 = \delta_{\max}$ ;  $F_0$  – сила удержания бойка на момент трогания;  $m$  – масса бойка.

Считая, что движение бойка, равноускоренное время его движения, определится как

$$t_{\text{дв}} = \frac{x_2 - x_1}{V} = \sqrt{\frac{x_2 m}{2F_0(k_L - 1)}}.$$

Из последнего выражения следует, что при увеличении удерживающего усилия  $F_0$  до некоторой степени, время движения бойка сокращается, что обеспечивает более высокую конечную скорость и кинетическую энергию бойка на момент удара.

Последнее, позволяет сформулировать требования, предъявляемые к электромагнитным двигателям с удержанием бойка: значительная сила противодействия движению в начале хода и минимальное противодействие движению на остальной части хода; возможность управления противодействующей силой сопротивления в начале хода.

#### *Литература:*

1. Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 29. – С. 88–90.
2. Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н. Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука. – 1985. – 153 с.
3. Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С. Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 1. С. 118–126.
4. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
5. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Новые конструктивные решения проблемы точной синхронизации возвратно-поступательного движения бойка неуправляемой электромагнитной машины ударного действия // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – №2. – С. 280–285.
6. Нейман В.Ю., Нейман Л.А. Оценка конструктивного совершенства систем принудительного охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – Т. 8. – № 2. – С. 166–175.
7. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка // Вестник Ивановского

государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 32–40.

8. Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А. Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия // Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр. Под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 106–120.

9. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 220–224.

10. Нейман В.Ю. Петрова А.А. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.

11. Нейман В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы: Коллективная монография / Новосиб. гос. техн. ун-т; Под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–169.

12. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: Наука, техника, управление. – 2010. – № 8. – С. 29–31.

13. Нейман В.Ю. Режимы форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – №1. – С. 105–112.

## **СИНХРОННЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ**

**Р.О. Никулин, Д.М. Топорков**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, roma99352@gmail.com**

Синхронный реактивный двигатель был создан еще в начале XX века, однако не получил столь широкого распространения, как асинхронный двигатель. Синхронный реактивный двигатель сочетает в себе простоту и надежность асинхронного, а также высокую

эффективность двигателя с постоянными магнитами. Данный двигатель может быть собран на базе серийного асинхронного с аналогичными размерами путем замены ротора. Ротор таких двигателей проще и дешевле в изготовлении, чем ротор асинхронной машины и двигателя с постоянными магнитами, ввиду отсутствия обмотки и магнитов. Также плюсом данной конструкции ротора является низкий температурный фактор. Потери у синхронных реактивных двигателей на порядок меньше чем у асинхронных, за счет отсутствия обмотки ротора, вследствие чего кпд, при одинаковой номинальной мощности, скорости вращения и полюсности, будет выше.

Момент в данном типе двигателей создается за счет разности магнитных сопротивлений по осям  $d$  и  $q$ , приемлемым результатом при проектировании считается, когда отношение  $X_d/X_q$  больше 10. Такое отношение магнитных сопротивлений достигается за счет специфической формы пазов ротора, которые являются барьерами препятствующими прохождению магнитного потока.



Рис. 1

Исходя из этого главной задачей проектирования синхронной реактивной машины, является расчет правильной геометрии листа ротора. Данная конструкция в зависимости от времени имела различное расположение и размер пазов.

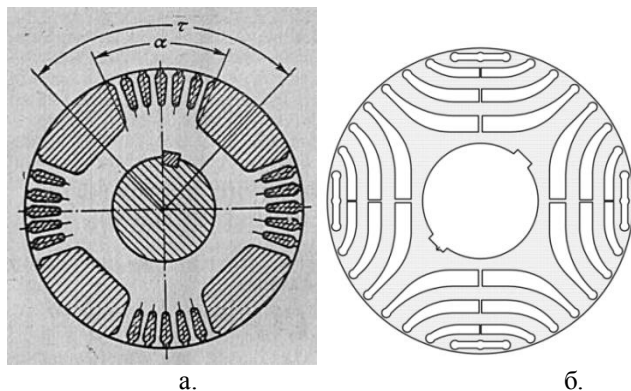


Рис. 2

На рисунках представлены конструкции листов роторов разных поколений, где «а» - это лист ротора простого синхронного реактивного двигателя, а «б» - это лист ротора современного синхронного реактивного двигателя.

Также существуют разные типы шихтовки листов, такие как: аксиальная и поперечная. Аксиально шихтованный ротор имеет большее отношение  $X_d/X_q$ , но более сложен в производстве.

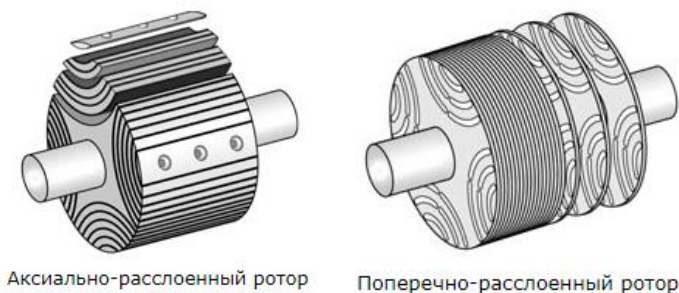


Рис. 3

В работе предполагается исследование различных роторов с целью поиска оптимальной конструкции, особое внимание будет уделяться геометрии пазов.

#### *Литература:*

1. Кононенко, Е.В. Синхронные реактивные машины/ Е.В. Кононенко. – М.: Энергия, 1970. – 208 с.
2. F. Parasiliti, M. Tursini, M. Villani, “Design of synchronous reluctance motors by finite element analysis and optimization algorithm

Prototype and tests”, Department of Electrical and Information Engineering, University of 'Aquila, 67100 Poggio di Roio, L'Aquila, Italy, July 15 th 2006.

3. R.R. Moghaddam “Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design”, Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power electronics, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2007.

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

**А.А. Раджапов, И.С. Ермолов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, aleksej.radzharov@bk.ru**

*На основании анализа научно-технической литературы представлены основные пути повышения энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, дана характеристика их классов энергоэффективности.*

*Based on the analysis of scientific and technical literature, the main ways of improving the energy efficiency of induction motors with a squirrel-cage rotor are presented, the characteristic of their energy efficiency classes is given.*

Понятие «энергоэффективность» определено ГОСТ Р 54413-2011 и означает оптимальное использование энергии, благодаря которому достигается снижение ее потребления при идентичной мощности нагрузки.

Особые требования к энергоэффективности предъявляются к асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором, которые широко используются в регулируемых электромеханических системах переменного тока. В соответствии с ГОСТ Р 54413-2011 (International Electrotechnical Commission) различают 4 класса энергоэффективности:

- IE1 – это стандартный тип,
- IE2 – высокая группа эффективности,
- IE3 – сверхвысокий класс,
- IE4 – премиум класс.

Зависимость коэффициента полезного действия в функции мощности электрического двигателя показана на рисунке 1.

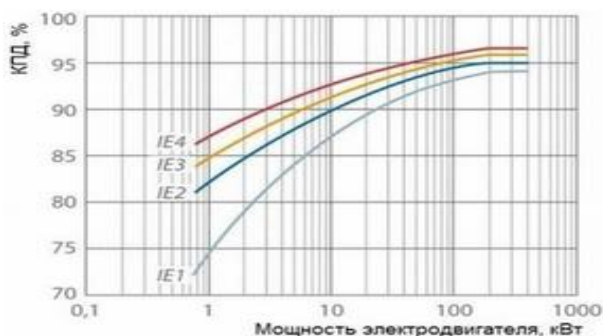


Рис.1 Зависимость КПД от мощности двигателя

Основным показателем энергоэффективности электродвигателя является его коэффициент полезного действия. Очевидно, чем выше коэффициент полезного действия (соответственно ниже потери мощности), тем меньше энергии потребляет электродвигатель из сети для создания той же механической мощности. Ключом к получению более высокого значения коэффициента полезного действия является ограничение потерь. Известно, что потери подразделяются на три вида:

- механические потери (включают в себя вентиляционные потери, потери в подшипниках);
- магнитные потери (потери на гистерезис и вихревые токи);
- электрические потери (потери в обмотках при протекании тока).

Следует отметить, что с ростом энергоэффективности увеличивается и срок службы двигателя.

На основании анализа научно-технической литературы, касающейся вопроса обеспечения энергоэффективности электрической машины любого типа, в том числе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, выделено шесть основных направлений повышения энергоэффективности:

- применение электротехнических сталей с улучшенными магнитными свойствами и уменьшенными магнитными потерями;
- использование дополнительных технологических операций (например, отжиг для восстановления магнитных свойств стали);
- использование изоляции с повышенной теплопроводностью и электрической прочностью;
- улучшение аэродинамических свойств и снижение вентиляционных потерь;
- использование высококачественных подшипников;

- увеличение точности обработки и улучшение качества изготовления узлов и деталей двигателя.

Еще одним важным параметром, характеризующим энергоэффективность электродвигателя, является коэффициент мощности. Коэффициент мощности определяет долю активной мощности в полной, поступающей в электродвигатель из сети. При этом только активная мощность преобразуется в полезную мощность на валу, реактивная мощность предназначена для создания электромагнитного поля. Отсюда следует, что низкие значения коэффициента мощности значительно ухудшают показатели энергоэффективности асинхронного двигателя (энергетический коэффициент полезного действия есть произведение коэффициента полезного действия на коэффициент мощности).

Заключение.

1. Следует отметить, что повышение энергоэффективности является одной из актуальных задач, учитывая большое количество асинхронных двигателей, применяемых в электрических приводах переменного тока.

2. На основании анализа научно-технической литературы выделены основные направления повышения энергоэффективности, наиболее используемые в практической деятельности.

3. Оценка себестоимости асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором представляет собой отдельную задачу. Целесообразно отметить, что некоторые направления являются материалозатратными, а другие требуют дополнительного нового оборудования.

*Литература.*

1. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А.Э.Кравчик / М.М.Шлаф / В.И.Афонин / Е.А.Соболевская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с

2. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общ. Ред. И.П.Копылова и Б.К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

3. ГОСТ Р 54413-2011. Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (код IE).

4. Шумов Ю.Н. Энергоэффективные электрические машины // Электричество. - №4. – 2015 С. 3236

5. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интер – У 59 электро / В.И. Радин, Й. Лондин, В.Д. Розенкном и др.; Под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.:



6. Темлякова З.С., Шевченко А.А., Гречкин В.В. Исследование эксплуатационных свойств асинхронного двигателя на основе численного моделирования // Электротехника. Электротехнология. Энергетика (ЭЭЭ-2015) = Electrical engineering. Electrotechnology. Energy (EEE-2015) : сб. науч. тр. 7 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 9–12 июня 2015 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 79-82.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ САМОЛЕТОВ

**А.Б. Раднаев, Е.В. Бейерлейн**

**Томский политехнический университет, г. Томск,  
radnaev.andrei@gmail.com**

*Проведен анализ возможных вариантов развития систем генерирования электрической энергии самолетов, в частности генераторных узлов. Рассмотрена проблема большого веса и габаритов приводов постоянной частоты и генераторов электрической энергии.*

*The analysis of possible options for the development of systems for generating electrical energy of aircraft, in particular generator units. The problem of the large weight and dimensions of constant frequency drives and electric power generators is considered.*

В настоящее время генераторы систем электроснабжения самолетов преобразуют механическую энергию вращения авиационного двигателя (АД) через приводы постоянных оборотов (ППО). Наиболее распространёнными в настоящее время являются гидромеханические и пневмомеханические приводы. На них приходится большая доля отказов источников бортовой системы электроснабжения. Кроме того, как видно из табл. 1, применение таких приводов увеличивает массу генераторного узла более чем в два раза, а объем - в 1,5.

**Таблица 1 - Характеристики отечественных  
приводов постоянной частоты**

Тип привода	Тип генератора	Масса, кг		Тип самолета на котором использован привод
		ППЧВ	Генератора	
ППО-62М	ГТ40ПЧ8Б	55	47	Ил-62М
ППО-	ГТ60ПЧ6А	45	64	Ил-76

30КП				
ППО-86	ГТ40ПЧ6	38,8	40	Ту-154
ГП-21	ГТ30НЖЧ12-2с	23	14	МиГ-29С
ГП-23	ГТ60НЖЧ12Л	31	21	Су-30
ГП-26	ГТ90НЖЧ12К	32,5	29,5	Ту-204

Неотъемлемое техническое требование к любой продукции авиационной промышленности - снижение веса изделия.

Как видно из данных представленных в табл. 1 масса приводов постоянной частоты вращения (ППЧВ) составляет значительную долю от массы всего генераторного узла.

Для генерирования электрической энергии в авиации используются генераторы постоянного тока и синхронные генераторы, наибольшее распространение среди которых нашли бесконтактные синхронные генераторы с вращающимися выпрямителями (рис.2). Бесконтактные генераторы с вращающимися выпрямителями выполняется в виде трехкаскадной электрической машины, состоящей из основного генератора, возбuditеля, и подвозбудителя, представляющего собой синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов. Такие генераторы имеют довольно большую массу и сложны в изготовлении.

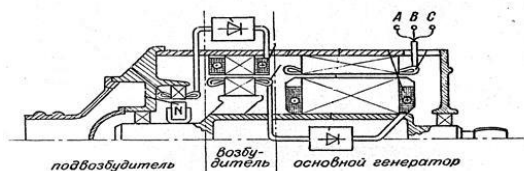


Рис.1 – Типовая конструкция бесконтактного генератора

ППЧВ и генераторы бесконтактного исполнения достигли своих предельных возможностей, что делает их дальнейшее использование неперспективными. Наиболее перспективными, на сегодняшний день, решениями являются:

- использование современных магнитоэлектрических генераторов с редкоземельными постоянными магнитами (МЭГ с РЗМ)
- использование электромашинных приводов постоянной частоты вращения;
- использование прямого привода генератора от авиационного двигателя с использованием МЭГ с РЗМ, так называемые системы переменная скорость – постоянная частота.

Альтернативой синхронным генераторам бесконтактного типа являются синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ). СМПМ имеют более простую конструкцию и, следовательно, более высокую надежность, а также лучшие массогабаритные показатели и энергетические характеристики. Кроме того, СМПМ можно использовать и в стартерном режиме. Недостатки СМПМ связаны с невысокими регулируемыми свойствами, однако это проблема решается использованием полупроводниковыми преобразователями. Поэтому в дальнейшем прогнозируется вытеснение устаревших бесконтактных генераторов на более перспективные СМПМ [3].

Другим решением, является использование электромашинных ППЧВ могут не уступать в массогабаритных показателях гидромеханическим привод-генераторам, позволяют значительно повысить надежность системы генерирования, а также превосходят гидромеханические приводы по эксплуатационным показателям.

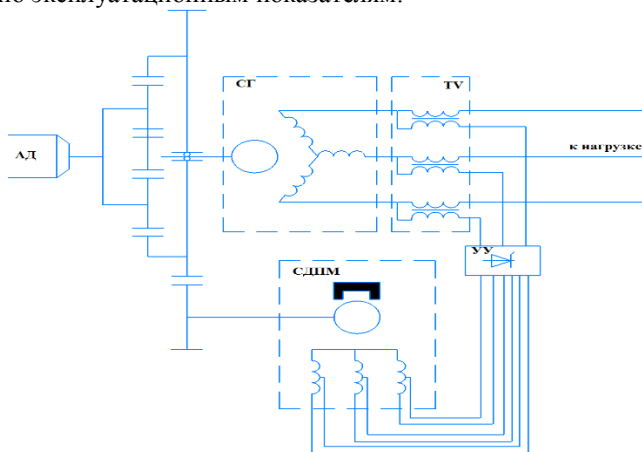


Рис. 2 – Структурная схема электромашинного ППЧВ

Привод состоит из двух электрических машин - синхронного генератора (СГ), и исполнительного органа асинхронной либо СМПМ, соединённых через планетарный редуктор и устройства управления, которое в зависимости от режима работы АД управляет режимами работы исполнительного органа, обеспечивающего постоянство частоты вращения ротора СГ [1].

Еще одним решением является использование систем генерирования с полупроводниковыми преобразователями совместно с СГПМ без привода постоянной частоты вращения (рис.3) так называемые системы генерирования переменная скорость – постоянная частота.

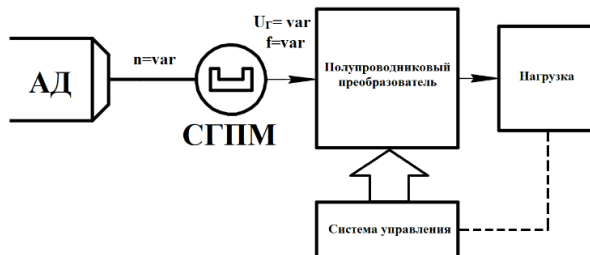


Рис. 3 – Функциональная схема системы генерирования с полупроводниковым преобразователем

Такие системы можно выполнять как постоянного, так и переменного тока, при этом полупроводниковый преобразователь может быть включен как последовательно, так и параллельно. Такие системы генерирования позволят значительно снизить общую массу системы, обладают более высоким КПД, и имеют высокую надежность и обеспечивают режим электростартерного запуска. Системы переменного тока могут быть как переменной частоты, так и стабилизированной. На базе схем с использованием активных выпрямителей напряжения и многоуровневых инверторов может быть построен практически любой вариант системы электроснабжения [2].

#### *Литература:*

1. С.А. Грузков, С.Ю. Останин, А.М.Сугробов, А.Б. Токарев, П.А. Тыричев Электрооборудование летательных аппаратов том 1. – М.:МЭИ, 2005. – 568 с. с
2. А.Г. Гарганеев, Л.К. Бурулько, В.П. Петрович, А.П. Леонов Функциональные системы летательных аппаратов.- Издательство Томского политехнического университета, 2016 г.- 240. с.
3. В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев Электрические генераторы с постоянными магнитами.-М.: Энергоатомиздат, 1988.-280. ил.

## АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ СХЕМ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИВОДА ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.В. Салчак, В.Ю. Нейман

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [lita\\_sss@mail.ru](mailto:lita_sss@mail.ru)

*Проведен краткий анализ конструктивных схем линейных электромагнитных двигателей (ЭМД) применяемых в приводе прессового оборудования. Установлена предпочтительность в использовании вариантов схем ЭМД с предварительным аккумулярованием магнитной энергии в рабочем цикле.*

*A brief analysis of the design schemes of linear electromagnetic motors (EMM) used in the drive of press equipment is carried out. Preference is established for using EMD circuit variants with preliminary accumulation of magnetic energy in the duty cycle.*

Для импульсных технологий в машиностроении при выполнении операций ударного прессования изделий с частотой воздействия до 100 уд./мин взамен электромеханическому, гидравлическому и пневматическому оборудованию целесообразно применение электромагнитного прессового оборудования созданного на основе линейных ЭМД [1]. Отсутствие вредных выбросов и смазочных материалов в электромагнитных прессах является главным достоинством использования данного оборудования.

Применение приводов с линейными ЭМД свидетельствует о значительном многообразии вариантов схем электромагнитных прессов, которые различаются между собой способами реализации движения ударной массы в магнитном поле, возбуждаемом катушкой с током [2].

Также существует разница в их технико-экономических показателях даже в случае выполнения ими одинаковых технологических операций ударного прессования. По этой причине вопросы рационального конструирования приводных устройств для прессового оборудования на основе линейных ЭМД по-прежнему считаются актуальными.

Анализ конструктивных схем различного оборудования на основе линейных ЭМД указывает на очевидную связь энергоэффективности такого оборудования с режимами работы, что отражается на энергии удара, частоте и мощности ударов, КПД энергопреобразования. По конструктивному исполнению большинство ЭМД выполнено по однокатушечным схемам с пружинным возвратом ударной массы бойка в период бестоковой паузы. Пример одного из распространенных вариантов схем линейного ЭМД для пресса приведен на рис. 1. На

рис. 2 представлена конструкция электромагнитного пресса с линейным однокатушечным ЭМД по варианту схемы на рис. 1, созданный малым инновационным предприятием «Электрика» НГТУ [3].

Анализ схем приводов с линейными ЭМД для прессового оборудования позволил выявить основные принципы, применяемые для повышения эффективности подобного оборудования [4, 5].

Принцип действия части вариантов схем основан на предварительном удержании бойка [1, 4]. Это обеспечивает увеличение тока трогания и повышения уровня магнитной энергии накапливаемой в индуктивностях катушки к моменту времени начала рабочего хода. Для предварительного удержания бойка используются различные способы. Самый простой способ удержания – применение механических защелок или специальных приспособлений в виде постоянных магнитов. Это так называемые неуправляемые механизмы удержания, характеризующиеся нестабильными показателями в усилии удержания и как следствие с нестабильной энергией удара в процессе ударного прессования. К наиболее продвинутым устройствам удержания относятся управляемые магнитные устройства. Использование управляемых автономно магнитных устройств позволило существенно повысить стабильность усилия удержания и энергию удара, а также производить управление начальным запасом магнитной энергии в момент отрыва бойка. Неудобство в использовании данного способа удержания

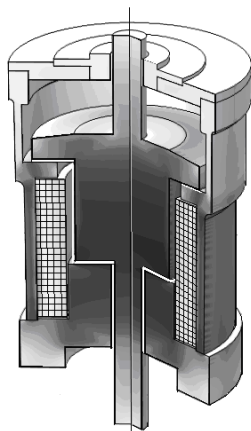


Рис. 1 – Линейный ЭМД



Рис. 2 – Электромагнитный пресс на базе однокатушечного линейного ЭМД

требующего применения двух катушек привело к созданию удерживающих устройств содержащих общий магнитопровод с устройством удержания. При этом для электромагнитного удержания бойка применяется рабочая катушка ЭМД. Работа в режиме накопителя магнитной энергии при неподвижном бойке обеспечивается за счет перераспределения магнитного потока от рабочей катушки. Подобный способ управления начальным запасом магнитной энергии реализован в конструкции ЭМД прессы на рис. 1.

Таким образом, характерной особенностью для всех вариантов схем, реализующих предварительное накопление магнитной энергии, является применение способа искусственного удержания бойка на начальном этапе его движения. Применение удержания за короткий промежуток времени повышает ток трогания и обеспечивает начальный запас магнитной энергии, что приводит к увеличению конечной скорости и энергии удара бойка и тем самым повышает динамическую эффективность прессового оборудования с ЭМД. По завершению рабочего хода возврат бойка осуществляется под действием усилия возвратной пружины. Использование способа удержания бойка позволяет от двух до четырех раз увеличить энергию удара по отношению к способу, где удержание рабочим процессом не предусмотрено.

В настоящее время расчет и проектирование подобных вариантов схем ЭМД с удержанием бойка рассмотрен с позиций статических подходов, где скорость движения учитывается только номинально либо вовсе не рассматривается [6–9]. В этой связи для более детального исследования рабочих процессов ЭМД с предварительным накоплением магнитной энергии, учитывая эффективность их использования, целесообразна разработка математических моделей подобного оборудования учитывающих динамику процесса [10–12].

#### *Литература:*

1. Ряшенцев Н.П. Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицин – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. – 1989. – 216 с.
2. Нейман В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин / В.Ю. Нейман // Автоматизированные электромеханические системы: Коллективная монография / Новосиб. гос. техн. ун-т; Под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–169.
3. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки

и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 220–224.

4. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: Наука, техника, управление. – 2010. – № 8. – С. 29–31.

5. Нейман В.Ю. Режимы форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях / В.Ю. Нейман // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 1. – С. 105–112.

6. Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулированием магнитной энергии в динамических режимах / В.Ю. Нейман // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 30–36.

7. Нейман Л.А. Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.С. Шабанов // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 50–53.

8. Нейман В.Ю. Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Транспорт: Наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 21–24.

9. Нейман В.Ю. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей/ В.Ю. Нейман, А.А. Петрова// Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.

10. Малинин Л.И. Определение напряжения преобразования энергии и электромагнитных сил в электромеханических системах/ Л.И. Малинин, В.Ю. Нейман // Электричество. –2008. – № 6. – С. 57–62.

11. Нейман Л.А. Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями/ Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35–40.

12. Нейман Л.А. Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107.



# РАЗРАБОТКА МАХОВИКОВОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ САМОХОДНОГО КРАНА

А.Н. Царегородцев, Д.М. Топорков

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, CaregorodcevAlex@yandex.ru

*Работа посвящена выбору конструкторских решений маховикового накопителя энергии для самоходного крана. Заявленная проблема заключается в низкой энергоэффективности энергетической установки самоходного крана. В качестве решения предлагается разработать и внедрить в энергосистему крана маховиковый накопитель энергии.*

*The paper considers the design choices of flywheel energy storage for rubber tyred gantry crane. The stated problem is the low energy efficiency of traditional rubber tyred gantry crane's energy unit. The proposed solution is to design flywheel energy storage and implement it into crane's energy system.*

В последние несколько лет, как в России, так и в мире в целом наблюдается непрерывный рост объемов контейнерных грузоперевозок [1]. Возрастает и потребность в грузоподъемных машинах, применяемых для перегрузки контейнеров в портах и на логистических терминалах. Одной из разновидностей таких грузоподъемных машин является самоходный подъемный кран, в зарубежной литературе также называемый «козловой кран на шинном ходу». Он отличается повышенной мобильностью и не нуждается в специальной инфраструктуре (рельсовых путях, кабелях для подвода электричества), необходимой для традиционных козловых кранов.

Источником энергии самоходного крана является дизель-генератор. Основными потребителями – электроприводы колёс, тележки и лебёдки. Причём, на привод лебёдки приходится примерно 60% потребляемой краном электроэнергии [2].

Работа подъемного крана характеризуется неравномерностью нагрузки, а, следовательно, и неравномерностью энергопотребления во времени. Резкое увеличение или уменьшение потребляемой мощности приводит к большему потреблению топлива и к более быстрому износу дизель-генератора [3]. Более того, мощность генератора рассчитывается на подъем контейнера максимально допустимой по стандартам массы, даже если на практике необходимость подъема такого тяжелого груза встречается редко. Это означает, что большую часть времени установленная мощность дизель-генератора недоиспользуется. Кроме того, при спуске груза вырабатывается энергия, которая в обычном самоходном кране не используется повторно, а просто выделяется в

виде тепла на тормозных резисторах. Всё это говорит о низкой эффективности энергетической системы обычного самоходного крана.

Для устранения указанных недостатков было предложено использовать буферный накопитель энергии, отвечающий следующим требованиям:

- большая мощность (сравнимая с мощностью дизель-генератора);
- большой ресурс (десятки тысяч рабочих циклов заряда-разряда);
- низкая стоимость;
- высокий КПД преобразования энергии;
- низкая скорость саморазряда;
- малый вес и размер.

Сравнительный анализ показал, что указанным требованиям отвечают два типа накопителей: суперконденсаторы и маховиковый накопитель энергии (МНЭ). В рамках данной работы было решено ограничиться рассмотрением лишь маховикового накопителя.

Маховиковый накопитель – это накопитель механической энергии, представляющий собой совокупность электрической машины и маховика – массивного вращающегося тела. Во время заряда накопителя электрическая машина работает в двигательном режиме, скорость вращения маховика, а, следовательно, и его кинетическая энергия увеличиваются. Во время разряда накопителя электрическая машина работает в генераторном режиме, скорость вращения и кинетическая энергия маховика уменьшаются. Когда энергия не отдаётся и не запасается, электрическая машина работает в режиме выбега, кинетическая энергия маховика расходуется на преодоления сил трения, сопротивления внешней среды и т. п., скорость вращения маховика постепенно уменьшается.

Существует большое разнообразие видов МНЭ. Рассмотрим основные конструкторские решения и выберем наиболее подходящие для МНЭ, устанавливаемого на самоходный кран.

По скорости вращения МНЭ делятся на низкоскоростные (до 10 тысяч оборотов в минуту) и высокоскоростные (свыше 10 тысяч оборотов в минуту). Низкоскоростные маховики изготавливаются из тяжёлых металлов (например, стали) и удерживаются механическими или магнитными подшипниками. Высокоскоростные маховики изготавливаются из более лёгких и более прочных композитных материалов и удерживаются магнитными подшипниками. Высокоскоростные МНЭ по сравнению с низкоскоростными имеют большую плотность энергии, но стоят дороже [4]. Для установки на

самоходный кран предпочтительным является низкоскоростной МНЭ, поскольку накопление больших объёмов энергии не требуется.

Выбор низкоскоростного МНЭ позволяет не использовать дорогостоящие и сложные в управлении магнитные подшипники, а ограничиться установкой механических шарикоподшипников с высокой точностью изготовления, необходимой для минимизации потерь на трение.

МНЭ бывают как с горизонтальным расположением оси вращения, так и с вертикальным. Предпочтительным является вертикальное расположение, потому что при нём отсутствуют изгибающие моменты, обусловленные массой маховика, а также радиальное биение и смещение валов, которые имеются при горизонтальном расположении оси.

В маховиковых накопителях обычно используются три типа электрических машин: асинхронные, вентильные реактивные и синхронные машины с постоянными магнитами. В разрабатываемом МНЭ будет использоваться синхронная машина с постоянными магнитами, потому что она обладает большим удельным вращающим моментом и высоким КПД. К недостаткам такой машины относится риск размагничивания постоянных магнитов при перегреве [4].

Конструктивно более простым является МНЭ, у которого электрическая машина и маховик представляют собой отдельные узлы, размещённые на общем валу. Однако в последнее время получают распространение МНЭ, у которых маховик и ротор электрической машины совмещены. Такие МНЭ более компактны и имеют большую плотность энергии. Для того чтобы совместить маховик с ротором машины в разрабатываемом накопителе предлагается использовать электрическую машину с аксиальным магнитным потоком. При этом цилиндрический ротор из электротехнической стали будет закреплён на валу из конструкционной стали. На боковую поверхность ротора с целью увеличения момента инерции, а, следовательно, и максимальной кинетической энергии, будет намотана лента из высокопрочной немагнитной стали. На нижнюю и верхнюю поверхности ротора будут наклеены постоянные магниты. Сверху и снизу от ротора будут находиться статоры, закреплённые на корпусе МНЭ. Конструкция с одним ротором, расположенным между двумя статорами позволит достичь максимальной плотности магнитного потока, а, следовательно, и максимального крутящего момента [5].

В ходе дальнейших исследований планируется определить необходимую мощность и энергоёмкость МНЭ, рассчитать

геометрические размеры маховика и осуществить проектирование электрической машины.

*Литература:*

1. Никода К. Выравнивание спроса и предложения на рынке контейнерных перевозок // Морские порты. – 2018. – № 1 (162). – С. 44–47.
2. Analysis of energy usage for RTG cranes / V. Papaioannou, S. Pietrosanti, W. Holderbaum, V.M. Becerra, R. Mayer. – Reading, 2016. – 21 p. – (Preprint / University of Reading).
3. M.M. Flynn, P. McMullen, O. Solis. Saving energy using flywheels // IEEE Industry Applications Magazine. – 2008. – Vol. 14, iss. 6. – P. 69–76. – doi: 10.1109/MIAS.2008.929351.
4. M.E. Amiryar, K.R. Pullen. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications // Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7, iss. 3. – P. 286. – doi: 10.3390/app7030286.
5. Design and Loss Analysis of A High Speed Flywheel Energy Storage System Based on Axial-Flux Flywheel-Rotor Electric Machines / C. Zhang, K.J. Tseng, T.D. Nguyen, S. Zhang // International Power Engineering Conference, IPEC 2010, 27-29 oct. 2010: Proceedings. – Singapore, 2010. – P. 886–891. – doi: 10.1109/IPECON.2010.5697091.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
НАГРУЗОК НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ  
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ  
РОТОРОМ**

**Д.Ю. Чернядьева, В.С.Ашаргин**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [diana\\_chernyadeva@mail.ru](mailto:diana_chernyadeva@mail.ru)**

*В данной статье приведено исследование влияния уровня электромагнитной нагрузки на технико-экономические показатели электродвигателя. Исследование проводилось на основе данных электромагнитного расчёта высоковольтного асинхронного двигателя мощностью 1000 кВт при напряжении 6 кВ.*

*The study has been presented of the influence of the level of electromagnetic load on the technical and economic indicators of an electric motor in this article. The study was carried out on the basis of the electromagnetic calculation of a high-voltage induction motor with a power of 1000 kW and a voltage of 6 kV.*

В работе рассмотрены результаты исследований, поясняющие влияние электромагнитных нагрузок на технико-экономические показатели двигателя, такие как коэффициент полезного действия, пусковой ток, пусковой момент, коэффициент мощности.

Спецификой электромагнитного расчета является итерационные циклы электромагнитного расчета, при выполнении которых определяются экономически выгодные значения показателей технической функции асинхронного двигателя, в частности, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности.

Целью исследования является определение размерных соотношений активного объема электродвигателя, которые обеспечивают заданные технико-экономические показатели.

Из анализа формулы проектирования

$$P' = \frac{\pi}{2} \alpha_{\delta} k_f k_0 D^2 l_{\delta} A B_{\delta} \Omega.$$

следует, что при заданных расчетной мощности  $P'$  и частоты вращения объем и вес активных материалов зависит от величины расчетной индукции  $B_{\delta}$  и линейной нагрузки  $A$ .

Это означает, что оптимизация уровня электромагнитных нагрузок соответствует оптимизации массогабаритных показателей электрического двигателя.

Выбор уровня магнитной индукции на различных участках магнитной цепи является трудной задачей, поскольку их значения сложным образом влияют на различные показатели электродвигателя, поэтому данное исследование проводится при следующих условиях:

Значение линейной нагрузки постоянно и равно максимальному для данного типа

электродвигателей значению 63000 А/м.

Внешний диаметр статора неизменен и равен значению внешнего диаметра выпускаемого серийно двигателя-аналога -  $D_a = 0.85$  м.

Значение воздушного зазора постоянно.

Критериями оценки возможных расчётных вариантов являются следующие показатели: масса активного объема электродвигателя, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, пусковой момент, пусковой ток, максимальный момент. Чтобы определить наилучший вариант, был проведён электромагнитный расчёт нескольких вариантов, в которых определены основные конструктивные размеры машины, значения МДС на различных участках магнитной цепи, номинальные значения КПД, коэффициента

мощности, пусковые ток и момент, максимальный момент. Основные результаты наилучшего варианта расчетов приведены в таблице.

$I_{\text{н}}, \text{A}$	22,69	25,06	29,9	34,5
$s_{\text{н}}, \text{о.е.}$	0,005	0,0049	0,0047	0.0046
$\eta, \%$	95,7	95,6	95,6	95,5
$\cos \varphi, \text{о.е.}$	0,91	0,903	0,89	0,88
$I_{\text{м}}, \text{о.е.}$	6,26	6,43	7,1	7,5
$M_{\text{м}}, \text{о.е.}$	0,75	0,802	0,85	0,88

Графическая интерпретация  $\eta, \cos \varphi, I, M = f(B_{\delta})$  показаны на рисунках 1,2,3,4.

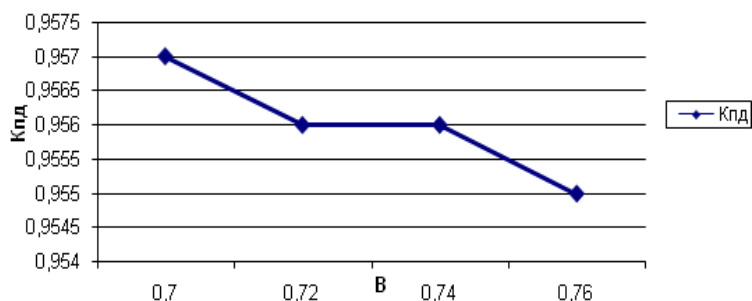


Рисунок 1. Зависимость  $\eta$  от  $B_{\delta}$

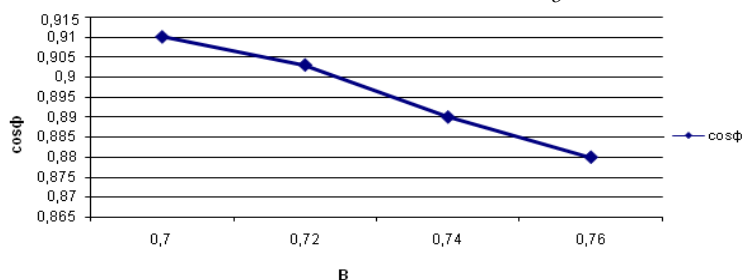


Рисунок 2. Зависимость  $\cos \varphi$  от  $B_{\delta}$

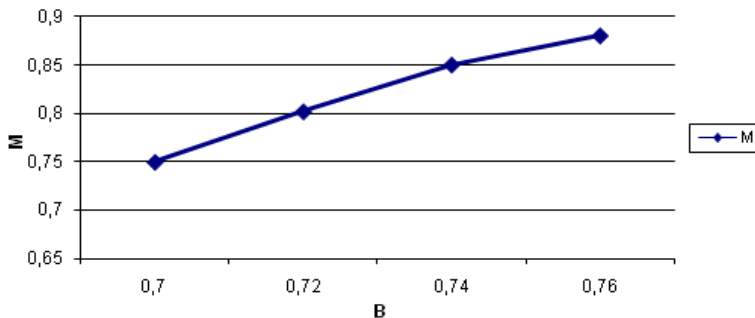


Рисунок 3 – Зависимость  $M$  от  $B_{\delta}$

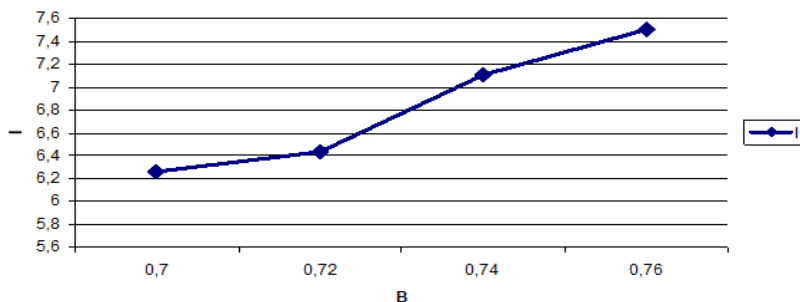


Рисунок 4 – Зависимость  $I$  от  $B_{\delta}$

Результаты сравнения трех наилучших вариантов отражены в выводах.

Анализ полученных результатов приводит к следующим выводам:

- Коэффициент полезного действия имеет примерно одинаковые численные значения для каждого из вариантов; наибольшее значение имеет вариант № 1. Значение КПД второго и третьего вариантов меньше первого на 0,1%, а четвертого на 0,2%.

- При уменьшении значений индукций значения  $\cos \varphi$  увеличиваются, так как уменьшаются МДС на участках магнитной цепи, а, следовательно, и суммарная МДС и, соответственно, снижается значение намагничивающего тока. Наибольшее значение коэффициент мощности имеет в первом варианте – 0,91, во втором варианте  $\cos \varphi$  меньше на 0,77%, в третьем – на 2,2%, в четвертом – на 3,3%.

- Пусковой ток электродвигателей в первом и во втором варианте имеет значение, удовлетворяющее требованиям ГОСТ, наименьшее

значение пускового тока в первом варианте – 6,26, во втором пусковой ток больше на 2,7%, в третьем – на 13,4% и в четвертом – на 19,8%.

– Значения пускового момента возрастают при увеличении значения  $B_{\delta}$  и достигают наибольшего значения в варианте № 4 – 0,88, в первом варианте  $M_{II}$  меньше на 14,8%, во втором – на 10%, в третьем – на 5,68%. Во втором третьем и четвертом вариантах значения пускового момента соответствуют требованиям ГОСТ.

– Наименьшую массу активных частей имеет электродвигатель в четвертом варианте 1199,1 кг, в первом варианте масса больше на 16,6%, во втором – на 11,8%, в третьем – на 8,3%.

#### *Литература:*

1. Темлякова З.С., Шевченко А.А., Гречкин В.В. Исследование эксплуатационных свойств асинхронного двигателя на основе численного моделирования // Электротехника. Электротехнология. Энергетика (ЭЭЭ-2015) = Electrical engineering. Electrotechnology. Energy (EEE-2015) : сб. науч. тр. 7 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 9–12 июня 2015 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 79-82.
2. Темлякова З.С., Гречкин В. В., Соловейчик Ю. Г., Персова М. Г. Компьютерная поддержка проектирования высоковольтных асинхронных двигателей // Электротехника, 2014. - № 12. - С. 33-35.
3. Темлякова З.С., Вильбергер М.Е., Морозов П.В., Темляков А.А. Анализ конструктивно-технических решений повышение энергоэффективности асинхронных двигателей / З.С. Темлякова, М.Е. Вильбергер, П.В. Морозов, А.А. Темляков // Научное издание. Научные проблемы транспорта Сибири и дальнего востока. -2018. - №2. – С 219-222
4. И.П.Копылов, Б.К. Клоков. Асинхронные машины//Справочник по электрическим машинам : Т.1- М.: Энергоатомиздат, 1988.-Т.1. С.216-218.



**СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИКА**  
**ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК**  
**И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ**

**С.Н. Андрияшин, С.В. Мятеж**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, myatezh@corp.nstu.ru**

*Рассмотрены актуальные проблемы энергоэффективности котельных. Доказана актуальность и необходимость внедрения различных методов для повышения экономичности и экологичности котельных.*

*Actual problems of boiler house energy efficiency are considered. The relevance and necessity of introducing various methods to increase the efficiency and environmental friendliness of boiler rooms is proved.*

Главным показателем энергетической эффективности котельной является КПД, который учитывает потери топлива и теплоты при производстве и отпуске, а также затраты электроэнергии на привод механизмов. Достигнуть более высоких значений данного показателя возможно благодаря энергосберегающим мероприятиям.

Поддержание оптимального коэффициента избытка воздуха. При сжигании топливных материалов важно правильно регулировать поступление воздуха в камеру сгорания. Если воздуха будет поступать мало, то количество кислорода для полного сгорания топлива будет недостаточно. Для того чтобы обеспечить процесс полного сгорания топлива требуется подводить достаточное количество воздуха, при этом избыток воздуха в камере сгорания также недопустим. В таком случае большое количество тепла расходуется на нагрев воздуха, не участвующего в химическом процессе горения из-за недостаточного перемешивания с топливом.

Определяющими факторами при выборе оптимального значения коэффициента избытка воздуха являются минимальные суммарные потери с уходящими газами и химическим и механическим недожогом.

С точки зрения экологии. Обогащение состава топливно-воздушной смеси приводит к увеличению содержания СО и НС в дымовых газах, увеличению расходов топлива и неэффективной работе камеры сгорания, а обеднение – увеличению содержания NOx.

Использование конденсационных теплообменников. Потери теплоты с уходящими газами значительны и могут достигать 25%. При номинальной нагрузке паровых котлов Т уходящих газов за

экономайзером при работе на газе составляет 140-160 °С. У водогрейных 140-190 °С. В связи с этим все большее распространение получают конденсационные теплоутилизаторы, позволяющие охлаждать уходящие дымовые газы ниже точки росы и дополнительно полезно использовать скрытую теплоту конденсации содержащихся в продуктах сгорания водяных паров.

Данное решение является достаточно эффективным в котельных установках. Оно не только позволяет сократить расход газа, но также имеет экологическое значение. За счёт охлаждения выходящих газов уменьшается тепловое загрязнение окружающей среды.

Автоматизированное погодозависимое регулирование. Такая система управляет выработкой и отпуском тепловой энергии. В состав системы регулирования входят датчик контроля наружной температуры и контроллер. В контроллере устанавливается температурная кривая, отражающая зависимость изменения температуры наружного воздуха и температуры теплоносителя. По выстроенной кривой автоматически определяются условия для создания теплового комфорта в помещениях.

Помимо обеспечения теплового комфорта в отапливаемых объектах, котельные, использующие погодозависимые системы регулирования, экономят до 15% топлива в сравнении с котельными, где данное решение не применяется.

Снижение расхода электроэнергии на 25-30% обеспечивает использование частотных приводов и устройств плавного пуска. Преобразователь частоты вентиляторов и дымососов полностью устраняет токовые перегрузки двигателя, а также исключает проскальзывание ремней. Устройство плавного пуска является регулятором напряжения, который обеспечивает плавный пуск и остановку двигателей, что значительно снижает пусковые токи и ограничивает провалы напряжения в сети. Помимо сохранения электрической энергии данное решение актуально за счёт продления срока эксплуатации двигателя на 15%.

Перечисленные мероприятия не только решают столь актуальную в наши дни проблему энергоэффективности. Их применение также ведёт к экономии затрат на обслуживание котельных установок, продлению срока эксплуатации оборудования и снижению вредоносного воздействия на экологию окружающей среды.

#### *Литература:*

1. Соколов Б. А., Котельные установки и их эксплуатация: учебник для нач. проф. образования. – М.: «Академия», 2008. – 432 с.

2. Брюханов О. Н., Кузнецов В.А. Газифицированные котельные агрегаты: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2009. –392 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ НА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЯХ**

**В.И. Аниброев, Е.А. Гвоздик, А.Д. Зимогряд  
Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [anibroev.v@yandex.ru](mailto:anibroev.v@yandex.ru)**

*В настоящее время аккумуляторные батареи имеют большое значение в современной жизни. Аккумуляторные батареи широко применяются как источники питания для автономных транспортных средств и для грамотной разработки систем с их использованием необходимо осуществлять математическое моделирование. В каком бы устройстве аккумуляторная батарея не применялась, ее преждевременный отказ может повлечь последствия разной степени тяжести.*

*Currently, rechargeable batteries are of great importance in modern life. Rechargeable batteries are widely used as power sources for autonomous vehicles and for the competent development of systems with their use it is necessary to carry out mathematical modeling. Whatever device the battery is used in, its premature failure can lead to consequences of varying severity.*

В последнее время, в качестве энергообеспечивающих комплексов все чаще используются литий-ионные аккумуляторные батареи. Литий ионные аккумуляторы (далее - ЛИА) – сравнительно новая технология накопления электрической энергии, которая быстро развивается в последнее время. По своим параметрам (плотность запасаемой энергии, плотность мощности, ресурс при циклировании) данный тип химических источников тока значительно превосходит традиционные (свинцово-кислотные и щелочные) аккумуляторы [1]. В связи с постоянным улучшением технологии производства ЛИА, наблюдается последовательное снижение стоимости данного типа аккумуляторов. Сегодня стоимость запасаемой в них энергии лишь незначительно превышает стоимость энергии, запасаемой в традиционных аккумуляторах. Это обеспечивает экономическую целесообразность их использования во все более широких областях техники.

На сегодняшний день существует множество различных способов и режимов зарядки аккумуляторных батарей (далее - АКБ), при этом выделяют три основных способа: зарядка постоянным током, постоянным напряжением и комбинированный, когда в процессе зарядки изменяется и ток, и напряжение [2].

При зарядке постоянным током на всем протяжении заряда поддерживается заданная величина. Преимуществом такого способа зарядки является относительно малая продолжительность заряда. Однако, этому методу присущ ряд недостатков: ускоренное старение батареи из-за высоких токовых нагрузок, необходимость стабилизации силы тока, возможность превышения температуры.

Если же процесс зарядки производить при постоянном напряжении, то на последней стадии процесс существенно замедляется и растёт время зарядки АКБ.

И, наконец, третий – комбинированный режим, сочетающий два выше указанных в одном. На первом этапе производится заряд батареи постоянным током, после того, как напряжение достигнет значения ограничения, происходит подзарядка постоянным напряжением с автоматически уменьшающимся током. Этот метод исключает недостатки, присущие первым двум способам. Это самый оптимальный, но самый сложный в плане реализации схемы способ [3].

Понимание процессов, происходящих в аккумуляторной ячейке, позволит избежать аварийных ситуаций, продлить сроки эксплуатации и повысить производительность накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной батареи.

В связи с этим возникает необходимость в получении достоверной и оперативной информации о текущем состоянии и об эксплуатационных характеристиках АКБ. Методы оперативной оценки состояния основываются на характеристиках, полученных косвенно, в результате анализа параметров. Для этого нужна математическая модель, описывающей основные характеристики аккумуляторной батареи. Понимание процессов, происходящих в аккумуляторной ячейке, позволит избежать аварийных ситуаций, продлить сроки эксплуатации и повысить производительность накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной батареи.

Моделирование одиночных и многоэлементных батарей позволяет более детально проанализировать происходящие внутри процессы и их влияние на характеристики аккумулятора, что достаточно трудно оценить экспериментально.

Разработка полномасштабной компьютерной модели является трудоемким и дорогостоящим процессом, который начинается с достаточно простых моделей, которые в дальнейшем корректируются до тех пор, пока не будет обеспечена приемлемая достоверность. Важным этапом является экспериментальная проверка корректности выбранной модели, используемой в дальнейшем как эффективный инструмент проектирования [4].

Исследование способов и режимов зарядки литий-ионных аккумуляторов производилось в среде Matlab/Simulink. Результаты цифрового моделирования будут представлены в докладе.

*Литература:*

1. Дасоян М.А., Стартерные аккумуляторные батареи. Устройство, эксплуатация и ремонт. – М.: “Транспорт”, 1994. – 206 с.
2. Болотовский В. И., Вайсгант З. И., Эксплуатация, обслуживание и ремонт свинцовых аккумуляторов. – Ленинград: “Энергия”, 1988. – 208 с.
3. Шестопалов С.К. Увеличение срока службы аккумуляторных батарей – М.: “Патриот”, 1997. – 61 с.
4. Дьяконов В.П. VisSim + Mathcad + MATLAB. Визуальное математическое моделирование. – М.: “СОЛОН-Пресс”, 2004. – 384 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ НА НЕЙРОСЕТЕВУЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКУЮ ИДЕНТИФИКАЦИЮ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

**К.В. Баратова, В.И. Полищук**

**Алтайский государственный технический университет**

**им. И.И. Ползунова,**

**г. Барнаул, baratova99\_99@mail.ru**

*Представлены результаты подтверждающие получение достоверных данных при использовании нейронной сети для идентификации параметров асинхронных машин при наличии в измерительной части системы сильных импульсных помех. Приведена структура нейронной сети и способ подготовки тренировочного набора для ее обучения.*

*Results obtained confirm the possibility of using neural networks for identification parameters of induction machines in the presence of strong impulse noise in the measuring system. Proposed the structure of the neural network and method of preparing the training set for her education.*

Автоматизированные системы управления асинхронными электроприводами (АЭП) довольно уязвимы в условиях работы реального промышленного объекта. Появление сильных импульсных помех в измерительной части, как правило, приводят к появлению нежелательных сигналов поступающих со стороны датчиков или в цепях связи. Такие импульсные помехи в системе управления появляются от коммутационных операций различных потребителей электроэнергии, возникающих коротких замыканиях, а также

источником сильных импульсных помех может выступать городской электрифицированный транспорт и электрифицированная железная дорога.

В настоящее время одним из перспективных способов идентификации параметров управляемых асинхронных электроприводов находит применение искусственные нейронные сети (ИНС) [1]. Теоретически обосновано, что из-за своих аппроксимирующих свойств, ИНС позволяют производить параметрическую идентификацию при зашумленности данных [3].

Целью работы является исследование и оценка чувствительности нейросетевой идентификационной модели к сильным импульсным помехам во входных сигналах и в обучающей выборке.

Исследования влияния импульсных помех при нейросетевой идентификации частоты вращения АЭП. Исследования проводились на экспериментальной установке рис. 1, которая представляла собой установленные на едином основании машину постоянного тока, асинхронный двигатель, маховик и датчик угловых перемещений. Измерительные сигналы с датчиков подавались в компьютер через плату сбора данных PCI-6024E от National Instruments.

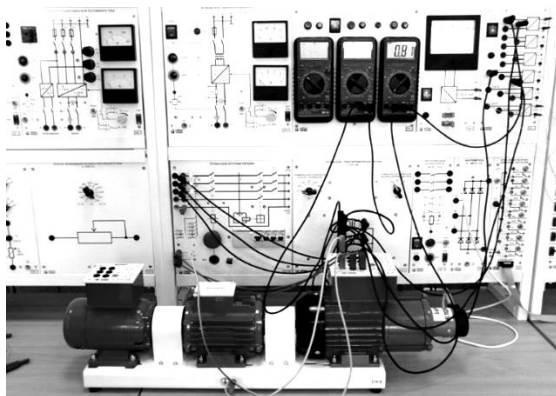


Рис.1 – Внешний вид стенда

Были получены фазные токи, напряжения и скорость вращения асинхронного двигателя при пуске, набросе, сбросе нагрузки и торможении двигателя. На рис. 2 показана характеристика изменения скорости вращения асинхронного двигателя.

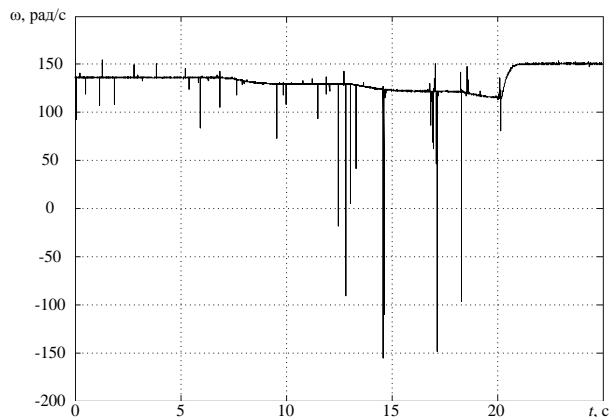


Рис.2 – Характер изменения сигналов в канале измерения скорости вращения асинхронного двигателя при набросе и сбросе нагрузки с сильными импульсными помехами

На основе данных с имеющимися импульсами формировалась обучающая выборка и обучалась ИНС. ИНС была выбрана рекуррентная вида 17-20-1, в качестве функции активации использовался гиперболический тангенс. Входными величинами выступали текущие значения и с одноразовой, двухразовой и трехразовой задержкой значения токов и напряжений 2-х фаз асинхронного двигателя, на выходе ИНС – частота вращения двигателя. Обучение ИНС производилось на основе метода Левенберга-Марквардта [2]. Число циклов обучения: 100.

В качестве эталонных выступали сглаженные при помощи взвешенной локальной квадратичной регрессии опытные данные. На рис. 3 приведены график сглаженных опытных данных скорости вращения и график оценки скорости с использованием ИНС при набросе и сбросе нагрузки.

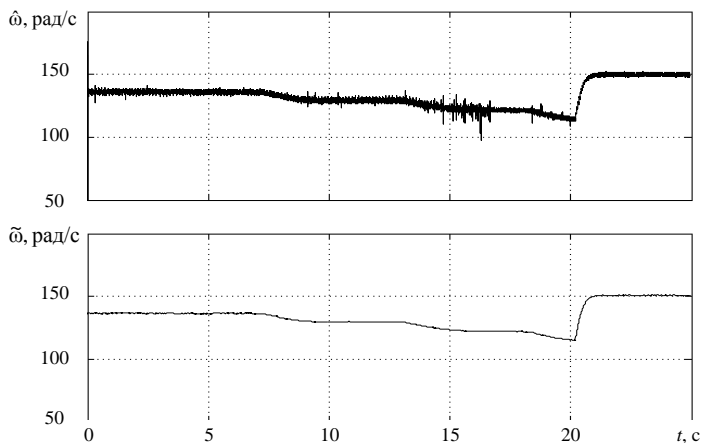


Рис.3 – Графики сглаженных опытных данных и оценки частоты вращения ротора при набросе и сбросе нагрузки

Среднеквадратическую погрешность определения частоты вращения асинхронного двигателя определялась по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{\omega}_i - \omega_i)^2}{n}},$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическая погрешность,  $\tilde{\omega}_i$  – сглаженная частота вращения ротора на шаге интегрирования  $i$ ,  $\omega_i$  – определенная частота вращения ротора на шаге интегрирования  $i$ ,  $n$  – число шагов интегрирования.

Среднеквадратическая погрешность измерения за 2,5 с холостого хода составила 0,88 рад/с, в режимах наброса и сброса нагрузки за 25 с – 4,06 рад/с, а во время торможения за 6 с – 2,62 рад/с.

Среднеквадратическая погрешность оценивания с помощью ИНС частоты вращения асинхронного двигателя определялась по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{\omega}_i - \hat{\omega}_i)^2}{n}},$$



где  $\sigma$  – среднеквадратическая погрешность,  $\tilde{\omega}_i$  – сглаженная частота вращения ротора на шаге интегрирования  $i$ ,  $\hat{\omega}_i$  – оценка частоты вращения ротора на шаге интегрирования  $i$ ,  $n$  – число шагов интегрирования.

Среднеквадратическая погрешность оценивания частоты вращения на холостом ходу за 2,5 с составила 2,6 рад/с, в режимах наброса и сброса нагрузки за 25 с – 1,69 рад/с, а во время торможения за 6 с – 1,92 рад/с.

На основании полученных результатов видно, что искусственные нейронные сети позволяют с приемлемой погрешностью оценивать параметры асинхронного электропривода при наличии сильных импульсных помех в измерительной системе, избавляя от необходимости применения для защиты от помех промежуточных электронных фильтров или фильтрации с помощью специализированных математических методов, таких как регрессия, сглаживание, интерполяция и т.п.

#### *Литература*

1. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации: пер. с пол. / С. Осовский. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
2. Метод Левенберга-Марквардта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// alglib.sources.ru/optimization/levenbergmarquardt.php](http://alglib.sources.ru/optimization/levenbergmarquardt.php). – 13.05.2011.
3. Михайлов А.С., Староверов Б.А. Проблемы и перспективы использования искусственных нейронных сетей для идентификации и диагностики технических объектов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – № 3. – С. 64-68.

## **ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА АФСТ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ТОРСИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМАХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

**Д.Н. Белкова, В.М. Кавешников**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [belkova34diana@gmail.com](mailto:belkova34diana@gmail.com)**

*В данной статье анализируется проблема возникновения и развития субсинхронных колебаний в автономной электростанции. В качестве основного*

решения предполагается использовать устройство для их подавления – активный фильтр субгармоник тока (АФСТ). Для корректной работы АФСТ на основе метода оптимального управления принципа максимума Л.С. Понтрягина были получены закон управления и структура оптимального регулятора для АФСТ.

*This article analyzes the problem of the emergence and development of sub-synchronous oscillations in an autonomous power plant. It is supposed to use a device for their suppression as the main solution - an active filter current subharmonics (AFSC). On the basis of the optimal control method (the maximum principle of L. S. Pontryagin), the control law and the structure of the optimal regulator for AFSC were received for the correct operation of the AFSC.*

В России и в мире наблюдается ежегодный рост появления объектов распределенной генерации. В большинстве случаев производство электроэнергии децентрализовано обусловлено экономическими аспектами. На некоторых нефтедобывающих месторождениях, электроснабжение которых осуществляется от автономных электростанций, работающих на попутном нефтяном газе, происходили аварийные отключения генераторных установок по причине возникновения повышенной виброактивности валов [1, 2].

Такое повышение вибраций вызвано колебаниями тока в цепи статора при сбросе нагрузки мощными тиристорными частотно-регулируемыми приводами (ЧРП). Источником пульсаций является электронная аппаратура ЧРП [3, 4, 5]. Тиристорный выпрямитель способен создавать субгармонические колебания входного тока выпрямителя с частотой, которая способна «плавать» в некоторых пределах. Результат взаимодействия ГТУ и нагрузок представлен на осциллограмме тока нагрузки с наличием низкочастотной субгармоники с частотой около 12 Гц [6].

Появление токов субсинхронной частоты приводит к возникновению динамического момента на роторе генератора, который вызывает колебания ротора на субсинхронной частоте.

В качестве решения данной проблемы для демпфирования субсинхронных колебаний на собственной частоте предлагается активный фильтр субгармоник тока (АФСТ). АФСТ позволит подавлять резонанс в сети без вмешательства в её элементы, включая нагрузку.

Для эффективной и бесперебойной работы системы необходимо разработать систему автоматического управления (САУ) для АФСТ и выбрать оптимальную точку подключения фильтра (или нескольких фильтров) к сети изолированного энергорайона.

Для нахождения функции управления для оптимального регулятора целесообразно использовать принцип максимума Понтрягина, т.к. данный метод позволяет найти не только траекторию оптимального

управления, но и структуру и параметры регулятора, что соответствует поставленной задаче [7].

В качестве первого этапа решения указанной проблемы была выполнена задача разработки упрощенного математического описания газотурбинной установки (ГТУ), учитывающего возможные резонансные явления в энергосистеме [8]. Элементом, который превращает ГТУ в резонирующий объект, является упругая муфта.

На основании выбранного метода оптимального управления критерий оптимальности [16] имеет вид

$$I = \int_0^T \left( k_u^2 k_i^2 \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + L u_y^2 \right) dt \rightarrow \min \quad (1)$$

где  $k_u$  – коэффициент, связывающий напряжение потребителя с колебаниями ротора генератора относительно статического режима;  $k_i$  – коэффициент связи напряжения и тока нелинейных потребителей;  $\varphi$  – угол закручивания муфты;  $L$  – множитель Лагранжа;  $u_y$  – сигнал управления инвертором.

В результате была получена схема оптимального регулятора (ОР) и было проведено моделирование системы в пакете моделирующих программ MATLABSimulink (структурная схема была составлена на основании упрощенного математического описания энергорайона) без ОР (Рис. 1.) и с ОР (Рис. 2.).

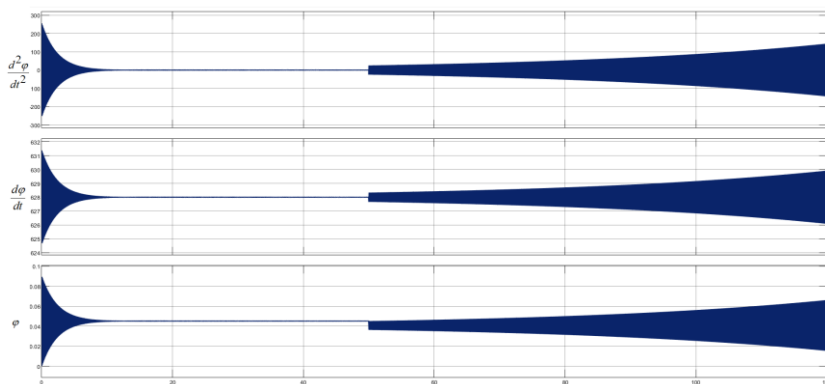


Рис.5. – Переходный процесс без ОР

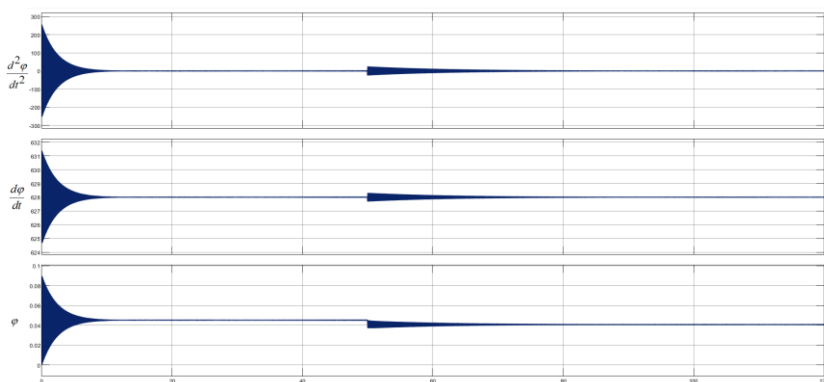


Рис.6. – Переходный процесс с ОР

Графики переходных процессов с ОР удовлетворяют поставленной задаче. Значительные упрощения и допущения, принятые в ходе решения поставленной задачи, требуют доказательства эффективности применения, полученного при указанных условиях регулятора в энергосистеме с АФСТ с математическим описанием, максимально приближенным к реальному объекту.

### *Литература*

1. Задание на выполнение работ по «Выявлению причин субсинхронных колебаний ТГ Ванкорской ГТЭС и разработки мероприятий по их исключению» [http://zakupki.rosneft.ru/files/zakup/238/2013-10/66968/docs/tehnicheskoe\\_zadanie\\_515.pdf](http://zakupki.rosneft.ru/files/zakup/238/2013-10/66968/docs/tehnicheskoe_zadanie_515.pdf) (дата обращения: 23.10.19).
2. Илюшин П.В. Проблемные технические вопросы работы объектов распределенной генерации в составе энергосистемы и подходы к их решению // ЭнергоЭксперт – № 1 – 2015.– С. 58-62.
3. Илюшин П.В. Анализ опыта применения объектов распределенной генерации для обеспечения надежного электроснабжения потребителей [Электронный ресурс]. – URL: [www.cigre.ru/research\\_commitets/ik\\_rus/c6\\_rus/base/04-05-2015/2.%20IlyshinPV.pdf](http://www.cigre.ru/research_commitets/ik_rus/c6_rus/base/04-05-2015/2.%20IlyshinPV.pdf) (дата обращения: 11.11.18).
4. Comparison between electrical drives in LNG plant for subsynchronous torsional interactions / Hiroyuki Masuda, Yoshihiro Ogashi, Masahiko Tsukakoshi, Makoto Yoshimura [Electronic resource]. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/3be8/6ccea49daffecb0ab6e93ce23aca8f70f584.pdf> (дата обращения: 26.06.19).

5. Investigation of SSTI on LNG power plants / Piergiovanni La Seta, Edwin Lerch, Rainer Zurowski [Electronic resource]. – URL: [http://m.energy.siemens.com/US/pool/hq/energy-topics/pdfs/en/oil-gas/LNG16\\_Paper\\_Lerch\\_SAG.pdf](http://m.energy.siemens.com/US/pool/hq/energy-topics/pdfs/en/oil-gas/LNG16_Paper_Lerch_SAG.pdf) (датаобращения: 01.11.18).

6. Белкова Д. Н. Проблема подавления торсионных колебаний в системах распределенной генерации электроэнергии / Д. Н. Белкова, В. М. Кавешников // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 3–7 дек. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 5. – С. 146-149.

7. Теория автоматического управления. Ч.II. Под ред. А.В. Нетушила. Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1972. – 432 с.

8. Белкова Д.Н. упрощенная математическая модель возникновения и развития торсионных колебаний в системах распределенной генерации / Дни науки НГТУ-2019: Материалы научной студенческой конференции / под ред. А.В. Гадюкиной. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – с. 9-13.

## **АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА В МЕХАНИЗМЕ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ**

**А.А. Блинов, Е.С. Кучер**

**Новосибирский Государственный Технический Университет,  
г. Новосибирск, [artur.dunga97@gmail.com](mailto:artur.dunga97@gmail.com)**

*Работаносвящена анализу устройства электропривода ориентации солнечной батареи, а также способам повышения эффективности работы электропривода ориентации.*

*The work is devoted to the analysis of the device of the electric drive of orientation of the solar battery and ways to improve the efficiency of the electric drive of orientation.*

На данный момент солнечная энергия является одной из наиболее перспективных областей развития возобновляемых источников энергии и всей энергии в целом. Для подтверждения этого достаточно сказать то что, солнечная энергия более экологична, чем большинство прочих возобновляемых источников энергии, а также ресурс солнечной энергии практически неисчерпаем. На поверхность земного шара солнечной энергии попадает примерно в 10000 раз больше, чем человек потребляет в настоящее время. [1]

Широкому распространению различного рода гелиосистем препятствуют:

- большая занимаемая площадь по сравнению с другими энергетическими станциями;
- относительно низкий КПД;
- нецелесообразность использования гелиосистем в районах, где весь год интенсивность солнечного излучения относительно мала.

Одним из способов решения проблемы с недостаточно высоким КПД солнечной батареи является проектирование высокоэффективных электроприводов ориентирования солнечных батарей.

Электропривод ориентирования призван совершать поворот солнечной батареи в сторону максимального солнечного излучения. Ниже приведён график зависимости функции мощности солнечного излучения, дошедшей до солнечной панели, от угла между нормалью, проведённой к плоскости панели, и линией падения солнечных лучей (рисунок 1).

Исходя из графика можно сделать вывод о том, что ориентирование панели по солнцу является немаловажным фактором для повышения КПД.

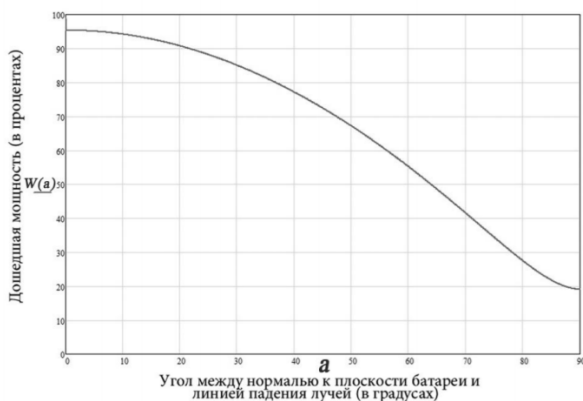


Рисунок 1 – График зависимости функции мощности солнечного излучения от угла падения солнечных лучей

Необходимость применения электропривода в механизме ориентации, можно так же оценить, просмотрев данные [2], которые изображены на рисунке 2.

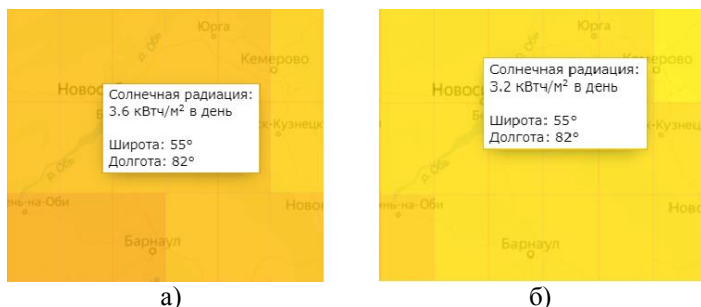


Рисунок 2 – Среднесуточная солнечная радиация, приходящаяся на поверхность солнечной панели площадью 1 кв.м в Новосибирске

На рисунке 2а изображены данные солнечной радиации, приходящейся на следящую поверхность площадью 1 кв.м в течении суток в районе г. Новосибирска в среднем за один год, а на рисунке 2б данные солнечной радиации приходящейся на горизонтальную поверхность солнечной панели.

По расчетам разности между солнечной радиацией, приходящейся на следящую и горизонтальную поверхности солнечных панелей в течении года, можно наглядно убедиться в необходимости применения и усовершенствовании электропривода ориентации солнечной батареи.

$$\Delta_{\text{ср}} = P_{\text{ср}}^{\text{сп}} \cdot 360 - P_{\text{ср}}^{\text{гп}} \cdot 360 = 3,6 \cdot 360 - 3,2 \cdot 360 = 144 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где  $P_{\text{ср}}^{\text{сп}}, P_{\text{ср}}^{\text{гп}}$  – мощности солнечной энергии, приходящиеся на следящую и горизонтальную поверхности соответственно.

Для примера произведем расчет мощности, взяв во внимание КПД реальной солнечной панели:

$$\Delta_{\text{ср}} \cdot \eta_{\text{сп}} = 144 \cdot 0,22 = 31,68 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Тем самым разница в выработке энергии между солнечными панелями с электроприводом слежения и горизонтально расположенной составляет 31,68 кВт · ч, что является достаточно весомым значением мощности (к примеру один человек тратит за один месяц в среднем 60 кВт · ч энергии).

Для создания современного электропривода ориентации стараются совершить подбор элементов системы таким способом, чтобы максимально упростить, удешевить, а также увеличить эффективность работы электропривода.

Увеличения эффективности электропривода ориентации добиваются следующими способами:

- использование электрических машин, не требующих дополнительных преобразований энергии, которые приводят к лишним потерям усложнению системы [3];
- использование адаптивной системы автоматического управления электроприводом, что позволяет снизить энергопотребление и увеличить точность позиционирования панели [4];
- использование управляющей платы без микроконтроллеров [3];
- создание такой механической системы поворота для солнечного модуля, которая бы позволяла получить наибольший угол поворота.

Тем самым проектирование электропривода ориентации солнечной панели сводится к оптимальному подбору элементов системы и к качественному синтезу системы управления электрической машиной, находящейся в составе электропривода.

#### *Литература:*

- 1.Пронин, М. В., А. Г. Воронцов. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам // Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. 2017 г. – 222 с.
2. ГИС ВИЭ GIS RENEWABLE ENERGY SOURCES OF RUSSIA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gisre.ru> - Загл. с экрана.
3. А.С. Петрусёв, Е.Ж. Сарсикеев, Д.Ю. Ляпунов. Разработка технических средств повышения эффективности солнечных установок // Вестник науки Сибири. – 2015. - Спецвыпуск (15). – С77-82.
4. Аржанов Кирилл Владимирович. Двухкоординатная система наведения солнечных батарей на солнце // Известия Томского политехнического университета. – 2014. - Т. 324. № 4. – С139-146.

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В КНС**

**А.Р. Гимадеев, В.М. Кавешников**

**Новосибирский Государственный Технический Университет,  
г. Новосибирск, [kaveshnikov@corp.nstu.ru](mailto:kaveshnikov@corp.nstu.ru)**

*В данной работе рассмотрена система автоматического регулирования уровня в резервуаре КНС. Описан технологический процесс работы канализационной насосной станции. Произведено обоснование применения системы с частотно-регулируемым приводом на канализационной насосной станции, а так же рассмотрены энергетические характеристики насосного*



агрегата при частотном регулировании. Описан выбор оборудования необходимого для модернизации канализационной насосной станции. Проведена проверка работоспособности проектируемой системы стабилизации уровня в КНС с помощью математического моделирования в среде для программирования MATLAB 2017a. Проведен анализ целесообразности проведения модернизации.

*In this paper, we consider a system of automatic control of the level in the SPS tank. The technological process of the sewage pumping station is described. The rationale for the use of a system with a frequency-controlled drive at a sewage pumping station is justified, as well as the energy characteristics of the pumping unit with frequency regulation are considered. The selection of equipment necessary for the modernization of the sewage pumping station is described. The operability of the designed level stabilization system in the SPS was checked using mathematical modeling in MATLAB 2017a programming environment. The analysis of the feasibility of modernization.*

Важное значение в промышленности имеет отвод сточных вод. При производстве какого-либо продукта образуются отходы, большее количество которых представляет вода. Для нормального функционирования предприятия необходимо удаление этих отходов, эта задача выполняется канализационной сетью. Канализационная сеть представляет собой несколько колодцев, в которые проводится слив воды из цехов, далее по трубопроводу эта вода поступает в накопительную емкость, из накопительной емкости перекачивается на очистные сооружения. В накопительной емкости необходимо поддержание определенного уровня.

Целью этой работы является разработка системы регулирования уровня с применением бесконтактного датчика уровня и применением для пуска и регулирования производительности насоса преобразователя частоты.

Центробежные насосы являются энергоемкими механизмами, на привод которых расходуется большое количество энергии.

Работа насосов канализационно-насосной станции осуществляется, в повторно-кратковременном режиме, в данном режиме имеются гидравлические потери, вызывая дополнительный перерасход электрической энергии.

Поэтому применение частотно-регулируемого электропривода позволит не только экономить значительную часть электроэнергии, но так же и снизит эксплуатационные затраты, связанные с обслуживанием агрегатов и систем. Например, снижение перепада давления между всасывающим и напорным патрубками насосного агрегата увеличивают срок службы сальниковых уплотнителей, практически исключая гидроудары и обеспечивает стабильность давлений в трубопроводах сетей, а также минимизирует затраты обслуживание оборудования.

Применение акустического датчика уровня позволяет системе выдерживать заданный уровень жидкости в приемном резервуаре.

В работе разработана система автоматической стабилизации уровня сточных вод в приёмной ёмкости канализационной насосной станции. Система автоматической стабилизации уровня реализована за счёт применения в системе акустического датчика уровня и преобразователя частоты, выполняющего регулирование частоты вращения электродвигателя.

Была обоснована целесообразность применения системы с частотным регулированием перед системой с повторно-кратковременным режимом.

### *Литература*

1. Козлов А. Эффективность применения частотно-регулируемого электропривода на канализационных насосных станциях. // Современные технологии автоматизации. – 2005. – 89 с.
2. Герман-Галкин С.А. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.5. – М:Корона принт, 2001. – 346 с.
3. Электроприводы ИРБИ серии ИРБИ8. //Руководство по эксплуатации. Новосибирск. – 2017. – 4 с.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ В РВС-700 ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ**

**Д.А. Гладкий , В.М. Кавешников**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, kaveshnikov@corp.nstu.ru**

*Объектом в данной работе является система автоматического регулирования уровня налива нефти насосным агрегатом в резервуар.*

*Работа состоит из аннотации, введения, описания технологического процесса, выбора оборудования, моделирования, разделов, посвящённых экономике и охране труда, заключения, списка литературы и приложений.*

*В основной части описан технологический процесс установки налива нефти в резервуар. Проанализирован объект автоматизации, в результате чего определён объём автоматизации. Выбрано оборудование для управления технологическим процессом. Выбран датчик и построена принципиальная схема системы. Произведено моделирование системы автоматического регулирования уровня в программе MATLAB 2017.*

*В разделах экономики и охраны труда рассмотрены опасные, вредные производственные факторы, рассчитана экономическая эффективность автоматизирования данной системы.*

*В заключении представлены основные выводы и результаты работы.*

*The object in this paper is a system for automatically regulating the level of the gross stock of the pump unit in a tank.*

*The work consists of an annotation, introduction, description of the technological process, selection of equipment, modeling, sections devoted to the economy and labor protection, conclusions, references and applications.*

*The main part describes the technological process of installing the oil in the tank. The object of automation is analyzed, as a result of which the volume of automation is determined. The equipment for management of the technological interface is chosen. A sensor is selected and a schematic diagram of the system is constructed. Modeling of the automatic level control system in the program MATLAB 2017 is made.*

*In the sections of the economy and labor protection, hazardous, harmful production factors, calculated economic efficiency of automatization of this system are considered.*

*In conclusion, the main conclusions and results of the work are presented.*

Рассмотрены актуальные проблемы оптимизации системы регулирования уровня. Доказана актуальность и необходимость внедрения различных методов для повышения экономичности и экологичности системы регулирования уровня.

Система регулирования, датчик уровня, преобразователь частоты, оптимизация, экономичность, энергоэффективность, экология, автоматизация.

Подготовка нефти проводится в единой системе сбора и подготовки нефти и легких углеводородов, в которую входят комплексные установки обезвоживания, обессоливания и стабилизации нефти.

Одной из проблем, возникающих в этом проекте - контроль заданного параметра уровня нефти, поступающей с сепаратора концевой ступени сепарации КСУ через РВС-3000 м<sup>3</sup>, в резервуар РВС-700 м<sup>3</sup>.

Из-за неблагоприятного расположения резервуара РВС-3000 м<sup>3</sup> ниже уровня резервуара РВС-700 м<sup>3</sup>, нефть нуждается в подачи в резервуар РВС-700 м<sup>3</sup> с помощью наливного насоса. Регулирование уровня нефти в резервуаре РВС-700 м<sup>3</sup> осуществляется уровнемером и с помощью насоса ЦНС105-294.

Решение данной проблемы производится за счет использования частотного регулирования скорости вращения электродвигателя насосного агрегата.

В основную часть включается описание технологического процесса установки налива нефти в резервуар. Насосная станция представляет собой единый комплекс, включающий в себя насосное и

вспомогательное оборудование. Проанализировав объект автоматизации, определяется объем автоматизации. Система должна обеспечивать регулирование уровня в резервуаре, с использованием пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования. Для электропривода регулирующего насоса должны быть предусмотрены следующие режимы управления: автоматический и кнопочный.

Исполнительный механизм должен быть оснащен приводом с электрическим сигналом управления.

Выбирается оборудование для управления технологическим процессом. Производится выбор насосного агрегата, предназначенного для перекачивания обводненной газонасыщенной и товарной нефти с температурой от 273К до 318К в системах внутрипромыслового сбора, подготовки и транспорта нефти. Насосы горизонтальные секционные ЦНСн применяются в отраслях нефтеперерабатывающей промышленности и подходят для данной системы.

Электропривод должен быть рассчитан на продолжительный режим работы с постоянной нагрузкой. Выбор электродвигателя для системы электропривода магистрального насосного агрегата выполняют, учитывая пусковые и нагрузочные режимы, условия обслуживания, требования к стабильности частоты вращения и режим потребления реактивной мощности на станции. Очень важно сделать правильный выбор преобразователя частоты. От него будет зависеть эффективность и ресурс работы всего электропривода в целом.

Выбор ПЧ может производиться по следующим параметрам:

1. Паспортная мощность ПЧ должна быть больше или равна паспортной мощности двигателя.

2. Номинальный длительный ток ПЧ должен быть больше (или равен) фактического длительного тока, потребляемого двигателем, также напряжение преобразователя должно быть больше или равно напряжению потребляемого двигателем насоса. Danfoss AquaDrive FC202 - данный преобразователь частоты подходит для применения в системах электропривода, где необходимо поддерживать заданный параметр, кроме того использование данного преобразователя дает возможность экономить электроэнергию от 25% до 40%. Выбирается датчик и строится принципиальная схема системы. Производится моделирование системы автоматического регулирования уровня в программе MATLAB 2017.

В разделах экономики и охраны труда рассматриваются опасные, вредные производственные факторы, рассчитывается экономическая эффективность автоматизирования данной системы. Эффективность

деятельности достигается за счет внедрения частотно – регулируемого электропривода. Срок окупаемости проекта составляет 1,74 года, что является экономически целесообразным.

#### *Литература*

1. Осипова О.О., Технология переработки нефти и газа: метод. указания / О.О. Осипова. – Ухта: УГТУ, 2010.
2. Панкратов, В. В., Избранные разделы теории автоматического управления: учеб. Пособие / В. В. Панкратов, О. В. Нос, Е. А. Зима. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. — 223 с..

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК**

**Т.В. Грызунова, Е.С. Кучер**

**Новосибирский Государственный Технический Университет,  
г. Новосибирск, tanya.gryzunova31@gmail.com**

*В представленной статье рассматриваются вопросы возможных усовершенствований систем автоматизированного электропривода солнечных батарей. Представлены требования к электроприводам солнечных установок. Рассматриваются классификации систем управления ориентаций солнечных батарей. Излагаются последующие задачи разработки электропривода солнечных установок.*

*This article consider the issues of possible improvements to the automated electric drive of solar batteries systems. Presented requirements for electric drives of solar installations. The author consider classifications of control orientations systems of solar batteries. The subsequent tasks of developing an electric drive for solar installations are outlined.*

На сегодняшний день, разработка наиболее эффективной системы управления возобновляемыми источниками энергии сохраняет свою актуальность. Связано это с тем, что традиционные источники из ископаемых материалов, например, в виде топлива постепенно ликвидируются, из-за трудности добычи и негативного влияния на экологию окружающего мира, следовательно, растет потребность в оптимизации системы управления возобновляемыми источниками энергии.

Из всех видов возобновляемых источников энергии наиболее перспективным и доступным представляется Солнце. Запас солнечной энергии неисчерпаем, а физические принципы преобразования этой энергии в виды, удобные для потребления, просты, надежны и безопасны.

В представленной работе в качестве объектов управления будут рассматриваться солнечные батареи. Существует ряд требований, который необходимо учитывать при проектировании электропривода солнечных установок.

Требования, предъявляемые к электроприводам солнечных установок [1]

1. электропривод должны обязательно соответствовать требованиям ГОСТ 14691-69;

2. должен обеспечивать все требуемые режимы работы механизма: точность, быстродействие диапазон регулирования параметров и т.д.;

3. электропривод должным быть устойчив к различным видам ударов и вибрационных нагрузок, для избегания скорейшего выхода из строя;

4. электропривод должен быть: ремонтпригодным, надежным, обладать возможностью наладки;

5. оборудование должно быть работоспособным, при этом сохраняя все заложенные изначально характеристики и параметры, несмотря на воздействие внешних факторов, например, постоянного магнитного поля;

6. конструктивные требования: электропривод должен быть изготовлен из материалов высокого качества;

Солнечные электростанции являются перспективными источниками, в частности для применения в области малой энергетике, когда необходимо обеспечить снабжение электрической энергии на небольшую мощность. Особенно актуальным это является для отдаленных потребителей на достаточно большом расстоянии от централизованной системы энергоснабжения.

Зачастую солнечные панели устанавливают неподвижно в южном направлении. С точки зрения простоты и экономии средств — это безусловно хорошее техническое решение, позволяющее упростить установку системы, но не эффективное т.к. приводит к не полноценному использованию электрической энергии. Это связано с тем, что существуют определенные временные интервалы, особенно это можно часто наблюдать в период межсезонья. Солнце уже находится на небе, но еще не освещает солнечные панели. Вышесказанное позволяет прийти к выводу, что солнечным панели необходимо устанавливать в регионах страны с наибольшим периодом солнцестояния.

В Российской Федерации такими регионами могут стать Приморский, Краснодарский, Забайкальский края, Республика Тыва, Амурская область. [2]

При этом система управления солнечных панель должна быть автоматизирована, и способна менять наплавления солнечных батарей в зависимости от положения солнца.

Система ориентации солнечных батарей (СОСБ) – система, предназначенная для наведения панелей. Система обеспечивает наведение путем разворота и последующего передвижения требуемой ориентации в пространстве, реализуется данная система с помощью электромеханических приводов.

СОСБ можно классифицировать по следующим признакам:

- по способу формирования сигналов отклонения солнечных батарей от направления на солнце;
- по типу ориентации солнечных панелей;
- по числу степеней свободы (осей поворота)

В работе особое внимание будет уделено электромеханической системе солнечных батарей с электроприводом переменного тока на базе асинхронного двигателя. Задачей будет являться улучшение рабочих динамических и статических характеристик. Будет разработана система управления поворотным механизмом для более эффективного поглощения панелью солнечных лучей и как следствие большей энергоэффективностью.

Также возникает необходимость в разработке линеаризованной модели солнечной панели для анализа эффективности работы солнечной установки.

#### *Литература:*

1. ГОСТ 30533-97 Электроприводы постоянного тока общего назначения. Общие технические требования.
2. Перспективы развития солнечной энергетики в России [Электронный ресурс] <http://900igr.net/prezentacija/fizika/perspektivy-razvitiya-solnechnoj-energetiki-150749/perspektivy-v-rossii-solnechnaja-energetika-13.html>
3. Система ориентации солнечных батарей [Электронный ресурс] // [https://ru.wikipedia.org/wiki/Система\\_ориентации\\_солнечных\\_батарей](https://ru.wikipedia.org/wiki/Система_ориентации_солнечных_батарей)

# СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МАГИСТРАЛЬНОГО ТЕПЛОВОЗА

**Е.С. Евдокимова, В.М. Кавешников**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, ElenaPhotographer1@mail.ru**

*В работе ставится задача разработки системы управления энергоустановкой магистрального тепловоза, обеспечивающей минимальные удельные затраты энергии на движение, определяются методы решения поставленной задачи.*

*The task is to develop a control system for a power plant of a main diesel locomotive that provides the minimum unit energy consumption for movement, and methods for solving this problem are determined.*

Общий расход электрической энергии на тягу поездов распределяется следующим образом [1]:

- на тяговые двигатели;
- на вспомогательные машины и нагреватели;
- на преобразователи и реакторы;
- на потери в тяговых двигателях и зубчатой передаче;
- на полезную работу тяговых двигателей.

Наиболее удобный показатель для учета и анализа расхода энергии, потребляемой на тягу поездов, — удельный расход, представляющий собой расход электроэнергии, выраженный в ватт-часах, отнесенный к 1 т массы поезда на 1 км его пробега [Вт·ч/(т·км)].

Наиболее значимыми видами ТЭР являются электрическая энергия, дизельное топливо, уголь, мазут и газ. В совокупности они составляют более 95% общего энергобаланса ОАО «РЖД» и 93,0% финансовых затрат на приобретение энергоресурсов всех видов. При этом доля ОАО «РЖД» в общем балансе потребления ТЭР на внутреннем рынке России не превышает 3,0% и имеет ежегодную тенденцию к снижению при активном росте объемов перевозок.

Постоянное повышение доли затрат на электроэнергию на тягу поездов относительно общих затрат ТЭР на грузоперевозки (рисунок 1) [2] свидетельствует об актуальности задачи снижения затрат электроэнергии на единицу перевозимого груза по железным дорогам, что позволяет уменьшить себестоимость товара и получить конкурентное преимущество на внутреннем и международном рынке.

Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте реализуются в виде десяти мероприятий [3], в числе которых второй пункт связан с разработкой современных локомотивов с улучшенным КПД силовой установки.



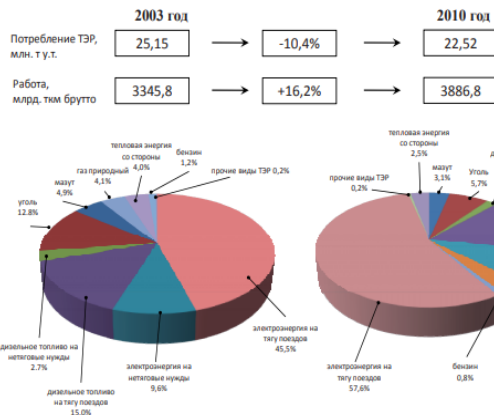


Рис. 1 - Динамика структуры потребления в ОАО "РЖД"

На сегодняшний день большая часть железнодорожного транспорта электрифицирована. Рассмотрим задачу на не электрифицированных участках пути. В качестве магистральных локомотивов на них используются тепловозы.

Рассмотрим устройство устройства тепловоза (рисунок 2) [4].

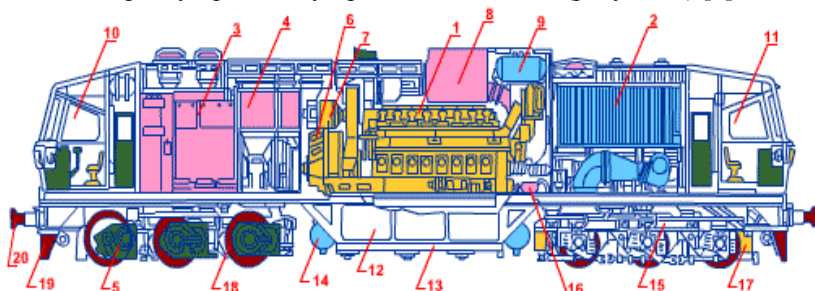


Рис. 2 - Устройство тепловоза: 1 — дизель, 2 — холодильная камера, 3 — высоковольтная камера, 4 — выпрямительная установка, 5 — тяговый электродвигатель, 6 — тяговый генератор, 7 — стартер-генератор, 8 — глушитель, 9 — бак для воды, 10 — передняя кабина машиниста, 11 — задняя кабина машиниста, 12 — аккумуляторная батарея, 13 — топливный бак, 14 — воздушный резервуар, 15 — тележка, 16 — топливный насос, 17 — бункер песочницы, 18 — колёсная пара, 19 — метельник, 20 — буфер.

Через контроллер машиниста (КМ) подается сигнал на систему управления дизелем (СУД), а с СУД на систему управления впрыском топлива (СУВТ), дизель (Д) начинает вращаться и, так как он жестко закреплен на одном валу с синхронным генератором (СГ), приводит

генератор в движение. Трёхфазное напряжение с СГ выпрямляется неуправляемым выпрямителем (НВ), сглаживается фильтром и подается на инверторы (И), расположенные по одному на каждой оси двух трехосных тележек тепловоза и управляемые с помощью системы управления тяговым двигателем. С инверторов трехфазное напряжение поступает на тяговые асинхронные двигатели (ТАД), которые и вращают оси.

Проверка работоспособности производится машинистом по показаниям датчиков, которые выводятся на монитор (рисунок 3).

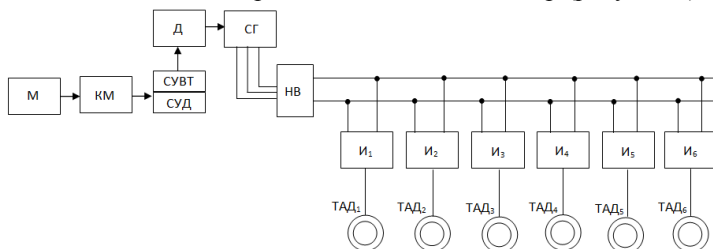


Рис. 3 - Функциональная схема

Целью данной работы является разработка системы управления энергоустановкой, обеспечивающей минимальные удельные затраты энергии на движение.

В работе предполагается применение следующих методов решения:

- методы математического описания системы;
- методы ТАУ;
- методы математического моделирования.

Важнейшим шагом в дальнейшем будет разработка упрощенного математического описания системы, которое даст возможность применения аналитических методов анализа и синтеза систем автоматического управления.

#### Литература:

1. Расход и экономия электроэнергии при вождении поездов [Электронный ресурс] URL: [https://studopedia.su/12\\_22034\\_rashod-i-ekonomiya-elektroenergii-pri-vozhdenii-poezdov.html](https://studopedia.su/12_22034_rashod-i-ekonomiya-elektroenergii-pri-vozhdenii-poezdov.html)
2. Энергетическая стратегия холдинга "Российские железные дороги" на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс] URL: [http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ\\_Strateg\\_new.pdf](http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf)
3. Энергосбережение на транспорте [Электронный ресурс] URL: <https://energo-audit.com/energoberezhenie-na-transporte>

## АВТОНОМНАЯ ФОТОВСПЫШКА

**Е.С. Евдокимова, Д.Г. Цамалаидзе, И.С. Дымов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, ElenaPhotographer1@mail.ru**

*Работа посвящена решению проблемы большинства фотографов, связанной с недостаточным освещением на местах съёмки и невозможностью использовать существующие на сегодняшний день проводные фотовспышки. Предложена блок-схема алгоритма работы разрабатываемого устройства.*

*The work is devoted to solving the problem of most photographers, due to the lack of lighting at the location of the shooting and the inability to use wired flashlights existing today. A flow chart of the developed device is proposed.*

Существует множество красивых и атмосферных мест, освещение которых не позволяет сделать качественные снимки без дополнительного специализированного оборудования для получения требуемого результата [1]. Но существующие устройства не решают данную проблему в связи с отсутствием возможности автономной работы.

В статье [2] были рассмотрены способы регулирования мощности и цвета свечения разрабатываемой фотовспышки. На рисунке 1 изображен алгоритм работы и настройки разрабатываемого устройства.

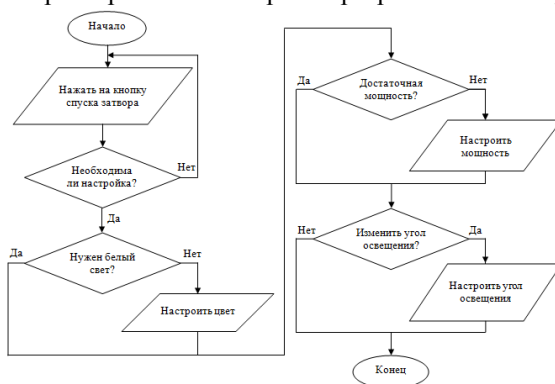


Рис. 1 – Алгоритм работы и настройки автономной фотовспышки

Принцип работы системы включения и настройки фотовспышки заключается в следующем: при нажатии на кнопку спуска затвора на синхроконтакте появляется сигнал управления. При этом на дискретный вход микроконтроллера подается логический ноль. На нелицензированной частоте 433,9 МГц происходит передача пакета данных от передатчика до приемника, который разрешает работу реле освещения К1 (Рисунок 2, а). После фильтрации, приемник получает необходимую информацию (пакет данных) и дает разрешение на срабатывание реле. Фотовспышка включается.

При изменении положения пульта управления в двух взаимно перпендикулярных осях отправляется пакет данных, разрешающий изменение угла поворота крепления вспышки, которое осуществляется двигателями постоянного тока (Рисунок 2, б).

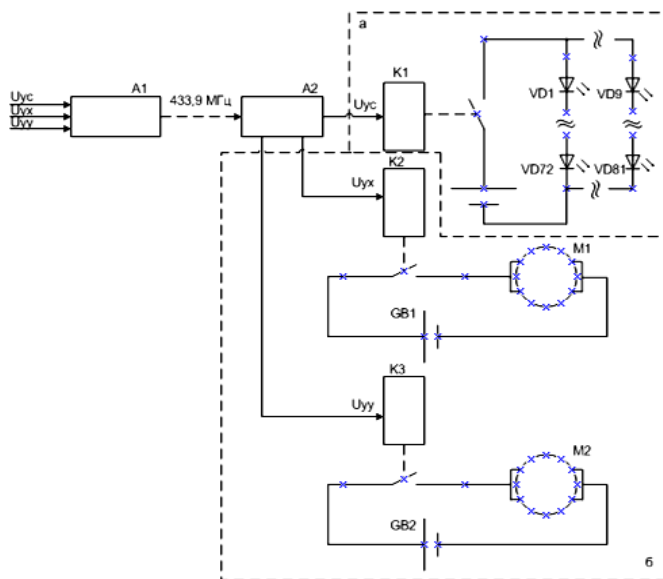


Рис. 2 – Функциональная схема

Таким образом, из процесса фотосъемки будет исключена проблема недостаточной освещенности.

#### Литература:

1. Волков В. Светодиодные фотовспышки для фотосъемки. Полупроводниковая светотехника. 2016. Т. 2. № 40. С. 72-78.
2. Цамалаидзе Д. Г. Автономная фотовспышка / Д. Г. Цамалаидзе, Е. С. Евдокимова ; [науч. рук. И. С. Дымов] // Молодежь, инновации,

технологии : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 23–25 апр. 2019 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – С. 136-137. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-3880-0.

## **АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЭСКАЛАТОРА**

**С.С. Жук, Е.С. Кучер**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, sergey.zhuk.97@mail.ru**

*Эскалаторы являются одной из самых дорогих машин, которые люди регулярно используют. В данной работе рассмотрены способы повышения энергоэффективности эскалатора: использование энергии рекуперации, замена привода постоянного тока на переменный и использование преобразователей частоты.*

*Escalators are one of the most expensive cars that people regularly use. This paper discusses ways to increase the energy efficiency of the escalator: the use of recovery energy, replacing a direct current drive with an alternating current and the use of frequency converters.*

Проблема сохранения энергии имеет большую актуальность и является одной из главных технических проблем ведущих стран мира. Одна из основных задач заключается в повышении энергоэффективности работы электроприводных механизмов.

Одним из распространенных механизмов непрерывного действия, разработанный в 19 веке, является эскалатор. Эскалаторы -это наиболее эффективный и универсальный способ перемещения огромных групп людей. Ступени приводятся в движение цепью, которая приводится в движение двигателем.

Эскалаторы подразделяются на два основных класса – тоннельные и поэтажные. Тоннельные эскалаторы устанавливаются в длинных наклонных тоннелях – выходах станций метро глубокого заложения. Большая длина таких эскалаторов накладывает особые требования к прочности их конструкции и надежности тормозов. [1]

Поэтажные эскалаторы используются на станциях метро мелкого заложения и в других неглубоких подземных пространствах, в офисных и торгово-развлекательных центрах.

Цикл работы эскалатора имеет большую долю в тормозном режиме. В данном режиме эскалатор находится во время спуска большого пассажиропотока. Учитывая мощность, выделяемую при торможении

таких механизмов, использование генерируемой энергии позволит значительно увеличить энергоэффективность таких систем.

Данный вид механизма должен обладать повышенной надежностью и обеспечивать комфортный режим работы для людей. Эскалатор должен соответствовать следующим требованиям: скорость движения полотна не более 0,75 м/с, плавный разгон при пуске, привод должен приводить в движение не более одного эскалатора и рассчитан на непрерывную работу в течении 140 часов в неделю. В офисных помещениях главным критерием является низкий уровень шума. Эскалатор должен автоматически останавливаться при обесточивании силовой цепи или цепи управления, при перегрузке или при перегреве двигателя.[2]

Одним из важных элементов эскалатора является электропривод и система управления используемой электрической машиной.

Двигатели постоянного тока требуют существенных затрат при покупке и эксплуатации. С развитием полупроводниковой электроники, появилась возможность производства недорогих микропроцессорных преобразователей частоты, с помощью которых стало возможно полноценно управлять скоростью двигателями переменного тока в широком диапазоне регулирования. Системы управления движением с использованием двигателей переменного тока и преобразователей частоты, обходятся дешевле и проще подобных систем управления двигателями постоянного тока.

Замена привода на более современную версию может сократить расход энергии напрямую, подавая на эскалатор меньше энергии, когда он не используется или переходя в режим с низким энергопотреблением. Электропривод переменного тока эскалатора будет реагировать на изменение нагрузки и сбрасывать напряжение, поступающее к нему, пока не поступит большее число людей, сокращая потребление энергии, когда полная мощность не требуется.

Описанные выше возможности должна обеспечивать система управления электроприводом (ЭП). Самыми важными регулируемыми координатами двигателя являются частота вращения ротора ЭП, следовательно, скорость передвижения полотна эскалатора и токи двигателя. Современные системы управления ЭП позволяют обеспечить высокий уровень реакции эскалатора на изменение количества людей, высокую точность управления скоростью перемещения полотна и частоты вращения ротора ЭП, высокую надежность и безопасность.

Преобразователи частоты позволяют регулировать напряжение питания двигателя в зависимости от нагрузки, но вместо того, чтобы

напрямую снизить питание энергией, он резко замедляет скорость эскалатора до уровня, который требует меньшей энергии.

Устройство плавного пуска для некоторых старых эскалаторов запускает эскалатор с постепенно увеличивающимся уровнем тока, вместо того, чтобы немедленно подавать его на полную мощность. Это помогает увеличить срок службы двигателя, откладывая дорогостоящий ремонт и замену двигателя.

Некоторые устройства плавного пуска также включают энергосберегающие функции, которые обеспечивают меньшее количество электроэнергии, когда на эскалаторе ездят меньше людей. Комбинированное устройство, созданное для экономии энергии, постоянно меняет количество используемой электроэнергии.

На сегодняшний день, в работе произведен сравнительный анализ режимов работы и особенностей исполнения механизма эскалаторов, определены современные тенденции развития.

При проведении исследований в работе, будут решаться следующие задачи:

1. разработать модель эскалатора с учетом количества пассажиров;
2. синтезировать систему управления электроприводом эскалатора, обеспечивающую надежную работу в двигательном режиме и рекуперацию энергии в тормозных;
3. поиск способов аккумуляирования или передачи в сеть рекуперативной энергии.

*Литература:*

1. Интернет-источник:

<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%81%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80>

2. Интернет-источник: <https://internet-law.ru/gosts/gost/51864>

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМА МОНТАЖНОГО КРАНА ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 300Т**

**Р.И. Зинков, В.М. Кавешников**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск**

*В данной работе представлено исследование системы электропривода подъема монтажного крана грузоподъемностью 300т.*

*В первой части доклада раскрывается цель работы и рассматривается объект исследования.*

*Во второй части описываются предполагаемые результаты исследования.*

*This paper presents a study of the electric drive system for lifting an assembly crane with a lifting capacity of 300 tons.*

*The first part of the report reveals the purpose of the work and examines the object of research.*

*The second part describes the intended results of the study.*

Целью данной работы является упрощение конструкции и повышение надежности работы механизма подъема.

В мостовых кранах механизм подъема груза размещен на крановой тележке. В зависимости от назначения крана тележки комплектуют одним, двумя или, весьма редко, тремя механизмами подъема: главным — на номинальную грузоподъемность и вспомогательными на грузоподъемность, меньшую номинальной в 3—5 раз для кранов средней грузоподъемности и в 4—10 раз для кранов большой грузоподъемности.

Схема механизма подъема кранов общего и специального назначений зависит от многих факторов: типа грузозахватного устройства, массы поднимаемого груза, высоты подъема, необходимых устойчивых скоростей подъема или опускания груза и т. д. Если в качестве грузозахватного устройства применяют крюки, грузовые петли, одноканатный грейфер и т. п., то для подъема груза используют только один механизм подъема. Кинематическая схема такого механизма подъема, характерного для кранов грузоподъемностью 80...320 т, приведена на рисунке 1.

Этот механизм состоит из грузового каната, сбегаящего с барабана и огибающего блоки крюковой подвески, обводные блоки и уравнильный блок, редуктора, снабженного тормозом, промежуточного быстроходного вала и приводного электродвигателя. Для выигрыша в тяговом усилии в механизмах подъема используют полиспаст, который представляет собой систему подвижных (в крюковой подвеске) и неподвижных (обводных) блоков. Механизмы подъема кранов грузоподъемностью 80...320 т отличаются от кранов меньшей грузоподъемности наличием дополнительной понижающей зубчатой передачи или второго редуктора, с помощью которых выходной вал главного редуктора соединен с барабаном. При этом второй редуктор выполняет функцию быстроходной передачи. Колесо дополнительной зубчатой передачи жестко соединено с барабаном, а шестерня установлена на отдельном валу на опорах и присоединена к выходному валу основного редуктора с помощью зубчатой муфты или установлена на выходном валу редуктора. Для уменьшения консольной



нагрузки, действующей на вал редуктора, используют дополнительную опору-кронштейн, присоединяемый к корпусу редуктора.

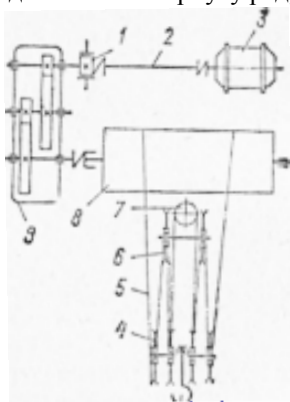


Рисунок 1 – Схема механизма подъема с приводом от электродвигателя

Указанная цель достигается тем, что в механизме подъема груза стрелового крана стрела выполнена с направляющими, а привод механизма подъема груза смонтирован на стреле и снабжен колодкой, взаимодействующей с винтом и размещенной в направляющих стрелы, при этом трособлочная система содержит два троса, концы которых закреплены к упомянутой колодке в точках, лежащих в плоскости, проходящей через оси винта, и расположенных по обе стороны и на равных расстояниях от последней.

Данная конструкция механизма грузоподъемных кранов является наиболее простой и надежной, повышает безопасность работы, позволяет надежно удерживать груз в заданном положении, позволяет снизить вес и материалоемкость механизма подъема, а также обеспечивает заданное постоянное положение груза без предварительной центровки для предотвращения перекосов.

#### *Литература:*

1. Интернет-ресурс <http://stroy-technics.ru>.
2. Патент «Механизм подъема груза стрелового крана», УДК 621.874 (088.8).

# **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТОЙ**

**В.О. Казанцев, Е.С. Кучер**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, vlad-uk95@mail.ru**

*Работа посвящена вопросам улучшения параметров качества регулирования систем управления электроприводами конвейерных транспортеров. Авторами была изучена область применения конвейерных транспортеров, а так же была рассмотрена конструкция конвейерного транспортера.*

*The work is devoted to improving the quality parameters of regulation of control systems of electric drives of conveyor conveyors. The authors studied the field of application of conveyor conveyors, and also considered the design of the conveyor belt.*

В условиях современного мира конвейерный транспортер является неотъемлемой частью производства. Они применяются для транспортировки различных типов грузов, на всевозможных производствах, например, конвейерные транспортеры применяются для доставки руды на поверхность в горнодобывающей промышленности, перемещения грузов в условиях массового производства и т.д.

Конвейерные транспортеры увеличивают производительность, качество и эффективность технологических процессов, уменьшают долю использования человеческого труда, а также позволяют создать поточные технологий производства.

Современные производственные процессы подразумевают изменение параметров перемещаемого объекта во время транспортировки, а так же применение на производстве ряда конвейерных транспортеров. Поэтому остро встает вопрос о поддержании скорости перемещения и синхронизации скоростей ряда конвейерных транспортеров. Для поддержания необходимых параметров в заданных пределах необходимо применение системы автоматического регулирования.

Устройство современных конвейерных транспортеров в общем случае представляет собой гибкую ленту (3), опирающуюся на роликовые опоры (2, 6), по краям лента огибает приводной (4) и натяжной барабаны (1) (рисунки 1).

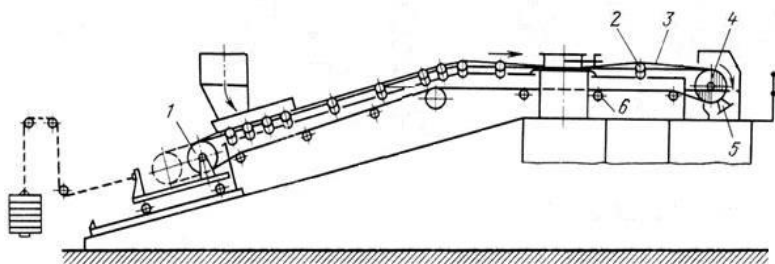


Рисунок 1 – Конструкция конвейерного транспортера

В движение лента приводится фрикционным способом от приводного барабана (4). Первоначальное натяжение ленты создается натяжным барабаном при помощи натяжного устройства (1). Натяжное устройство может быть грузового или винтового типа. [1]

Для многих видов грузов необходимо устанавливать устройство для очистки ленты (5). Прилипающие к ленте частицы могут привести к неравномерному вращению нижних роликовых опор. Это может вызывать высокие динамические нагрузки и ускорить износ ленты.

Для очистки ленты от налипших частиц устанавливаются вращающиеся щетки или неподвижный скребок. [1]

Для обеспечения центрирования хода ленты различные центрирующие роликовые опоры. На криволинейных участках ветвей трассы устанавливают роликовые батареи, создающие плавный перегиб ленты, или отклоняющие барабаны.[1]

Привод ленточного конвейера включает в себя приводной барабан, редукторы соединительные муфты, электродвигатель. Основными характеристиками приводного механизма являются мощность двигателя, передаточное число редуктора и развиваемый наибольший крутящий момент.

Основными характеристиками приводного барабана являются наибольший допустимый крутящий момент и его фрикционная способность, которая определяется коэффициентом сцепления барабана с лентой. Для увеличения коэффициента сцепления ленты с барабаном, барабан покрывают резиной или другим материалом.

Привод может быть с одним барабаном или с несколькими, так как увеличение числа приводных барабанов повышает тяговую способность привода. В качестве двигателя в приводах применяются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором или фазным ротором. [1]

Для транспортировки сыпучих грузов, как правило, применяют многороликовые опоры, которые формируют желобчатую форму ленты.[2]

Несущим и тяговым органом конвейерного транспортера являются резинотканевые или резинотросовые ленты с гладкой поверхностью. Резинотканевые ленты в основном применяются для перемещения грузов на относительно малые расстояния, а резинотросовые ленты применяются в магистральных конвейерах.

В состав резинотканевых лент входят 3–8 прокладок, между которыми находится резина. Для защиты прокладок и тросов ленты имеют наружные резиновые обкладки. Тяговая способность лент определяется в зависимости от прочности ткани прокладок и их числа для резинотканевых лент и прочности тросов для резинотросовых лент. В зависимости от температуры груза и окружающей среды различаются ленты общего назначения, тепло- и морозостойкие.[2]

Для того что бы обеспечить необходимые параметры регулирования, математическая модель конвейерного транспортера будет представлена как многомассовая система. Первичная апробация разработанных алгоритмов модели транспортера будет осуществлена в программной среде MATLAB Simulink.

#### *Литература:*

1. Расчет и проектирование ленточных конвейеров : учебно-методическое пособие / Г. Г. Кожушко, О. А. Лукашук. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 232 с.
2. Зеленский О. В. Справочник по проектированию ленточных конвейеров. — СПб. : Недра, 2009. — 376 с.: ил.

## **ТРЕХМЕРНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЩИТ**

**Е.Е. Кобзев, Д.М. Фазлыев, Г.С. Сидоров**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, shamet01@yandex.ru**

*Трехмерный информационная щит - прорыв в индустрии рекламы. Эта технология позволит нам преподнести информацию в ярком и запоминающемся виде.*

*Three-dimensional billboard - is a breakthrough in the advertising industry. This technology will allow us to present information in a readable and memorable way.*

На сегодняшний день трудно недооценивать ценность информационной индустрии для современного общества. Но с развитием современных технологий, возникает проблема конкуренции внутри сферы. Связано это напрямую с тем, что с каждым днем наблюдается рост сложности дизайнерских идей, а, следовательно, и их

решений. Целью проекта является создание информационного трехмерного щита, который позволит перевести сферу рекламы на кардинально новый уровень. Объемная информация легко улавливается человеческим глазом - а значит и будет фокусировать на себе большее внимание.

Разрабатываемое устройство состоит из автоматизированных ячеек, выполненных в виде пчелиных сот, которые перемещаются перпендикулярно общей плоскости его поверхности на заданное расстояние при помощи исполнительных механизмов. С точки зрения простоты позиционного управления шаговые двигатели представляют собой наиболее целесообразными из-за возможности точного программного регулирования положения собственного вала. Шаговый двигатель представляет собой бесщеточный двигатель постоянного тока, который можно вращать на небольшие углы, которые называются ступенями. Обычно шаговый двигатель использует 200 шагов, чтобы завершить вращение на 360 градусов, что означает его вращение на 1,8 градуса за шаг. Существуют два основных типа шаговых двигателей: униполярный и биполярный, которые отличаются друг от друга лишь способом подключения обмоток. Таким образом, изменяя расстояние с помощью двигателей, можно получить объемное изображение.

Для преобразования движения из вращательного (вращение вала двигателя) в поступательное (движение ячеек-сот) была выбрана и рассчитана передача шестерня-рейка (рисунок 1). Внутри каждой ячейки 1 на одной из сторон установлена зубчатая рейка 2, при этом на валу каждого соответствующего электродвигателя закреплено зубчатое колесо 3. При вращении вала на заданный угол ячейка будет перемещаться на расчетное расстояние относительно общей плоскости щита. Для правильного движения ячеек установлены направляющие, которые располагаются на внешних гранях каждой ячейки. В корпусе установки предусмотрены балки 4, необходимые для установки на них шаговых двигателей. В дальнейшем планируется разработка прототипа, в передней панели ячеек которого будут установлены дисплеи или светодиодные панели, которые позволят создать объем для абсолютно любого двухмерного изображения.

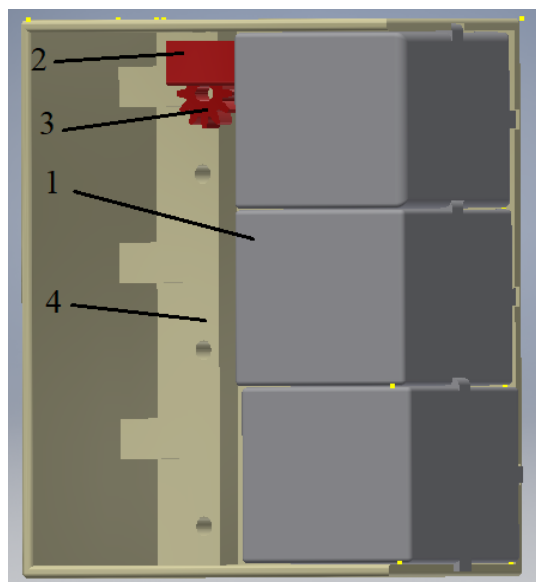


Рисунок 1 – Модель устройства в сборе

Предлагаемая технология создания трехмерных рекламных щитов проста в изготовлении. Однако, она расширяет горизонты возможностей представлений рекламы и информации. Связано это напрямую с тем, что для фокусировки внимания, трехмерная информация воспринимается легче, нежели статическая двухмерная. Трехмерное изображение позволяет человеку лучше запомнить объект, в связи с тем, что она вызывает у него ассоциации с данным объектом.

#### *Литература:*

1. Азарян А.А., Черных С.В., Волошин А.П. Особенности применения шаговых двигателей для электропривода механизмов с программным управлением. Инновационная наука. 2015. Т. 2. № 4. С. 6-8.
2. Киреев Э.А., Шерстнев С.Н. Полный справочник по эл.оборудованию и электротехнике (с примерами расчетов) КНОРУС, Москва, 2013. -864с.
3. Бородин И.Ф., Судник Ю.А. Автоматизация технологических процессов. -М.: КолосС, 3-е издание, 2007.-344с

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ НЕФТЕПРОМЫСЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Е.Н. Литвинчук, А.А. Штанг**

**Новосибирский государственный технический университет  
г. Новосибирск, shtang@corp.nstu.ru**

*Рассмотрены актуальные проблемы энергосбережения при работе привода переменного тока. Доказана актуальность и необходимость внедрения частотных преобразователей с целью снижения энергопотребления. Предложены возможные пути решения проблемы.*

Совершенствование производства, распределения и потребления всех видов энергии в последние годы стала одним из приоритетных направлений технического развития в развитых странах мира. Это связано как с непрерывно возрастающей сложностью и стоимостью добычи энергоресурсов, которые в большей степени являются не возобновляемыми и ограниченными, так и с глобальными проблемами в сфере экологии. Одним из направлений решения проблемы энергосбережения является снижение непроизводительных потерь энергии.

До 65% электроэнергии в нефтегазовой промышленности и других отраслях расходуется электроприводами насосных, вентиляторных и компрессорных установок. Большая часть, из которых является нерегулируемой [1]. Приводы без регулирования частоты вращения не исключают вредных динамических воздействий на оборудование, что может приводить к замене составляющих и к выходу оборудования из строя. Прямой пуск асинхронных электродвигателей сопровождается броском пускового тока, что вызывает большие электромагнитные и механические ударные нагрузки на двигатели и на приводимые ими исполнительные механизмы. Это может приводить к выходу из строя дорогостоящего технологического оборудования и к значительным затратам на его ремонт. Помимо этого при запуске таких агрегатов происходит большая нагрузка на сеть, что уменьшает стабильность работы других потребителей. Поэтому в настоящее время непрерывно растет число предприятий, внедряющих электроприводы с регулируемой частотой вращения, которые являются ключом к энергосбережению, повышению рентабельности и конкурентоспособности производства.

Одним из распространённых способом регулирования напора насосного агрегата является установка задвижки на выходе из насоса

или регулируемой гидравлической муфты. Эти способы являются простыми, но и одновременно энергозатратными.

Более экономичным способом регулирования частоты вращения в широком диапазоне оборотов является применение полупроводниковых преобразователей. Скорость вращения вала электродвигателя изменяется пропорционально частоте и амплитуде подводимого к статору напряжения. Несмотря на их, более высокую стоимость регулирование напора насосных агрегатов за счет применения частотных преобразователей целесообразно там, где необходимо плавное регулирование в широком диапазоне при постоянно меняющихся уровнях нагрузки. КПД преобразователя частоты составляет 97,5-98,5% и мало зависит от скорости вращения вала электродвигателя и различных моделей приводов [2].

Предлагается имитационная модель системы автоматического регулирования для нефтедобывающего комплексного электрооборудования с применением регулируемых электроприводов насосных агрегатов с целью поиска вариантов повышения их энергоэффективности и надежности.

Результаты моделирования могут быть использованы для создания системы и комплексного оборудования с повышенными показателями энергоэффективности, как в нефтедобывающей промышленности, так и в других сферах применения насосных агрегатов с переменными нагрузками.

#### *Литература*

1. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.
2. Афанасьев А.В., Беккер Л.М. Применение ЧРП для повышения энергоэффективности насосной установки [Электронный ресурс] // ООО "Энергия – насосы и арматура", г. Москва, 2011г. - Режим доступа: <http://www.mnz.ru/stat-i/primenenie-chrp-dlya-povisheniya-energoeffektivnosti-nasosnoy-ustanovki>.



# СИСТЕМА ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

А.В. Малышев

Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, [malyshev1994@yandex.ru](mailto:malyshev1994@yandex.ru)

*Рассмотрена система прогнозирующего управления электродвигателем с аксиальным магнитным потоком. В отличие от системы прямого управления моментом (в англоязычной литературе применяется термин «DirectTorqueControl» или сокращенно «DTC»), в которой применяются векторы напряжения инвертора, в рассматриваемой системе прогнозирующего управления дополнительно рассматриваются ещё 2 нулевых вектора напряжения, что непосредственно приводит к более быстрому динамическому отклику и снижению пульсаций электромагнитного момента двигателя.*

*The system of Predictive TorqueControl (PTC) of an Axial Flux Permanent Magnet motor is considered. In contrast to the Direct Torque Control system, in which inverter has 6 active voltage vectors are used, the considered Predictive Torque Control system additionally considers 2 more zero voltage vectors, which directly leads to a faster dynamic response and lower ripple of the electromagnetic moment of the motor.*

Вследствие резкого снижения цен на редкоземельные магниты, а также интенсивного развития силовой электроники, в последнее время всё чаще в электроприводах установок стали применяться синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ). В отличие от привычных асинхронных двигателей, двигатели с постоянными магнитами не имеют обмоток ротора, вместо этого они оснащены постоянными магнитами.

СДПМ делятся на 2 основные группы, а именно машины с радиальным магнитным потоком и машины с аксиальным магнитным потоком. Вентильные машины с аксиальным магнитным потоком (ВМАП) имеют более высокое отношение электромагнитного момента к моменту инерции, и, следовательно, более быстрый динамический отклик электромагнитного момента по отношению к машинам с радиальным магнитным потоком [1-4].

Система прогнозирующего управления была разработана в конце 1970-х годов [5]. Различные варианты рассматриваемой системы управления применялись для преобразования мощности и управления электродвигателем посредством разных методов модуляции [6, 7].

Для преодоления недостатков системы прямого управления моментом DTC для СДПМ был предложен метод прогнозирующего

прямого управления электромагнитным моментом двигателя [8], при котором пульсация электромагнитного момента двигателя должна быть постоянной. Каждое время выборки, состоящее из активного времени (интервал приложения вектора активного напряжения) и нулевого времени (интервал приложения нулевого вектора напряжения), вычисляются для каждого из 6 векторов активного напряжения в соответствии с дискретной моделью электромагнитного момента двигателя. Расчёт выполняется таким образом, как если бы вектор напряжения использовался в следующем интервале. Тогда вектор напряжения, приводящий к минимальной пульсации магнитного потока, будет применен в следующем интервале дискретного времени. Таким образом, в этом методе два вектора напряжения (вектор активного напряжения и вектор нулевого напряжения) и, следовательно, два состояния переключения применяются в каждом интервале времени.

Система прогнозирующего управления электромагнитным моментом (в англоязычной литературе PredictiveTorqueControl или сокращенно PTC) состоит из выбора одного из 8 возможных состояний переключения инвертора с фиксированными интервалами дискретизации [9]. Методика выбора состояния переключения для каждого временного интервала основана на минимизации функции качества (QualityFunction, сокращенно QF). Функция качества  $QF$  представляет собой критерии оценки для выбора наилучшего состояния переключения для следующего интервала дискретизации. Для вычисления функции  $QF$ , воспользовавшись математической моделью двигателя с аксиальным магнитным потоком, необходимо спрогнозировать электромагнитный момент двигателя  $M$  и потокосцепление статора  $\psi_s$  на следующем интервале дискретизации для каждого действительного коммутационного состояния. Эти прогнозируемые значения обозначаются верхним индексом « $p$ » и сравниваются с их контрольными значениями, обозначенными верхним индексом « $*$ » в границах функции  $QF$ . Пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор используется для формирования опорного момента  $M^*$  для алгоритма прогнозирования.

Для изучения характеристик рассматриваемой системы управления была построена модель в программном пакете MatlabSimulink, параметры моделирования которой приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Характеристики электродвигателя**

Параметр	Значение
Число пар полюсов $p$	4
Активное сопротивление статора $R_s$ , Ом	0,2
Индуктивность статора $L_s$ , мГн	8,5

Потокосцепление ротора $\psi_f$ , Вб	0,175
Момент инерции ротора $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,089
Коэффициент демпфирования $k_d$	0,005
Подаваемое напряжение постоянного тока $U_s$ , В	250
Номинальная частота вращения $n_{ном}$ , об/мин	300
Номинальный электромагнитный момент $M$ , Н·м	11
Ключи инвертора	IGBT

Блок-схема предлагаемой системы прогнозирующего управления моментом двигателя показана на рисунке 1.

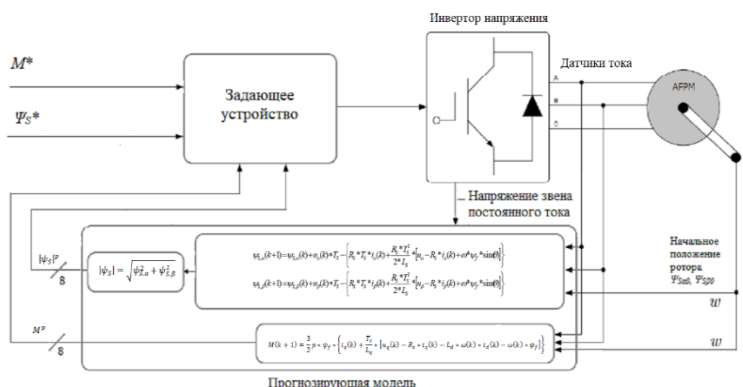


Рисунок 4 – Блок-схема системы прогнозирующего управления двигателем с аксиальным магнитным потоком

Реакция электромагнитного момента двигателя при этой системе управления показана на рисунке 2. Для исследования отклика электромагнитного момента, механический момент резко изменяется от 11 до -11 Нм при  $t = 0,075$  с и от -11 до 11 Нм при  $t = 0,175$  с. Как показано на этом рисунке, электромагнитный момент правильно отслеживает момент механической нагрузки.

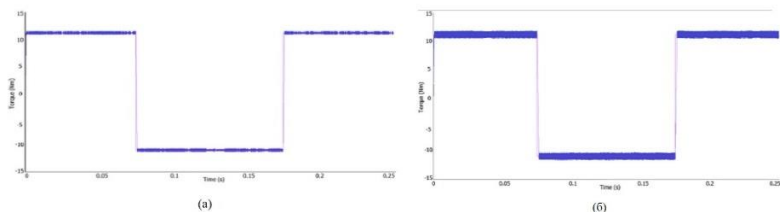


Рисунок 5 – Отклик момента двигателя при времени выборки (а)  $T_s = 10$  мкс и (б)  $T_s = 40$  мкс

Моделирование было выполнено для двух разных времен выборки  $T_s = 10$  мкс и  $T_s = 40$  мкс. Как показано на рисунке 2, меньшее время

выборки приводит к меньшей пульсации крутящего момента. Однако следует заметить, что для того, чтобы время выборки было меньше требуется более мощный процессор для выполнения вычислений.

Результаты моделирования показывают, что система прогнозирующего управления имеет более быстрый динамический отклик относительно прямого управления DTC. Кроме того, в установившемся состоянии она имеет меньшую пульсацию электромагнитного момента и потока, что приводит к меньшим потерям и, следовательно, большей эффективности и большему сроку службы машины.

#### *Литература:*

1. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). – М.: ЭФО, 2013. – 72 с.
2. *Gieras, J.F., Wang R.-J., Kamper M.J.* AxialFluxPermanentMagnetBrushlessMachines. – SpringerScience, 2008. – 362 p.
3. *Sitapati K., Krishnan R.* Performance comparisons of radial and axial field, permanent-magnet, brushless machines // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2001. – Vol. 37, No. 5. –P. 1219-1226.
4. *Jung J., Hofmann W.* Comparison of two concentrated winding topologies applied on an axial flux permanent magnet machine // 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe). – Geneva, 2015. –P. 1-10.
5. *Zhang R., Xue A., Gao F.* Model Predictive Control. – Singapore: Springer, 2019. – 127p.
6. *Mohamed Y.A.-R.I., El-Saadany E.F.* Robust high bandwidth discrete-time predictive current control with predictive internal model—A unified approach for voltage-source PWM converters // IEEE Trans. Power Electron. – 2008. – Vol. 23, No. 1. – P. 126–136.
7. *Geyer T., Papafotiou G., Morari M.* Model predictive direct torque control—Part I: Concept, algorithm and analysis // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2009. – Vol. 56, No. 6. – P. 1894–1905.
8. *Pacas, M., Weber, J.* Predictive Direct Torque Control for the PM Synchronous Machine // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2005. – Vol. 52, no. 5. – P. 1350-1356. – doi: 10.1109/TIE.2005.855662.
9. *Mohsen S., Gholamian S. A.* Predictive Torque Control of Three Phase Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machines // Majlesi Journal of Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 6, N 2. – P. 7–13.

# СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕТОДОМ ЛОКАЛИЗАЦИИ

Е.С. Матюхова, Е.С. Кучер

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [eavalanche@mail.ru](mailto:eavalanche@mail.ru)

*В докладе рассмотрен вопрос модернизации классической системы автоматического управления синхронным электроприводом. Синтез регуляторов в рассмотренной системе автоматического управления произведен методом локализации. В работе приведена сравнительная характеристика динамики переходных процессов в классической системе регулирования и модифицированной.*

*The report examined the issue of modernization of the classical automatic control system of synchronous motor drive. The synthesis of controllers in the considered automatic control system is carried out by the localization method. The paper gives a comparative characteristic of the dynamics of transients in the classical and modified control system.*

Применение синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) получает все более широкое применение. Это связано с тем, что найдены новые, более доступные, источники сырья для производства магнитов, используемых в данном типе электродвигателей. [1]

В данной работе рассматривается математическая модель СДПМ, описанная во вращающейся системе координат d-q, ориентированной по вектору потокоцепления ротора. Математическое описание широко известно [2] и представляет собой систему уравнений (1), два из которых есть выражения для напряжения статора по осям d и q, уравнение электромагнитного момента и основное уравнение движения электропривода (ЭП):

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1d} = R_1 I_{1d} + (L_{1d} I_{1d} + \Psi_2) p - \omega_r Z_p (L_{1q} I_{1q}) \\ U_{1q} = R_1 I_{1q} + L_{1q} I_{1q} p + \omega_r Z_p (L_{1d} I_{1d} + \Psi_2) \\ M_e = \frac{3}{2} Z_p (\Psi_{1d} I_{1q} - \Psi_{1q} I_{1d}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_c). \end{array} \right. \quad (1)$$

Для точного и качественного управления синхронным электроприводом, был осуществлен синтез трехконтурной системы подчиненного регулирования (СПР) основными координатами состояния СДПМ. Расчет регуляторов скорости и токов производился с использованием стандартных настроек на симметричный и модульный

оптимумы соответственно [3]. В дальнейшем, синтезированная многоконтурная система векторного управления СДПМ будет использоваться как классическая, для удобства проведения сравнительного анализа.

В качестве альтернативы классическому способу параметрического синтеза регуляторов СПР СДПМ, предлагается метод локализации, который позволит за счет «глубоких» обратных связей, обеспечить малую чувствительность синхронного электропривода к действиям возмущений различного рода.

Идея метода локализации состоит в том, что для компенсации возмущающего воздействия большим коэффициентом, прежде нужно локализовать его с помощью вектора скорости, «глубоких» обратных связей и разделения движения процессов управления. [4]

На рисунке 1 представлена структурная схема контура регулирования тока статора СДПМ по осям q и d.

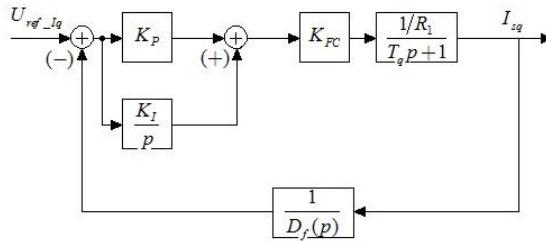


Рис.1 – Структурная схема контура регулирования тока по оси q(d)

Входное задающее воздействие (рис. 1) формируется с помощью уравнения желаемых движений, а также приняты следующие допущения: дифференцирующий фильтр представлен апериодическим звеном с некой постоянной времени фильтра, преобразователь частоты представлен безынерционным звеном. Тогда характеристический полином контура регулирования тока статора синхронного электропривода примет вид

$$D_{\text{крт}}(p) = \frac{T_q T_f R_1}{K_I K_{FC}} p^3 + \left( \frac{(T_q + T_f) R_1}{K_I K_{FC}} \right) p^2 + \left( \frac{K_p K_{FC} + R_1}{K_I K_{FC}} \right) p + 1.$$

На основе модального метода синтеза, приравнявая полученный характеристический полином к нормированному [5] можно получить систему уравнений, однозначно определяющую пропорциональный и интегральный коэффициенты ПИ-регулятора тока статора СДПМ.

При рассмотрении регулятора скорости синхронного электропривода, используется аналогичная методика структурного и параметрического синтеза. На рисунке 2 приведена структурная схема контура регулирования скорости.

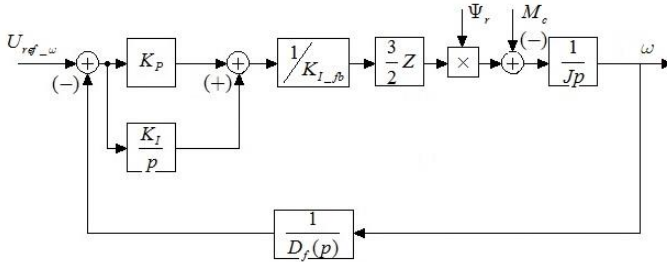


Рис.2 – Структурная схема контура регулирования скорости СДПМ  
Тогда, характеристический полином контура регулирования скорости СДПМ будет выглядеть следующим образом

$$D_{\text{КРС}}(p) = \frac{2JT_f K_I^{\text{OC}}}{3K_I Z \Psi_r} p^3 + \left( \frac{2(J+T_f)K_I^{\text{OC}}}{3K_I Z \Psi_r} \right) p^2 + \frac{K_P}{K_I} p + 1.$$

Первичная апробация синтезированных алгоритмов многоконтурной системы векторного управления синхронным электроприводом, позволяет оценить корректность ее работы и правильность структурного, параметрического синтеза.

На рисунке 3 приведены переходные процессы по токам в осях d-q и скорости.

Произведен сравнительный анализ систем векторного управления синхронным электроприводом, синтезированные классической методикой для СПР и методом локализации. Система векторного управления СДПМ, построенная по принципу метода локализации, имеет меньшее перерегулирование, большее быстродействие, меньшую колебательность, следовательно, значения показателей качества переходных процессов СДПМ соответствуют предъявляемым требованиям по сравнению с классической СПР.

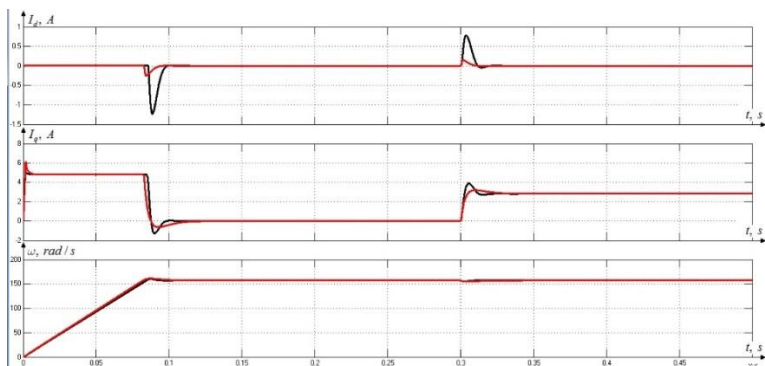


Рис.3 – Переходные процессы по токам в осях d-q и скорости при пуске на номинальную скорость и последующем набросе нагрузки

### *Литература*

1. Markus Lindegger. Economic viability, applications and limits of efficient permanent magnet motors.- Switzerland: Swiss Federal Office of Energy, 2009
2. T. Sebastian and G. R. Slemon, "Operating limits of inverter-driven permanent magnet motor drives," IEEE CH2272-3/86, pp. 800-805, 1986.
3. Kessler C. Ein Beitrag zur Theorie mehrschleifiger Regelungen // Regelungstechnik. – №8. – 1960. – Н.8. – S. 261 – 266.
4. Востриков А.С. Синтез систем регулирования методом локализации / А.С. Востриков, – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 252с. («Монографии НГТУ»).
5. Панкратов В.В. Избранные разделы теории автоматического управления / В.В. Панкратов, О.В. Нос, Е.А. Зима. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 233с.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ АППАРАТА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА НА КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ**

**М.С. Межинских, С.В. Мятёж**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, axkiss@ya.ru, myatezh@corp.nstu.ru**

*Рассмотрены способы управления аппаратом воздушного охлаждения (АВО). Предложена схема питания асинхронных короткозамкнутых двигателей с использованием одного преобразователя*



*частоты. Разработан алгоритм программы управления двигателями АВО и регулирования температуры газа.*

В следствии подготовки газа на компрессорной станции, для дальнейшей транспортировки по магистральному трубопроводу, происходит его нагрев при компримировании. Для энергосбережения газ необходимо охлаждать при помощи аппарата воздушного охлаждения(АВО) газа.

На большинстве газовых промыслов применяется способ управления АВО газа, заключающийся в ручном или дистанционном включении-отключении вентиляторов, число которых определяется оператором. При таком регулировании мощность[1], потребляемая на охлаждение, изменяется пропорционально числу включенных вентиляторов, и, при прочих равных условиях, аналогично изменяется температурный перепад на установке охлаждения газа. Недостатками такого способа регулирования является, обусловленная дискретностью, низкая точность регулирования и большие длительные пусковые токи асинхронных короткозамкнутых двигателей вентиляторов.

Для решения проблемы энергосбережения и поддержания требуемой температуры газа на выходе АВО целесообразно использовать автоматическую систему управление АВО с использованием частотного преобразователя(ПЧ)[2].

При таком способе регулирования температурный перепад изменяется пропорционально частоте вращения вентиляторов, а мощность на валу, зависит от частоты вращения в третьей степени. Благодаря этому при работе АВО с неполной нагрузкой и, соответственно, снижении частоты вращения достигается значительное уменьшение расхода электроэнергии на нужды охлаждения.

На рисунке 1 приведена схема питания двигателей АВО в упрощенном виде. Которая позволяет использовать всего один ЧП малой мощности рассчитанный на один двигатель, реализовать плавный пуск и частотное регулирования в широком диапазоне каждым двигателем. Всем этим управляет промышленный контроллер по авторскому алгоритму.

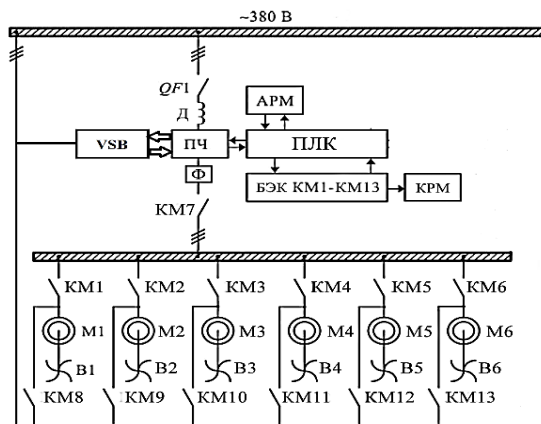


Рисунок 1 - Схема питания двигателей АВО в упрощенном виде.

При работе АВО по авторскому алгоритму управления обеспечивается точное регулирование температуры газа на выходе из аппарата, экономия электроэнергии на нужды охлаждения газа за счет оптимальной последовательности подключения дополнительных вентиляторов и равномерный расход ресурса каждого электродвигателя.

Постоянное использование частотного управления для одного вентилятора, т.е. в ходе регулирования всегда какой-нибудь привод вентилятора подключен через ПЧ, обеспечивает экономию приблизительно 30-40% от мощности одного асинхронного двигателя вентилятора.

#### *Литература*

1. Артюхов, И.И. Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, Р.Ш. Тарисов, А.А. Тримбач, Е.В. Устинов // Вестник Саратовского Гос. технического ун-та. – 2011. – № 1 (54) вып. 3. – С.25 – 32.
2. Аршакян И.И. Повышение эффективности работы установок охлаждения газа / И.И. Аршакян, А.А. Тримбач // Газовая промышленность. 2006. № 12. С. 52 – 55.

# ЭЛЕКТРОННЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С ДВУМЯ ПРИВОДНЫМИ КОЛЕСАМИ

**М.Е. Мосин, В.Н. Бутенко, И.В. Чернов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, mosin.for.work@yandex.ru**

*В последнее время в мировой автомобильной индустрии наблюдается интенсивный рост количества выпускаемых и продаваемых электромобилей и, согласно прогнозам, их доля на рынке будет только увеличиваться. Как известно, ни один современный автомобиль не выпускается без дифференциала. Целью данной статьи является разработка электронного дифференциала (ЭД) для электромобиля, оснащенного двумя задними ведущими колесами, приводящимися во вращение отдельными электродвигателями. ЭД имеет преимущество перед более тяжёлым механическим дифференциалом и обеспечивает более оптимальное управление при применении относительно лёгких двигателей (в случае если их 2 или более), наиболее предпочтителен ЭД при применении мотор-колёс. Электронный дифференциал должен полностью обеспечивать функции механического дифференциала.*

*Recently, the global automotive industry has seen an intensive growth in the number of manufactured and sold electric vehicles and, according to forecasts, their market share will only increase. As you know, no modern car is produced without a differential. The purpose of this paper is to develop an electronic differential (ED) for an electric vehicle equipped with two rear driving wheels driven by separate electric motors. ED has the advantage of replacing loose and heavy mechanical differentials and transmissions with lighter and smaller electric motors directly coupled to the wheels via a single gear or an in-wheel motor. The electronic differential must fully support the functions of the mechanical differential.*

В общем случае в большинстве современных электромобилей асинхронный двигатель приводит во вращение колеса посредством редуктора и механического дифференциала. В некоторых моделях возможно использование высокооборотистых маломоментных двигателей, которые тоже требуют использование редуктора. Дальнейшее упрощение устройства привода транспортного средства приводит к устранению редуктора, что в свою очередь требует применение электронного дифференциала. Электронный дифференциал позволит улучшить массо-габаритные показатели транспортного средства, а также позволит более оптимально использовать энергию двигателя, благодаря тому, что будут исключены потери энергии в механических передачах.

В момент совершения поворота задние приводные колеса вращаются с разной скоростью. Если в системе не применяется электронный дифференциал, и колеса вращаются с одинаковой скоростью, то такое условие существенно ухудшает управляемость автомобиля, что может

привести к заносам, потери управления, следственно, к аварии. Во избежание этого электронный дифференциал должен менять скорость вращения колес при повороте.

Когда транспортное средство совершает поворот налево, то его левое колесо должно замедляться, правое, соответственно, ускоряться. На рисунке 1 представлена модель траектории повороте, где  $\delta$  – это угол поворота руля,  $V_1$  и  $V_2$  – линейные скорости соответствующих колес,  $\omega_v$  – угловая скорость поворота,  $R$  – радиус траектории,  $L$  и  $d$  – длина и ширина колесной базы соответственно.

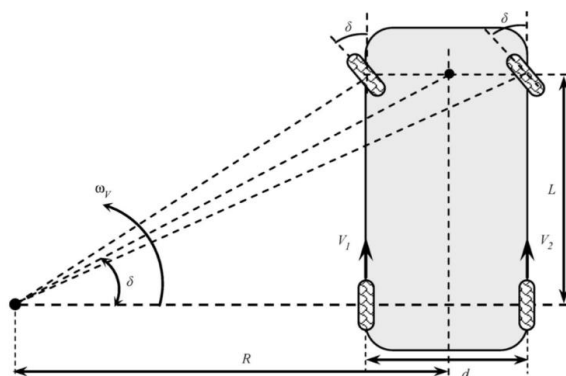


Рис.6 – Модель траектории движения.

Структурная схема формирования сигналов задания на скорости левого и правого колес представлена на рисунке 2. Сигнал задания на общую скорость вращения колес  $\omega_{зад}$  формируется датчиком положения педали газа (соответственно, чем сильнее нажата педаль, тем больше должна быть скорость). При повороте сигнал задания скорости на каждое колесо уменьшается либо увеличивается на величину  $\Delta\omega$ , соответственно, при повороте налево сигнал задания скорости левого колеса уменьшается, правого – увеличивается и наоборот. Величина  $\Delta\omega$  является функцией угла поворота руля  $\delta$  и угловой скорости поворота автомобиля  $\omega_v$ . Соответственно, чем больше скорость поворота транспортного средства, тем больше должна быть разница скоростей левого и правого колес, аналогично чем угол больше поворота, тем больше должны отличаться скорости колес. Сигналы текущих скоростей  $\omega_l$  и  $\omega_p$  приходят от датчиков скорости либо вычисляются, тогда в системе электронного дифференциала должен быть дополнительно синтезирован наблюдатель скорости. Когда автомобиль

движется прямо, сигнал с датчика положения руля равен нулю, тогда  $\Delta\omega = 0$ , оба колеса вращаются с заданной скоростью  $\omega_{зад}$ .

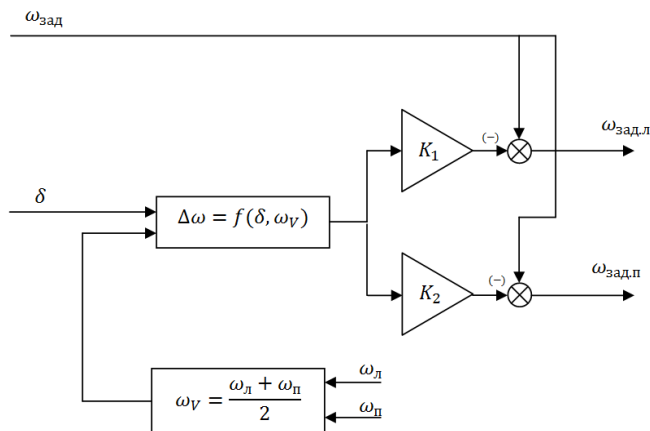


Рис.7 – Формирование сигналов задания скорости на левое и правое колеса.

В результате дальнейшей работы будет произведено цифровое моделирование работы электронного дифференциала и САУ с векторным управлением приводными асинхронными двигателями, а также будут исследованы различные режимы движения транспортного средства. Результаты моделирования и исследования будут представлены в докладе.

#### Литература:

1. A. Haddoun et al., "Modeling, analysis and neural network control of an EVElectrical Differential," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 55, n°6, pp. 2286-2294, June 2008.
2. A. Haddoun, F. Khoucha, M. E. H. Benbouzid, and D. Diallo, "SDTC neural network traction control of an electric vehicle without differential gears," in Proc. IEEE VPPC, Arlington, TX, Sep. 2007, pp. 259–266.

## **МНОГОУРОВНЕВЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПАРКИНГ ДЛЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ В РОССИИ**

**Р.А. Мосин, Е.С. Кучер**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, justmilky@mail.ru**

*Статья посвящена вопросам развития транспортной инфраструктуры в России. Авторами представлены общие сведения о достижениях в области современного паркинга автомобилей в мире. Рассмотрены различные виды автоматизированных паркингов. Определены пути решения проблемы нехватки парковочных мест.*

*The article is devoted to the development of transport infrastructure in Russia. The authors provide general information about the achievements in the field of modern car parking in the world. Various types of automated parking are considered. The ways to solve the problem of lack of parking spaces are identified.*

В современном мире, переполненном автомобилями, люди нередко сталкиваются с проблемой размещения своего транспортного средства. Как показывает анализ состояния транспортной инфраструктуры городов России, разработка и развитие парковочных систем автотранспорта имеет высокую актуальность. По статистике только 35-40% от общего количества автомобилей обеспечены парковочными местами. Бесконтрольная парковка автомобилей только усугубляет ситуацию на дорогах, уменьшая места на проезжей части. В центральной части городов многие улицы используются лишь на 30-50%, что приводит к низкой пропускной способности дорожной инфраструктуры. [1]

Проблема нехватки парковочных мест вынуждает производить поиск новых эффективных путей решений, которые при фиксированных инвестициях обеспечат значительный результат. Самым популярным на сегодняшний день способ представляет собой строительство паркингов, которые способны вместить в себя значительное количество транспорта и сократить площадь застройки.

Устройство автоматизированных систем парковки представляет собой некоторую последовательность действий: владелец загоняет автомобиль в терминал, после чего выходит, а автомобиль перемещается в парковочное место хранения под управлением специальной системы координации. Он попадает на механизированное устройство, которое по определенному алгоритму в автоматизированном режиме обеспечивает компактное размещение автомобиля в его парковочном месте. Главной задачей автоматизированных парковочных систем, является размещение

большого количества автомобилей на малой площади застройки, помещая автомобили на стеллажи системы цилиндрического типа, башенного типа, с узкопроходными стеллажами, а также систем циркуляционного типа. [3]

Автоматическая парковка имеет более высокий коэффициент заполнения пустого пространства автотранспортом. Отличительной особенностью автоматизированных парковок от обычных многоэтажных заключается в увеличении полезной площади, за счет отсутствия атрибутов используемых для классических парковок, которые значительно отнимают место для большого количества парковочных мест. К данным атрибутам относятся подъездные пути, лестницы и лифты, пандусы. Так же такие парковки могут использоваться в жилых домах, торговых центрах и офисных постройках.

Проблему парковочных мест пытаются решить во многих странах мира, применяя различные способы. К таким способам относятся: выдача права на приобретение автомобиля только при условии владения парковочным местом, вывод парковочных терминалов за черту города, и другие.

В немецком городе Вольфсбург несколько лет назад открылся принадлежащий автогиганту Volkswagen промышленный парк под названием Автоград. Это целый город с офисными и производственными помещениями, а также собственным музеем. Но основное внимание к себе притягивают два бывших бункера, в настоящее время переоборудованных под многоуровневые парковки. Каждая башня достигает 48 метров в высоту и состоит из 16 функциональных этажей. При этом автомобили доставляются до верхних этажей башен не по круговой рампе, а с помощью специальных лифтов, доставляющих наверх и любопытных туристов, ежедневно штурмующих Автоград. [2]

Правительство России долгое время занимается разработкой различных систем парковки основываясь на опыте зарубежных коллег, тем самым улучшить обстановку на дорогах в крупных городах.

В Москве зарегистрировано свыше 3,5 млн частных автомобилей и каждый год их количество увеличивается на 250–300 тыс. новых частных машин. Количество парковочных мест растет в значительно меньшем количестве, нежели количество транспорта, поэтому проблема нехватки парковочных мест становится более явной.

Автоматизированные парковки становятся все более популярными в Москве, Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде, Краснодаре, Казани,

Красноярске и других городах. Их можно разделить на группы по принципу работы.

Простые автоматизированные парковки представляют собой комплексы из металлоконструкций, которые стоят сравнительно недорого, но значительно экономят пространство. Такая автоматизированная парковка роторного типа позволяет разместить до 16 автомобилей на площади, которая предназначалась бы для 3-4 машин. Чтобы расположиться на стоянке, водителю необходимо заехать в ячейку и оставить авто. Такие парковки называются Роторными. Система поднимет ячейку выше, а свободное место может занять следующий водитель. Что немаловажно, парковки просты в сборке. Известны случаи, когда их переносили в другие места путем демонтажа и монтажа на новом участке.

Пазловый паркинг так же можно отнести к автоматизированным стоянкам, на которых автомобиль перемещается с помощью специальных устройств. Проект представляет собой несущую раму, исполненную в несколько ярусов. Один из них остается свободным. Этот блок предназначен для свободного горизонтального и вертикального перемещения автомобилей.

Ещё одной разновидностью автоматических парковок можно считать Башенный паркинг. Он представляет собой многоэтажную башню, где места для стоянки автомобилей предусмотрены в два ряда. Между ними остается место для перемещения лифта с автомобилем. Такая стоянка занимает очень мало места, но вмещает большое количество автомобилей.

Стеллажный паркинг представляет собой места для автомобилей, напоминающие полки в магазине супермаркета, где автомобили – товар, который располагается в ячейках с помощью подъемника. Удобный и компактный тип паркинга.

В мире роботизированные парковки распространены в Японии, Сингапуре, а также в некоторых европейских странах с большим количеством машин. В России такие парковки представлены единичными экземплярами только в крупных городах. Таким образом, можно отметить, что основная Проблема на сегодняшний день заключается в отсутствии законодательной базы для автоматических парковок и обслуживающее оборудование. Исходя из вышесказанного, решением будет следовать разработка государственного стандарта, внедрение проектов по постройке многоуровневых автоматических парковок, а так же вложение инвестиций для осуществления данных проектов.



В дальнейшей работе планируется рассмотреть различные схемы автоматических парковок с дальнейшим выбором оптимальной схемы с учетом финансово-экономического обоснования, а так же статистических данных по потребности парковочных мест и экономии места в центральных районах городов России. Будет реализован выбор подъемно-передвижного механизма с проектирование системы автоматического управления для реализации автоматической работы паркинга.

#### *Литература:*

1. Наumenko Е. Ю. Организация парковочного пространства в общей системе дорожного движения в городах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2012. – 16 с.
2. 10 самых невероятных современных автомобильных парковок 2015. [Электронный ресурс] // Интернет-проект Novate.Ru. – 2015. – URL: <https://novate.ru/blogs/160115/29597/> (дата обращения 20.10.2019)
3. Ягузинская И. Ю., Типушова И. О. Современные автоматизированные системы парковки автомобилей [Электронный ресурс] // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – URL: <http://e-koncept.ru/2015/95585.htm> (дата обращения 20.10.2019)

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАГРЕВА НЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ТОВАРНОЙ НЕФТИ**

**А.А. Мочалов, В.М. Кавешников**

**Новосибирский Государственный Технический Университет,  
г. Новосибирск, kaveshnikov@corp.nstu.ru**

*В докладе представлено исследование оптимизации процесса нагрева нефти в подогревателе вида ПТБ-10А на установке подготовки нефти «Родинка».*

*После проведенного анализа процесса предложена система автоматического регулирования температуры на базе программно-технических средств фирмы Siemens.*

*Описана технология процесса, произведен выбор оборудования и собрана модель системы в программе Matlab, с помощью которой получены графики переходных процессов при различных значениях.*

*The report presents a study of optimizing the process of heating oil in a heater of the type PTB-10A at the Rodinka oil treatment unit.*

*After the analysis of the process, a system of automatic temperature control based on software and hardware tools of the company Siemens is proposed.*

*The technology of the process is described, the equipment is selected and the system model is assembled in the Matlab program, with the help of which transient graphs are obtained at various values.*

При добыче нефти, в ее составе присутствует множество компонентов (вода, механические примеси, минеральные соли, попутные газы), которые затрудняют ее транспортировку и дальнейшую переработку. Присутствие воды в нефти приводит к увеличению вязкости нефти, по сравнению с чистой нефтью, а также к повышению ее цены на транспортировку, так как повышается объем. Механические примеси приводят к разрушению трубопроводов, ухудшению качества нефтепродуктов, абразивному износу для нефтеперекачивающего оборудования. Наличие минеральных солей приводит к ускоренной коррозии нефтеперекачивающего оборудования и трубопроводов.

Все перечисленные проблемы обуславливают необходимость в качественной подготовке нефти, в состав которой входят обезвоживание, обессоливание и ее стабилизация. Подготовка нефти проводится в единой системе сбора и подготовки нефти и легких углеводородов, в которую входят комплексные установки обезвоживания, обессоливания и стабилизации нефти.

При нагреве нефти в теплообменниках важно поддержание температуры нефти в пределах  $50 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $120 - 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), в зависимости от сорта нефти, для лучшего обезвоживания нефти. При таких температурах нефть обезвоживается эффективнее и быстрее, за счет снижения вязкости среды, а вода лучше собирается в капли (процесс коалесценции).

Для решения проблемы поддержания необходимой температуры был подобран контроллер CPU-1512 фирмы Siemens. Для более точного и быстродействующего регулирования температуры решено не пользоваться стандартным блоком регулятора (CONT\_S), имеющимся в среде TIA Portal, а разработать собственный ПИ-регулятор адаптированный как к параметрическим, так и сигнальным возмущениям. Так же в программе возможна реализация системы противоаварийной защиты, сбор и передача данных в АСУ верхнего уровня.

Предполагается, что данная система управления обеспечит высокие технико-экономические показатели, позволит обеспечить оптимальное безаварийное ведение процесса нагрева нефти на этапе её подготовки, а также безопасность персонала при эксплуатации.

Решение, представленное в данной работе применимо так же и к другим системам в которых необходимо производить регулирование.

*Литература:*

1. Промысловый сбор и подготовка нефти, газа и воды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://neftandgaz.ru/?p=939> - Загл. с экрана.
2. ГОСТ Р 8.615-2005. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования. – Введ. 2006-03-01-М.: Изд-во стандартов, 2005. – 31с
3. Оборудование для автоматизации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10239949/info> – Загл. с экрана.

## **СИНТЕЗ И АНАЛИЗ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

**О.Э. Пауль, Е.С. Кучер**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [olyapaul01@yandex.ru](mailto:olyapaul01@yandex.ru)**

*Целью работы является синтез и анализ систем векторного управления, обеспечивающих желаемые показатели качества регулирования асинхронным двигателем. Для сравнительного анализа синтезированы системы управления с подчиненным регулированием контуров и методом сигнально-адаптивной обратной модели. Выполнен сравнительный анализ результатов моделирования систем.*

*The key issue of the paper is to design and analyse field-oriented control systems of induction motor providing desired control performance. Control systems with subordinate control and with the method of signal adaptive inverse model are designed to be compared. The comparative analysis of simulation results is obtained.*

Векторное управление асинхронными двигателями (АД) является наиболее часто применяемым в промышленности, позволяет разделять каналы управления скоростью вращения ротора и моментом на валу электродвигателя. Более того, системы векторного управления по сравнению со скалярными системами управления (СУ), обладают более высокой производительностью и широким диапазоном регулирования.

На первом этапе работы был произведен синтез математической модели асинхронного электропривода, в основу которого заложен принцип векторного управления с ориентацией по направлению вектора потокосцепления ротора.

После чего, был выполнен синтез четырехконтурной системы подчиненного регулирования асинхронным электроприводом. Данный

метод, включающий в себя метод разделения движений, позволяет последовательно синтезировать контуры регулирования токами (КРТ) в полеориентированной системе координат  $I_d$ ,  $I_q$ , и контуров регулирования потокосцепления ротора (КРП) и скорости вращения вала двигателя (КРС). Настройка КРТ и КРП производилась на модульный оптимум, КРС – на симметричный оптимум [1].

В среде MATLAB Simulink проведено цифровое моделирование для подтверждения корректности синтеза системы векторного управления АД.

На третьем этапе работы для разработки СУ для получения оценок потокосцепления ротора и скорости вращения вала двигателя был выполнен синтез наблюдателя на основе адаптивных систем с задающей (эталонной) моделью.

В современных установках предъявляются повышенные требования к динамическим и статическим характеристикам электропривода, поэтому наибольший интерес представляют собой адаптивные системы управления, которые малочувствительны не только к внешним возмущениям, но и к параметрическим. Для разработки адаптивной СУ асинхронным электроприводом был выбран метод сигнально-адаптивной обратной модели (САОМ) [2]. Параметрическая адаптация обеспечит нечувствительность СУ к изменению активного сопротивления ротора и статора.

На четвертом этапе работы методом САОМ были синтезированы внутренние КРТ  $I_d$ ,  $I_q$ . При моделировании в среде MATLAB Simulink были выявлены неудовлетворительные показатели качества регулирования такой системы управления.

Текущей задачей является синтез внешних контуров управления, т.е. контура регулирования потокосцепления ротора и контура регулирования скорости асинхронного двигателя.

Далее предполагается выполнение сравнительного анализа по результатам моделирования обеих систем в среде MATLAB Simulink.

Дальнейшие задачи научно-исследовательской работы будут в себя включать синтез вспомогательных подсистем - специальных алгоритмов параметрической текущей идентификации.

#### *Литература:*

1.Панкратов В.В., Котин Д.А. Адаптивные алгоритмы бездатчикового векторного управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов: учеб. Пособие.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012.-143с.

2. Специальные разделы теории автоматического управления: учеб. пособие/ В.В. Панкратов, О.В. Нос. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. Ч. 2. 102 с.

## **ОБОСНОВАННЫЙ ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ДЛЯ МНОГОКООРДИНАТНЫХ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ**

**Н.С. Попов, И.И. Сингизин, Е.А. Финоженко**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, nikitaa\_popov@mail.ru**

*Техническое оснащение предприятий не стоит на месте. Всё больше заводских комплексов интегрируют в своё производство робототехнику, чаще всего это роботы-манипуляторы. Они довольно просты в своем исполнении, но при этом достаточно многозадачны и многофункциональны. В зависимости от рабочего органа робот-манипулятор может выполнять функции перемещения, покраски, сборки деталей, сварки и др. Для каждой задачи робот-манипулятор должен обладать определенными характеристиками, которые закладываются на этапе сборки, программирования и отладки.*

*Technical equipment of enterprises does not stand still. More and more factory complexes are integrating robot technology into their production, most often these are robotic manipulators. They are quite simple in their execution, but at the same time quite multitasking and multi-functional. Depending on the working body, the robot manipulator can perform the functions of moving, painting, assembling parts, welding, etc. For each task, the robot manipulator must have certain characteristics that are laid down at the assembly, programming, and debugging stages.*

Робот — автоматическое устройство, предназначенное для осуществления различного рода механических операций, которое действует по заранее заложенной программе [1].

Манипулятор — это управляемый механизм, который предназначен для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека при перемещении объектов в пространстве, и оснащён рабочим органом. В некоторых случаях в состав робота могут входить два и более манипулятора [2].

В совокупности два этих понятия дают информацию о том, что представляет собой робот-манипулятор. Робот-манипулятор — это устройство предназначенное для перемещения объектов в пространстве, управляемое по заранее составленной программе.

Исполнительный механизм манипулятора представляет собой открытую кинематическую цепь, звенья которой последовательно соединены между собой сочленениями различного типа. На конце

манипулятора располагается рабочий орган — устройство, предназначенное для выполнения определенной задачи. В качестве рабочего органа может выступать захватное устройство или какой-либо технологический инструмент. Наиболее универсальной разновидностью захватного устройства является схват — устройство, в котором захватывание и удержание объекта производятся посредством относительного перемещения частей данного устройства. Схват по своей конструкции напоминает кисть человеческой руки: захват объекта осуществляется с помощью механических «пальцев», для захвата плоских предметов используются захватные устройства с пневматической присоской. Применяют также крюки (для поднятия деталей с конвейеров), черпаки или совки (для жидких, сыпучих или гранулированных веществ). Для захвата множества однотипных деталей применяют специализированные конструкции (например, магнитные захватные устройства).

Для приведения звеньев манипулятора и устройства захвата в движение используют различные виды приводов. В современных робототехнических системах имеет место применение большого количества типов электрической машины, в зависимости от технологического процесса. В случае, когда от механизма не требуется высоких показателей по грузоподъемности и точности позиционирования, оптимально реализовывать кинематическую схему на базе сервоприводов. Такие манипуляторы, как правило, используются в учебных целях, для реализации различных систем управления. Для выполнения промышленных задач, необходимо применение шаговых двигателей, либо электрических машин переменного тока. Мировые лидеры в области роботов - манипуляторов склоняются к применению синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов. Это обусловлено, в основном, преимуществом таких машин в массогабаритных показателях. Именно этот критерий является определяющим, поскольку собственный вес механизмов так же создает нагрузку на электрическую машину в процессе работы робота.

В учебных целях разработан робот-манипулятор из органического стекла, привод которого реализован на базе пяти сервоприводов. В дальнейшем, планируется внести изменения в кинематическую систему механизма для увеличения рабочей площади установки, а также осуществить переход к машинам переменного тока.

#### *Литература:*

1. Козырев Ю.Г., Промышленные роботы. Основные типы и технические характеристики. – М.: “Кнорус”, 2019. – 560 с.

2. Москвичев А.А., Кварталов А.Р., Устинов Б.В., Захватные устройства промышленных роботов и манипуляторов. – М: “Форум”, 2015. – 302 с.

## **ОБОСНОВАНИЕ КОМПАНОВКИ ТЯГОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

**Н.С. Попов, В.И. Аниброев, В.Н. Аносов**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, [nikita\\_a\\_popov@mail.ru](mailto:nikita_a_popov@mail.ru)**

*В современном обществе особое место занимают вопросы экологии. Из года в год, публикуется огромное количество статистических данных, которые отображают масштаб того ущерба, который наносят окружающей среде продукты человеческой деятельности. Главным «вредителем» на планете, на сегодняшний день, уверенно можно назвать автомобили с двигателем внутреннего сгорания.*

*В последние годы, многие производители транспортных систем видят выход в развитие систем автономного электрического транспорта, которые, в перспективе, смогут прийти на замену автотранспорту с двигателем внутреннего сгорания.*

*In modern society, environmental issues occupy a special place. From year to year, a huge amount of statistics is published that reflect the scale of the damage that human products cause to the environment. Today, the main “pest” on the planet can surely be called cars with an internal combustion engine.*

*In recent years, many manufacturers of transport systems have entered the development of autonomous electric transport systems, which, in the future, will be able to replace motor vehicles with an internal combustion engine.*

Все большую популярность по всему миру приобретают электрокары и погрузчики, особенно в закрытых складских помещениях, где применение классического транспорта с ДВС невозможно.

Автономные электрические транспортные системы, независимо от компании производителя, сталкиваются с одной и той же проблемой – малый запас автономного хода. Увеличение автономного хода электрических транспортных средств, в настоящее время, достигается разными способами. Один из наиболее распространенных – это интеграция дополнительных аккумуляторных батарей в силовую схему транспортной установки [1]. Недостатками этого метода являются удорожание транспортного средства и увеличение массогабаритных показателей. Другой метод – это реализация современных систем

управления силовой схемой транспортного средства, так называемый аппаратный метод. Его недостатками служит сложность реализации и внедрение дополнительного оборудования в электрическую часть транспортного средства [2].

Рассмотрим наиболее популярные варианты расположения электродвигателей:

- двигатель подключается к первичному валу коробки переключения передач (рисунок 1а);
- двигатель подключается к осевому дифференциалу ведущего моста (рисунок 1б);
- двигатель подключается непосредственно к ведущим колесам (рисунок 1в).

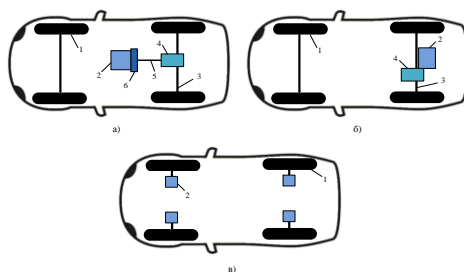


Рисунок 1 – Расположение тяговой системы в автономном электрическом транспортном средстве

где 1 – колесо; 2 – электрический двигатель; 3 – полуось; 4 – дифференциал; 5 – редуктор; 6 – коробка переключения передач.

Анализ каждого из предложенных вариантов показал, что наиболее подходящим является реализация мотор колес. Вариант с подключением электродвигателя непосредственно к колесу упрощает конструкцию трансмиссии, так как отпадает необходимость в сцеплении, коробке переключения передач, приводных валах, а также дифференциалах, что существенно снижает вес транспортного средства. Повышается надежность полученной системы за счет упрощения конструкции. Реализация оптимальной системы управления всеми двигателями одновременно позволит повысить энергоэффективность установки. Все вышерассмотренные варианты компоновки тяговой системы вариативны, их практическое применение возможно как на базе автономного электрического транспортного средства личного пользования, так и на базе машин специального назначения. В случае с электрокарами и погрузчиками такое решение имеет дополнительное преимущество в виде маневренности и мобильности в ограниченных



масштабах помещений закрытого типа. Управляемые мотор-колеса могут вращаться с разной скоростью и в разных направлениях, это позволяет разворачиваться на 360 градусов, парковаться в ограниченном пространстве. Еще одним важным преимуществом является простота важнейшей для автономного электрического транспорта системы рекуперации энергии торможения в накопительные устройства. К недостатку такой системы стоит отнести большую неподдрессоренную массу, которая повышает износ подвески и передает на кузов больше вибраций [3].

Реализация подобной компоновки тяговой системы влечет за собой применение электронного дифференциала. Систему управления таким транспортным комплексом планируется реализовать посредством нейро-нечеткого регулятора, синтезированного по принципу нейронной сети, что позволит значительно повысить энергоэффективность автономного электрического транспортного средства.

#### *Литература:*

1. Кашкаров А.П., Современные электромобили. Устройство, отличия и выбор для российских дорог. – М.: “ДМК-Пресс”, 2018. – 92 с.
2. Баранцев И.А., Электромобиль 130 лет истории. – М: “Русские витязи”, 2019. – 312 с.
3. Бекишев Р.Ф., Электропривод. – М.: Юрайт, 2016. – 302 с.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИВОДА РАБОТЫ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ**

**В.О. Рахвалов, В.М. Кавешников**

**Новосибирский Государственный Технический Университет,  
г. Новосибирск**

*Шахтная подъемная машина является ключевым оборудованием, используемым в горнодобывающей промышленности. Точная и безаварийная работа данного оборудования являются основными требованиями к системе автоматического управления установки. В данной работе представлена система, полностью соответствующая заданным условиям.*

*The minehoist is the key equipment use in the mining industry. Exact and accident-free operation of this equipment is the main requirements to the system of automatic control of installation. the control system, completely corresponding to the set conditions is presented in this paper.*

Шахтная подъемная установка это основной транспортный комплекс, связывающий подземную часть шахты (рудника) с поверхностью. Данное оборудование предназначено для выдачи на поверхность добываемого угля и получаемой при проходке горных выработок породы, быстрого и безопасного спуска и подъема людей, горно-шахтного оборудования и материалов.

Система управления может изменяться в зависимости от типа подъемной установки, типа привода (двигатель постоянного тока или асинхронный двигатель), типа подъемного сосуда и количества горизонтов.

Основываясь на вышесказанном можно сделать выводы о требованиях к системе управления. Система автоматического управления шахтной подъемной установки должна обеспечивать точную и своевременную подачу управляющих сигналов на пуск и торможения двигателя, контроль выполнения рабочей и защитной тахограмм подъема и спуска, контроль скорости движения сосуда и его приход в зону разгрузки и приемной площадки, корректировку системы в зависимости от массы поднимаемого груза, предотвращение ухода сосуда в переподъем.

Описанные требования связаны с обеспечением эффективной и безопасной работы машины.

Разрабатываемая система автоматического управления, состоящая из преобразователя частоты, микроконтроллера и датчиков положения полностью удовлетворяет заданным требованиям.

#### *Литература:*

1. Завозин Л. Ф. Шахтные подъемные установки. Изд. 2-е, перераб. и дор. М., «Недра», 1975, 368 с.

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ НЕФТИ**

**У.К. Садкова, А.В. Мятаж**

**Новосибирский Государственный Технический Университет,  
г. Новосибирск, a.myatezh@corp.nstu.ru**

*Нефтегазовая отрасль является одной из важных областей экономического развития Сибирских регионов РФ. На сегодняшний день существует 670 месторождений в Западной Сибири, средняя выработанность которых составляет от 37% до 60 %. При добыче нефтегазовых продуктов в пласт подается рабочий агент - вода или природный газ, для поддержания*

пластового давления (в 80% случаях используется вода). Средняя обводненность месторождений по России составляет от 50-80 %, что повышает себестоимость добываемой продукции.

Автоматизация и оптимизация технологических процессов является важным фактором для повышения производительности производств и улучшения качества выпускаемой продукции.

В данной работе рассмотрены актуальные задачи эффективной очистки нефти от воды, повышение качества регулирования подачи деэмульгатора, уменьшение энергозатрат путем повышения температуры перекачиваемой нефти и обеспечения безопасности протекания технологического процесса на установке подготовки нефти.

Целью настоящей работы является разработка, и исследование системы автоматизированного управления нефтеподготовки с использованием автоматического регулирования подачи эмульгатора в реальном масштабе времени в зависимости от температуры и расхода выходного объема подготовленной для транспортирования нефти, уменьшение энергозатрат и обеспечение безопасности протекания технологического процесса.

Объектом исследования является установка подготовки нефти, в частности блок подачи деэмульгатора, печь и трехфазный сепаратор.

Продукт, получаемый из нефтяных скважин, является сложной смесью, состоящей из нефти, попутного нефтяного газа, воды и механических примесей. Нефть в «сыром» виде транспортировать нецелесообразно. Поскольку доставка «сырого» продукта экономически невыгодно: во-первых, поскольку имеет место большие потери по скорости транспортирования, вследствие совместного движения составляющих (нефти, газа и воды), из-за преодоления сил трения, во-вторых, минерализованная пластовая вода и механические примеси вызывают коррозию и ускоряют абразивный износ оборудования. Поэтому актуально очищать «сырую» нефть сразу при добыче.

Для подтверждения актуальности был проведен теоретический анализ и обработка статистических данных для исследования тенденции развития тематики. Используются данные о патентах и публикациях за последние 20 лет (1997-2017 г.г.)

Автоматизация и оптимизация технологических процессов является важным фактором для повышения производительности и улучшения качества выпускаемой продукции. Поэтому автоматизацию на предприятия нефтедобычи и нефтепереработке должна использоваться на всех этапах добычи и производства. Применение автоматизации целесообразно не только из-за получения финансовой прибыли, но и в целях безопасности, поскольку нефтегазовые продукты пожаро-взрывоопасные вещества.

### *Литература:*

1. Все о минерально-сырьевом комплексе России / Информационный центр «Минерал» [Электронный ресурс]; <http://www.mineral.ru/Facts/.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
2. Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа / А.К. Мановян. - М.: Химия, 2001. - 568с.

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОПРИВОДА РЕКУРРЕНТНЫМ МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ**

**С.В. Сыренов, П.А. Суняйкина, В.Д. Юркевич**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, [sod.cheese@gmail.com](mailto:sod.cheese@gmail.com), [stanleyvens@gmail.com](mailto:stanleyvens@gmail.com)**

*Рассматривается проблема оценки коэффициента усиления математической модели гидропривода с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов. Приведены результаты численного моделирования и экспериментов на одноканальном стенде прочностных испытаний.*

*The problem of estimating the gain of a mathematical model of a hydraulic actuator using the recurrent least squares method is considered. The results of numerical simulation and experiments on a single-channel strength test bench are presented.*

Важной частью повышения надёжности летальных аппаратов и обеспечения их гарантированного эксплуатационного ресурса является проведение прочностных испытаний авиационных конструкций на специализированных стендах, включающих в себя десятки электрогидроприводов [1].

На основе исследований [2, 3] была предложена следующая математическая модель гидропривода:

$$\dot{y}(t) = g \cdot u(t - \tau),$$

где  $y(t)$  – выходной сигнал динамометра, измеряющего величину усилия электрогидропривода;  $u(t)$  – управляющий сигнал на входе блока управления электрогидропривода;  $t$  – время;  $\tau$  – величина запаздывания в канале управления;  $g$  – коэффициент усиления электрогидропривода.

В результате предварительных исследований [4] было выяснено, что параметр  $g$  существенно изменяется в процессе проведения ресурсных испытаний. Это приводит к возникновению автоколебательных

режимов в системе управления силовым нагружением конструкции и к снижению точности реализации циклограмм силового нагружения.

Целью данной работы является исследование возможности оценки параметра  $g$  на основе рекуррентного метода наименьших квадратов, что позволит в дальнейшем повысить точность реализации циклограмм силового нагружения путём построения адаптивной системы управления.

В данной работе используется модификация рекуррентного метода наименьших квадратов с параметром «забывания» [5]. Для реализации данного метода используются значения переменных  $y(t)$  и  $u(t)$ , полученные в дискретные моменты времени  $t_k = T_s \cdot k$ , где  $T_s$  – шаг дискретизации по времени,  $k = 1, 2, \dots$ . Расчётные соотношения для оценки параметра  $g$  имеют следующий вид:

$$\hat{g}(t_k) = \hat{g}(t_{k-1}) + P(t_k) \cdot u(t_k) \cdot \left[ \frac{\Delta y(t_k)}{T_s} - u(t_k) \cdot \hat{g}(t_{k-1}) \right],$$

$$P(t_k) = \lambda^{-1} \cdot P(t_{k-1}) - \frac{\lambda^{-1} \cdot u^2(t_k) \cdot P^2(t_{k-1})}{\lambda + u^2(t_k) \cdot P(t_{k-1})},$$

где  $\Delta y(t_k) = y(t_k) - y(t_{k-1})$ ;  $\hat{g}(t_k)$  – оценка коэффициента усиления  $g$  в момент времени  $t_k$ ;  $P(t_k)$  – настраиваемый коэффициент;  $\lambda$  – параметр «забывания».

В докладе приведены результаты численного моделирования, а также результаты экспериментов на одноканальном стенде прочностных испытаний.

#### *Литература:*

1. Баранов А. Н. Статические и теплопрочностные испытания летательных аппаратов / Под ред. А.Н. Баранов – Жуковский: Изд. отдела ЦАГИ, 2009. – 204 с.
2. Лапердин А. И., Юркевич В. Д. Разработка адаптивного алгоритма управления стендом прочностных испытаний авиационных конструкций. // Автометрия. 2017. Т. 53, №4, С. 51 – 58.
3. Юркевич В. Д., Суняйкина П. А., Сыренов С. В. Применение релейного теста для автоматической подстройки регулятора электрогидропривода стенда прочностных испытаний. // Автометрия – Новосибирск, 2019. – № 4(55) – С. 29 – 36.
4. Лапердин А. И., Юркевич В. Д. Экспериментальное исследование динамических свойств канала нагружения стенда для прочностных

испытаний авиационных конструкций // Научный вестник НГТУ. 2016. Т. 62, №1, С. 168 – 180.

5. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. 1975. – 690 с.

## **УПРАВЛЕНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫМИ НАСОСНЫМИ АГРЕГАТАМИ НЕФТЕПРОВОДА**

**Д.Г. Цамалаидзе, В.М. Кавешников**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, darya.tsamalaidze@mail.ru**

*Работа посвящена минимизации нерациональных потерь при транспортировке за счет разрабатываемой системы управления, обеспечивающей минимальное удельное потребление электроэнергии.*

*The work is devoted to minimizing irrational losses during transportation due to the developed control system that provides the minimum specific energy consumption.*

Нефтяная промышленность — ведущая отрасль российской промышленности.

Добыча нефти в России с начала 2000-х годов стабильно растет. Начиная с 2010 года, добыча нефти в России преодолела планку в 500 млн. тонн в год и уверенно держится выше этого уровня, неуклонно повышаясь.

Одной из важнейших задач для развития отрасли является быстрая и экономичная доставка, т.к. большинство нефтепромыслов находится далеко от мест переработки или сбыта нефти. Самым дешевым и экологически безопасным способом транспортировки нефти являются нефтепроводы.[1]

Затраты на транспортировку нефти занимают в конечной стоимости нефти значительную долю. Поэтому, проблеме энергосбережения при перекачке нефти на нефтеперекачивающих станциях (НПС) уделяется большое внимание с целью сокращения удельного расхода электроэнергии на тоннокилометр перемещаемого продукта,  $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{т} \cdot \text{км}$ .

Перекачка нефти осуществляется с помощью магистральных насосных агрегатов (МНА), устанавливаемых на НПС. Примерная схема нефтепровода представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема нефтепровода

Задача МНА на НПС – создать необходимые условия для получения нужной производительности при минимальных затратах энергии, создавая на выходе НПС необходимое давление для производительной доставки нефти до входа в следующую НПС.

Обычно в состав МНА входят: центробежный насос, асинхронный электродвигатель.

Известно, что КПД насосного агрегата зависит от его загрузки, т.е. отношения полезной мощности на выходе насоса к номинальной мощности МНА. Для минимизации нерациональных потерь необходимо привести режим работы МНА к существующему объему прокачки. Рисунки 2 и 3 показывают возможность снижения потерь при регулировании скорости. [2]

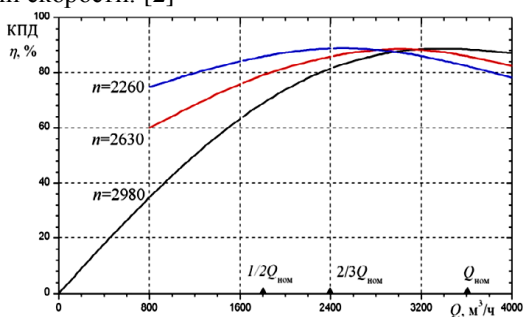


Рисунок 2 – Характеристики  $\eta$  -  $Q$  магистрального насоса при различных частотах вращения

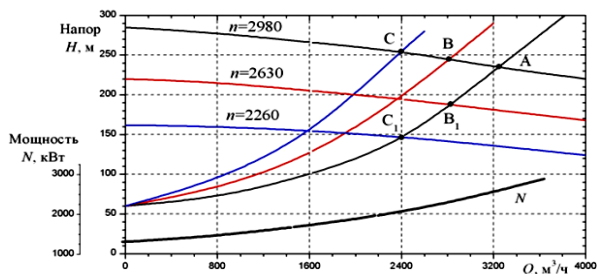


Рисунок 3 – Характеристики  $H - Q$  магистрального насоса при различных частотах вращения, характеристика  $N - Q$  при номинальной частоте вращения

Для конкретной НПС разработать систему управления МНА обеспечивающую минимальное удельное потребление электроэнергии. Примерная функциональная схема представлена на рисунке 4.

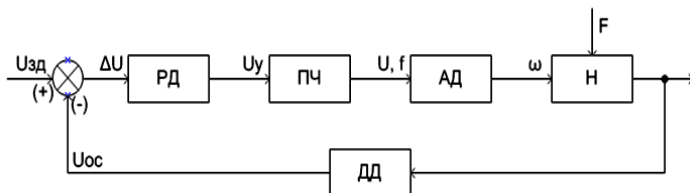


Рисунок 4 – Функциональная схема

На функциональной схеме:

РД – регулятор давления;

ПЧ – преобразователь частоты;

АД – асинхронный двигатель;

Н – центробежный насос;

ДД – датчик давления.

При разработки системы предполагается использование методов ТАУ, теории электропривода, математического моделирования.

#### Литература:

1. Бирюков В.В. Оборудование нефтегазовых производств / В.В.Бирюков, А.А.Штанг. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. - 514 с. (Серия "Учебники НГТУ").

2. Анализ резервов энергосбережения при управления насосными агрегатами нефтеперекачивающих станций Украины / Канюк Г.И., Андреев А.В., Мезеря А.Ю., Князева В.Н.



## **СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ** **И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

### **БАЗА НЕФТЕПРОДУКТОВ ОБЩИМ ОБЪЁМОМ ОДИН МИЛЛИОН ТОНН**

**К.С. Авдеев, В.В. Бирюков**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, [alles\\_kr@mail.ru](mailto:alles_kr@mail.ru)**

*В этой статье анализируется возможность проектирования базы нефтепродуктов общим объемом один миллион тонн.*

*This article analyzes the possibility of designing a base of petroleum products with a total volume of one million tons.*

Современные нефтебазы представляют собой сложный инженерно-технический комплекс, который включает в себя административные и технологические здания и сооружения, трубопроводы, резервуары, насосные станции, автоматизированные системы и специальное оборудование для приема, хранения, передачи нефти и нефтепродуктов. Трудоемкость задачи автоматизации обусловлена многовариантностью возможных технических решений, выбора оборудования, а так же неоднозначностью при определении уровня и степени автоматизации. При выборе оптимальных технических решений должны учитываться различные критерии, включающие в себя как характеристики объектов автоматизации, так и требования эксплуатационного и сервисного обслуживания. При этом не только в значительной степени возрастает и усложняется информационная база результатов измерений, обусловленная широким спектром и большим количеством измерительного и технологического оборудования, но и возникает еще один существенный, усложняющий разработку АСУ ТП аспект. Он связан с необходимостью создания распределенной системы управления, включающей в себя функционально независимые подсистемы (расположенные территориально на значительном расстоянии друг от друга) со своими датчиками, исполнительными механизмами, предназначенными для управления конкретной частью нефтебазы.

При проектировании и строительстве нефтебазы не обходимо оптимизировать затраты. Для этого целесообразно разработать стандартную линейку нефтебаз в зависимости от объемов резервуарных парков. Для этого территория нефтебазы должна быть разбита на зоны, в каждой из которых размещается оборудование для приёма и отпуска

одного нефтепродукта. Производительность оборудования каждой зоны, являющейся определённым модулем, может быть принята как среднестатистическая для существующих нефтебаз.

Резервуарные парки складов нефти и нефтепродуктов должны распределяться на более низких отметках земли по отношению к отметкам территории соседних населенных пунктов, предприятий, железнодорожных путей. При размещении резервуарных парков нефти и нефтепродуктов на площадках, имеющих более высокие отметки по сравнению с отметкой территории соседних населенных пунктов, должны быть предусмотрены мероприятия по предотвращению при аварии наземных резервуаров разлива нефти на территорию населенного пункта и т.д.

Оборудование стационарных насосных станций, включающих насосы с трубопроводной обвязкой, задвижки, обратные клапана, перепускные устройства, двигатели для привода насосов с пусковыми и защитными устройствами, КИП и системы управления размещаются, в зданиях, сооружаемых в соответствии с требованиями СНиП 106-79 и оборудованных средствами противопожарной защиты, вентиляцией, освещением и отоплением. Подбор насосов проводится по производительности приёмо-раздаточного устройства (ПРУ) резервуара.

Для слива нефтепродуктов при железнодорожных перевозках на нефтебазах сооружаются специальные подъездные пути. Для обеспечения благоприятных условий слива железнодорожные тупики целесообразно располагать в наиболее высоком участке территории нефтебазы. Железнодорожные пути на территории нефтебазы должны быть прямолинейными и строго горизонтальными во избежание самопроизвольного движения маршрутов при погрузке или разгрузке.

Для сотрудников нефтебазы принципиально важно наблюдать за процессами изменения параметров и состояния оборудования в реальном времени, что требует считывания данных с малым периодом времени. Усложнение стандартных алгоритмов управления технологическими процессами нефтебазы, большие потоки данных с необходимостью обеспечения межсистемного взаимодействия, совокупность разнотипных технических средств и контрольно-измерительных приборов, коммуникационных средств передачи данных в центральную систему управления и распространения их по локальной сети, является, безусловно, нетривиальной задачей.

Автоматизированная система, эксплуатируемая на нефтебазе, имеет децентрализованную территориально-распределенную структуру и предназначена для решения следующих задач:

- измерение параметров нефтепродуктов в автоматическом режиме и архивирование текущих значений;
- автоматизированный контроль и управление технологическим процессом приема, хранения и отгрузки нефтепродуктов;
- автоматизация противопожарной защиты и предотвращение образования взрывоопасной среды на объектах нефтебазы;
- мониторинг изменений параметров и состояния технологического оборудования в режиме реального времени, своевременное обнаружение аварийных ситуаций.

Чтобы предоставить возможность осуществление данных задач требуется установка нового программируемого контроллера (ПЛК), реализующего управление и контроль параметров всей системы. Благодаря установке необходимых датчиков для контроля над технологическим процессом, монтажа электроприводных задвижек, клапанов, управление, контроль и регулирование которых осуществляется программируемым логическим контроллером, возможно, добиться улучшения качества производимой продукции путем сохранения и поддержания параметров производственного процесса в рамках технологического регламента. Кроме того, автоматизация резервуарного парка позволит улучшить качество работы персонала, его защиту от опасных воздействий процесса.

Для управления установкой предлагается использование программируемого логического контроллера ОВЕН ПЛК, зарекомендовавшим себя на аналогичных нефтеопливаемых объектах. ПЛК выполняет технологическую программу, осуществляет удаленный прием значений сигналов входных каналов, выполняет диагностику состояния входных и выходных сигналов.

В результате автоматизации АСУ ТП на нефтебазе могут быть внедрены новые технологии, как на программном уровне, так и на прикладном. Это позволит обеспечить формирование полной, достоверной отчетности о наличии и движении нефтепродуктов на нефтебазе.

#### *Литература:*

1. Бирюков В.В. Оборудование нефтегазовых производств: / учебник / В.В.Бирюков, А.А.Штанг. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 514 с. (Серия «Учебники НГТУ»).
2. СНиП 2.11.03-93 Склады нефти и нефтепродуктов. Противопожарные нормы. = Warehouses for oil and oil products. Fire regulation. – Москва, 1993.

3. Шишкин Г.В. Справочник по проектированию нефтебаз. Л., Недра, 1978, 216 с.

## **ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЕЗДОВЫХ ЦИКЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПАСА ХОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ**

**Д.А. Бахолдин, Н.И. Щуров, П.А. Бахолдин**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск**

*В статье приводится сравнительный анализ методик определения запаса хода электромобиля на основе существующих ездовых циклов, а так же соответствия получаемых данных условиям реальной эксплуатации.*

*The article provides a comparative analysis of the methods of determining the drive range of an electric vehicle based on driving cycles in the world, as well as the compliance of the obtained data with the conditions of actual operation.*

В настоящее время в мире существует четыре основных методики оценки расхода топлива автомобилей с ДВС и запаса хода электромобиля. Это европейский NewEuropeanDrivingCycle (NEDC), японский Japan Cycle '08 (JS08), американский FederalTestProcedure 75 разработанный Environmental Protection Agency (EPA FTP-75) и международный Worldwide harmonized light vehicles test procedures (WLTP), [1] они моделируют движение автомобиля в городской среде и на скоростной автомагистрали.

NEDC (рисунок 1) применяется с 2000 года и рассчитывает прохождение дистанции в 11 км на протяжении 20 минут. NEDC характеризуется достаточно низкими ускорениями, 26 секунд длится разгон от 0 до 50 км/ч и 41 секунду происходит набор скорости от 0 до 70 км/ч. При измерении запаса хода не учитывается расход энергии на обогрев салона и сидений, мультимедиа, стеклоочистители и освещение так же не используются. Поэтому данный ездовой цикл нельзя считать объективным и соответствующим реальному использованию транспортного средства в современных реалиях.

JS08 (рисунок 2), в 2011 году ставший единственным для Японии. Данные измерения в большей степени моделируют езду по городу. В рамках тестовой процедуры автомобиль до 30% времени испытания может простаивать, этим и объясняется значительное повышение значения запаса хода относительно европейских и американских стандартов.

$V$ , км/ч

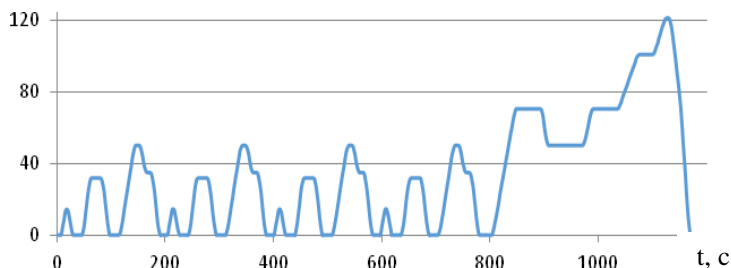


Рис. 1 – Тестовая процедура NEDC

$V$ , км/ч

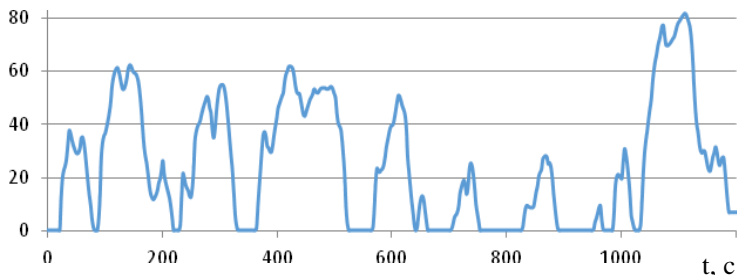


Рис. 2 – Тестовая процедура JS08

FTP-75 (рисунок 3). Характерными особенностями данного теста является высокая средняя скорость, динамичные ускорения и общая длительность. Предусматривается так же дополнительные процедуры для приближения результатов к реальным показателям:

- US06 - моделирует энергичную езду по городу. Большое количество остановок, с последующим достаточно резким набором скорости характерны для данного цикла.
- SC03 данный цикл подразумевает езду с включенным кондиционером, что безусловно сказывается на заряде аккумуляторов и, соответственно, на запасе хода.

Именно благодаря всему вышеперечисленному, FTP-75 традиционно дает наименьшие цифры запаса хода для электромобиля. Однако они и наиболее близки к истине.

Приведенные выше методики тестирования не учитывают конструктивных особенностей электромобиля, проводимые испытания аналогичны автомобилям с ДВС.

Наиболее современным на данный момент [3] является международный комплекс измерительных процедур легковых автомобилей Worldwide harmonized light vehicles test procedures (WLTP) (Рисунок 4).

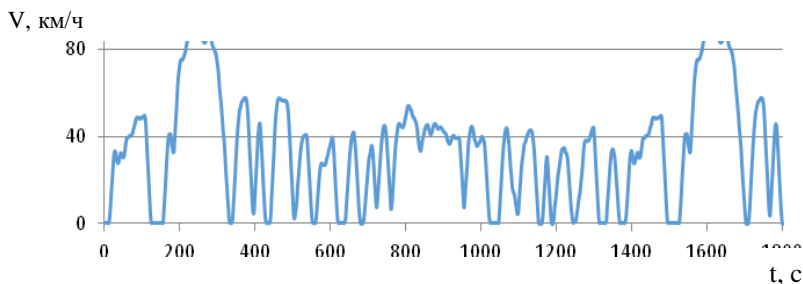


Рис. 3 – Тестовая процедура FTP-75

Разработка данного цикла началась еще в 2007 году, он должен был учесть особенности и недостатки уже существующих циклов. WLTP учитывает влияние целого ряда случайных внешних факторов [4], влияющих на точность измерений, таких как погодные условия и плотность трафика в самых разных уголках мира. WLTP — это не один измерительный цикл, а целый комплекс тестов для трех классов автомобилей полной массой до 3,5 тонн. Для каждого из классов набор тестовых процедур отличается, с ростом удельной мощности транспортного средства добавляются тесты с большей максимальной и средней скоростью.

Также особенностью данного цикла является то, что нет ни одного участка, где автомобиль движется с постоянной скоростью. В сравнении с остальными тремя измерительными циклами WLTP имеет наименьшее время остановок и самую высокую среднюю скорость — 53,8 км/ч.

В отношении электромобилей и гибридных авто предусматривается процедура подготовки накопителей энергии в виде цикла полного разряда и пополнения запаса энергии в течение 12 часов, после чего проводится тестовый заезд с последующей выдержкой продолжительностью до 120 минут и повторной зарядкой батарей. Остается открытым вопрос типа применяемой зарядной станции, максимального зарядного тока.

Кроме того, не учитывается расход энергии подогрев или охлаждение батареи до температур, пригодных к эксплуатации. При средней теплоемкости литий-ионного аккумулятора [5]  $1100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}}$ ,

перепаде температур уже в  $10^{\circ}\text{C}$  от номинальной подогрев батареи весом в **300 кг** (стандартная батарея NissanLeaf) потребует **917 Вт·ч** энергии или практически 4% от общей емкости накопителя. Такие показатели можно не учитывать при эксплуатации в теплых условиях, однако для регионов с холодным климатом потеря 5-10% заряда после каждой длительной стоянки только для подготовки батареи перед началом движения очень существенно скажется на несоответствии реальных показателей запаса хода заявленным.

V, км/ч

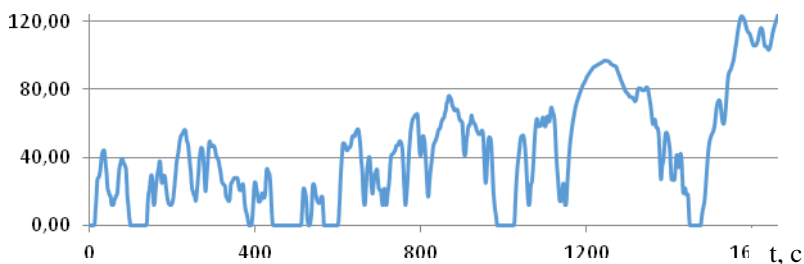


Рис. 4 – Тестовая процедура WLTP

Проведенный ретроспективный анализ позволил оценить возможность применения существующих ездовых циклов для оценки запаса хода электромобиля. Наиболее подходящим и учитывающим особенности эксплуатации современного транспорта является цикл WLTP, однако и он не учитывает и не регламентирует ряд особенностей, способных существенно сказаться на расхождении получаемых данных с реальной эксплуатацией.

#### *Литература:*

1. European Commission, White Paper, “Roadmap to a single European transport area - towards a competitive and resource efficient transport system”, Brussels, 2011, <http://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0144&from=EN>.
2. Gaseous Emissions from Light-Duty Vehicles: Moving from NEDC to the New WLTP Test Procedure Alessandro Marotta, Jelica Pavlovic, Biagio Ciuffo, Simone Serra, and Georgios Fontaras *Environmental Science & Technology* 2015 49 (14), 8315-8322 DOI: 10.1021/acs.est.5b01364
3. Biryukov V. V. The calculation features of the electrical energy storage devices parameters in transport / V. V. Biryukov, A. V. Kulekina // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk : NSTU, 2016. – Pt. 2. – P. 41-

43. - ISBN 978-1-5090-0853-7. - DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884282.1998. – 400 с.

4. Проценко Н. А., Лапшин В. Ю., Бледнова Ж. М. Расчетно-экспериментальная оценка распределения температур в случае технологических сбоев в работе литий-ионного аккумулятора космического назначения // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. №4-3.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

**П.А. Бахолдин, Н.И. Щуров, Д.А. Бахолдин  
Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск**

*В статье рассматривается создание имитационной математической модели системы упругого подвешивания транспортного средства с электромагнитным гасителем колебаний. Данная модель позволяет определить основные энергетические параметры системы в зависимости от свойств транспортного средства и качества путевой структуры.*

*The article considers the simulation mathematical model of the suspension system of a vehicle with an electromagnetic shock absorber. This model allows determining the system main energy parameters from the properties of a vehicle and quality of the track structure.*

Улучшение качества работы подвески с целью достижения плавности хода и максимальной энергоэффективности транспортного средства являются важнейшими задачами при проектировании транспортного средства. Частые разгоны и торможения, плохое состояние дорог обуславливают необходимость совершенствования устройств подвешивания и применение новых технических решений.

Существующие на сегодняшний день экспериментальные системы обеспечивают постоянное отслеживание положения подвески, каждого колеса, и при изменении нагрузки приводится в действие гидравлический цилиндр, приподнимая либо опуская колесо. Гидравлические системы, используемые в таких типах подвесок, требуют большой мощности привода (до 25 кВт), что приводит к неизбежному увеличению расхода топлива [1,2]. Кроме того, высокоточные гидравлические узлы являются дорогостоящими в производстве и обслуживании[3].



На сегодняшний день активно применяются в автомобилестроении подвески с изменяемыми характеристиками. Как правило, современные производители устанавливают на автомобиль регулируемые амортизаторы двух типов. Для первого типа характерно использование специального магнореологического масла, которое выполняет функции рабочей жидкости. Второй тип регулируемого амортизатора изменяет свои характеристики благодаря электромагнитным перепускным клапанам [4].

Однако все более широкий интерес находит электромагнитная подвеска, где роль гасителя колебаний выполняет, чаще всего, линейный электродвигатель. Такое техническое решение позволяет моментально изменять параметры жесткости подвески транспортного средства и добиться наилучших показателей плавности хода, обеспечивая при этом безопасность маневрирования [5].

Математическая модель системы управления подвеской относится к имитационным моделям и необходима для создания и упрощения физической модели. Для таких технических систем ради получения аналитической математической модели исследователь вынужден накладывать жесткие ограничения на модель и прибегать к упрощениям. При этом приходится пренебрегать некоторыми особенностями технической системы, что приводит к тому, что математическая модель перестаёт быть средством изучения сложной системы.

Система упругого подвешивания транспортного средства представляет собой сложную вибрационную систему [6], которая должна упрощаться на основе анализа свойств внутреннего функционирования системы и выбора параметров по заданным свойствам системы.

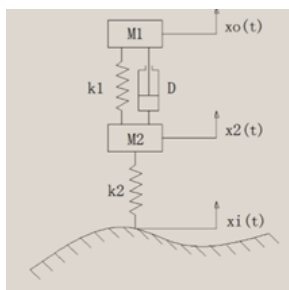


Рис. 1 Математическая модель фрагмента подвески транспортного средства

На рисунке 1 представлена модель системы подвешивания одного колеса транспортного средства, где:  $M_1$  – поддрессоренная масса,

представляет собой кузов транспортного средства,  $M_2$  – неподрессоренная масса, представляет собой ступичный узел и колесо. Шина контактирующая с дорогой эквивалентна линейной пружине, имеющей жесткость  $k_2$ . Линейный гаситель колебаний, чей средний коэффициент демпфирования  $D$ , винтовая пружина, средняя жесткость которой характеризуется  $k_1$ . Переменные  $x_0(t)$  и  $x_2(t)$  – вертикальные смещения поддрессоренных и неподрессоренных масс, соответственно, а  $x_1(t)$  – вертикальное перемещение профиля дорожного полотна.

При моделировании системы подвешивания транспортного средства входной сигнал должен соответствовать параметрам дорожного полотна. Неровности дорожного полотна имеют случайный характер от которого будет зависеть количество энергии вырабатываемое подвеской.

Многочисленные исследования показывают [7], что, когда скорость автомобиля постоянна, шероховатость дороги – это стохастический процесс, который подвергается распределению Гаусса и он не может

точно описываться математическими отношениями. Спектр мощности, выделяемой подвеской транспортного средства величина постоянная, которая соответствует определению и статистической характеристике.

В мировой практике стандартным критерием принято считать международный индекс ровности IRI (International Roughness Index).

Так как имитационное моделирование проводилось с целью оценки энергии рассеиваемой гасителем колебаний, применяется частота импульсов соответствующая скорости 40 км/ч,  $IRI = 0,5$ ц/м, что соответствует классу D – дороги с плохой ровностью.

Полученная имитационная модель системы упругого подвешивания позволяет определить зависимости получаемой при работе электромагнитного гасителя колебаний. Таким образом, модель показывает каким образом зависит энергоэффективность рассматриваемой системы как от параметров транспортного средства, так и от качества дорожного покрытия и скорости движения транспортного средства.

#### *Литература:*

1. R. A. Williams, Electronically Controlled Automotive Suspensions, Computing & Control Engineering Journal, Volume: 5, Issue: 3, 1994, pp. 143-148.
2. Biryukov V. V. The calculation features of the electrical energy storage devices parameters in transport / V. V. Biryukov, A. V. Kulekina // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc.,

Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk : NSTU, 2016. – Pt. 2. – P. 41-43. - ISBN 978-1-5090-0853-7. - DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884282.

3. Kulekina A. V. Combined braking system for hybrid vehicle / A. V. Kulekina, P. A. Bakholdin, N. I. Shchurov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2017. – Vol. 87. - Art. 032020 (6 p.). - DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032020.

4. Barak P., Passive versus active and semi-active suspension from theory to application in north American industry, SAE Technical Paper 922140, 1992.

5. Website:<http://www.automobilesreview.com/autonews/maserati-quattroporte-sport-gt-s-2/13824/>.

6. X. Li; K. Tian; H. Li; D. Chen; L. Li; T. Meng; and C. Zhang, Active Suspensions Based on the Principles of Giant Magnetostriction, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008, pp. 1-4.

7. Mohammad Ali Nekoui , Parisa Hadavi, “Optimal control of an active suspension system” 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE PEMC 2010.

## **ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ СЕТЬ ГОРОДА ИСКИТИМ**

**А.В. Бердюгина, В.В. Бирюков**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [lulula1one8@gmail.com](mailto:lulula1one8@gmail.com)**

*В статье рассматривается газораспределительная сеть низкого давления для города Искитим. Рассмотрению подлежат факторы, влияющие на выбор схемы газораспределительной сети, с учётом технико-экономических расчётов. Представлены расчётные данные по годовому потреблению газа в населённом пункте, а также удельный часовой расход газа на одного человека.*

*The article is about the gas distribution network of low pressure for the city Iskitim. Consideration should be given to factors affecting the choice of the gas distribution network, taking into account technical and economic calculations. The calculated data on the annual gas consumption in the locality, as well as the unit hourly gas consumption for one person are presented.*

Газовая распределительная сеть представляет собой систему трубопроводов и оборудования, служащих для транспорта и распределения газа внутри города. Современные городские распределительные системы представляют собой сложный комплекс сооружений, который состоит из следующих основных элементов: газовых сетей низкого, среднего и высокого давления, газораспределительных станций (ГРС), контрольно-регуляторных пунктов, газорегуляторных пунктов и установок (ГРП и ГРУ). Одним из

важнейших элементов городских систем газоснабжения являются газовые сети. Они берут своё начало от ГРС и служат для снабжения газом бытовых, коммунально-бытовых и промышленных потребителей.

Для населенных пунктов численностью до 60 тысяч человек рекомендована одноступенчатая система газоснабжения [4], т.е. система газоснабжения, при которой распределение и подача газа потребителям осуществляются по газопроводам только одного давления, как правило, низкого (рабочее давление газа в пределах 0,005 МПа).

Согласно данным за 2018 год население города Искитим составляет 57 тысяч человек, а общая площадь данного населенного пункта равна примерно 30 квадратным километрам. Конфигурация города – прямоугольная, а разделение на кварталы осуществляется взаимно перпендикулярными улицами.

Система газоснабжения должна обеспечивать надёжную, бесперебойную подачу газа потребителям, быть безопасной в эксплуатации, простой и удобной в обслуживании, должна предусматривать возможность отключения отдельных её элементов или участков газопроводов для производства ремонтных или аварийных работ.

Исходя из конфигурации города, количества жителей, условий эксплуатации газораспределительной сети, примем одноступенчатую систему газоснабжения, общая протяженность которой, согласно расчётам, по смешанной схеме составляет 37 километров. Смешанные схемы наиболее надёжны в эксплуатации и с меньшими капитальными затратами.

Годовое потребление газа населённым пунктом является основой для составления проекта газоснабжения. Расчёт годового потребления ведётся в соответствии с нормами потребления и численностью населения по отдельным видам нагрузок. Все виды городского потребления газа можно сгруппировать следующим образом:

- а) бытовое потребление (потребление газа в квартирах);
- б) потребление в коммунальных и общественных предприятиях;
- в) потребление на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение зданий;

г) промышленное потребление.

Бытовое потребление газа в год найдём по формуле:

где  $Q_1$  - норма расхода теплоты потребителями, имеющими газовые плиты без централизованного горячего водоснабжения (ЦГВ),  $Q_1 = 6000$  МДж/(чел. год) [3];  $P_1$  - процент охвата газоснабжением потребителей, имеющих газовые плиты без ЦГВ,  $P_1 = 0,1$ ;  $Q_2$  - норма

расхода теплоты потребителями, имеющими газовые плиты и проточные газовые водонагреватели при отсутствии ЦГВ,  $Q_2 = 10\,000$  МДж/(чел. год) [3];  $P_2$  - процент охвата газоснабжением потребителей, имеющих газовые плиты и проточные газовые водонагреватели,  $P_2 = 0,3$ ;  $Q_3$  - норма расхода теплоты потребителями, имеющими газовые плиты и ЦГВ,  $= 4100$  МДж/(чел. год) [3];  $P_3$  - процент охвата газоснабжением потребителей, имеющих газовые плиты и ЦГВ,  $P_3 = 0,6$ ;  $P_0$  - процент охвата газоснабжением бытовых потребителей,  $P_0 = 1$ ; - высшая теплота сгорания природного газа, (принимая метан (CH<sub>4</sub>) в качестве основного компонента),  $= 39,82$  МДж/м<sup>3</sup>.

Таким образом, получим  $= 8,675 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/год. В жилые здания газ поступает по разветвлённым газопроводам от городской газораспределительной сети. Эти газопроводы состоят из абонентских ответвлений, подводящих газ к зданию, и внутридомовых газопроводов, которые транспортируют газ внутри здания и распределяют его между отдельными газовыми приборами.

Результаты расчётов по остальным показателям сведены в таблицу.

Таблица 1 – Годовое потребление газа

Р№	Показатель	Численное значение, м <sup>3</sup> /год
П1	Годовой расход газа на здравоохранение	$8,875 \cdot 10^4$
22	Годовой расход газа мелкими потребителями*	$1,735 \cdot 10^6$
33	Годовой расход газа на отопление	$1,253 \cdot 10^7$
4	Годовой расход газа на вентиляцию	$7,751 \cdot 10^5$
55	Годовой расход газа на ГВС	$2,677 \cdot 10^7$

\* - к мелким потребителям относят отдельные жилые здания, отдельные стояки жилых зданий и отдельные мелкие коммунальные, общественные и прочие потребители (детские сады, ясли, школы, кинотеатры, гостиницы и т.д.)

В связи с тем, что большинство приведённых факторов не поддаётся точному учёту, потребление газа рассчитывают по средним нормам. Расход газа на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение жилых и общественных зданий определяют по удельным нормам теплопотребления.

Расчетный часовой расход газа на бытовые, коммунальные и промышленные нужды определяется с учётом эмпирического коэффициента  $K$  :

где  $K = 0,467 \cdot 10^{-3}$ . Коэффициент  $K$  индивидуален для каждого из показателей.

В результате вычислений имеем  $= 4,05 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{час}$ . Полученные результаты расчётов максимального часового расхода газа по всем показателям представлены в таблице 2.

**Таблица 2 – Максимальный часовой расход газа**

Р№	Показатель	Численное значение, $\text{м}^3/\text{час}$
П1	Часовой расход газа на здравоохранение	25,357
22	Часовой расход газа мелкими потребителями	714,247
33	Часовой расход газа на отопление	$5,126 \cdot 10^3$
Р4	Часовой расход газа на вентиляцию	$4,101 \cdot 10^2$
П5	Часовой расход газа на ГВС	$4,391 \cdot 10^3$

Режим расхода газа городом зависит от режима отдельных категорий потребителей и их удельного веса в общем потреблении. В нашем случае, согласно расчёту, удельный часовой расход газа на одного человека  $e = 0,084 \text{ м}^3/(\text{чел. час})$ .

Неравномерность потребления оказывает большое влияние на экономические показатели систем газоснабжения. За счёт неполного использования мощностей газовых промыслов растёт себестоимость газа. Покрыть неравномерность потребления за счёт изменения подачи газа с промысла не представляется возможным и целесообразным. Поэтому появляется необходимость строительства подземных газохранилищ. Подземное хранение газа является наиболее совершенным способом выравнивания его потребления по сезонам за счёт больших объёмов газа, которые удаётся закачивать в хранилища.

При проектировании системы газоснабжения учитывают целый ряд факторов. Выбор той или иной схемы газораспределения в первую очередь определяется на основе технико-экономических расчётов. Такие ключевые факторы как размеры города с особенностями его планировки, плотность населения и размеры нагрузок потребителей газа и были учтены в данной работе.

#### *Литература:*

1. Бирюков, В. В. Оборудование нефтегазовых производств: учебник / В.В. Бирюков, А.А. Штанг.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 514 с. (Серия «Учебники НГТУ»).

2. Ионин, А.А. Газоснабжение: учебник для вузов / А.А. Ионин. – Изд. 3-е, доп. – М.: Стройиздат, 1989. – 439 с.
3. Шанин Б.В., Кочев А.Г. Газоснабжение района города: метод. указания к курсовому проекту / Б.В. Шанин, А.Г. Кочев – Горький: 1988.
4. Скафтынов Н.А. Основы газоснабжения: учебник / Н.А. Скафтынов - Л.: изд. Недра 2001. - 339с.

## **СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПУТЕУКЛАДЧИКА В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ B&RAUTOMATIONSTUDIO**

**Э.С. Бондарев, Н.А. Маслов**

**Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск, [bondareff.edik@yandex.ru](mailto:bondareff.edik@yandex.ru)**

*Для повышения эффективности инженерной подготовки студентов факультета УТТК СГУПС по теме «Пневмооборудование и пневмосистемы путевых машин», а также по рабочей профессии «Машинист укладочного крана», в программной среде B&R Automation Studio создана имитационная модель пневматической тормозной системы УК-25/9-18. Модель имеет визуальное и параметрическое функционирование, облегчающее обучаемому изучение устройства и работы пневмосистемы в характерных режимах и внештатных ситуациях при эксплуатации путеукладчика.*

*To increase the efficiency of engineering training of students of the faculty of MTTK STU on the topic “Pneumatic equipment and pneumatic systems of track machines”, as well as in the working profession “Tracklayer driver”, in the B&R Automation Studio software environment, a simulation model of the UK-25/9-18 pneumatic brake system was created. The model has visual and parametric functioning, which facilitates the learner to study the device and the operation of the pneumatic system in typical modes and emergency situations during operation of the tracklayer.*

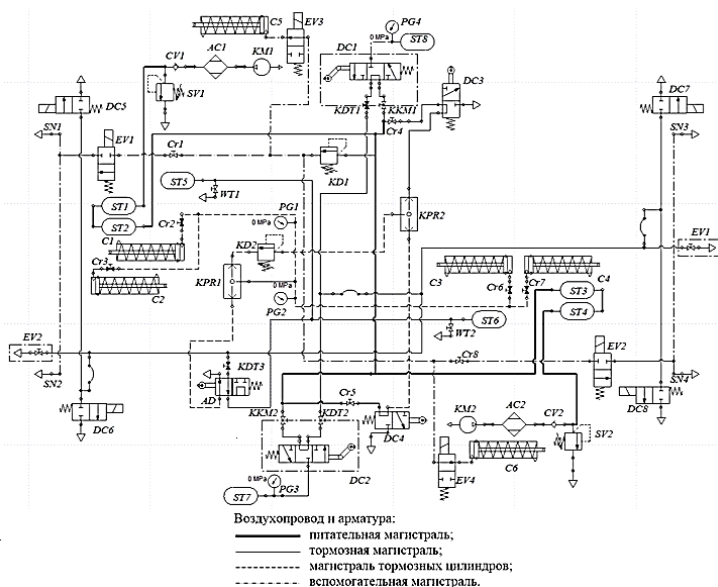
Цель работы: повышение эффективности инженерной подготовки студентов факультета УТТК СГУПС по теме «Пневмооборудование и пневмосистемы путевых машин».

Задачи работы: создать имитационную модель пневматической системы путеукладчика УК-25/9-18 в программной среде B&R Automation Studio; с использованием имитационной модели разработать методику проведения лабораторной работы; на имитационной модели апробировать методику выполнения лабораторной работы.

Научная новизна работы заключается в создании эффективного средства обучения по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства».

В период 2016-2019 годов по гранту ОАО «РЖД» был реализован проект «Совершенствование методики обучения по рабочей профессии «Машинист путеукладочного крана», в рамках которого разработаны электронный учебник и трехмерный тренажер-симулятор «Управление, техническое обслуживание и эксплуатация путеукладочного крана». Актуальным продолжением работы является имитационное моделирование гидравлических, пневматических и электрических систем УК-25/9-18 в программной среде B&R Automation Studio [1].

В программной среде B&R Automation Studio была создана виртуальная модель пневматической тормозной системы путеукладчика (рисунок 1).



AC1, AC2 – сборники-воздухоочистители; AD –  
 воздухораспределитель; C1-C4 – цилиндры тормозные № 507Б;  
 C5, C6 – пневмоцилиндры включения лебедки перетяжки пакетов  
 звеньев рельсошпальной решетки; CV1, CV2 – клапаны № Э-155;  
 Cr1-Cr8 – краны № 383;  
 DC1, DC2 – краны машиниста № 394; DC3, DC4 – краны  
 вспомогательного тормоза № 4БК; DC5-DC8 – краны экстренного  
 торможения № 163; EV1-EV4 – вентили электропневматические ВВ-32;



К1-К8 – краны № 383; КD1, КD2 – клапаны № 3МД; КDT1-КDT3 – краны № 377; КKM1, КKM2 – краны комбинированные № 383; КM1, КM2 – компрессоры; КPR1, КPR2 – клапаны № 3 ПК; SN1-SN4 – форсунки песочницы; ST1-ST4 – резервуары главные; ST5, ST6 – резервуары запасные P7-38; ST7-ST8 – резервуары уравнильные; SV1, SV2 – клапаны предохранительные № Э-216; WT1, WT2 – клапаны выпускные № 31Б

Рис. 1 – Имитационная модель пневматической системы укладочного крана УК-25/9-18

Разработана методика проведения лабораторной работы, целью которой является изучение устройства и работы пневматической тормозной системы путеукладчика. Для успешного выполнения обучающемуся необходимо решить следующие задачи:

- ознакомиться с принципиальной схемой тормозной пневматической системы путеукладчика;
- изучить устройство и работу элементов тормозной системы укладочного крана;
- измерить давления в магистралях пневмосистемы и на входе в пневмоцилиндр;
- определить частоту вращения вала компрессора;
- вычислить теоретическую скорость штока и силу на штоке пневмоцилиндра при выдвижении.

Разработанная модель пневматической тормозной системы путеукладчика имеет множество преимуществ (рисунок 2).



Рис. 2 – Преимущества использования имитационной модели

Имитационную модель можно применять при решении инженерных задач, добавляя датчики контроля параметров пневмосистемы.

Результаты работы внедрены в СГУПС на кафедре «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» и представлены на региональной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири» (получен диплом II степени), а также на 2-ой Международной научно-практической конференции «Электронные образовательные технологии: решения, проблемы, перспективы». Кроме того, результаты работы опубликованы в статьях [3-8].

#### *Литература:*

1. Маслов Н. А., Бондарев Э. С. Применение имитационного моделирования при подготовке по рабочей профессии машинист укладочного крана // Электронные образовательные технологии: решения, проблемы, перспективы: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. (Новосибирск, 23-24 апреля 2019 г.) – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2019. С. 142-146.
2. Бондарев Э. С. Совершенствования методики обучения рабочей профессии «Машинист укладочного крана» // Фундаментальные и прикладные исследования: сборник научных трудов IV Всероссийской (национальной) конференции молодых ученых / под ред. Е. Г. Гуровой, С. В. Макарова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. С. 11-12.
3. Бондарев Э. С., Маслов Н. А. Электронный курс для подготовки операторов укладочных кранов // Интеллектуальный потенциал Сибири: сб. науч. тр. 26-й Регион. науч. конф. (22-24 мая 2018 г., г. Новосибирск): в 2 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Ч. 2. С. 137-139.
4. Бондарев Э. С., Ермакова Д. В., Шаповалов А. В., Маслов Н. А. Разработка модулей тренажера машиниста укладочного крана // Интеллектуальный потенциал Сибири: сб. науч. тр. 26-й Регион. науч. конф. (22-24 мая 2018 г., г. Новосибирск): в 2 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Ч. 2. С. 275-277.
5. Абрамов А. Д., Задорин Г. П., Манакон А. Л., Маслов Н. А. Повышение эффективности подготовки кадров для ОАО «РЖД» // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 3. С. 25-32.
6. Маслов Н. А. Система обучения машинистов укладочного крана УК-25/9-18 // Энергосберегающие машины, оборудование и экологически чистые технологии в дорожной и строительной отраслях БГТУ им. В. Г. Шухова: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. (Белгород, 20-21 сентября 2018 г.). Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. С. 138-146.

7. Абрамов А. Д., Задорин Г. П., Манаков А. Л., Маслов Н. А. Подготовка инженеров-инноваторов для ОАО «РЖД» // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 3. С. 17-20.

8. Абрамов А. Д., Задорин Г. П., Манаков А. Л., Маслов Н. А. Повышение эффективности подготовки инженеров-инноваторов для ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2019. № 5. С. 29-34.

## **ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД СПОРТИВНОГО ЭЛЕКТРОКАРА MARUSSIA**

**А.Н. Бублик, Е.А. Спиридонов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, bublik17alex@mail.ru**

*В данной статье рассматриваются коллекторный двигатель постоянного тока независимого возбуждения и синхронный двигатель, а также системы управления ими. Производится анализ наиболее эффективного для спорткара тягового электропривода.*

*This article discusses a DC motor of independent excitation and a synchronous motor, as well as their control systems. An analysis is made of the most efficient traction electric drive for a sports car.*

В связи с решением проблем в таких важных на сегодняшний день аспектах, как энергоэффективность и экологичность, на замену автомобилям с двигателем внутреннего сгорания приходят электромобили на различных тяговых электродвигателях.

Существует множество целей, для которых может использоваться электромобиль, и, соответственно, в зависимости от них, машины могут использовать различные вариации электропривода (как тягового электродвигателя (ТЭД), так и его системы управления). Чтобы выбрать наиболее рациональный вариант электропривода, разберём некоторые моменты каждого из его видов.

Электропривод постоянного тока с коллекторным двигателем на транспорте может похвастаться простотой, дешевизной и компактностью системы управления (в сравнении с системой управления переменного тока), а также малыми габаритами и меньшей массой электродвигателя (именно поэтому такой привод на транспорте чаще всего используется). ДПТ (двигатель постоянного тока) имеет хорошие пусковые и регулировочные свойства: позволяют плавно и в широком диапазоне регулировать частоту вращения якоря простыми способами; могут развить большой пусковой момент при относительно малом токе. Имеется возможность развить частоту вращения более 3000

об/мин, имеют чуть больший КПД, чем синхронные двигатели при мощности до 100 кВт (для ДПТ около 92%, для синхронных машин – 80...90%). Однако, такой привод имеет несколько важных проблем: электродвигатель постоянного тока относительно дорогой по себестоимости (в сравнении с асинхронным); ДПТ имеет большие сложности в изготовлении (в сравнении с тем же асинхронным); пониженная надёжность машины и необходимость частого технического обслуживания, в основном обусловленного износом графитовых коллекторных щёток и самого коллектора (щёточный контакт вызывает около 25% отказов в работе электродвигателя); привод постоянного тока имеет низкую помехоустойчивость; щёточный узел вызывает радиопомехи, а также пожароопасен.

Электропривод переменного тока с асинхронным и синхронным двигателями имеет также свои плюсы и минусы. Система управления на переменном токе, хоть и является более дорогостоящей, но да сегодня позволяет точно и плавно регулировать двигатели на переменном токе. При этом, с ростом электроники, в будущем возможно значительно снизить стоимость такой системы. Преимущества асинхронного двигателя (АД): более дешёвый, как по себестоимости, так и по обслуживанию; из-за отсутствия щёточного узла более надёжен; более простой в конструктивном исполнении и изготовлении, чем ДПТ или синхронная машина; имеется большее число способов регулирования, чем у синхронной машины; возможность реверса сменой двух питающих фаз.

В сравнении с АД, синхронная машина имеет более высокий КПД; частота вращения вала двигателя постоянна при изменении нагрузки (если нагрузка не превосходит возможности машины); массо-габаритные показатели меньше; меньше чувствительность к колебаниям напряжения (максимальный момент пропорционален напряжению, а не его квадрату, как в асинхронном).

В результате произведённого анализа, можно произвести некоторые выводы, по отношению к вопросу выбора электропривода для спорткара Marussia: применение привода на переменном токе является более дорогим и громоздким по системе управления в сравнении с постоянным током, однако, вместе с тем в нём будет использоваться асинхронный электродвигатель, который позволит удешевить полную стоимость (учитывая вышеперечисленные плюсы). Такой вариант позволит иметь, возможно, и не самый мощный спорткар, но он будет более доступен в аспекте стоимости.

### *Литература:*

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н., Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — 3-е изд. — М.: Издательский центр «Академия», 2007. — 575 с.
2. Соколовский Г. Г., Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. — М.: «Академия», 2006.
3. Чиликин М. Г., Сандлер А. С., Общий курс электропривода. — 6-е изд. — М.: Энергоиздат, 1981. — 576 с.

## **ГАЗОСНАБЖЕНИЕ ПОСЕЛКА КОЧЕНЕВО GAS SUPPLY OF THE SETTLEMENT KOCHENEVO**

**М.С. Бурлягина, В.В. Бирюков**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, marinka9880@gmail.com**

*В статье разрабатывается оптимальный вариант схемы газораспределительной сети поселка Коченево. В основу положена идея разработки наиболее эффективной сети распределения газа по потребителям, с возможностью локализации аварийных участков, также учитывалось расположение муниципальных объектов (больниц, школ и т.д.). Также при анализе учитывается количество необходимого оборудования.*

*In article the optimum variant of the scheme of a gas distribution network of the settlement Kochenevo is developed. It is based on the idea of developing the most efficient gas distribution network for consumers, with the possibility of localization of emergency sectors, also taking into account the location of municipal facilities (hospitals, schools, etc.). Also, the analysis takes into account the amount of equipment required.*

Добыча газа определяет масштабы и темпы развития газовой промышленности и газоснабжающих систем. Россия является мировым лидером по добыче газа. Большой рост добычи газа существенно изменил топливный баланс страны. Так в 1983 г. газ занимал 27% в общем топливном балансе, однако уже к 2007 году доля газа в стране составила более 70%.

Автоматизация и совершенствование технологических процессов вызывает необходимость повышения качества расходомерного энергоносителя. Оптимальным, по сравнению с другими видами топлива, является природный газ[1]. Применение его для промышленных установок значительно улучшает условия труда и повышает рост его производительности. Применение природного газа в промышленности позволяет реализовать принципиально новые

экономически эффективные технологические процессы. Помимо этого, применение газа в качестве топлива позволяет значительно повысить условия быта населения, также улучшить воздух в городах и промышленных центрах.

Газовая промышленность является одной из более растущих и развивающихся отраслей народного хозяйства. В связи с большим ростом газопотребления появляется необходимость в увеличении добычи газа, которая осуществляется путем роста объемов использования его в городах, которые уже газифицированы, и газификации новых городов и населенных пунктов[2].

Распределительные сети газоснабжения являются сложными многокольцевыми системами, экономичное проектирование которых осуществляется на базе современных методов оптимизации с учетом вероятностного характера функционирования и обеспечения высокой надежности подачи газа потребителям.

Задачей технико-экономической оптимизации является определение таких параметров систем, которые для достижения заданного полезного результата требуют наименьших затрат материальных, энергетических, денежных или других ресурсов. Поскольку дополнительные трудности вносят особенности конфигурации населенного пункта, его расположение на местности, селитебная площадь, наличие озер, рек, оврагов и т.д.

При разработке системы газоснабжение поселка Коченево, который имеет круговую конфигурацию, представленную на рисунке 1(б). На нем виден явно выраженный центр, соединённый с периферийными участками дорогами, расположи нами диаметрально, которые разделяют поселок на кварталы, что характерно для круговой конфигурации населенного пункта.

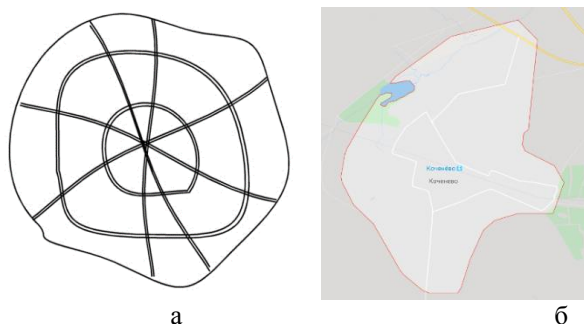


Рис. 1 – Классическая конфигурация населенного пункта и конфигурация поселка Коченево.

В соответствии с планировкой для варианта с круговой конфигурацией распределительная сеть может быть выполнена по кольцевой, концентрической, радиальной и смешанной схемам (см. рис. 2).

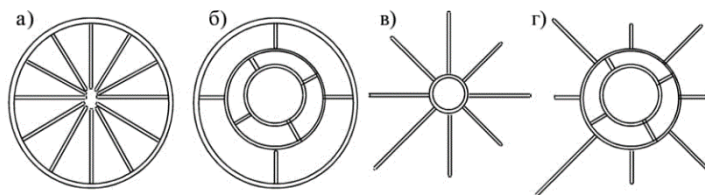


Рис. 2 – Кольцевая, концентрическая, радиальная и смешанная схемы газораспределительных сетей

При разработке сетей газоснабжения мы должны учитывать расположение муниципально важных объектов (больниц, школ, детских садов и домов культуры), чтобы в случае отказов мы могли локализовать аварийный участок для ремонта, и газоснабжение осуществлялось бесперебойно по другой ветке. Для этого в схеме устанавливают клапаны, которые отсекают поврежденные участки.

Численность населения поселка Коченево составляет 17000. Для населенных пунктов численностью до 50 тысяч человек рекомендована одноступенчатая система газоснабжения, т.е. система газоснабжения, при которой распределение и подача газа потребителям осуществляются по газопроводам только одного давления, как правило, низкого (рабочее давление газа в пределах 0,005 МПа).

Площадь поселка приблизительно равна  $20\text{ км}^2$ , расстояние от центра до периферии равно 2.5 км. В нем имеется 1 больниц (на 170 коек), 3 школы (около 360 учащихся), 3 детских сада (240 мест) и 2 дома культуры. Нормативный годовой расход газа на жилые дома составляет 4000 МДж (на одного человека (имеется плита и централизованное горячее водоснабжение)), на больницу 12400 МДж (1 койка), детские сады и школы 10400 МДж (1 место) и дом культуры 1052200 МДж.

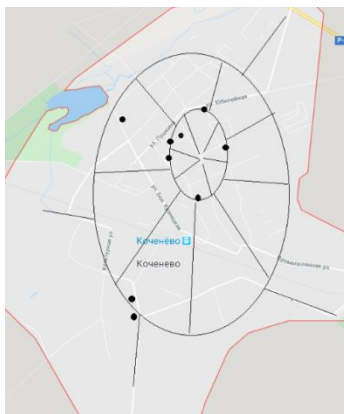
Поскольку население города относительно небольшое нет необходимости в газовых хранилищах, достаточно будет резервуаров[3]. Среднестатистическое число резервуаров для городов населением от 15 000 до 20 000 составляет от 4 до 5. Количество клапанов необходимых в системе составило 23 шт.

**Таблица 1 – Общий годовой расход газа**

Потребители газа	Количество потребителей	Норма расхода газа в год, МДж	Общее количество потребляемой энергии, МДж
Жилые дома	17000	4000	68 000 000
Больницы	170	12400	2 108 000
Школы	360	10400	3 744 000
Детские сады	240	10400	2 496 000
Дома культуры	2	1052200	2 104 400

Из таблицы 1 слетает, что общее количество газа необходимое в год составляет 75 082 800 МДж энергии.

Учитывая все вышеперечисленные факторы оптимальной схемой является смешанная. Она позволяет даже при отказе какого-либо из участков продолжать поставлять газ потребителям. Окончательный вид системы газоснабжения поселка Коченево представлен на рисунке 3 (кружками обозначены муниципально важные объекты, линиями – газораспределительные каналы).



**Рис. 3 – Схема газораспределительной сети поселка Коченево.**

*Литература:*

1. Ионин, А.А. Газоснабжение: учебник / А.А. Ионин. – 4-е изд. – М.: Изд-во Стройиздат, 1989. – 439 с.
2. Голик В.Г. Газоснабжение населенного пункта: учебное пособие / В.Г. Голик. – Саратов: Изд-во СГТУ, 1995. – 68 с.



3. Бирюков, В. В. Оборудование нефтегазовых производств: учебник / В.В. Бирюков, А.А. Штанг. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 514с. (Серия «Учебники НГТУ»).

## **ГИБРИДНАЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКА ШКОЛЬНОГО АВТОБУСА**

**С.А. Внуков, В.В. Бирюков**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск**

В этой статье анализируется возможность создания гибридного привода для школьного автобуса с целью сохранения надёжности конструкции, а также повышения экологического уровня.

В современном мире невозможно представить устойчивое развитие крупных городов без эффективной транспортной системы. Для России транспортная проблема является особенно острой и обусловлена огромным количеством автомобилей на дорогах.

Самым эффективным на сегодняшний день решением по экономии топлива и снижению уровня выброса вредных веществ является применение в маршрутных автобусах комбинированной (гибридной) энергетической системы – гибридного привода. Под гибридной энергоустановкой принято понимать наличие на транспортном средстве двух источников энергии – двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и накопителя энергии. Наиболее экономически и технически целесообразным являются дизель-электрические энергоустановки. [1].

Как следует из таблицы 1, достоинства нового вида транспорта преобладают над его недостатками.

**Таблица 1 – Преимущества и недостатки гибридных автобусов**

Преимущества	Недостатки
Низкий уровень шума и вибрации	Высокая стоимость
Плавность хода	
Безопасная конструкция кузова	
Экологическая чистота	Высокая технологическая сложность
Экономичная эксплуатация	
Долгий срок службы	

Перевод электрического транспорта на газовое топливо позволит в несколько раз снизить выбросы в атмосферу канцерогенных веществ.

Сократится расход нефтепродуктов, а также значительно сократятся затраты на охрану окружающей среды и воздушного бассейна.

Наиболее реальной альтернативой бензину и дизельному топливу является сниженный или сжатый газ. Его запасы в несколько раз превосходят запасы нефти, технология переработки проще, чем технология извлечения бензина из нефти. Кроме того, для перехода на газообразное топливо практически не требуется вносить конструктивные изменения в двигателе внутреннего сгорания. Концентрации оксидов углерода и азота в выхлопе мотора, работающего на газе, значительно ниже, чем в выхлопе бензинового мотора, даже снабжённого самым современным трёхкомпонентным каталитическим нейтрализатором с замкнутым контуром. [2]. Наконец, газовое топливо практически не содержит соединений свинца и серы.

Газ хорошо смешивается с воздухом и равномерно распределяется по цилиндрам двигателя, что гарантирует его практически полное сгорание и высокую топливную экономичность.

Эффект от внедрения гибридных автобусов для перевозчиков благоприятен и очевиден:

- экономия расхода топлива 25-30 %: гибридный автобус потребляет на 30 % меньше топлива, что позволяет экономить до 10000 литров дизельного топлива в год;
- возможность рекуперации электроэнергии;
- оптимальные режимы работы ДВС;
- повышение надёжности и ресурса работы автобуса;
- сокращение затрат на обслуживание;
- значительное снижение выбросов вредных веществ в атмосферу: на 26 тонн меньше диоксида углерода, чем у аналогичных автобусов со стандартным двигателем, при наличии идентичной нагрузки;
- повышение комфорта перевозок по таким критериям, как шум, вибрация, плавность хода, вместимость автобуса;
- сокращение интервалов движения.

Подведём итоги. Интенсивная автомобилизация была вызвана потребностью в скоростном и комфортном передвижении по городу, которое не смог обеспечить общественный транспорт.

Наряду с продолжительностью поездок, решающим фактором в выборе способа передвижения является качество, предлагаемое местным общественным транспортом. В первую очередь это сокращение интервалов и повышение надёжности перевозок.

Гибридные автобусы полностью соответствуют всем современным требованиям безопасности, комфорта и экономичности.

*Литература:*

1. Бирюков В. В. Конструкция и расчёт электрического оборудования электроподвижного состава: учебник / В. В. Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 328 с.: ил. (Серия «Учебники НГТУ»).
2. Бирюков В. В. Оборудование нефтегазовых производств: учебник / В. В. Бирюков, А. А. Штанг. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 480 с.: ил. (Серия «Учебники НГТУ»).

## **АВТОНОМНОЕ ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО НА ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ**

**М.Э. Гусева, К.И. Куликов, Н.И. Щуров**  
**Новосибирский государственный технический университет**  
**Г. Новосибирск, ritagkor@gmail.com**

*Повышение эффективности систем электроснабжения городского транспорта имеет весьма существенное значение, поскольку электрический транспорт является одним из крупнейших потребителей электрической энергии. Наиболее перспективными решениями, направленными на повышение эффективности электроснабжения транспорта являются создание и внедрение современных технологий в области электроподвижного состава, способствующих, в частности, снижению расхода электроэнергии, затрачиваемой на движение транспортных средств.*

*Так же в настоящее время в атмосфере Земли наблюдается превышение допустимой концентрации CO<sub>2</sub>, что негативно сказывается на экологии. В этой связи необходимо проведение исследований, направленных на разработку тягового привода, обеспечивающего требуемые скоростные транспортные характеристики при минимальном воздействии на среду обитания человека.*

*Improving the efficiency of urban transport power supply systems is very important, since electric transport is one of the largest consumers of electric energy. The most promising solutions aimed at improving the efficiency of power supply of transport are the creation and introduction of modern technologies in the field of electric rolling stock, contributing, in particular, to reduce the consumption of electricity spent on the movement of vehicles.*

*CO<sub>2</sub> CO<sub>2</sub>, which has a negative impact on the environment. In this regard, it is necessary to conduct research aimed at developing a traction drive that provides the required high-speed transport characteristics with minimal impact on the human environment.*

Электрохимические источники питания используются сегодня повсеместно и имеют отличительные характеристики: ёмкость, или количество хранимой энергии, а также мощность, или возможность быстро отдавать или накапливать эту энергию (разрядка/зарядка на

высоких токах). К тому же, для элементов питания очень важны безопасность и долговечность.

Причина, по которой суперконденсаторы были вытеснены аккумуляторными батареями (АКБ), была связана со значительно большими значениями электроэнергии, которые они способны накапливать. Другой причиной является то, что при разряде напряжение на выходе АКБ меняется очень слабо, так что стабилизатор напряжения или не требуется или же может иметь очень простую конструкцию.

Главное различие между суперконденсаторами и АКБ заключается в том, что суперконденсаторы непосредственно хранят электрический заряд, а АКБ превращают электрическую энергию в химическую, запасают ее, а потом обратно преобразуют химическую энергию в электрическую.

При преобразованиях энергии часть ее теряется. Поэтому даже у АКБ КПД составляет не более 90%, в то время, как у суперконденсаторов он может достигать 99%. Интенсивность химических реакций зависит от температуры, поэтому на морозе АКБ работают заметно хуже, чем при комнатной температуре. Кроме этого, химические реакции в АКБ не полностью обратимы. Отсюда малое количество циклов заряда-разряда, а также «эффект памяти».

Зачастую АКБ и суперконденсатор используются совместно. Задача суперконденсатора состоит в том, чтобы взять на себя питание стартера в эти первые секунды, когда ток резко возрастает. Ну а дальше, когда суперконденсатор разрядится, питать стартер будет уже аккумулятор, но вдвое меньшим током.

Как видно (Рис. 1), в начале ток резко возрастает до максимума (ток короткого замыкания стартера, когда ротор еще неподвижен, в нагрузке присутствует лишь активное электрическое сопротивление статора), потом где-то за 0.5 секунды потребляемый ток снижается вдвое (стартер начал проворачиваться, в нагрузку добавилось реактивное сопротивление) и дальше остается на этом устоявшемся значении, пока двигатель не заведется.

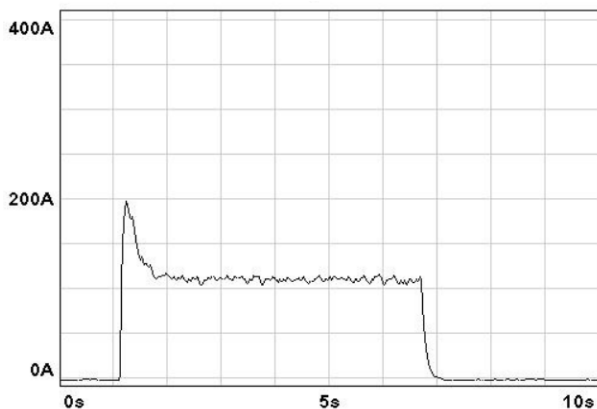


Рис. 1 – Стартовые токи

В настоящее время в атмосфере Земли наблюдается превышение допустимой концентрации  $\text{CO}_2$ , что негативно сказывается на экологии. В этой связи необходимо проведение исследований, направленных на разработку тягового привода, обеспечивающего требуемые скоростные транспортные характеристики при минимальном воздействии на среду обитания человека.

Одним из возможных решений этой задачи может стать использование топливных элементов (ТЭ) – устройств прямого электрохимического преобразования энергии. В основе работы ТЭ лежит химическая реакция разложения молекулярного водорода на электроны и протоны. Электроны, двигаясь во внешней цепи к катоду, формируют постоянный электрический ток. Протоны также движутся к катоду, но преодолевая электролит. В дальнейшем протоны окисляются кислородом окружающего воздуха с выделением водяного пара и теплоты, что и является продуктом реакции, протекающей в ТЭ. Данная технология способна обеспечивать электричеством потребителей практически непрерывно, т.к. количество вырабатываемого тока напрямую зависит от стабильности подачи топлива. К тому же, в отличие от ДВС, топливный элемент не имеет движущихся частей, поэтому протекающие в нем процессы не подчиняются закону Карно, что обуславливает теоретический КПД в диапазоне 70...80 % [1, 2].

Существуют различные типы ТЭ. Их обычно классифицируют по используемому топливу, рабочему давлению и температуре, что определяет область применения, КПД, вид топлива и тип катализатора, используемый в ТЭ. В настоящее время известно несколько типов ТЭ, различающихся составом используемого электролита:

- топливные элементы с протонообменной мембраной (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC);
- твердооксидные топливные элементы (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC);
- топливные элементы на основе ортофосфорной (фосфорной) кислоты (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC);
- топливные элементы на основе расплавленного карбоната (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC).
- 

**Таблица 1 – Характеристики топливных элементов**

Характеристика	Тип топливного элемента	
	С протонообменной мембраной	Твердооксидный
Температура, °С	70...90	1073...1273
Применимое топливо	технический водород	синтез-газ, метан
Материал катода	углерод+платина	лантан, стронций, оксиды марганца
Материал анода	углерод/платина	никель/оксиды стронция
Плотность тока, кА/м <sup>2</sup>	3...5	2...4
Ресурс, ч	20000	60000
Напряжение, В	0,75...0,8	0,75...0,8

Анализ существующих исследований [3, 4] по части комбинирования топливных элементов и электрохимических НЭ показывают перспективность данного направления. Проектируемые системы управления [8] комбинированными энергоустановками предусматривают использование ТЭ в качестве источника питания большой энергоемкости, обеспечивающего длительный режим движения транспорта с установившейся скоростью. Аккумуляторная батарея/суперконденсаторная батарея рассматривается в качестве источника питания пиковой мощности, способного работать в форсированных режимах, обеспечивая должную динамику разгона и прием энергии рекуперативного торможения. Важным преимуществом такого подхода является возможность подзаряда источника питания пиковой мощности. Это возможно, например, в периоды остановок, или когда требуемая входная мощность привода меньше, чем номинальная мощность батареи топливных элементов. В таком случае батарея топливных элементов работает с номинальной мощностью, часть

которой расходуется на движение транспортного средства, а часть – на подзарядку источника питания пиковой мощности.

*Литература:*

1. П. В. Беляев и Д. А. Подберезкин, “Применение топливных элементов с протонообменной мембраной,” Вестник науки и образования, no. 5 (17), pp. 15-18, 2016.
2. М. О. Галлямов и А. Р. Хохлов, “Топливные элементы с полимерной мембраной: материалы к курсу по основам топливных элементов,” Физический факультет МГУ, pp. 5-15, 2014.
3. F. Ciancetta et al., “Minimum supercapacitor choice to provide current step variation in FC PEM,” in Electrical Machines and Power Electronics, 2007 © IEEE. doi: 10.1109/ACEMP.2007.4510484.
4. F. Ciancetta et al., “Energy storage system comparison for mini electrical bus,” in Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2016 © IEEE. doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525909.

## **АККУМУЛЯТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**

**К.В. Коваленко, Е.А. Спиридонов**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**г. Новосибирск, [kirill259@bk.ru](mailto:kirill259@bk.ru)**

*В данной статье сравниваются некоторые виды аккумуляторных батарей, устанавливаемых на электромобилях, анализируется наиболее рациональный вариант.*

*This article compares some types of batteries that are installed on electric vehicles and analyzes the most rational choice.*

Электромобили приобретают все большую популярность, и сегодня в ассортименте многих известных автопроизводителей присутствуют автомобили с электродвигателем.

Технико-экономические параметры электромобилей, прежде всего, зависят от характеристик применяемых аккумуляторных батарей. На электромобили устанавливаются различные по типу аккумуляторные батареи.[1] Основным на данный момент типом являются литий-ионные батареи. Последнее десятилетие этот тип постоянно развивался в автомобильном направлении, поэтому большинство современных и предстоящих электрических автомобилей используют в своей схеме именно их. Эта технология позволяет создавать аккумуляторные ячейки с впечатляющей удельной энергией более 200 Втч/кг, хорошей

удельной мощностью и эффективностью заряда/разряда от 80 до 90%. Например, такая батарея, состоящая из 192 ячеек, установлена на электромобиле NissanLeaf, масса батареи около 270 кг, а емкость составляет 24 кВт·ч. По результатам тестов энергопотребление составляет 765 кДж/км (21 кВт·ч/100 км), что эквивалентно расходу около 2,4 л / 100 км. Также литий-ионные аккумуляторы установлены на новом электрическом суперкаре PorscheTaycan, где емкость составляет 93,4 кВт·ч, расход энергии в среднем 25 кВт·ч/100 км.

Долговечность батареи на текущий момент с учетом постепенного падения остаточной емкости не ниже 70% составляет более 4 000 циклов зарядки-разрядки, в среднем служит около 8 - 10 лет. Последнее позволяет утверждать, что сейчас главная претензия к тяговым батареям - их стоимость. В США проводились тесты срока службы батареи Tesla Roadster (2008). Было обнаружено, что после 160 000 км, батарея по-прежнему оставалась вместимостью от 80 до 85 %, причем независимо от климатической зоны[3].

Никель-металлогидридный аккумулятор является старейшим типом современных батарей, всё еще используется в электрокарах, хотя литий-ионные аккумуляторы постепенно начали вытеснять их, повсюду виден переход на более современную систему хранения энергии. В отличие от литий-ионных, никель-металлогидридные аккумуляторы используют водород, никель и титан или подобный ему металл для хранения энергии. Это и делает их гораздо более дешевыми в производстве по сравнению с первым типом аккумуляторов.[2]

Основным препятствием для дальнейшего использования NiMH является их низкая плотность энергии, которая почти на 40% меньше, чем у их основного конкурента. Их определенно можно сделать по емкости такими же, как и литий-ионные батареи, но только путем увеличения их размеров.

Существует еще несколько типов аккумуляторов, но на данный момент развивается именно литий-ионное направление. Много работы и исследований проводится для совершенствования литий-ионных батарей в лабораториях. Оксид лития-ванадия уже используется в прототипе Subaru G4e, удваивая плотность энергии. На данный момент это самая перспективная технология аккумуляторов для электромобилей.

В заключении необходимо отметить, несмотря на то, что существует множество видов батарей, все они имеют свои недостатки, срок их службы зависит от условий эксплуатации, в том числе от окружающей



температуры, характеристики некоторых видов ухудшаются в независимости от циклов зарядки.

*Литература:*

1. Ставров О. А., Электромобили. – М.: Транспорт, 1968. – 104 с.
2. Рыбкина Е.А., Рынок электромобилей: вчера, сегодня, завтра. – М.: Изд. дом МЭИ, 2016. – 415
3. Кашкаров А.П., Современные электромобили. Устройство, отличия. – М.: ДМК-Пресс, 2018. – 92 с.

## **ТРАМВАЙ ПОВЫШЕННОЙ ВМЕСТИМОСТИ**

**А.А. Колодинская, В.В. Бирюков**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, kolodinskaya.2016@stud.nstu.ru**

*В публикации излагается решение проблемы загруженности дорог с помощью городского электрического транспорта, а именно трамвая повышенной вместимости.*

*The publication outlines a solution to the problem of congestion with the help of urban electric vehicles, namely a tram with increased capacity.*

Мобильность всё более явно становится одним из основных признаков современного общества. Жизнь человека, особенно городского сопровождается ежедневными перемещениями на значительные расстояния. По результатам опроса, проведенного на сайте среди автолюбителей, было выяснено, что в случае невозможности использования личного автомобиля 70 процентов проголосовавших пересели бы на общественный транспорт, что еще раз доказывает актуальность общественного транспорта в современном обществе.

Одним из экологически и экономически выгодных видов транспорта является трамвай. Основное отличие в применении трамвая от остального общественного транспорта заключается в том, что у него есть, как правило, выделенная полоса движения, выезд на которую остального транспорта ограничен физическим барьером (столбики и пр.). В тех случаях, когда такой обособленной полосы нет, например, в центре города, в силу вступают правила дорожного движения, которые запрещают, за некоторыми исключениями выезд на трамвайные пути.

Автомобилизация населения городов привела к такой «болезни» транспортных магистралей, как пробки на дорогах не только в часы утреннего и вечернего пиков, но и в дневное время. Согласно

статистике среднее наполнение легковых автомобилей, участвующих в движении, составляет 1,2 человека. В то же время вместимость традиционного однокузовного трамвая составляет в зависимости от наполнения до 130...150 пассажиров, т.е. на два порядка больше, чем у среднестатистического автомобиля. Поэтому использование трамвая в мегаполисах оправдано и актуально. Не следует забывать и об экологичности трамвая в сравнении с автомобилем.

Возрастание численности населения крупных городов приводит к тому, что увеличивается транспортная подвижность населения, и провозная способность однокузовного трамвая не удовлетворяет требованиям возрастающего пассажиропотока. Решение задачи увеличения вместимости возможно двумя путями: использованием трамвайных поездов (так называемая система многих единиц) и применение шарнирно сочленённых кузовов. Первый вариант в силу ряда причин даёт временное решение проблемы, т.к. по условиям безопасности движения возможно соединение только двух однокузовных вагонов. В настоящее время наряду с однокузовными выпускаются и шарнирно сочленённые, состоящие из двух, трёх и более секций. Длины головной и промежуточных секций меньше, чем длина однокузовного трамвая, что обеспечивает их более высокую маневренность и вписывание в кривые на узких улицах старых городов (см. рис.). Кроме того, секционирование кузова даёт возможность оперативного изменения состава трамвайного поезда, что актуально при изменении пассажиропотока в течение суток, повышая тем самым эффективность его использования [1].

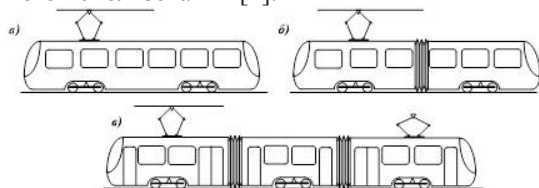


Рис.1 – Варианты секционирования кузова трамвая

Предварительные расчёты показывают, что вместимость шарнирно сочленённого кузова трамвайного вагона может возрасти до 350...400 пассажиров, что позволит использовать его не только в качестве подвозящего транспорта к станциям метрополитена и электропоездам железнодорожных линий, но и в качестве основного транспорта при формировании транспортной сети между районами города [2].

Актуальной в настоящее время становится задача объединения транспортных сетей наземного и подземного транспорта с целью

осуществления беспересадочных поездок пассажиров, как в пределах одного города, так и в пределах агломераций. Применительно к трамваю это прежде всего касается объединения с линиями метрополитена и пригородных электропоездов. Положительный опыт ряда стран, в том числе и России, показал перспективность такого решения транспортного обслуживания населения. Этому в значительной мере способствует примерно одинаковый уровень питающего напряжения систем электроснабжения метрополитена и трамвая.

#### *Литература:*

1. *Бирюков В.В.* Конструкция и расчёт механического оборудования электроподвижного состава: учебник / В.В.Бирюков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – 492 с. (Серия «Учебники НГТУ»).
2. *Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А.* Теория городских пассажирских перевозок: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 535 с., ил.

## **ЭЛЕКТРОПОГРУЗЧИК С ТЯГОВОЙ СИСТЕМОЙ НА БАЗЕ МОТОР-КОЛЕСА**

**А.С. Кузьмин, В.В. Бирюков**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск**

В данной статье рассматривается применение электромотор-колес для погрузчика.

Одним из широко распространенных в настоящее время разгрузо-погрузочных устройств товаров на небольшие расстояния (производственные помещения, торговые площадки, крупные магазины и т.д.) являются погрузчики, они могут иметь привод на базе двигателя внутреннего сгорания и электрический, последние обладают несомненными преимуществами в плане экологической чистоты поскольку при их работе не происходит загрязнение. Основным недостатком предлагаемых на рынке электропогрузчиков - ограниченное время работы. Это ключевой показатель, который формируется из множества факторов: большая масса электрокара, трудность и время заряда аккумуляторных батарей и др. В свою очередь, этот показатель влечет за собой повышение эксплуатационных издержек, снижение общего КПД системы. Решение данной задачи способно значительно

повысить эффективность работы предприятия, что может быть достигнуто за счет снижения затрат на обслуживание транспортного средства, повышения времени его автономной работы и определения оптимального варианта грузоподъемности.

Данное исследование направлена на создания и внедрения в различных складских, производственных предприятиях, а также аэропортах, вокзалах и т.д. экологически чистых, энергоэффективных, компактных электропогрузчиков необходимой грузоподъемности. Исследования в данной работе позволяют решать задачу оптимизации времени автономной работы, снижения затрат на обслуживание и повышение ресурса работы источника энергии (аккумуляторной батареи) по сравнению с существующими на рынке прототипами.

Есть различные типы компоновки электропривода, одно из них мотор-колесо. Мотор-колесо – агрегат, в котором объединены электродвигатель, силовая передача, собственно колесо и тормозное устройство. Вращение на внутренний зубчатый венец ведущего колеса передаётся от электродвигателя через редуктор. Мотор-колесо получает электроэнергию от генератора, соединённого с двигателем внутреннего сгорания (обычно на самосвалах особо большой грузоподъёмности) или от контактной сети.

Электромотор-колесо (мотор-колесо) является исполнительным механизмом системы тягового электропривода пневмоколесной транспортной машины. Мотор-колесо осуществляет преобразование электрической энергии, вырабатываемой двигатель-генератором, в механическую энергию, реализуемую при движении машины

Мотор-колесо является агрегатом, объединяющим в себе все элементы исполнительного механизма:

- электрический двигатель;
- механическая передача, включающая в себя редуктор, механизм сочленения вала электродвигателя с ведущим звеном редуктора, а также (в отдельных образцах) механизм, осуществляющий переключение передач и сцепление с приводом;
- колесо, состоящее из шины с ободом и ступицей или только с ободом;
- тормозной механизм с соответствующим электроприводом, который может осуществлять торможение электромотор-колеса механическим путём;
- элементы подвески колеса.

Главной особенностью конструкции мотор-колеса является довольно рациональное распределение его элементов, в особенности, размещение двигателя частично или полностью внутри обода колеса, а также

значительное уменьшение количества и размеров деталей механической передачи.

В последнее время применение мотор-колес в различных отраслях техники, а особенно, на транспортных и специализированных машинах значительно расширяется. Это можно объяснить тем, что использование мотор-колес раскрывает новые технические возможности при создании колесного транспорта принципиально новой конструкции, для которых трансмиссия в виде индивидуального электрического привода ведущих колес является самой целесообразной или вообще единственно возможной.

Благодаря спроектированной индивидуальной системе управления электропогрузчик становится более маневренным в сравнении с классическим исполнением электропривода.

На основе результатов производится сравнение технико-экономических показателей погрузчиков с традиционным электроприводом и на основе электромотор-колес, для выявления наиболее лучшего варианта.

#### *Литература:*

1. Бирюков В.В. Тяговый электрический привод: учеб. пособие / В.В.Бирюков, Е.Г.Порсев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 314 с.
2. Бирюков В.В. Автономный электрический Транспорт: учебник / В.В.Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 302 с.: ил. (Серия «Учебники НГТУ»).
3. Яковлев А.И. Конструкция и расчет электромотор-колес. – М.: «Машиностроение», 1970 – 240 с.
4. Типы электроприводов колес // Устройство автомобиля. Режим доступа: <http://ustroistvo-avtomobilya.ru/transmissiya/typy-e-lektroprivodov-koles/> (дата обращения: 7.10.2019)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТЬ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ТЯГОВОЙ СЕТИ**

**К.С. Линник, Л.А. Нейман**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [linnkin17@gmail.com](mailto:linnkin17@gmail.com)**

*Представлены результаты исследования электромагнитной совместимости выпрямительного агрегата, содержащего преобразователь и*

*выпрямитель, и тяговой сети. Приведены результаты сравнительного анализа гармонических составляющих в кривой напряжения на выходе преобразователя при моделировании с данными эксперимента.*

*The results of the research of electromagnetic compatibility of a rectifier unit (a converter and a rectifier) with an electric-traction network are presented. The results of a comparative analysis of the harmonic components in the voltage curve at the output of the converter during simulation with experimental data are presented.*

Под электромагнитной совместимостью, в общем случае, понимают способность основных функциональных элементов (источников, преобразователей и потребителей электроэнергии) работать совместно таким образом, чтобы дестабилизирующие факторы, возникающие в работе, не приводили к недопустимому снижению, прежде всего, качества и потерь электроэнергии.

Нормальное функционирование технических средств обеспечивается при установленных стандартом уровнях электромагнитной совместимости [1].

Однако, с ростом использования на тяговых подстанциях электрического транспорта различных преобразователей, входящих в состав выпрямительных агрегатов, проблема электромагнитной совместимости не перестает быть актуальной.

Принцип работы выпрямительного агрегата неблагоприятно влияет на питающую сеть и потребителей электрической энергии (подвижные составы). Это приводит к скачкообразным изменениям напряжения и тока на входе и выходе преобразователей электроэнергии. Искажение формы кривых токов и напряжений на входе и выходе преобразователя обусловлено принципом формирования выходного напряжения и входного тока за счет поочередной работы полупроводниковых вентилей. При этом возникает несинусоидальность кривых токов и напряжений, как на входе, так и на выходе преобразователя, которые распространяются в тяговой сети[2].

Целью работы является создание модели, учитывающей физические процессы, протекающие в выпрямительном агрегате тяговой подстанции.

На рис. 1 приведена структурная схема тяговой подстанции 10кВ, которая содержит питающую сеть, распределительное устройство переменного тока 10 кВ, выпрямительные агрегаты, распределительное устройство 600 В и фидеры контактной сети, а также трансформаторы собственных нужд, фидеры собственных нужд и прочую нагрузку.

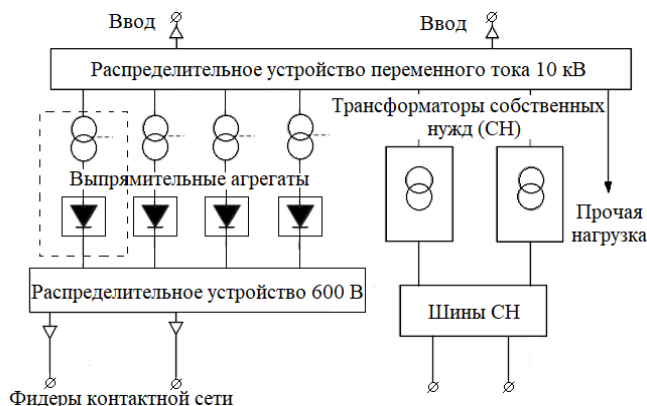


Рис.1 – Структурная схема тяговой подстанции 10кВ

На рис. 2 представлена полученная по результатам обработки экспериментальных данных кривая напряжения на выходе выпрямительного агрегата на интервале  $t=0.6$  с. в сетях тяговой электростанции ГЭТ с помощью прибора “Fluke1760”.

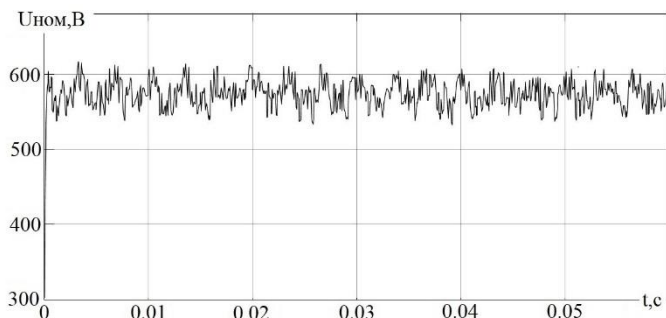


Рис. 2 – Экспериментальная кривая напряжения на выходе выпрямителя

Анализ полученных результатов показал, что отклонения фазных и межфазных напряжений выше допустимых пределов ГОСТ-32144-2013 [1]. Отклонения частоты не превышают установленных норм, коэффициенты несинусоидальности напряжения выше нормы. В кривой напряжения на выходе выпрямителя отклонения по характеристикам несинусоидальности и несимметрии превышают на 10%, что

свидетельствует о проявлении дестабилизирующих факторов, нарушающих электромагнитную совместимость.

В пакете визуального моделирования Simulink в MATLAB создана модель с параметрами электрической схемы замещения, соответствующими эксперименту. Работа созданной модели представлена на рис. 3 кривой напряжения на выходе выпрямителя.

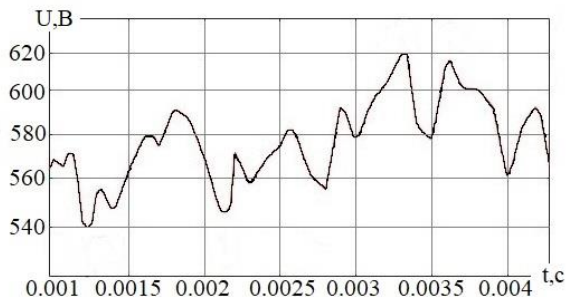


Рис. 3 – Расчетная кривая напряжения на выходе выпрямителя

Из представленной кривой на рис. 3 видно, что имеются искажения формы напряжения на выходе выпрямителя, обуславливающие несинусоидальность кривой напряжения, распространяющейся в тяговую сеть.

Гармонический состав выходного напряжения показан на рис.4. Результаты гармонического состава кривой выходного напряжения представлены на рис.4: для кривой, полученной экспериментально – красная линия, для кривой напряжения, полученной по результатам моделирования – темная линия. В спектре присутствуют нечетные гармоники, среди которых доминирует 5-я гармоника (45.2% в модели и 44.7% в эксперименте). Остальные гармоники расположены по убыванию: 7-я гармоника – 35.4% и 29.3%, 9-я гармоника – 14.7% и 10.4, 11-я – 6.2% и 5.8%, 13-я –16.6% и 12.8% относительно основной гармоники. Все значения гармонических составляющих в кривых напряжения, как экспериментальной, так и расчетной, превышают регламентирующие допустимые значения [1].



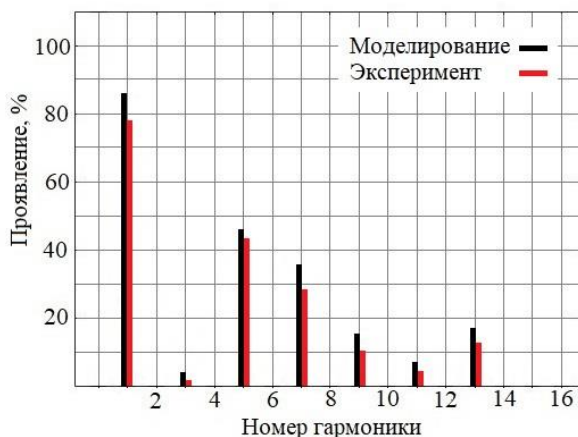


Рис.4 – Сравнение спектра гармоник выходного напряжения ВА в экспериментальной кривой напряжения и по результатам моделирование

Полученный в данной работе гармонический состав кривой напряжения на выходе выпрямителя в целом соответствует экспериментальным данным. Погрешность находится в пределах допустимых для инженерных расчетов. Следовательно, данные возможности созданной модели подходят для дальнейшего анализа электромагнитной совместимости выпрямительного агрегата и тяговой сети.

#### *Литература:*

1. ГОСТ-32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01.
2. Овсянников А.Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебник / А.Г. Овсянников, Р.К. Борисов – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. -196 с.

## ГИБРИДНАЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКА ДРЕЗИНЫ

**А.Н. Новоселов, В.В. Бирюков**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск**

*Анализируется возможность создания гибридной энергоустановки для дрезины с целью уменьшения топливных затрат, а также снижения выброса вредных веществ в окружающую среду.*

Так как прогресс не стоит на месте, и использование железных дорог становится все более и более актуальнее (к примеру в Китае все железные дороги уже электрифицированы и использование высокоскоростных поездов там считается обыденным делом), то и проверка состояния железнодорожного полотна является важнейшим признаком.

В данном случае одним из простых способов решения данных проблем становится использование дрезины для диагностики и контроля путевой структуры.

Дрезина — самоходное транспортное средство для железнодорожного полотна, используемая для перевозки материалов, оборудования, инструментов, а также для транспортировки прицепных платформ и служебных поездок ж.-д. персонала при обслуживании, текущем содержании, ремонте, строительстве железных дорог, монтаже контактной сети и т. п.

Одним из преимуществ этого транспортного средства является удобство доставки необходимых материалов и инструмента для проверки состояния и ремонта железнодорожного полотна. Дрезина могут быть оборудованы монтажными вышками, грузоподъемными кранами, измерительными приборами (для проведения ремонтных и монтажных работ).

Исполнение грузового варианта такой дрезины представлено на рисунке 1.

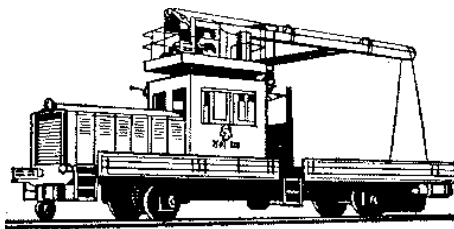


Рис. 1. Грузовая автодрезина

На дрезинах в зависимости от грузоподъёмности устанавливаются бензиновые мотоциклетный двигатели внутреннего сгорания (мотодрезина) или более мощные автомобильный двигатель (автодрезина).

Использование подобных тепловых двигателей сопровождается выхлопом большого количества отработанных газов и, как следствие, к загрязнению окружающей среды. Для снижения или полного исключения загазованности окружающей среды необходимо установить энергетическую установку для питания тягового электрического привода, передающего крутящий момент на каждую из осей дрезина. В качестве тяговых электродвигателей могут использоваться электрические машины, как постоянного, так и переменного тока. Питание их может осуществляться от различных источников, в качестве которых выступают обычно электрохимические аккумуляторы, топливные элементы, либо комбинированные энергетические установки (КЭУ), сочетающие в себе различные преобразователи, начиная от тепловых машин, и кончая конденсаторными установками.

Одним из вариантов КЭУ является установка, где в качестве первоисточника энергии выступает тепловой двигатель, вращающий тяговый генератор, от которого и получают питание тяговые электродвигатели. Применение тяговых электродвигателей позволяет отказаться от использования тяговой передачи довольно громоздкой коробки передач, служащей для согласования частоты вращения коленчатого вала теплового двигателя с частотой вращения колёс в функции скорости. Это, во-первых, позволяет сохранить тяговое усилие на колёсах, что очень важно при движении на подъёме, а во-вторых, добиться работы теплового двигателя при минимальном расходе топлива, что снизит выброс в атмосферу его продуктов сгорания.

Кроме того, торможение будет осуществляться электрическими машинами, переведёнными в генераторный режим, что позволяет возвратить часть электрической энергии, потраченной на разгон, для повторного использования, сократив тем самым расход топлива тепловой машины. Механические тормоза при этом сохраняют своё назначение при подтормаживании на малых скоростях, либо на стоянках.

Для сохранения электрической энергии, полученной в результате электрического (рекуперативного) торможения в силовой схеме электрических цепей дрезина следует предусмотреть накопитель, в качестве которого обычно используется аккумулятор или ионистор (конденсатор двойного электрического слоя). Структурная схема такого привода дрезина приведена на рисунке 2.



Рис. 2 - Структурная схема КЭУ с тепловым двигателем

Альтернативным вариантом данного схемного решения является КЭУ, в которой тепловой двигатель и тяговый генератор могут быть заменены на батарею топливных элементов, как это показано на рисунках 3,4,5.

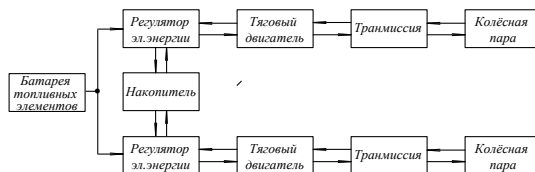


Рис. 3 - Структурная схема КЭУ с топливными элементами

Еще одной реальной альтернативой бензину и дизельному топливу является сниженный или сжатый газ. Газ хорошо смешивается с воздухом и равномерно распределяется по цилиндрам двигателя, что гарантирует его практически полное сгорание и высокую топливную экономичность.

Компания Toyota в ноябре этого года презентовала новейший прототип автомобиля работающего на водородном генераторе.

Еще одним из альтернативных вариантов снабжения привода транспорта является установка водородного электрохимического генератора в качестве энергоносителя. Установка такого оборудования позволит полностью избавиться от выхлопов, что опять же способствует решению экологической проблемы.

Железнодорожные двигательные установки должны развивать довольно большую мощность, тогда как компактность железнодорожных двигательных установок менее важна чем на автомобильном транспорте.



Рис.4 - Структурная схема КЭУ с электрохимическим генератором



Рис. 5 - Схема КЭУ с электрохимическим генератором

Различные варианты исполнения КЭУ, приведённые в таблице имеют свои преимущества и недостатки.

Виды КЭУ		
Тепловой двигатель + Тяговый двигатель	ЭХГ + Тяговый двигатель	Батарея топливных элементов + тяговый двигатель

Преимущества :

- Низкий уровень шума и вибраций
- Экологическая чистота
- Экономичная эксплуатация
- Долгий срок службы
- Плавность хода
- Экономия расхода топлива
- Уменьшение затрат на ремонт и обслуживание

Недостатки:

- Высокая технологическая сложность
- Высокая стоимость
- Трудности хранения водорода (в случае ЭХГ)

Окончательный вариант КЭУ следует принять после проведения дополнительного экономического обоснования, в результате которого должны определиться капитальные затраты и эксплуатационные расходы на изготовление и содержание КЭУ.

*Литература:*

1. Бирюков В.В. Тяговый электрический привод: учеб. пособие / В.В.Бирюков, Е.Г.Порсев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 314 с.
2. Бирюков В.В. Автономный электрический транспорт: учебник / В.В.Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 302 с.: ил. (Серия «Учебники НГТУ»).
3. Бирюков В.В. Конструкция и расчёт электрического оборудования электроподвижного состава / В.В.Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 328 с.: (Серия «Учебники НГТУ»).

## **ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ВОЖДЕНИЯ СОЕДИНЕННЫХ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ**

**Л.Е. Пилипушка, В.С. Рябов, Е.В. Климова**

**Сибирский государственный университет путей сообщения  
г. Новосибирск, kate-kitton@yandex.ru**

*В исследовании рассмотрены две технологии вождения соединенных тяжеловесных поездов, формируемых по классической технологии, предполагающей их физическую сцепку, а также виртуальную сцепку. Выполнен расчёт затрат времени на пропуск поезда по участку. Произведена оценка наличной пропускной и провозной способностей.*

*The study considers two technologies of driving connected heavy trains formed by the classical technology, assuming their physical coupling, as well as virtual coupling. The calculation of time spent on the passage of the train on the site. The assessment of cash capacity and carrying capacity.*

В настоящее время на железнодорожном транспорте активно применяются и прорабатываются меры по увеличению норм массы и длины грузовых поездов, позволяющие повысить пропускную и провозную способности линий. Одной из таких мер является формирование соединённых тяжеловесных грузовых поездов.

В соответствии с ПТЭ соединенным называется грузовой поезд, составленный из двух и более сцепленных между собой грузовых поездов с действующими локомотивами в голове каждого поезда. Тяжеловесным называется грузовой поезд, масса которого превышает графиковую на 100 тонн и более [1].

Технология формирования соединённого тяжеловесного поезда заключается в следующем: на техническую станцию прибывают два грузовых поезда графической массы, где происходит их обработка и пополнение группой из  $n$ -вагонов для увеличения массы каждого поезда до тяжеловесного. Далее поезда объединяют либо на длинных станционных путях, либо на главных путях перегона, и соединённый поезд отправляется до станции расформирования.

Для достижения наибольшей эффективности от применения технологии обращения соединённых поездов операции по их формированию необходимо производить на длинных станционных путях. Однако, сооружение таких путей требует значительных капитальных вложений. Поэтому, в большинстве случаев, на сети железных дорог соединение поездов происходит на главных путях перегона, что в свою очередь вызывает задержки отправления попутных грузовых поездов, тем самым эффективность от применения рассматриваемой технологии снижается [2].

Стоит также отметить, что в настоящее время повышение норм массы и длины грузовых поездов происходит, в основном, за счёт увеличения коэффициента использования мощности локомотива и не сопровождается мероприятиями по увеличению его тяговых возможностей. Это приводит к предельным режимам работы, при которых возрастают риски, связанные с выходом из строя оборудования электровозов. В результате, вместо планируемого повышения пропускной способности, могут возникнуть её потери, а также дополнительные расходы, связанные с ремонтом электрического и механического оборудования подвижного состава [3].

Развитие технологий интервального регулирования движения поездов в рамках проекта «Цифровая железная дорога» позволит не только сократить межпоездные интервалы на линиях с высоким коэффициентом заполнения пропускной способности, но и реализовать технологию «Виртуальная сцепка» для вождения соединённых поездов (Рисунок 1).



Рисунок 1 - Движение поезда, соединённого с помощью технологии «Виртуальная сцепка»

Следование двух попутных поездов, соединённых с помощью виртуальной сцепки, происходит не по сигналам трёхзначной автоблокировки (АБ), а посредством радиосвязи, установленной между локомотивами так, что режим ведения второго поезда в составе

соединённого зависит от режима ведения впереди следующего поезда. В данном случае эффективность будет достигнута не только из-за уменьшения интервала между попутно следующими поездами, но и за счёт сокращения затрат времени на формирование и расформирование соединённого поезда, так как исключаются операции по соединению автосцепок и объединению тормозных магистралей двух грузовых поездов в составе соединённого поезда. Исследования Российских ученых показывают, что при применении технологии виртуальной сцепки время на формирование и расформирование соединённых поездов сокращается до 50 %. Кроме этого исключается потребность в длинных станционных путях, т.к. появляется возможность формирования соединённого поезда на путях последовательно расположенных парков станции [4].

Для сравнения технологий физической и виртуальной сцепки для формирования соединённых поездов произведён анализ затрат времени на пропуск поезда по участку, а также выполнен расчёт наличной пропускной способности рассматриваемого участка [6,7].

Затраты времени на пропуск соединённого поезда составили: для технологии физической сцепки 797 и 799 минут при формировании и расформировании соединённого поезда на длинных путях станций и путях перегона соответственно; аналогично для технологии виртуальной сцепки 774 и 775 минут.

Результаты расчёта наличной пропускной и провозной способностей участка представлены в таблице 1.

**Таблица 1 - Результаты расчёта пропускной и провозной способностей участка**

Место формирования соединённого поезда	Пути станции		Пути перегона	
	Физическая	Виртуальная	Физическая	Виртуальная
Наличная пропускная способность, поездов в сутки	197	191	132	152
Наличная провозная способность, млн. тонн брутто в год	490,4	476,7	341,1	387,1

Из таблицы видно, что наиболее эффективной является технология физической сцепки при формировании соединённого поезда на длинных станционных путях. Однако, в случае формирования такого поезда на главных путях перегона (при отсутствии длинных путей на станциях) возникнут задержки отправления попутных грузовых поездов, что



приведёт к снижению пропускной и провозной способностей участка. В этом случае эффективным является вариант, который предусматривает формирование соединённых поездов с помощью технологии виртуальной сцепки, т.к. затраты времени на операции соединения в этом случае сократятся. Кроме этого, при виртуальной сцепке снижается нагрузка локомотива, следовательно, и вероятность выхода из строя его электрического и механического оборудования.

#### *Литература:*

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утв. Минтранс России 21.12.10: введ. 22.09.11 [Текст]. – М., 2011. – 255 с.
2. Климова Е.В. Исследование сфер эффективности применения технологии пропуска соединённых и тяжеловесных поездов // Вестник СГУПС. – 2017. – № 4. – С. 66 – 73.
3. Мугинштейн Л. А. Тяговое обеспечение тяжеловесного движения и управление поездами повышенной массы с использованием автоматизированных систем // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». – 2016. - №6 – С. 13 – 14.
4. Розенберг Е. Н. Глобальные тренды развития интеллектуальных транспортных систем[Текст] / Розенберг Е. Н., Коровин А. С. // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». – 2018. - №4 – С. 10 – 13.
5. Климова Е.В. Методика оценки эффективности формирования и пропуска соединённых грузовых поездов на участках и полигонах железных дорог // Вестник СГУПС. – Новосибирск, 2015. – № 4. – С. 19 – 23.
6. Пилипушка Л.Е., Рябов В.С. Оценка применения технологии виртуальной сцепки при вождении соединённых тяжеловесных поездов // Молодежь. Инновации. Технологии: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции г. Новосибирск, 23-25 апреля 2019. – Новосибирск, 2019. с. 196 - 197.
7. Пилипушка Л.Е., Рябов В.С., Климова Е.В. Использование технологии виртуальной сцепки грузовых поездов для усиления провозной способности участка // сборник научных трудов V Всероссийской (национальной) научной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования», г. Новосибирск, 2019.

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Д.С. Прокопенко, А.А. Штанг**

**Новосибирский государственный технический университет,  
shtang@corp.nstu.ru**

*Рассмотрены способы энергоснабжения удаленных от энергосети промышленных комплексов и объектов временного назначения. Описывается схема гибридной электростанции с использованием дизель-генераторной установки, устройств получения и преобразования электроэнергии из возобновляемых источников и накопителей электроэнергии. Синтезирован алгоритм управления комбинированной энергетической установкой.*

Существуют два основных способа энергоснабжения потребителей в отдаленных районах - это строительство и развитие существующей электросети и развертывание систем с использованием дизель-генераторных установок (ДГУ). Осуществление электроснабжения посредством линий электропередач (ЛЭП) в некоторых случаях может быть нерентабельно, поэтому единственным доступным вариантом для удаленной электрификации остается получение энергии непосредственно на месте путем использования углеводородных ресурсов [1].

Однако в условиях работы с переменным графиком нагрузки на электросеть и необходимостью обеспечения бесперебойной работы установки применение ДГУ без системы накопителей энергии сопровождается неэффективным использованием ресурса агрегатов, работой в режимах с низким КПД и высокими показателями удельного расхода топлива, что способствует обострению, в том числе и экологических проблем.

Применение комбинированной схемы с использованием дизель-генераторной установки, устройств получения и преобразования электроэнергии из возобновляемых источников и накопителей электроэнергии (НЭ) позволяет устранить и минимизировать последствия проблем, возникающих при развертывании систем ДГУ без резервирования накопителями энергии.

В такой системе дизель-генераторная установка (ДГУ) с регулируемой скоростью вращения имеет специальное исполнение для непосредственного подключения к шине постоянного тока. Частота вращения ДГУ регулируется автоматически в зависимости от нагрузки на электросеть, уровня заряда накопителей электроэнергии и напряжения генерирующих установок возобновляемой энергии (ВИЭ).

При этом постоянное напряжение накопителей энергии преобразуется в переменное при помощи силового инвертора [2].

Работа комбинированной энергетической установки по синтезируемому алгоритму управления обеспечивает повышение надежности работы децентрализованных объектов электроснабжения наряду с сокращением удельного расхода топливных ресурсов, принимая во внимание такие факторы как: генерируемую мощность каждого из узлов установки, уровень заряда блока накопителей электроэнергии и текущую нагрузку.

#### *Литература:*

1. Стычинский З.А. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики. / З.А. Стычинский, Н.И. Воропай.– Иркутск, 2010. - 215с.
2. Попель О.С. Автономные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии / О.С. Попель // Энергоснабжение.– 2006.– № 3.– С. 70–76.

## **ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ УЧАЩИХСЯ**

**Е.О. Сагатаева, В.В. Бирюков**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, seo1.98@mail.ru**

*В этой статье рассматривается возможность внедрения экологически чистого транспорта для перевозки детей до общеобразовательных учреждений с целью повышения безопасности учащихся.*

*This article discusses the possibility of introducing environmentally friendly transport for transporting children to educational institutions in order to increase the safety of students.*

Одним из элементов социального обеспечения населения в плане удовлетворения его потребностей является выполнение желания обучения, особенно учащихся школ. К сожалению, в связи с расформированием школ с малым количеством учеников и перевода их образовательные учреждения в других населённых пунктов возникает необходимость организации доставки детей до близлежащих школьных учреждений. Проблема возникла главным образом в сельской местности в связи со снижением численности населения. Решению этой проблемы способствует применение специализированного транспорта для перевозки учащихся, в котором обеспечивается безопасность перевозки школьников из близлежащих поселений к районному центру.

Количество детей школьного возраста, как правило, в них небольшое, поэтому зачастую невыгодно доставлять их в школьных автобусах большой вместимости. В ряде случаев целесообразно использовать микроавтобусы.

Школы районных центров в отличие от городских работают в одну смену, что приводит к необходимости работы школьного автобуса дважды в день – утром для подвоза детей в школу, в обед – доставку домой. Такой режим работы транспортного средства затратен и малоэффективен. Поэтому в некоторых случаях в период вынужденного простоя целесообразно использовать автобус для оказания транспортных услуг населению либо райцентра, либо населённых пунктов, из которых возят детей в школу. При наличии довольно большого парка автомобилей, что может быть обусловлено большим количеством сёл и их удалённостью, они могут быть объединены в одно предприятие, т.е. не закреплены за образовательным учреждением. Такое решение позволит повысить качество эксплуатации транспортных средств и регулярность движения.

Увеличение транспортной работы автобусов приведёт к возрастанию выброса в атмосферу продуктов сгорания теплового двигателя. Поэтому желательно использовать экологически чистый транспорт, в качестве которого может выступить электробус малой вместимости.

Почему для перевозки учащихся необходимо использовать именно экологически чистый транспорт? Загрязнение окружающей среды растёт, в частности загрязнение атмосферы выхлопными газами, но благодаря современным технологиям можно сократить количество вредных выбросов. Транспорт занимает важное место в нашей жизни, потому что человек всегда стремится осваивать новые пространства. В связи с этим постепенно увеличивается число автомобилей на дорогах, что затрудняет движение и создает пробки. Использование экологически чистого общественного транспорта, в данном случае специализированного- для перевозки учащихся, облегчит сложившуюся ситуацию.

При сравнении электробуса с другими видами экологически чистого транспорта, в частности троллейбуса, электробус имеет больше преимуществ и по функциональной части и по эстетической. Например, для выпуска электробуса не нужно протягивать контактную сеть по всему городу, что облегчает перевозку в отдалённые районы и не портит облик улиц. Так же, при торможении электробус может запасать энергию от торможения обратно в сеть, а троллейбус тормозит и тратит энергию, что создает потери.

### *Литература:*

1. Бирюков В.В. Тяговый электрический привод: учеб. пособие / В.В. Бирюков, Е.Г. Порсев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 314 с.
2. Бирюков В.В. Автономный электрический Транспорт: учебник / В.В. Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 302 с.: ил. (Серия «Учебники НГТУ»).

## **ШКОЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОБУС С ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

**А.В. Сосновских, В.В. Бирюков**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, sosnovskihaleksandr33@gmail.com**

*В этой статье анализируется возможность создания школьного электробуса с топливными элементами, для перевозки учащихся из отдаленных малонаселенных пунктов.*

Назначение школьного электробуса заключается в том, чтобы привозить школьников из малонаселенных отдаленных пунктов в центральные школьные учреждения районных центров. Используемые в настоящее время (автобусы малой вместимости) отличает высокая степень негативного влияния на окружающую среду.

Поэтому возникла идея использовать другие источники энергии. Например, в технике используются топливные элементы, которые позволяют при окислении топлива вырабатывать электрическую энергию, что даёт возможность использовать на школьных автобусах электрический привод, отличающийся большей экологичностью и экономичностью.

В настоящее время разработано большое количество топливных элементов, различающихся по энергоэффективности, рабочей температуре и т.д. На основе проведённого анализа выявлено, что наиболее приемлемым для размещения на школьном автобусе является топливный элемент с протонообменной мембранной. Именно этот топливный элемент считается самым лучшим типом топливных элементов для генерации электрической энергии на транспортных средствах. Их отличительной особенностью является то, что они функционируют при относительно низких температурах (60-160°C), развивают приемлемую удельную мощность, позволяют быстро её регулировать, имеют высокое быстродействие при включении, высокие удельные энергетические и весовые показатели. В качестве топлива этого элемента, используется – водород, а носителем заряда является

ион водорода. Структурная схема топливного элемента с твердым электролитом, поясняющая принцип его работы, приведена на рисунке 1.

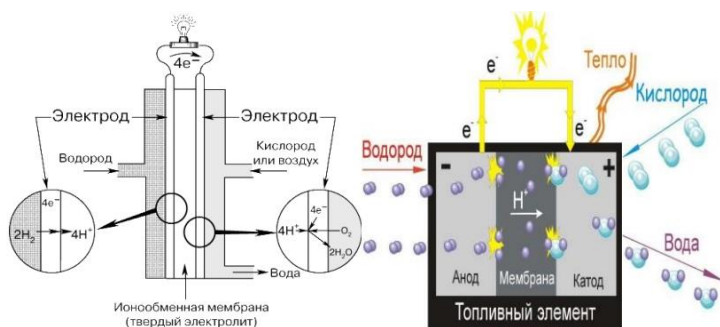


Рис.1 - Структурная схема топливного элемента с твердым электролитом

Замена в тяговой передаче теплового двигателя на электрический позволяет использовать на автобусе электрическое торможение, в результате чего затраченная на движение энергия может быть частично возвращена. Поэтому необходим накопитель энергии, который при повторном пуске может быть использован, чтобы повысить КПД всей установки. Для накопителя энергии целесообразно использовать ионистор (суперконденсатор). Таким образом, для питания тягового электродвигателя используется установка с двумя источниками, т.е. комбинированная энергетическая установка.

Принцип действия установки следующий. При разгоне топливный элемент вырабатывает электроэнергию, которая потребляется тяговым двигателем. В режиме торможения электродвигатель переводится в режим генерирования энергии, которая пополняет накопитель. При последующем разгоне двигатель питается, как от батареи топливных элементов, так и от накопителя, что позволяет сэкономить часть топлива. Для того, чтобы регулировать подводимую к двигателю энергию используется регулятор подачи топлива, связанный с педалью водителя. Во время стоянки автобуса батарея топливных элементов подзаряжает накопитель.

Структурная схема тягового привода приведена на рисунке 2.

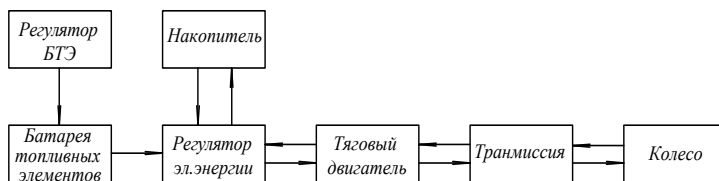


Рис.2 - Структурная схема тягового привода

Применение комбинированной энергетической установки несмотря на усложнение привода способствует улучшению экологической обстановки на маршрутах, где используется школьный автобус.

#### Литература:

1. Бирюков В.В. Тяговый электрический привод: учеб. пособие / В.В.Бирюков, Е.Г.Порсев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 314 с.
2. Бирюков В.В. Автономный электрический Транспорт: учебник / В.В.Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 302 с.: ил. (Серия «Учебники НГТУ»).

## ТЕХНОЛОГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

**М.В. Социховский, Е.А.Спиридонов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, mr.socihovskiy@mail.ru**

*В данном тезисе рассматриваются две системы отопления электромобилей — тепловые насосы и трубчатые электронагреватели, анализируется наиболее рациональный вариант применения.*

*This article compares two electric vehicle heating systems – heat pumps and tubular electric heaters, the most rational application is analyzed.*

В автомобилях с двигателем внутреннего сгорания нет проблемы с отоплением салона. При работе ДВС выделяет большое количество тепла, и это тепло легко направляется в салон. Электрический же двигатель является чрезвычайно эффективным. Выделяется недостаточное количество тепла для отопления салона. Поэтому приходится использовать сторонние нагреватели, которые расходуют дополнительное количество энергии. Эта энергия расходуется из автономного источника, вследствие чего уменьшается запас хода электромобиля.

Высокая эффективность может быть достигнута с использованием тепловых насосов типа воздух-воздух. Принцип действия основан на способности хладагента поглощать и отдавать тепло при изменении агрегатного состояния. Тепловой насос забирает тепло у воздуха. Хладагент получает это тепло и испаряется в испарителе. В компрессоре этот пар сжимается и нагревается, и хладагент через конденсатор передает теплоту в отопительный контур. Энергия батареи в этом случае тратится только на работу компрессора. Недостатки данной системы: работа теплового насоса напрямую зависит от температуры окружающей среды (в большинстве моделей работа возможна до минус 10°C); высокая стоимость оборудования. Преимущества: высокая эффективность и возможность работы в двух режимах (режим отопления — зимой, режим кондиционирования — летом)[1].

Широкое применение получили трубчатые электронагреватели (ТЭН) — приборы в виде металлической трубки, заполненной теплопроводящим электрическим изолятором. В центре изолятора располагается нихромовая или фехралевая нить определенного сопротивления для передачи необходимой мощности на поверхность нагревателя. Главный недостаток данных электронагревателей: непроизводительное уменьшение запаса энергии тяговой батареи (потеря может достигать 50%). Преимущества ТЭНов: высокая надежность; быстрый обогрев салона независимо от температуры окружающей среды[2].

Учитывая все особенности рассмотренных двух систем отопления электромобилей, можно сделать вывод, что использование тепловых насосов — наиболее удачное решение с точки зрения экономии заряда аккумуляторной батареи. Однако, это решение подходит не для всех климатических зон. В умеренных и субарктических широтах, где температура зимой опускается ниже минус 20°C, системы с тепловым насосом недостаточно. Выгодным решением в этом случае будет совмещение систем ТЭНа и теплового насоса. В этом случае первоначальный обогрев салона будет происходить за счет ТЭНа, а поддержание комфортной температуры будет осуществлять тепловой насос.

#### *Литература:*

1. Кашкаров А.П., Современные электромобили. Устройство, отличия. — М.: ДМК-Пресс, 2018. — 92 с.



2. Щетина В.А., Морговский Ю.А., Центр Б.И., Богомазов В.А., Электромобиль: техника и экономика. – Л.: Машиностроение, 1987. – 253 с.

## **ТРОЛЛЕЙБУС С ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ**

**Р.В. Шабалин, В.В. Бирюков**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск**

В этой статье анализируется возможность создания троллейбуса с гибридной энергоустановкой с целью получения наибольшей конструкции и управляемости, а также повышения экологичности.

В настоящее время невозможно представить развитие крупного города без эффективной транспортной системы. В частности, для России, из-за большого количества автомобилей на дорогах, транспортная проблема является наиболее важной.

Принимаются меры по созданию и разработке экологически чистых и наиболее выгодных транспортных средств. В частности, создание маршрутных транспортных средств общего пользования, доступных для всех слоев населения, способные решить проблемы загруженности дорог. Одним из таких решений является внедрение троллейбусов с гибридной энергоустановкой.

Под гибридной энергоустановкой принято понимать наличие на транспортном средстве двух источников энергии.

Проблема обычных троллейбусов, заключается в том, что для их работы необходимо питание от контактной сети, поэтому стал вопрос создания троллейбусов способных осуществлять автономное движение ,независимо от контактной сети.

В результате было принято решение разработать троллейбус способный аккумулировать энергию, накопленную в результате движения от сети. Применение химических аккумуляторов не всегда выгодно,поэтому выгодно рационально использование суперкондсаторов.

Суперконденсатор — электрохимическое устройство, конденсатор с органическим или неорганическим электролитом, «обкладками» в котором служит двойной электрический слой на границе раздела электрода и электролита. По характеристикам занимает промежуточное положение между конденсатором и химическим источником тока.

В таблице 1, указаны достоинства и недостатки применения и использования суперконденсаторов.

**Таблица 1 – Преимущества и недостатки суперконденсаторов**

Преимущества	Недостатки
Быстрый заряд	Высокая стоимость
Эксплуатация при экстремальных температурах	
Безопасное использование	
Экологическая чистота	Высокая технологическая сложность
Экономичная эксплуатация	
Долгий срок службы	

Применение суперконденсаторов позволит троллейбусу двигаться в автономном режиме, без использования контактной сети, в случае обрыва или внезапных перебоев обеспечения контактной сети электричеством. Так же троллейбус сможет двигаться в пригородных зонах, что даст увеличение маршрутного пути, а так же экономии затрат на строительство контактной сети.

#### *Литература:*

1. Бирюков В.В. Тяговый электрический привод: учеб. пособие / В.В.Бирюков, Е.Г.Порсев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 314 с.
2. Бирюков В.В. Автономный электрический Транспорт: учебник / В.В.Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 302 с.: ил. (Серия «Учебники НГТУ»).

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ – ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

#### **Секция ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ.** **ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ**

Бадашкова Н. К., Алиферов А.И.	Новосибирск	3
Битюцких А.В., Горева Л.П.	Новосибирск	7
Бондарь А.С., Стрельцова О.В.,	Санкт-Петербург	10
Галунин С.А., Никаноров А.Н.		
Брюсов Д.В., Кибартас В.В.	Павлодар	14
Васильева Е.П., Алиферов А.И.	Новосибирск	18
Винтер Э.Р., Тимофеев В. Н.	Красноярск	21
Вологин В.В., Сериков В.А.	Новосибирск	24
Волокитин О.Г., Шеховцов В.В.,	Томск	27
Гафаров Р.Е.		
Гринько С.С., Кислов А.П.	Павлодар	30
Гришина К.А.	Новосибирск	33
Золотарев В.В., Алиферов А.И.	Новосибирск	37
Зуев С.П., Бикеев Р.А.,	Новосибирск	39
Зуев С.П., Чередниченко А.В.,	Новосибирск	43
Чередниченко В.С.		
Ким Р.А., Алиферов А.И.	Новосибирск	47
Кондратьев С.С., Алексеенко В.М.,	Томск	50
Жерлицын А.А.		
Кондрашов С.С., Федин М.А.,	Москва	54
Кулешов А.О.		
Конюшенко Е.В., Сабайкин Н.А.,	Москва	58
Соловьев Д.Ю.		
Маликов В.Н., Григорьев А.А.,	Барнаул	62
Леис В.М.		
Марченко В.Д., Перевалов Ю.Ю.	Санкт-Петербург	64
Омарова А., Козулина Т.П.	Санкт-Петербург	66

Перевалов Ю.Ю., Демидович О.В.,	Санкт-Петербург	70
Марченко В.Д.		
Ракина М.Д., Алиферов А.И.	Новосибирск	74
Стрельцова О.В., Ишин В.В.,	Санкт-Петербург	76
Бондарь А.С.		
Шепелёв А.А., Чередниченко Л.Е.	Новосибирск	80

### **Секция ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА**

Абрамов М.В., Приступ А.Г.	Новосибирск	85
Брынзова А.Н., Топорков Д.М.	Новосибирск	88
Доржиева Б.С., Бейерлейн Е.В.,	Томск	92
Киселев А.В.		
Зимогляд А.Д., Темляков А.А.,	Новосибирск	97
Темлякова З.С.		
Исичко А.П., Темлякова З.С.	Новосибирск	101
Кобобель И.В., Нейман В.Ю.	Новосибирск	103
Копейко А.Н., Новокрещенов О.И.	Новосибирск	108
Манько А.А., Шаншуров Г.А.	Новосибирск	110
Маратканов А.А., Тютеева П.В.	Томск	114
Марков А.В., Аксютин В.А.	Новосибирск	118
Никулин Р.О., Топорков Д.М.	Новосибирск	122
Раджапов А.А., Ермолов И.С.	Новосибирск	125
Раднаев А.Б., Бейерлейн Е.В.	Томск	128
Салчак А.В., Нейман В.Ю.	Новосибирск	132
Царегородцев А.Н., Топорков Д.М.	Новосибирск	136
Чернядьева Д.Ю., Ашаргин В.С.	Новосибирск	139

### **Секция ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Андряшин С.Н., Мятаж С.В.	Новосибирск	144
Аниброев В.И., Гвоздик Е.А.,	Новосибирск	146
Зимогляд А.Д.		
Баратова К.В., В.И. Полищук В.И.	Барнаул	148
Белкова Д.Н., Кавешников В.М.	Новосибирск	152

Блинов А.А., Кучер Е.С.	Новосибирск	156
Гимадеев А.Р., Кавешников В.М.	Новосибирск	159
Гладкий Д.А., Кавешников В.М.	Новосибирск	161
Грызункова Т.В., Кучер Е.С.	Новосибирск	164
Евдокимова Е.С., Кавешников В.М.	Новосибирск	167
Евдокимова Е.С., Цамалаидзе Д.Г.,	Новосибирск	170
Дымов И.С.		
Жук С.С., Кучер Е.С.	Новосибирск	172
Зинков Р. И., Кавешников В.М.	Новосибирск	174
Казанцев В.О., Кучер Е.С.	Новосибирск	177
Кобзев Е.Е., Фазлыев Д.М.,	Новосибирск	179
Сидоров Г.С.		
Литвинчук Е. Н., Штанг А.А.	Новосибирск	182
Малышев А.В.	Новокузнецк	184
Матюхова Е.С., Кучер Е.С.	Новосибирск	188
Мехинских М.С., Мятёж С.В.	Новосибирск	191
Мосин М. Е., Бутенко В.Н.,	Новосибирск	194
Чернов И. В.		
Мосин Р.А., Кучер Е.С.	Новосибирск	197
Мочалов А.А., Кавешников В.М.	Новосибирск	200
Пауль О.Э., Кучер Е.С.	Новосибирск	202
Попов Н.С., Сингизин И.И.,	Новосибирск	204
Финоженко Е.А.		
Попов Н.С., Аниброев В.И.	Новосибирск	206
Рахвалов В.О., Кавешников В.М.	Новосибирск	208
Садкова У.К., Мятёж У.К.	Новосибирск	209
Сыренков С.В., Суняйкина П.А.,	Новосибирск	211
Юркевич В.Д.		
Цамалаидзе Д.Г., Кавешников В.М.	Новосибирск	213

**Секция ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ  
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

Авдеенко К.С., Бирюков В.В.	Новосибирск	216
Бахолдин Д.А., Бахолдин П.А. , Щуров Н.И.	Новосибирск	219
Бахолдин Д.А., Бахолдин П.А., Щуров Н.И.	Новосибирск	223
Бердюгина А.В., Бирюков В.В.	Новосибирск	226
Бондарев Э.С., Маслов Н.А.	Новосибирск	230
Бублик А.Н., Спиридонов Е.А.	Новосибирск	234
Бурлягина М.С., Бирюков В.В.	Новосибирск	236
Внуков С. А., Бирюков В.В.	Новосибирск	240
Гусева М.Э., Куликов К.И., Щуров Н.И.	Новосибирск	242
Коваленко К.В., Спиридонов Е.А.	Новосибирск	246
Колодинская А.А., Бирюков В.В.	Новосибирск	248
Кузьмин А.С., Бирюков В.В.	Новосибирск	250
Линник К.С., Нейман Л.А.	Новосибирск	252
Новоселов А.Н., Бирюков В.В.	Новосибирск	257
Пилипушка Л.Е., Рябов В.С., Климова Е.В.	Новосибирск	261
Прокопенко Д.С., Штанг А.А.	Новосибирск	265
Сагатаева Е.О., Бирюков В.В.	Новосибирск	266
Сосновских А.В., Бирюков В.В.	Новосибирск	268
Социховский М.В., Спиридонов Е.А.	Новосибирск	270
Шабалин Р.В., Бирюков В.В.	Новосибирск	272

**НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ**  
**Сборник научных трудов в 9 частях**

**г. Новосибирск, 02-06 декабря 2019 г.**  
**Часть 5**

**Под ред. Гадюкиной А.В.**

Подписано в печать 10.12.2019. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Уч.-изд. л. 16,27. Печ. л. 17,5. Тираж 100 экз. Заказ № 5

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

