



—



—



НОВОСИБИРСК  
2022



ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ.  
ИННОВАЦИИ



**СБОРНИК  
НАУЧНЫХ  
ТРУДОВ 05**

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

---

---

# **НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ**

---

---

**XVI Всероссийская научная конференция молодых  
ученых, г. Новосибирск, 05-08 декабря 2022 г.**

**Сборник научных трудов  
в 11-и частях**

**Часть 5**

НОВОСИБИРСК

2022

УДК 62(063)  
ББК 72.5я431  
Н34

**Н34 НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ:** XVI Всероссийская научная конференция молодых ученых (г. Новосибирск, 05-08 декабря 2022 г.) // Сборник научных трудов в 11 ч. / Под ред. Казьминой А.С. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022.

ISBN 978-5-7782-4861-8

Часть 5: – 169 с.

ISBN 978-5-7782-4866-3

В сборнике опубликованы материалы научных исследований, представленных на XVI Всероссийской научной конференции молодых ученых.

В части 1 сборника представлены материалы по направлению «Информатика, автоматика, вычислительная и измерительная техника». В части 2 сборника представлены материалы по направлению «Информационные технологии математического моделирования и обработки данных». В части 3 сборника представлены материалы по направлению «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств. Материаловедение, технологические процессы и аппараты». В части 4 сборника представлены материалы по направлению «Энергетика». В части 5 сборника представлены материалы по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». В части 6 сборника представлены материалы по направлению «Электроника и биомедицинская техника». В части 7 сборника представлены материалы по направлению «Экономика и управление». В частях 8, 9 и 10 сборника представлены материалы по направлению «Гуманитарные науки и современность». В части 11 сборника представлены материалы по направлению «Актуальные проблемы авиаракетостроения».

---

---

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

### **Председатель Оргкомитета:**

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

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

Брованов С.В., д.т.н., доцент, проректор по научной работе НГТУ

### **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

Овчинникова Н.Н. к.э.н., декан ФБ

Стрельцов С.А., к.т.н., доцент, декан РЭФ

Вильбергер М.Е., к.т.н., доцент, декан ФМА

Тюрин А.Г., к.т.н. доцент, декан МТФ

Русина А.Г., д.т.н. доцент, декан ФЭН

**УДК 62(063)**

**ББК 72.5я431**

**ISBN 978-5-7782-4866-3 (Ч.5)**

© Коллектив авторов, 2022

**ISBN 978-5-7782-4861-8**

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2022

**НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ – ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**

**Секция ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

**Ф.К. Айрапетян**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**г. Новосибирск**

**Научный руководитель: Честюнина Т.В., к.т.н.**

*Представлены технические решения для повышения энергоэффективности асинхронных двигателей. Рассчитан асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощность 110 кВт на частоту вращения 1500 об/мин. Показаны возможности повышения энергоэффективности двигателя за счёт применения медной обмотки на роторе, а так же магнитного клина.*

*Technical solutions for improving the energy efficiency of asynchronous motors are presented. An asynchronous motor with a squirrel-cage rotor with a power of 110 kW at a speed of 1500 rpm is calculated. The possibilities of increasing the energy efficiency of the engine through the use of a copper winding on the rotor, as well as a magnetic wedge, are shown.*

**Введение.** В соответствии с “Энергетической стратегией на период до 2020 года” высшем приоритетом государственной энергетической политики является повышение энергоэффективности промышленности. Энергоэффективность российской экономики существенно снижается из-за ее высокой энергоемкости. Следовательно, на первое место выходит задача создания энергоэффективных электрических двигателей [1,2]. Согласно ГОСТ энергоэффективность асинхронного двигателя характеризуется величиной коэффициента полезного действия (КПД) и коэффициента мощности [3].

На сегодняшний день существует ряд способов по повышению энергоэффективности электрических машин:

- применением новых марок электротехнической стали с меньшими удельными потерями и меньшей толщиной листов сердечников,
- уменьшением воздушного зазора между статором и ротором и обеспечением его равномерности,

- унижением электромагнитных нагрузок, т.е. увеличением массы активных материалов при уменьшении количества витков и увеличении сечения проводника обмотки,
- оптимизацией геометрии зубцовой зоны, применением современной изоляции и пропиточного лака, новых марок обмоточного провода,
- применением меди для изготовления короткозамкнутой обмотки ротора взамен алюминия,
- применением высококачественных подшипников и стабильных маловязких смазок, выносом подшипников за пределы подшипникового щита,
- оптимизацией конструкции и производительности вентиляционного узла с учетом меньшего нагрева электродвигателей повышенной энергоэффективности,
- применением более высокого класса нагревостойкости изоляции F при обеспечении перегрева по классу B,
- учёт при проектировании возможности работы с преобразователем частоты.

Наиболее эффективным способом повышения КПД является применение медной обмотки взамен алюминиевой [4], хорошие результаты в машинах большой мощности дают так же применение магнитных клиньев [5]. Целесообразность их применения в машинах малой и средней мощности до сих пор не решена.

Целью данной работы является исследование влияния применения магнитных клиньев и медной обмотки на повышение энергоэффективности двигателя мощностью 110 кВт с частотой вращения 1500 об/мин.

### **Описание работы**

Для проведения исследований по известной методике [6] предварительно был спроектирован двигатель и получены геометрия активной зоны машины, обмоточные данные и рассчитаны основные характеристики.

Как известно, магнитный клин существенно изменяет структуру магнитного поля в воздушном зазоре и в области паза, занятой клином. Это обстоятельство вносит особенности в расчёт коэффициента воздушного зазора  $k_\delta$  и магнитной проводимости пазового и дифференциального рассеяний, что в свою очередь вызовет изменение индуктивного сопротивления статора  $x_1$  и тока холостого хода двигателя. [5]

Применение медной обмотки ротора вместо алюминиевой повлияет на его активное сопротивление в связи с тем, что, как известно, удельное сопротивление меди ниже, чем у алюминия.

В результате проведения расчётов с использованием магнитного клина было получено уменьшение индуктивного сопротивления обмотки статора, что можно объяснить уменьшением проводимости пазового рассеяния из-за того, что происходит ответвление большей части потока из пазов в воздушный зазор и снижением проводимости дифференциального рассеяния благодаря уменьшению эквивалентного открытия паза.

Активное сопротивление обмотки ротора при использовании меди снизилось в 2 раза, что в свою очередь повлияло на увеличение КПД двигателя.

Благодаря применению магнитного клина существенно удалось снизить добавочные (пульсационные и поверхностные) потери в стали ротора, обусловленные зубчатостью статора. Также снизился номинальный ток, что в свою очередь, привело к снижению электрических потерь в обмотке статора.

Наибольшими потерями являются электрические потери в обмотках. Применение меди в качестве материала обмотки ротора позволило существенно снизить электрические потери в роторе.

В таблице 1 приведено сравнение потерь и основных характеристик двигателей с литой алюминиевой обмоткой ротора (ЛАОР), медной обмоткой ротора (ЛМОР), алюминиевой обмоткой ротора и магнитным клином (ЛАОР МК), медной обмоткой ротора и магнитным клином (ЛМОР МК).

**Таблица 1 – Сравнение потерь и основных характеристик двигателей**

№ п/п	Показатели	Единицы	ЛАОР	ЛАОР МК	ЛМОР	ЛМОР МК
			$P_2/P_{2ном}, \%$			
			100	100	100	100
1	Активная составляющая тока статора ( $I_{1a}$ )	А	178.4	175.9	175.3	174.3
2	Реактивная составляющая тока статора ( $I_{1p}$ )	А	76.4	68.8	74.8	68.1
3	Ток статора ( $I_1$ )	А	194	189	190.6	187.15
4	Потери в стали ротора поверхностные ( $P_{ст.пов2}$ )	кВт	0.134	0.029	0.134	0.029

5	Потери в стали ротора пульсационные $P_{ст.пульз}$	кВт	0.377	0.014	0.377	0.014
6	Добавочные потери ( $P_{доб}$ )	кВт	0.511	0.043	0.511	0.043
7	Электрические потери в статоре ( $P_{э1}$ )	кВт	2.499	2.37	2.41	2.325
8	Электрические потери в роторе ( $P_{э2}$ )	кВт	2.28	2.152	1.099	1.055
9	Суммарные потери ( $\Sigma P$ )	кВт	6.7	5.986	5.451	4.833
11	КПД( $\eta$ )	%	94.3	94.8	95.3	95.8
12	Коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ )	о.е.	0.92	0.931	0.92	0.931
13	Кратность пускового тока ( $I_{п}$ )	о.е.	5.639	7.347	5.902	8.182
14	Кратность пускового момента ( $M_{п}$ )	о.е.	1.415	2.31	0.77	1.418
15	Кратность максимального момента ( $M_{max}$ )	о.е.	2.214	2.878	2.195	2.896

### Заключение

Проведенные исследования показали, что КПД от применения только магнитного клина увеличился на 0.5%, а от использования меди в качестве материала обмотки ротора на 1%. Таким образом в модификации двигателя с литой медной короткозамкнутой обмоткой ротора и с магнитными клиньями в магнитопроводе статора удалось повысить КПД на 1.5%, что приведёт к экономии электроэнергии у потребителя.

Наличие магнитного клина не оказывает существенное влияния на пусковые характеристики двигателей, а вот применение медной обмотки ротора вместо алюминиевой, как и ожидалось, существенно понизило пусковой момент и несколько возрос пусковой ток.

Литература:

1. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С., Энергосберегающие электрические машины // «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО». – 2015. – №4. – С. 45–54.
2. Муравлева О.О., Энергоэффективные асинхронные двигатели для регулируемого электропривода // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, №7. – С. 135–139.
3. Бекетов А.Р., Баранов М.В., Шустов И.Г., Лыткин В.В., Мойсейченков А.Н., Денисенко В.И., Пластун А.Т., Недзельский В.Е., Бердичевский А.С., Состав, конструкция и технология получения магнитного клина для асинхронных двигателей малой и средней мощности // Уральский федеральный университет. – 2014. – С. 160–163.
4. ГОСТ Р 54413-2011. Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (код IE) – Rotating electrical machines. Part 30. Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code). – Введ. 2012–06–01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 14 с.
5. Макаров Ф.К. Электрические машины переменного тока с магнитными клиньями. – М.: Энергоиздат, 1981. – 96 с.
6. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учеб. Для вузов. – В 2-х кн.: Кн. 2 / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, Б.Ф. Токарев. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.

# МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ЗАКОНУ КОСТЕНКО

**И. А. Артюх, З.С. Темлякова, П. В. Морозов**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, [ilya.artyx123@mail.ru](mailto:ilya.artyx123@mail.ru)**  
**Научный руководитель: Темлякова З.С., д.т.н., профессор**

*На сегодняшний день широко используются преобразователи частоты для управления асинхронным двигателем. Выбор асинхронного двигателя не случаен, так как асинхронный двигатель является наиболее дешевой электрической машиной. Целью работы является определение механических характеристик при изменении частоты питающего напряжения по закону Костенко.*

*To date, frequency converters are widely used to control an asynchronous motor. The choice of an asynchronous motor is not accidental, since an asynchronous motor is the cheapest electric machine. The purpose of the work is to determine the mechanical characteristics when the frequency of the supply voltage changes according to Kostenko's law.*

Асинхронные двигатели находят широкое применение в электрических приводах переменного тока. В данных приводах используются преобразователи частоты. Особенности эксплуатации асинхронных двигателей изложены в [1].

Как известно, частотное регулирование скорости асинхронного двигателя осуществляется путем изменения частоты и напряжения обмотки статора, подаваемого на электродвигатель.

Закон, по которому будет изменяться частота питающего напряжения, изложен в [2] и выглядит так:  $\frac{U}{f} = const$ .

Из анализа закона Костенко следует, что при изменении частоты питающего напряжения нужно изменить само напряжение.

Аналитическое выражение механической характеристики получено из Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором путем вынесения намагничивающего контура на ее вход. В силу указанного обстоятельства изменение намагничивающего тока и потокосцепление при определении механической характеристики не учитывается.

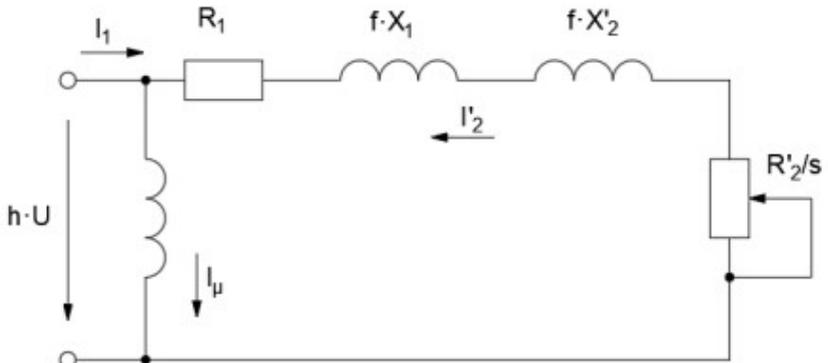


Рис. 1 – Г-образная схема замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Для упрощения расчета введены относительные величины входной частоты  $f = \frac{f_s}{f_n}$  и напряжения  $h = \frac{U_s}{U_n}$ .

Основные формулы для определения моментов [2,3]:  
 вращающий момент асинхронного электродвигателя

$$M = \frac{3 \cdot h^2 \cdot U_n^2 \cdot R_2' \cdot s}{f \cdot w_{sn} \cdot \left( (R_1 \cdot s + R_2')^2 + (f \cdot (X_1 + X_2') \cdot s)^2 \right)}$$

величина критического момента электродвигателя

$$M_K = \frac{3 \cdot h^2 \cdot U_n^2}{2 \cdot f \cdot w_{sn} \cdot \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + (f \cdot (X_1 + X_2'))^2} \right)}$$

Параметры эквивалентной схемы замещения двигателя мощностью 5,5 кВт:  $U_n = 220\text{В}$ ;  $p = 1$ ;  $w_{sn} = 314\text{Гц}$ ;  $R_1 = 1,775\text{Ом}$ ;  $R_2' = 0,486$ ;  $X_1 = 2,602\text{Ом}$ ;  $R_2' = 0,486\text{Ом}$ ;  $X_2' = 1,016\text{Ом}$ .

Результаты расчета механических характеристик  $M = f(w)$  при различных значениях частоты приведены в таблицах 1, 2, 3.

Таблица 1 – Момент двигателя и значения угловой скорости для частоты  $f_s = 50$  Гц и напряжения  $U_s = 220V$

Параметр	Скольжение s, о.е.									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
М, Н·м	0	39	36	30	25	21	18	16	14	13
$\omega$ , рад/с	314	282	251	219	188	157	125	94	62	31

Критический момент двигателя  $M_K = 40,25$  Н·м.

Таблица 2 – Момент двигателя и значения угловой скорости для частоты  $f_s = 30$  Гц и напряжения  $U_s = 132V$

Параметр	Скольжение s, о.е.									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
М, Н·м	0	28	30	27	24	21	19	17	16	14
$\omega$ , рад/с	183	169	150	131	113	94	73	56	37	18

Критический момент двигателя  $M_K = 30,64$  Н·м.

Таблица 3 – Момент двигателя и значения угловой скорости для частоты  $f_s = 15$  Гц и напряжения  $U_s = 132V$

Параметр	Скольжение s, о.е.									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
М, Н·м	0	15	18	17	16	15	14	13	12	11
$\omega$ , рад/с	91	84	75	65	56	47	37	28	18	9

Критический момент двигателя  $M_K = 18,21$  Н·м.

Заключение.

В работе исследованы механические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при изменении напряжения и частоты по закону Костенко. Анализ полученных результатов показывает, что для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 5,5 кВт характерной особенностью механических характеристик являются снижение критического момента  $M_K$  при уменьшении частоты напряжения питания.

Литература:

1. ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009. Машины Электрические вращающиеся. Часть 17. Руководство по применению асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей. – Введ. 2011-03-25. – М: Стандартинформ, 2011. – 9 с.

2. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. ч. 2. – Ленинград: Изд-во “Энергия”, 1973. – 648 с.

3. Абакумов А. М., Тулупов П. В., Чабанов Ю. А. Электрический привод. Часть 2, Электроприводы переменного тока. – Самара: Изд-во СГТУ, 2014. – 130 с.

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ БЕСПАЗОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Г.О. Гейнрих, А.Ф. Шевченко

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

*В работе приводится краткий анализ перспектив подкласса синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов – беспазовых (БЭМПМ). Данный тип электрических машин представлен в отечественной и зарубежной литературе не так широко и сферы их применения, до недавнего времени, были весьма ограничены. Однако, в последние годы, благодаря появлению новых технологий в проектировании и производстве электрических машин, а также совершенствованию алгоритмов их управления, растёт интерес к такому типу электрических машин. В рамках этой работы предлагается оценить преимущества и недостатки синхронных двигателей с постоянными магнитами со статором беспазовой компоновки, относительно более традиционных типов электродвигателей и рассмотреть существующие типы конструкций БЭМПМ.*

*The paper provides a brief analysis of the prospects of a subclass of synchronous electric machines with excitation from permanent magnets-less machines (BEMPM). This type of electric machines is not widely represented in the domestic and foreign literature and the scope of their application, until recently, was very limited. However, in recent years, due to the emergence of new technologies in the design and production of electric machines, as well as improvements in their control algorithms, interest in this type of electric machines is growing. This paper proposes to evaluate the advantages and disadvantages of permanent magnet synchronous motors with a slotless stator, relative to more traditional types of electric motors and consider the existing types of BEMM designs.*

Благодаря появлению высокоэрцитивных магнитотвёрдых материалов, таких как  $NeFeB$  и  $SmCo$  и совершенствованию аппаратной базы управления, связанное с развитием микропроцессорной техники и силовой полупроводниковой электроники, синхронные магнитоэлектрические машины получили в кратчайшие сроки весомое развитие, позволившее им стать одним из самых широко представленных в различных отраслях классом электромеханических преобразователей. Мнение многих специалистов сходится в том, что синхронные двигатели

с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) на сегодняшний день – это наиболее перспективное решение в плане выбора электромеханического преобразователя в диапазоне малых и средних мощностей.

Преимущества синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов (СМПМ) ранее были представлены многими авторами и не вызывают сомнений. Двигатели такого типа конструктивно просты и надёжны. Они не требуют затрат энергии на возбуждение, обладают большой перегрузочной способностью и высоким быстродействием в переходных процессах.

Стоит отметить, что сферы эксплуатации СМПМ не ограничиваются только общепромышленным назначением – существует множество спроектированных электрических машин для более узкоспециализированных применений, которые могут значительно отходить от концепции классической конструкции электрических машин. Здесь можно упомянуть и машины с внешним ротором, и машины с аксиальным типом возбуждения, и линейные двигатели. Один из типов специальных СМПМ, о которых пойдёт речь в данной работе – беспазовые машины.

История появления беспазовых электрических машин берёт начало с 1970-х годов прошлого столетия, в этот период в автоматике развитие получили двигатели постоянного тока без зубцовой зоны на якоре с полым ротором. До появления на рынке относительно недорогих постоянных магнитов из редкоземельных элементов такой тип электрических машин не получал значительного развития. Однако, анализ особенностей характеристик высококоэрцитивных магнитов (высокие значения коэрцитивных сил по намагниченности и индукции, значение магнитной проницаемости, близкое к значению магнитной проницаемости воздуха) и сегодняшних требований к электрическим машинам показывает, что синхронные машины с постоянными магнитами на роторе и статором без зубцовой зоны обладают рядом преимуществ, не присущих машинам с пазовыми статорами, и видятся перспективным, недостаточно изученным направлением электромашиностроения.

Для класса БЭМПМ характерно разнообразие конструкций. Машины могут быть как классической компоновки, так и обращённые с внешним ротором, также существуют дискообразные машины с аксиально-ориентированным магнитным потоком.

В беспазовых и пазовых СДПМ структура строения ротора малоотличима. Статор же, в свою очередь, не имеет зубцов и состоит только из яра. Обмотка может крепиться к яру различными способами,

например, приклеиванием с применением смол, может принимать трёхфазную двухслойную конфигурацию и иметь любые величины, формы и шаг. Однако стоит отметить, что крепление обмоток приклеиванием не может применяться в машинах с моментом более 10 Н\*м в виду вероятного отрыва. Некоторые авторы предлагают использование в качестве крепления обмотки якоря в немагнитном зазоре каркаса из полиамид-имидной смолы (PAI torlon), обладающей отличной стойкостью к механическим воздействиям и высоким температурам — до 250 °С, что значительно больше, чем класс С нагревостойкости изоляции электрических машин (180—200 °С). Но тем не менее вопрос поиска оптимальной конструкции БЭМПМ и материалов для изготовления, позволяющих повысить плотность тока в обмотках и обеспечивать механическую стойкость, стоит особым образом.

Преимущества беспазовой конструкции статора заключаются в:

1. Отсутствие потерь в стали зубцовой зоны, которые составляют основную долю потерь в пазовых машинах (в виду отсутствия зубцов), особенно на высоких скоростях вращения;

2. Вентильные двигатели с постоянными магнитами имеют сравнительно большой уровень остаточного электромагнитного момента реактивного происхождения (до 0.1 Н\*м). Этот недостаток затрудняет применение приводов на основе СДПМ в высокоточных системах, таких как промышленные станки, робототехнические комплексы, радиолокационные устройства. Беспазовые СДПМ лишены этих недостатков. При этом равномерность воздушного зазора и отсутствие реактивного момента уменьшают уровень шумов, вибраций, пульсаций крутящего момента, делает вращение ротора более равномерным, особенно на малых частотах вращения;

3. Отсутствие вихревых токов в массиве магнитов, из-за которых возможен чрезмерный нагрев магнитов и, как следствие, размагничивание.

4. Относительно большой немагнитный зазор, по сравнению, с пазовыми машинами, очевидно, влечёт уменьшение электромагнитного момента в беспазовых машинах. Однако отсутствие зубцов на статоре позволяет высвободить место под увеличенный диаметр ротора. Таким образом, при равных внешних габаритах, с грамотным подходом к проектированию, можно добиться примерно равных показателей выходной мощности и электромагнитного момента БЭМПМ и ПЭМПМ.

5. Высокая технологичность пакета статора без зубцов (также возможны варианты конструкции без металлического ярма)

6. Низкое значение индуктивного сопротивления обмотки в связи с отсутствием индуктивности от потоков пазового рассеяния, а также снижение электромагнитной постоянной времени  $T$ .

Перечисленные выше достоинства БЭМПМ над ПЭМПМ подтверждают необходимость их развития как отдельного класса машин с магнитоэлектрическим возбуждением. Однако, БЭМПМ обладают особенностями негативно сказывающихся на выходных показателях, имеет смысл проводить работу над уменьшением таких негативных эффектов. Одной из таких особенностей является путь прохождения основного магнитного потока. В виду специфики конструкции им пронизываются катушки обмоток, в то время как в традиционных электрических машинах обмотку, лежащую в пазу, пронизывают лишь потоки рассеяния. Из-за этого обстоятельства возрастают общие потери в обмотке, к джоулевым потерям при протекании тока якоря добавляются потери на уравнильные и вихревые токи. Для нивелирования этих потерь возможно использование многожильного витого проводника для обмотки, но при его использовании снижается коэффициент заполнения обмотки. Также остаётся открытым вопрос о величине этих потерь.

В стремлении достигнуть схожих показателей мощности с ПЭМПМ неизбежно увеличивается объём используемого магнитного материала в конструкции ротора. Это обстоятельство влечёт удорожание производства и увеличение инерционности ротора. Для увеличения доли использования магнитных материалов возможно применение сборки Хальбаха. Анализ показал, что машины беспазовой топологии со сборкой Хальбаха могут иметь даже лучшие показатели по плотности мощности, КПД и потерям в сердечнике по сравнению с пазово-радиальной машиной.

В работе показано, что массогабаритные показатели двигателя повышаются с увеличением полюсности, что объясняется уменьшением ярем статора и ротора. Поэтому в таких машинах чрезвычайно перспективным является применение дробных обмоток с  $q < 1$  [].

Для отработки технологии производства и получения характеристик был изготовлен первый прототип беспазового СДПМ. Его особенность заключается в отсутствии не только стали в зубцовой зоне, но и металлического ярма. Его испытания подтвердили возможность получения приемлемых для некоторых задач характеристик, отразили перечисленные выше преимущества, а также подтвердили, что используемые в БЭМПМ на сегодняшний день многополюсные классические обмотки с  $q > 1$  могут быть успешно заменены дробными обмотками с  $q < 1$ .

Полученные теоретические и экспериментальные результаты будут использованы при проектировании, изготовлении и экспериментальных исследованиях последующих опытных образцах БЭМПМ.

Литература:

1. *Топорков Д.М., Новокрещенов О.И., Честюнина Т.В., Вяльцев Г.Б., Гейнрих Г.О., Царегородцев А.Н.* Производство электрических машин: учебное пособие / коллектив авторов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ , 2021 – 179 с.

2. *Шевченко А.Ф., Приступ А.Г., Бухгольц Ю.Г., Честюнина Т.В., Топорков Д.М., Вяльцев Г.Б.* Проектирование электрических машин с постоянными магнитами : учебное пособие. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – 152 с.

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ РОТОРОВ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ С V-ОБРАЗНЫМИ МАГНИТАМИ

А. В. Гусева

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [alena\\_27042000@mail.ru](mailto:alena_27042000@mail.ru)  
Научный руководитель: Честюнина Т. В.

*В работе исследовалось влияние V-образных магнитов на реактивный момент. Для проведения исследований была создана модель двигателя в программной среде «Ansys Motor-Cad», были получены рабочие характеристики двигателя. Было установлено, что изменение угла наклона позволяет увеличить реактивный момент.*

*The purpose of the study is the influence of the angle of inclination of V-shaped magnets on the accumulation of the magnetic field, the reactive moment and the total electromagnetic moment. By creating models in the Ansys Motor-Cad motor design software, the performance of the motor was obtained. It was found that changing the angle of inclination allows increasing the reactive moment.*

В настоящее время все чаще стали использовать синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ). С помощью них можно увеличить КПД, уменьшить габариты самого двигателя и упростить его конструкцию. Синхронные двигатели состоят из неподвижного статора и вращающегося ротора. В данном случае синхронный двигатель выполняется с дробно-зубцовой обмоткой, что дает преимущества в технико-экономических показателях. В таких обмотках одна катушка обхватывает один зубец статора, что позволяет изготавливать электрические машины с большим числом пар полюсов, экономит количество меди на лобовых частях обмотки, уменьшаются электрические потери. В результате у машины растет коэффициент полезного действия, уменьшается вес и стоимость.

Инженеры «Tesla» отказались от традиционно используемых и хорошо проверенных асинхронных двигателей, заменив их на СДПМ – Tesla Model 3 IPM-SynRM [4]. В таком двигателе добились высокой эффективности на низких и высоких частотах вращения. В своем двигателе они применили сегментированные вдоль оси машины магниты, то есть вместо одного сплошного магнита, в машине устанавливаются четыре части магнита. Это помогло снизить риск перегрева магнитов за счет потерь в них. Ротор двигателя выполнен с V-

образным расположением магнитов, что является намного технологичнее других исполнений роторов [3]. При такой конструкции ротора магниты практически не дают потоку рассеяться, и возникает эффект концентрации магнитного потока. Недостатком этого типа ротора является уменьшенное значение максимального момента [3].

Исключить этот недостаток возможно за счет увеличения реактивной составляющей момента, возникающей из-за разности индуктивных сопротивлений реакции якоря по продольной и поперечной осям ( $d$  и  $q$ ).

Целью представленной работы является определение влияния расположения магнитов, а именно угла наклона и расстояния между ними, на максимальный момент синхронной машины.

Для проведения исследований по методике [1] были получены геометрические размеры активного объема электрической машины, геометрия зубцово-пазовой зоны, обмоточные данные при получаемой необходимой мощности 5,25 кВт, частоте вращения 1000 об/мин, напряжении 220 В и частоте питания 83 Гц.

В дальнейшем в программном обеспечении «Ansys Motor-Cad» производилось моделирование двигателя и электромагнитных процессов, которые происходят с ним. Исследуемый двигатель рассматривался при 3-х положениях магнитов – рис. 1,2,3.

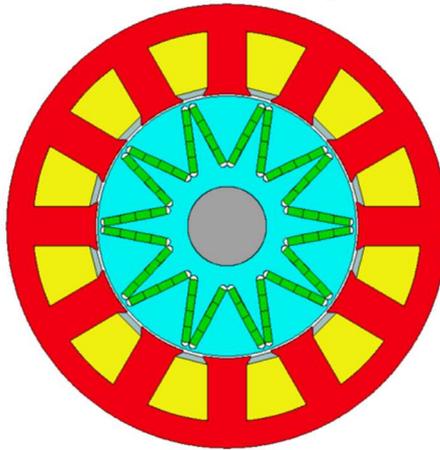


Рис.1 – Наклон магнитов на угол  $56.7^\circ$

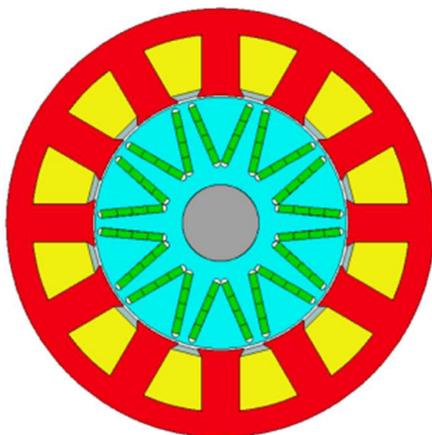


Рис.2 – Наклон магнитов на угол 47°

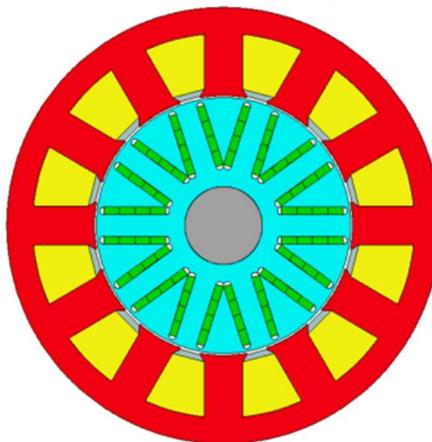


Рис.3 – Наклон магнитов на угол 36°

Таблица 1 – Реактивный момент двигателя

Угол наклона магнитов	56,7°	47°	36°
Реактивный момент	3,5 Н · м	5,23 Н · м	6,36 Н · м

В итоге было установлено, что при изменении угла наклона V-образных магнитов возникает путь для прохождения реактивного потока, что позволяет увеличить реактивный момент. Наилучшее положение магнитов в этом случае – параллельное, то есть наклон на 36°.

Литература:

1. Шевченко А.Ф. Проектирование электрических машин с постоянными магнитами: учебное пособие/ А.Ф. Шевченко, А.Г. Приступ, Ю.Г. Бухгольц, Т.В. Честюнина, Д.М. Топорков, Г.Б. Вяльцев – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. –146 с.
2. Шевченко А.Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками Часть 1. Основы теории и конструкция: методическое руководство по курсовому и дипломному проектированию/
3. Ю.Г. Бухгольц, А.В. Комаров, А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1995 – 39 с.
4. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов/ И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – М.: Высшая школа, 2005. – 766 с.
5. Tesla: Electric Cars, Solar & Clean Energy–  
URL:<https://www.tesla.com/>

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОТЕРЬ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

О.А. Жилин

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, oleg.zhilin.1998@mail.ru

Научный руководитель: Топорков Д.М., к.т.н., доцент

*В данной работе приведены недостатки аналитических методов и преимущества численных методов расчета добавочных потерь в асинхронном тяговом электродвигателе, работающем от частотного преобразователя с широтно-импульсной модуляцией. Обоснована необходимость разработки инженерной методики расчета потерь частотно-регулируемого тягового асинхронного двигателя на этапе его проектирования. Разработан и описан метод оценки потерь асинхронных тяговых электродвигателей с применением методов численного моделирования.*

*This paper presents disadvantages of analytical methods and advantages of numerical methods for calculating additional losses in traction induction motor operating from frequency converter with pulse-width modulation. The necessity of the development of an engineering methodology for calculating losses of a frequency-controlled traction induction motor at the stage of its design has been substantiated. A method for estimating losses of traction induction electric motors using numerical modeling methods has been developed and described.*

Тяговый электропривод является одним из основных узлов электротранспортных средств, его характеристики во многом определяют характеристики транспортного средства в целом. На сегодняшний день, как показал опыт эксплуатации, привод переменного тока с частотно-регулируемыми асинхронными тяговыми двигателями, получающими питание от автономных инверторов напряжения на основе IGBT транзисторов, является наиболее эффективным решением [1].

При разработке нового асинхронного тягового электродвигателя, работающего от частотного преобразователя, встречаются следующие основные проблемы:

- существующие подходы разработки тяговых электрических машин, описываемые в научно-технической литературе (Курбасов А.С., Находкин М.Д., Копылов И.П. и др.), могут быть использованы на практике, но они не учитывают дополнительные потери от широтно-импульсной модуляции (ШИМ) преобразователя;
- отсутствуют инженерные методики, которые учитывали бы возникающие дополнительные потери в асинхронном тяговом электродвигателе при работе от преобразователя с ШИМ.

Целью работы была разработка инженерной методики расчета потерь частотно-регулируемого тягового асинхронного двигателя на этапе его проектирования.

Для осуществления поставленной цели было необходимо выполнить следующие действия:

- выбрать метод исследования потерь в асинхронном тяговом двигателе, работающем от частотного преобразователя;
- разработать способ расчета и исследовать электрические потери в обмотке статора асинхронного тягового двигателя;
- разработать способ получения амплитуд и частот высших гармонических составляющих тока от ШИМ преобразователя;
- исследовать влияние индуктивности электродвигателя на амплитуды высших гармонических составляющих тока двигателя при различных частотах несущей волны ШИМ преобразователя;
- получить зависимость рекомендуемых размеров обмоточного проводника, активной геометрии электродвигателя от частоты коммутации частотного преобразователя.

Исследование проводилось на базе асинхронного тягового электродвигателя АД-4450, мощность 360 кВт, работающего в составе тягового привода карьерного самосвала БЕЛАЗ 90 т.

В карьерных самосвалах наибольшее распространение получила следующая система электропривода переменного тока с автономным источником: дизельный двигатель вращает вал синхронного генератора, вывода которого подключаются к неуправляемому выпрямителю. Выпрямленное напряжение подается на инверторы, подключенные к тяговым асинхронным электродвигателям. Инверторный преобразователь строится на IGBT-транзисторах, частота коммутации которых ограничивается в пределах менее 1 кГц для типичного диапазона основной частоты от 0 до 160 Гц [2, 3].

Преобразователь частоты с ШИМ на своем выходе создает определенный спектр гармонических напряжений, обуславливающих гармонические токи в машине (см. рисунок 1). Как следствие, возникают дополнительные потери в машине от высших гармоник. Они приводят в свою очередь к уменьшению КПД самого двигателя, а также перегреву его активных частей. На этапе разработки машины важно точно оценить эти потери для снижения издержек производства.

В асинхронных тяговых двигателях зачастую используется двухслойная обмотка с укорочением шага и большим числом витков. В таком случае возможно два случая расположения сторон катушек статора: в пазе лежат либо две стороны катушек одной фазы, либо две стороны катушек разных фаз. В результате чего становится

затруднительно оценить аналитическими методами возникающие дополнительные потери от высших гармонических составляющих, учитывая вытеснение самого тока и эффект близости проводников. Также сам спектр высших гармоник тока будет зависеть от частоты несущей волны ШИМ и индуктивности электродвигателя. Поэтому было принято решение использовать численные методы расчета.

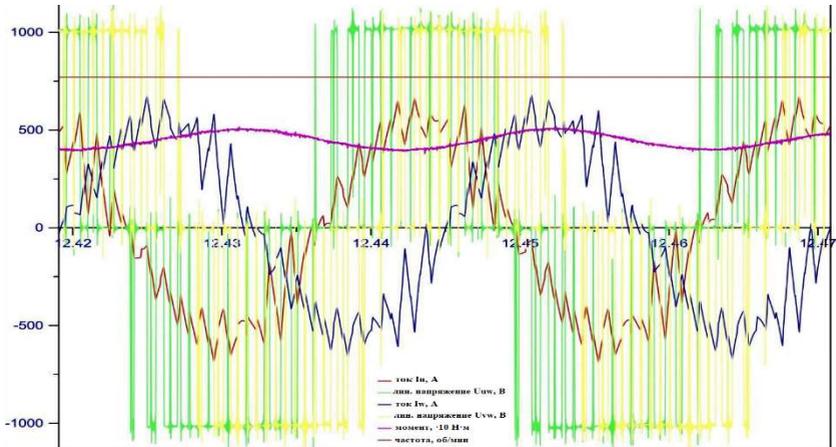


Рис. 1 – Кривые напряжения, тока и момента электродвигателя АТД-4450/6 при работе от преобразователя частоты

Для численного расчета был выбран программный продукт FEMM 4.2 исходя из результатов, полученных из моделирования простейшего случая: в пазе находятся два проводника, по которым протекает синусоидальный ток одной фазы в одном направлении. На рисунке 2 слева представлено распределение плотности тока по высоте паза согласно теории, представленной в любой научной литературе. Помимо вытеснения тока проявляется эффект близости проводников. На рисунке 2 по середине и справа представлены результаты моделирования этого же случая в Ansys Maxwell и FEMM соответственно. График распределения плотности тока по высоте паза в FEMM аналогичен с теорией. А результаты полученные в Ansys не учитывают эффект близости.

Расчет возникающих потерь от ШИМ преобразователя производится методом наложения. Для этого в FEMM моделируется магнитное поле при основной и каждой высшей гармонике соответствующей частоты и амплитуды тока. В последующем вычисляются потери в каждом проводнике. А затем берется сумма потерь от всех гармонических

составляющих. По предварительной оценке, увеличение потерь в тяговом электродвигателе АД-4450 только от несущей частоты ШИМ (783 Гц) составляет 8%, не учитывая наличие остальных высших гармоник.

Амплитуды и частоты возникающих высших гармоник получаем следующим образом: в рабочем диапазоне скоростей вращения для высших гармоник ротор асинхронного тягового двигателя считается неподвижным [4]. В программном продукте Matlab Simulink моделируется ШИМ модуляция, которая прикладывается к зажимам Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя, пренебрегая контуром намагничивания. В результате на выходе данного моделирования получается кривая тока, которая раскладывается в ряд Фурье и выделяются амплитуды высших гармоник соответствующих частот.

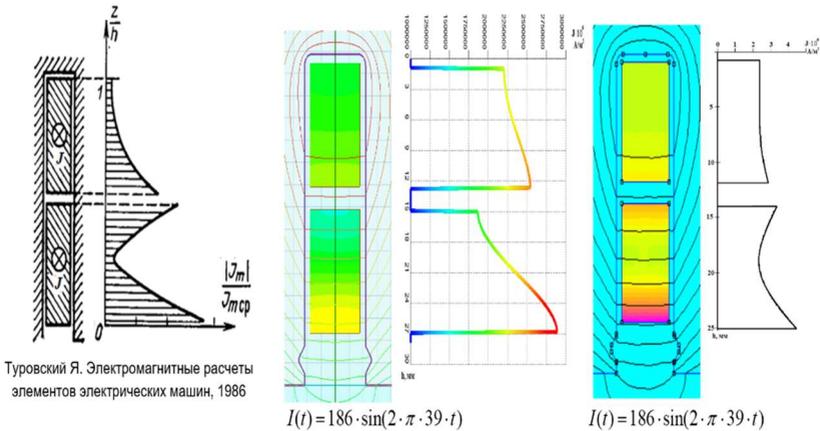


Рис. 2 – Картины распределения плотности тока по высоте паза: теория, результат в Ansys Maxwell и результат в FEMM 4.2 соответственно

В настоящее время на основе разработанного способа расчета, описанного выше, рассматривается влияние частоты ШИМ и индуктивности двигателя на амплитуды высших гармонических составляющих тока двигателя, рассматривается влияние размеров обмоточных проводников и активной геометрии двигателя на его добавочные потери при питании от частотного преобразователя с ШИМ. Также необходимо рассмотреть эффект вытеснения тока и эффект близости в лобовых частях асинхронного двигателя. Все полученные

результаты лягут в основу разрабатываемой инженерной методики расчета потерь частотно-регулируемого тягового асинхронного двигателя.

Литература:

1. *Камышьян А.М.* Структура и алгоритмы управления бесконтактным тяговым электроприводом карьерных самосвалов: дис. ... кандидата технических наук: 05.09.03. – Санкт-Петербург., 2019. – 141 с.

2. *Marcin Steczek, Arunava Chatterjee, Debashis Chatterjee* Optimization of current harmonics for three-level VSI based induction motor drive suitable for traction application // IET Power Electronics. – March 2018. - Vol. 11, N 9. – P. 1529-1536;

3. *Erich Schmidt, Florian Mullner, Harald Neudorfer* Modeling and precalculation of additional losses of inverter fed asynchronous induction machines of traction drives // 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), May 2011: - P. 533 – 538;

4. *Шестаков А.В.* Моделирование и гармонический анализ импульсного напряжения при синусоидальной широтно-импульсной модуляции // Общество. Наука. Инновации: Сборник статей XVIII Всероссийской научно-практической конференции: в 3 томах. – Киров: Вятский государственный университет, 2018. – С. 1137 – 1144.

# ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ПРОИЗВОДСТВА СИНХРОННОЙ ПЛАСТИКОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Д.К. Иванов

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, ya@dmitriyiv.ru

Научный руководитель: Г.О. Гейнрих

*В данной работе рассматриваются особенности проработки конструкции и изготовления пластикового двигателя на FDM/FFF 3D-принтерах. Подбор материала и подготовка перед печатью. Особенности посадки с зазором.*

*This paper discusses the features of the design and manufacture of a plastic motor on FDM/FFF 3D printers. Selection of material and preparation before printing. Features of landing with a gap.*

В настоящее время всё большую популярность получают электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов. Это обуславливается их высокими энергетическими и хорошими массогабаритными показателями, большим сроком службы, перегрузочной способностью и высокой надёжностью.

Сегодня, в качестве основного материала, для производства электрических машин используется- электротехническая сталь. В электрических машинах со стальным магнитопроводом наблюдается проблема пульсаций момента из-за неравномерности воздушного зазора (явно-выраженной зубчатости). Теоретически, данную проблему можно устранить, если применить пластик для изготовления магнитопровода.

Целью данной работы является изготовление синхронного двигателя с постоянными магнитами на 3D-принтере из пластика.

Для изготовления электрической машины была выбрана марка филамента- PETG

PETG устойчив к механическим воздействиям, имеет температуру «размягчения» от 90°C, устойчив к химическому воздействию. Имеет, сравнительно, небольшой коэффициент усадки что положительно сказывается на конечный результат.

Данная марка пластика не требует FDM принтер с активной термокамерой, достаточно FFF с пассивной, или вовсе без камеры, что упрощает процесс изготовления опытного образца в единичном экземпляре.

Для изготовления модели необходимо сделать подготовку принтера к печати. Подготовка состоит из следующих шагов:

1) Калибровка шагов подающего механизма: Bowden/Direct. Direct-тип подачи, при котором подающий механизм находится на каретке с экструдером, прямая подача филамента в экструдер. Bowden- при таком типе подачи подающий механизм находится на раме принтера, что увеличивает расстояние от подающего механизма до экструдера. Калибровка нужна для точной дозировки подаваемого материала в экструдер, и, соответственно, повышения качества печатаемой детали.

2) Калибровка температуры экструдера по PID- данный пункт нужен для поддержания стабильной температуры горячей части экструдера. При типе контроля Bang-Bang температурные скачки намного больше.

3) Настройка кинематики принтера: натяжка ремней, смазка направляющих осей- натянутые ремни обеспечивают стабильное движение каретки экструдера в двух осях, что позволяет обеспечить точность при печати.

4) При помощи калибровочных моделей настроить следующие параметры в слайсере: поток, количество периметров, скоростные параметры, рывки/ускорения, ширину экструзии, настройка алгоритма Linear Advance- Данные параметры напрямую влияют на качество и на прочностные характеристики модели. Алгоритм Linear Advance нужен для хорошей печати углов модели, позволяет снизить давление пластика в экструдере при печати углов.

5) Коррекция горизонтальных размеров модели- коррекция горизонтальных размеров нужна для компенсации усадки пластика и настройки зазоров для посадки деталей.

6) Ограничение тока на шаговых двигателях: подбирается исходя из параметров передвижения каретки экструдера (скорость, ускорения) влияет на качество печати. Если ток будет маленький, то моторы будут пропускать шаги при повышенных скоростях, а если слишком большой- модель будет ребристая, из-за резких передвижений каретки. Так же при большом токе повышается износ кинематики за счёт резких перемещений и рывков.

На филаменты нет единого ГОСТа, производители делают материал по своим внутренним стандартам. Поэтому, подбор коэффициентов горизонтального расширения, температур, потока и т.п, нужно делать непосредственно после вскрытия новой катушки, это необходимо делать для одной партии одинаковой марки филамента

*Примечание: пигмент в филаменте может повлиять на свойства печати, это необходимо учесть.*

Подготовка филамента перед печатью- это один из самых важных пунктов для успешной печати.

Любой филамент гигроскопичен, что сказывается на качестве печати и влияет на: спекаемость слоёв, качество поверхности. Требуется предварительная сушка в подходящем температурном диапазоне на протяжении 8-10 часов. Для PETG температура сушки 80°C

Помимо настройки печатающего устройства, необходимо учитывать особенности печати пластиком при моделировании в CAD-системе.

Угол нависания:

Пластик, под действием силы тяжести, без хорошего охлаждения стекает и не получается отпечатать плоскости с углом нависания больше 50 градусов относительно стола принтера. Соответственно, на больший угол требуется постройка вспомогательных, удаляемых конструкций-поддержек. Поддержка строится вместе с основной моделью, но с минимальным количеством материала, т.к. данный элемент служит только в качестве опоры плоскостей с большим углом нависания.

Угол нависания можно рассчитать через тангенс угла, взяв в числитель значение ширины экструзии сопла, а в знаменатель высоту слоя. Далее, обращаемся к таблице Брадиса и находим искомый угол.

Как показал опыт, данный угол лучше подбирать экспериментально, из-за особенностей марки филамента.

Посадка и допуски отверстий:

Из практических испытаний было установлено, что для обеспечения сборки деталей требуются разные допуски: 0.15 мм- для плотной посадки и сквозных отверстий под шпильки, 0.2 мм- для осевой, а также для деталей с линейным перемещением.

В процессе изготовления были выявлены нюансы связанные с печатью вала машины.

Печать толстым слоем (0.2-0.3мм) приводила к слишком ребристой поверхности, что не позволяло получить хорошую посадку в полюсном держателе. Чтобы компенсировать ребристую поверхность приходилось увеличивать диаметр посадочного отверстия в держателе, что вызывало осевой и радиальный люфт. Применили уменьшение высоты слоя- это повысило точность печати и ребристость вышла менее выраженной, получилось достичь минимального значения посадки и радиального люфта.

Процесс печати держателя полюсов был сразу установлен на высоте слоя в 0.1 мм и минимально допустимой ширине линии, чтобы достичь минимальных значений радиусов на внутренних углах в местах для посадки магнитов. В следствие чего получилось установить магниты без шлифовки посадочных мест.

Держатель зафиксирован на валу при помощи стопорных колец и шпонки.

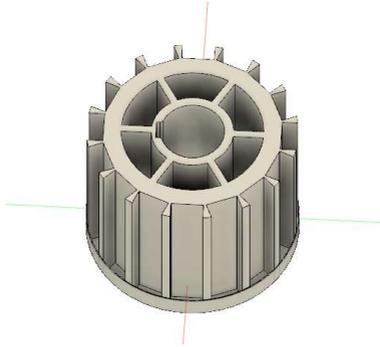


Рис. 1 – Держатель полюсов

В производимой электрической машине статор изготовлен в виде 4-х сегментов, которые фиксируются в крышках и стягиваются шпильками. Данная конструкция значительно упрощает процесс намотки обмотки.

Сегменты и крышки печатали на толщине слоя 0.2 мм и общей шириной линии в 0.4 мм. Для достижения плотной посадки внешней обоймы подшипника в посадочное место крышки уменьшили ширину периметра до 0.15 мм, а значение высоты слоя оставили неизменным.

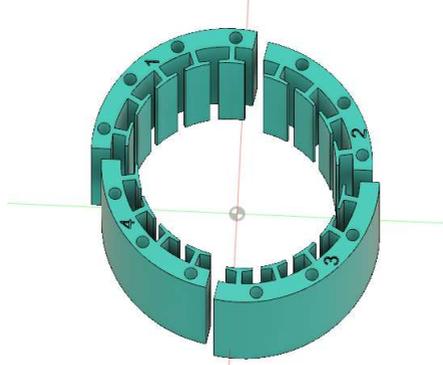


Рис. 2 – Сегменты статора

Органолептическим методом исследования было замечено, что ротор не имеет большого радиального биения, осевой люфт вала отсутствует.

Итогом нашей работы стал работоспособный макет синхронной электрической машины с постоянными магнитами в котором моменты пульсации сведены к минимуму.

Литература:

1. Топорков Д.М., Новокрещенов О.И., Честюнина Т.В., Вяльцев Г.Б., Гейнрих Г.О., Царегородцев А.Н. Производство электрических машин: учебное пособие / коллектив авторов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021 – 179 с.
2. Шевченко А.Ф., Приступ А.Г., Бухгольц Ю.Г., Честюнина Т.В., Топорков Д.М., Вяльцев Г.Б. Проектирование электрических машин с постоянными магнитами : учебное пособие. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – 152 с.
3. Приступ А.Г., Шевченко А.Ф. Электрические машины с постоянными магнитами: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016 – 64 с.
4. Методы расчета характеристик синхронного двигателя с постоянными магнитами. Концепция «известных точек» / Г. О. Гейнрих, А. Ф. Шевченко, Г. Б. Вяльцев. - Текст : непосредственный // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. 15 Всерос. науч. конф. молодых ученых, посвящ. Году науки и технологий в России, Новосибирск, 6–10 дек. 2021 г. : в 10 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – Ч. 5. – С. 64–68.

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**А.С. Лобачева**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, lobacheva.2018@stud.nstu.ru  
Научный руководитель: Топорков Д.М., к.т.н.**

*В данной работе представлен обзор на разновидности комбинированного возбуждения синхронного генератора для автономных систем электроснабжения. Изучены актуальность и тенденции в дальнейших исследованиях данного типа машин. Рассмотрены принцип работы и выходные характеристики на примере спроектированного и испытанного кафедрой ЭМ ФМА НГТУ образца.*

*This paper presents a review on the varieties of combined excitation of synchronous generator for autonomous power supply systems. Relevance and trends in further research of this type of machines have been studied. Also the principle of operation and output characteristics were considered on the example of a sample designed and tested by the Department of EM of FMA NSTU.*

Синхронные генераторы с постоянными магнитами имеют большое количество преимуществ относительно других видов электрических машин, например, массогабаритные показатели, улучшенные выходные характеристики, отсутствие щеточно-коллекторного узла. Однако их самый большой недостаток - невозможность прямого регулирования магнитного потока, то есть для регулирования выходного напряжения машины необходимо использовать дорогостоящие преобразователи частоты [1]. Поэтому для регулирования величины выходного напряжения существует необходимость введения в магнитную цепь переменной составляющей.

Данную проблему может решить использование синхронного генератора с комбинированным возбуждением (СГВК). Комбинированное возбуждение подразумевает, что возбуждение машины совершается от магнитных потоков постоянных магнитов и обмотки возбуждения. Такой вид возбуждения позволит использовать более дешевые и надежные выпрямители, а регулирование выходного напряжения будет осуществляться путем изменения тока возбуждения.

В научных работах зарубежных ученых можно встретить некоторые модификации синхронного генератора с комбинированным возбуждением [2-5].

Один из наиболее выгодных вариантов - расположение обмотки возбуждения на статоре, что означает отсутствие щеточно-

коллекторного узла. Это позволит повысить надежность и ремонтоспособность машины.

Кафедра ЭМ НГТУ также занималась разработкой СГВК. Рассматривался вариант, при котором синхронный генератор будет иметь радиально-аксиальное возбуждение (рисунок 1).

Магнитный поток машины замыкается радиально и аксиально. Радиальный магнитный поток создается за счет постоянных магнитов, а аксиальный поток - за счет неподвижной обмотки возбуждения, которая располагается между двумя пакетами статоров.

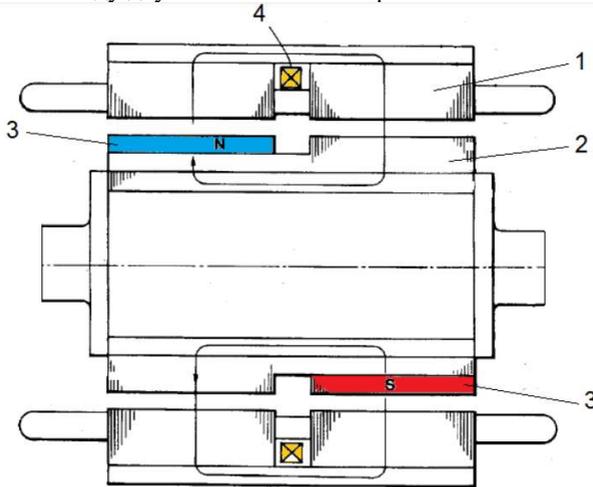


Рис. 1 – Схема синхронного генератора с радиально - аксиальным возбуждением: 1 - сердечник статора, 2 – сердечник ротора, 3 - постоянные магниты, 4 – обмотка возбуждения

При питании обмотки возбуждения, ее магнитный поток будет встречно направлен потоку от постоянных магнитов. За счет этого увеличивается магнитный поток, проходящий через магнитопровод полюсов, и уменьшается постоянная составляющая магнитной индукции в воздушном зазоре [6]. Благодаря взаимодействию двух разнонаправленных потоков возбуждения происходит перераспределение магнитного поля в объеме электрической машины, благодаря чему происходит регулирование выходного напряжения генератора.

Был произведен электромагнитный расчет и определены параметры машины [7]. Кафедрой ЭМ был спроектирован и произведен опытный образец, имеющий строение, представленное на рисунке 2. Позже

образец прошел испытания, в ходе которых были сняты выходные характеристики (рисунок 3).

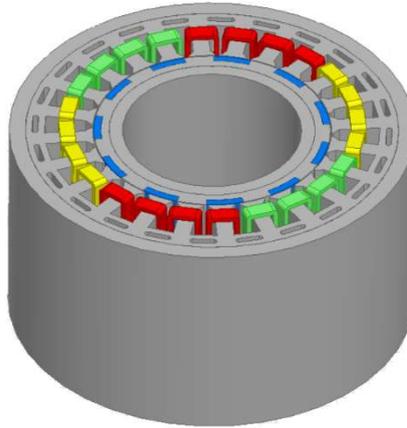


Рис. 2 – Модель генератора в программе ANSYS

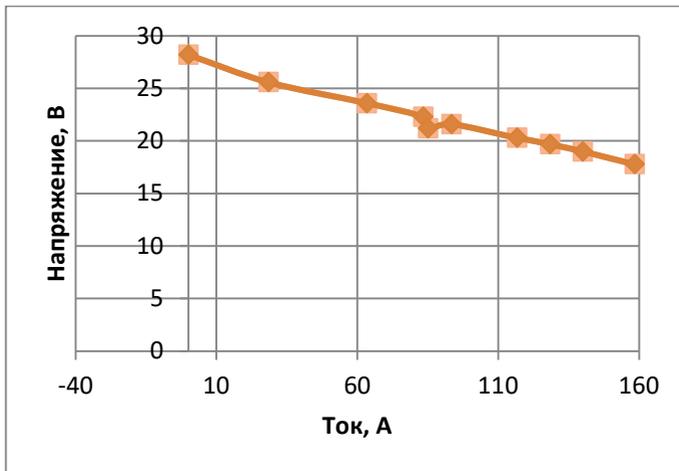


Рис. 3 – Внешняя характеристика разработанного генератора

Как видно из графика, внешняя характеристика имеет некий «провал» напряжения. Для выяснения причин необходимо в будущем провести электромагнитный расчет в программных обеспечениях путем конечно-элементарного анализа. Используя полученные данные, необходимо исследовать закономерности работы машины и углубить знания в области комбинированного возбуждения, что позволит создать

работающую математическую модель для дальнейшего проектирования синхронных генераторов с комбинированным возбуждением.

Исследования комбинированного возбуждения синхронного генератора позволят в будущем, сохранив достоинства синхронного генератора с постоянными магнитами и улучшив его, получить машину с более дешевым и простым управлением, а также это позволит расширить области ее применения и внедрения в производство.

Литература:

1. Электрические машины с постоянными магнитами: учебное пособие / А.Ф. Шевченко, А.Г. Приступ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 64 с.;
2. Gieras J. F. PM synchronous generators with hybrid excitation systems and voltage control Capabilities: A review //2012 XXth International Conference on Electrical Machines. – IEEE, 2012. – С. 2573-2579.
3. Wang S. et al. Hybrid excitation permanent magnet synchronous machines and their structures—Combination art of elements of machines //2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM). – IEEE, 2014. – С. 2618-2624.
4. Zhao C., Yan Y. A review of development of hybrid excitation synchronous machine //Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005. – IEEE, 2005. – Т. 2. – С. 857-862.
5. Amara Y. et al. Hybrid excitation synchronous machines: Energy-efficient solution for vehicles propulsion //IEEE Transactions on vehicular technology. – 2008. – Т. 58. – №. 5. – С. 2137-2149.
6. Известия Томского политехнического университета: научный журнал / учред. Томский политехнический университет. 1971. ISSN 2500-1019. 1971, № 209.
7. Voltage regulation characteristics of a two-pack synchronous generator with combined excitation / D. M. Toporkov, I. L. Popov, A. A. Blinov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, 21–24 мая 2019 года. Vol. 760. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012047. – DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012047. – EDN UVMMYV.

## УЛУЧШЕНИЕ КОММУТАЦИИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Н.К. Маломошнов**

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

**Научный руководитель: Честюнина Т.В., к.т.н.**

*Рассмотрены область применения, преимущества, особенность конструкции, разновидности причин выхода из строя тяговых электродвигателей постоянного тока, причины искрения под щетками. Изложены методы борьбы с неудовлетворительной коммутацией тяговых электродвигателей постоянного тока.*

*The scope, advantages, design features, varieties of reasons for the failure of DC traction motors, the causes of sparking under the brushes are considered. Methods of combating unsatisfactory switching of DC traction motors are outlined.*

Тяговый электродвигатель (ТЭД) — электрический двигатель, предназначенный для приведения в движение транспортных средств (электровозов, электропоездов, тепловозов, трамваев, троллейбусов, электромобилей, электроходов, большегрузных автомобилей с электроприводом, танков и машин на гусеничном ходу с электропередачей, подъемно-транспортных машин, самоходных кранов и т. п.).

Основное отличие ТЭД от стационарных электродвигателей большой мощности заключается в условиях монтажа двигателей и ограниченном месте для их размещения. Это привело к специфичности их конструкций (ограниченные диаметры и длина, многогранные станины, специальные устройства для крепления и т. п.). Тяговые двигатели городского и железнодорожного транспорта, а также двигатели мотор-колёс автомобилей эксплуатируются в сложных погодных условиях, во влажном и пыльном воздухе. Также в отличие от электродвигателей общего назначения ТЭД работают в самых разнообразных режимах (кратковременных, повторно-кратковременных с частыми пусками), сопровождающихся широким изменением частоты вращения ротора и нагрузки по току (при трогании с места может в 2 раза превышать номинальный). При эксплуатации тяговых двигателей имеют место частые механические, тепловые и электрические перегрузки, тряска и толчки. Поэтому при разработке их конструкции предусматривают

повышенную электрическую и механическую прочность деталей и узлов, теплостойкую и влагостойкую изоляцию токоведущих частей и обмоток.

Преимущества тягового электродвигателя постоянного тока:

- высокий пусковой момент;
- возможность широко регулировать скорость;
- легко реверсируются;
- имеет практически линейные регулировочные характеристики.

Машины постоянного тока используются только там, где невозможно подобрать равноценную замену. Это связано с наличием щёточно-коллекторного узла, который обуславливает большинство недостатков машины, основными из которых являются:

- повышается стоимость;
- сокращается ресурс работы;
- создаются радиопомехи, акустический шум;
- искрение под щётками ускоряет износ щёток и пластин коллектора;
- продукты износа покрывают внутреннюю полость машины тонким проводящим слоем, ухудшая изоляцию токопроводящих цепей.

Как правило, двигатель выходит из строя по причине неудовлетворительной коммутации. Коммутацией называется процесс переключения секций обмотки из одной параллельной ветви в другую путем замыкания этих секций щетками при переходе с одной коллекторной пластины на другую. При этом ток меняет знак на противоположный. При неудовлетворительной коммутации возникает искрение.

Искрение может вызываться большим количеством причин; обычно их разбивают на три группы: механические (рис.1), потенциальные, электромагнитные [1].



Рис. 1 – механические причины неудовлетворительной коммутации ТЭДПТ

Потенциальными причинами являются возникновение искровых разрядов через токопроводящую пыль (возникающую в результате истирания щеток) при достаточно большом напряжении между соседними коллекторными пластинами (межламельное напряжение) [2].

Электромагнитные причины возникают из-за наличия тока разрыва в коммутирующей секции. Величина искрения зависит от энергии запасенной в контуре секции [3].

На сегодняшний день в теории электрических машин подробно рассмотрены методы борьбы с искрением:

- Наличие компенсационной обмотки (потенциальные причины искрения) [4];
- Наличие добавочных полюсов с обмоткой, подключенной последовательно к обмотке якоря (электромагнитные причины искрения) [4];
- Базирования якоря [5];
- Изменение конструкции щеткодержателей [6];

Однако при проектировании компенсационной обмотки, обмотки добавочного полюса и геометрии магнитопроводов основного и добавочного полюсов в расчетах ряд важных величин рассчитать аналитически не представляется возможным. Например, это поля рассеивания обмотки добавочных полюсов. Это связано со сложной геометрией магнитопроводов ДПТ, нелинейностью характеристик магнитопроводов и широкий диапазон изменения токов в обмотках тягового двигателя из-за особенности его работы [7], [8].

Современные методы численного моделирования позволяют более точно рассчитать магнитное поле в зоне коммутации и учесть особенности геометрии магнитопровода и его свойств [9], [10].

Численные методы обеспечивают высокую точность за счет большого вычислительного времени. Аналитические методы могут быть упрощены для достижения быстрого процесса расчета. Однако в большинстве случаев это приводит к снижению точности.

Для исследовательской части работы был выбран метод МКЭ для моделирования ТЭД посредством бесплатного программного обеспечения FEMM4.2.

Суть метода заключается в разбиении некоторой области, в которой интересующий нас параметр изменяется по сложному закону, на множество подобластей, связанных между собой в точках соприкосновения. Закон изменения неизвестного параметра в этих подобластях предполагается известным (например, линейным или квадратичным). Этот подход очень похож на процесс измерения криволинейного пути на карте – когда сложная кривая заменяется набором связанных по концам прямолинейных отрезков [11].

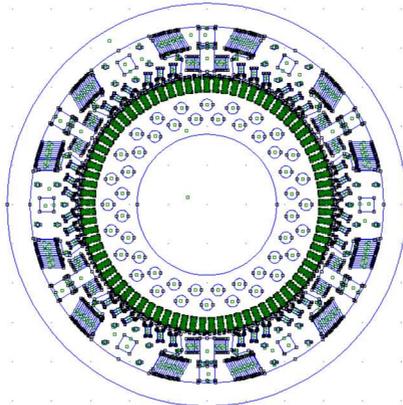


Рис.2 – модель ТЭДПТ в FEMM4.2

Используя программу FEMM4.2 можно построить модель ТЭД постоянного тока и смоделировать магнитное поле в зоне коммутации для расчета ЭДС коммутации. Также, можно исследовать влияние величины воздушного зазора и формы полюсного наконечника добавочного полюса на эту ЭДС.

В докладе будет представлена модель тягового ДПТ мощностью 800 кВт, с помощью которой можно рассмотреть магнитное поле в зоне коммутации для дальнейшего исследования коммутации.

Литература:

1. Алексеев А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи - Л.: Энергия, 1967. - 432 с.
2. Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, В.И. Бочаров, М.А. Козорезов. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с
3. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины: (Теория, конструкция, проектирование) - 2-е изд., перераб.и доп. - М.; Л.: Энергия, 1965. - 232 с.
4. Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
5. Выбор рациональной схемы базирования якоря электрической машины постоянного тока / Д. Ю. Белан, И. О. Петров, М. В. Казадаев [и др.] // Молодежь и XXI век - 2016 : Материалы VI Международной молодежной научной конференции: в 4-х томах, Курск, 25–26 февраля 2016 года / Ответственный редактор Горохов А.А.. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2016. – С. 234-236.
6. Хомченко, Д. Н. Улучшение качества коммутации тяговых электродвигателей локомотивов на основе разработки конструкций щеткодержателей / Д. Н. Хомченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2. – С. 120-123.
7. Новик, Я.А. Численный расчет магнитного поля методом конечных элементов в электрических машинах с учетом насыщения стали / Я.А. Новиков // Изв. АН Латв.ССР. Сер.физ. и тех. наук. – 1974. – № 6. – С. 17–22.
8. Битюцкий И. Б. Новые методы расчёта и наладки коммутации машин постоянного тока – Новочеркасск: Ред. журн. «Изв. вузов. Электромеханика», 2003. – 226 с., ил.
9. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов / И.П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 326 с.: ил.; табл.; 21 см. – Библиогр.: С. 22–26, 28–30. – ISBN 5-06-003861-0
10. Иванов-Смоленский, А.В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин, А.И. Власов и др. Под ред. А.В. Иванова-Смоленского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 214, [1] с.: ил.; 22 см.; ISBN (в пер.).
11. Андреев, В. Б. Лекции по методу конечных элементов: учебное пособие / В. Б. Андреев ; В. Б. Андреев ; Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Фак. вычислительной математики и кибернетики. – Изд. 2-е, испр. и доп.. – Москва: МАКС Пресс, 2010.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РОТОРА ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Р.О. Никулин, А.Г. Приступ

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

*В данной работе описаны исследования направленные на оптимизацию массы ротора двигателя беспилотных летательных аппаратов, за счет уменьшения толщины магнита и ярма ротора без ухудшения энергетических характеристик.*

*This paper describes research aimed at optimizing the mass of the unmanned aerial vehicle engine rotor, by reducing the thickness of the magnet and rotor fair without deteriorating the energy characteristics.*

На сегодняшний день в основном на БПЛА устанавливаются синхронные электрические двигатели с дробно-зубцовыми обмотками, постоянными магнитами и внешним ротором, при такой конструкции, получается, развить больший момент при том же объеме двигателя, снизить массу и улучшить охлаждение двигателя, также конструкция с внешним ротором позволяет достигать высоких значений частоты вращения двигателя, так как у такого исполнения магниты крепятся на внутренней части ротора и минимизируется риск разлета магнитов от центробежных сил.

В БПЛА как и в других летательных аппаратах очень важна масса, поэтому оптимизация массы является важным этапом разработки двигателя. В данном исследовании будет рассмотрен вариант снижения массы двигателя за счет уменьшения толщины магнита и ярма ротора.

В качестве показателя для сравнения результатов была выбрана величина магнитной индукция в воздушном зазоре. Для определения амплитуды рабочей гармоники вектора магнитной индукции в воздушном зазоре был произведен расчет поля методом конечных элементов, где статор был задан как сплошной цилиндр, при этом при изменении размеров магнитов и ярма диаметр расточки менялся таким образом, чтобы внешний диаметр двигателя не превышал заданного значения.

Так как ярмо ротора имеет маленькую толщину, его не получится сделать шихтованным, поэтому было решено использовать стандартную бесшовную трубу из Стали 20, которая после механической обработки будет иметь необходимые размеры. Данная сталь была добавлена в библиотеку, и выбрана в качестве материала ротора.

В ходе выполнения исследовательской части были построены зависимости амплитуды рабочей гармоники вектора магнитной индукции в воздушном зазоре от толщины ярма, а также от толщины магнитов.

Первым исследованием стала зависимость амплитуды рабочей гармоники вектора магнитной индукции в воздушном зазоре от толщины магнитов, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость амплитуды рабочей гармоники от толщины магнита

Толщина магнита, мм	Амплитуда рабочей гармоники, Т
0,3	0,681
0,35	0,734
0,4	0,777
0,45	0,805
0,5	0,827
0,55	0,844
0,6	0,858
0,65	0,870
0,7	0,882
0,75	0,889
0,8	0,901
0,85	0,905
0,9	0,915
0,95	0,927
1	0,932

Диаграмма зависимости амплитуды рабочей гармоники вектора магнитной индукции в воздушном зазоре от толщины магнитов представлена на рисунке 1.

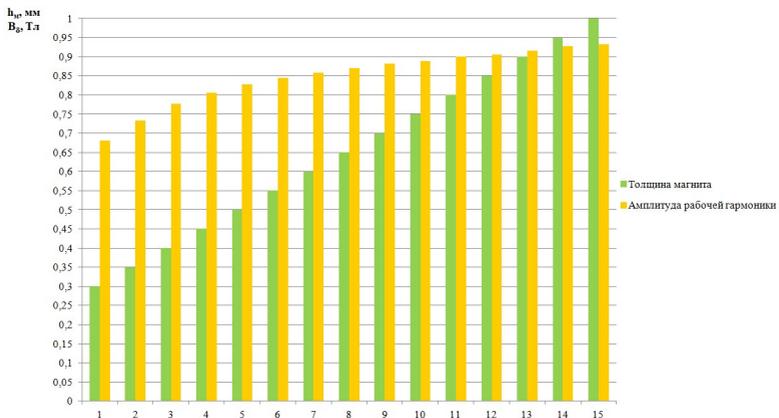


Рисунок 1 - Зависимость амплитуды рабочей гармоники вектора магнитной индукции в воздушном зазоре от толщины магнитов

Как видно из результатов исследования величина амплитуды рабочей гармоники перестает существенно расти после значения толщины магнита 0,75 мм, однако исходя из технологических соображений имеет смысл использовать магнит толщиной 1 мм, так как из технологических рекомендаций толщина магнита должна составлять не менее 10% от его длины, для обеспечения механической прочности.

Следующее исследование - это зависимость амплитуды рабочей гармоники вектора магнитной индукции в воздушном зазоре от толщины ярма. Далее с учетом изменения диаметра расточки было проведено исследование зависимости амплитуды рабочей гармоники вектора магнитной индукции в воздушном зазоре от толщины ярма, при магните N42, толщиной 1 мм, результаты исследования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость амплитуды рабочей гармоники от толщины ярма

Толщина ярма, мм	Амплитуда рабочей гармоники, Т
0,5	0,637
0,6	0,714
0,7	0,785
0,8	0,84
0,9	0,901
1	0,932
1,1	0,947

1,2	0,954
1,3	0,958
1,4	0,961
1,5	0,963
1,6	0,964

Диаграмма зависимости амплитуды рабочей гармоники вектора магнитной индукции в воздушном зазоре от толщины ярма с представлена на рисунке 2.

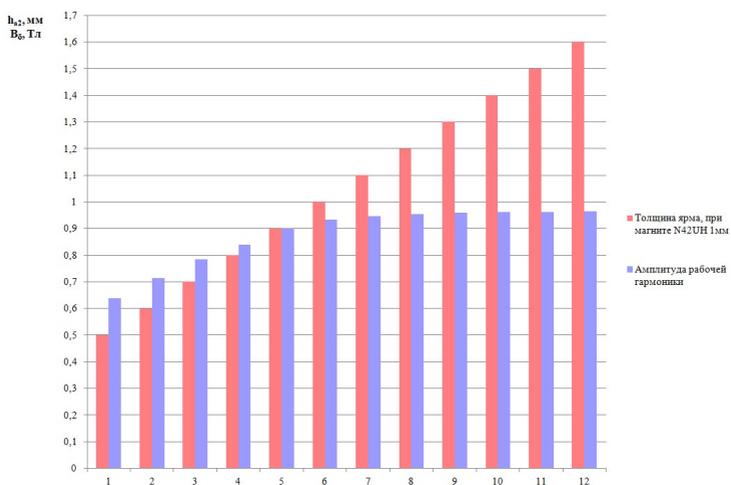


Рисунок 2 - Зависимость амплитуды рабочей гармоники вектора магнитной индукции в воздушном зазоре от толщины ярма ротора

Исходя из полученных данных видно, что оптимальная толщина ярма составляет 1 мм, так как при меньших значениях ярмо уходит в насыщение, а при больших лишь увеличивается масса ярма, без изменения амплитуды рабочей гармоники вектора магнитной индукции в воздушном зазоре. Данные исследования показали возможность выбора оптимальных размеров толщины магнита и ярма ротора.

Литература:

1. Шевченко А.Ф. Проектирование электрических машин с постоянными магнитами: учебное пособие / А.Ф. Шевченко, А.Г. Приступ., Честюнина Т.В., Топорков Д.М., Вяльцев Г.Б. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020.
2. Электрические машины с постоянными магнитами: учебное пособие / А.Ф. Шевченко, А.Г. Приступ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 64 с.
3. 16. Производство электрических машин: учебное пособие / Д. М. Топорков, О. И. Новокрещенов, Т. В. Честюнина [и др.]. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2021. – 179 с. – ISBN 978-5-7782-4532-7. – EDN HRHJCZ.
4. 17. Бодрова А. С., Безденежных С. И. Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами: конф. г //Коломна. – 2016. – Т. 274. – С. 106-113.

# СРАВНЕНИЕ ДВУХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, РАССЧИТАННЫХ НА ОДИНАКОВУЮ МОЩНОСТЬ И ЧАСТОТУ ВРАЩЕНИЯ И ОТЛИЧАЮЩИХСЯ КОНСТРУКТИВНЫМ ИСПОЛНЕНИЕМ РОТОРА

А.А. Отставнов

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, onirs@corp.nstu.ru

Научный руководитель: Честюнина Т.В., к.т.н.

*В статье сравниваются два синхронных генератора, рассчитанных на одинаковую мощность и частоту вращения. Они отличаются конструктивным исполнением ротора. На сегодняшний день существует ряд способов по уменьшению радиальных размеров. Один из таких: использование дробной зубцовой обмотки, направленной на уменьшение диаметра статора и, следовательно, радиальных размеров. Второй рассматриваемый способ заключается в использовании внешнего ротора, который способствует уменьшению пространства и позволяет в полной мере реализовать возможности по размещению обмотки возбуждения.*

*The article compares two synchronous generators designed for the same power and rotation speed. They differ in the design of the rotor. To date, there are a number of ways to reduce the radial dimensions. One of these is the use of fractional tooth winding, aimed at reducing the diameter of the stator and, consequently, the radial dimensions. The second method under consideration is to use an external rotor, which helps to reduce the space and allows you to fully realize the possibilities of placing the excitation winding.*

*Ключевые слова: генератор, синхронный генератор, внешний ротор, дробно зубцовая обмотка, сравнение технологий создания генераторов микроГЭС.*

*Keywords: generator, synchronous generator, external rotor, fractional tooth winding, comparison of micro HPP generator technologies.*

В России для производства электроэнергии активно использовали малые реки со второй половины XIX века. Сначала гидравлическую энергию преобразовывали в механическую с помощью водяных колёс, а позже, с появлением водяных турбин, водяные мельницы были замещены гидроэлектростанциями. В годы Советской власти особое внимание было уделено укреплению энергетической основы страны. Значительная роль в этом отводилась гидроэлектростанциям, дающим электроэнергию независимо от доступности топлива и состояния транспорта. В результате наблюдается глобальная тенденция к использованию большего количества возобновляемых источников энергии, и ожидается, что доля альтернативной энергетики в мировом производстве электроэнергии увеличится в следующие десятилетия.

В настоящее время снова проснулся интерес к малым и микроГЭС. Их применение позволяет электрифицировать промышленность в отдельных районах в труднодоступных местах, для которых передача электроэнергии нецелесообразна, а стоимость энергии, вырабатываемой другими способами, велика; а помимо этого решить ряд социальных и экономических проблем, в том числе проблем интеграции страны, что особенно важно в развивающихся странах. Кроме того, процессу вовлечения в оборот энергоресурсов малых рек способствуют непрерывный рост затрат на производство электроэнергии на ТЭС и АЭС и ужесточения экономических требований к этим объектам. Энергия, вырабатываемая микроГЭС, может использоваться как объединенной энергосистемой, так и для снабжения отдельных потребителей.

Один из центральных этапов в сооружении гидроэлектростанции – создание и ввод в эксплуатацию гидрогенератора. На малых ГЭС получили наибольшие распространение синхронные генераторы. Они применяются при автономном режиме работы на изолированного потребителя промышленной частоты, при работе на маломощную систему, если мощность СГ составляет более 15% от мощности системы.

Наблюдается растущий интерес к машинам мощностью от 5 кВт до 100 кВт со скоростями от 30 до 100 об/мин для малых и микро ГЭС. Синхронные генераторы имеют высокую частоту вращения, которая не может быть обеспечена низким напором малых рек. Также возникают трудности с размещением обмотки возбуждения. Выполнение обмотки в классическом варианте многополюсного генератора, где  $q > 1$ , приводит к тому, что диаметр статора становится большим.

В электрических машинах малой мощности используются обмотки с  $q < 1$ , называемые “однозубцовой”, как правило, они охватывают один зубец, что позволяет проектировать машины с большим количеством полюсов [1,2,3]. Теория дробных зубцовых обмоток развита в работах кафедры электромеханики Московского энергетического института и Новосибирского государственного технического университета. По их практическому применению следует отметить работы А.Ф. Шевченко [4,5]. В его работах проведена систематизация дробных зубцовых обмоток с  $q < 1$ , рассмотрены особенности их устройства и принципа действия.

Использование таких обмоток позволяет значительно уменьшить диаметр статора и, следовательно, радиальные размеры. Однако уменьшение внутреннего пространства создает трудности с размещением обмотки возбуждения и не позволяет в полной мере реализовать возможности минимизации геометрии машины. Решение этой проблемы может быть реализовано путем разработки генератора с

внешним ротором. Так же часто микро ГЭС с такой обмоткой предлагается использование машин с постоянными магнитами, но при этом возникают сложности с регулированием выходного напряжения на генераторе. При использовании обмотки возбуждения возрастают размеры ротора.

В докладе будет представлено сравнение двух синхронных генераторов, рассчитанных на одинаковую мощность и частоту вращения и отличающихся конструктивным исполнением ротора.

#### Литература:

1. Многополюсные синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками. В 2-х ч.: Ч1 – Основы теории и конструкции. – Новосибирск: НГТУ, 1995. – 39 с.
2. *Честюнина Т.В.* Исследование многополюсных синхронных магнитоэлектрических генераторов с дробнымизубцовыми обмотками. – Новосибирск: НГТУ, 2012 – 18 с.
3. *Бухгольц, Ю.Г.* К вопросу расчета индуктивностей дробных зубцовых обмоток/ Ю.Г. Бухгольц, А.Г. Приступ, Т.В. Честюнина // Электро. – 2012. - №1. – С. 48-52.
4. *Шевченко, А.Ф.* Анализ магнитодвижущих сил дробных зубцовых обмоток электрических машин/ А.Ф. Шевченко, Т.В. Честюнина// Электротехника. – 2009. - № 12. - С. 3-7.
5. *Васичкин М. С.* Синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов с дробной зубцовой обмоткой для привода транспортного средства / М. С. Васичкин ; науч. рук. А. Ф. Шевченко // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 5. – С. 61-62.

## СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ МИКРО-ГЭС

А.А. Отставнов

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, gusnhd@yandex.ru

Научный руководитель: Честюнина Т.В., к.т.н.

*В статье сравниваются два синхронных генератора, рассчитанных на одинаковую мощность и частоту вращения. Они отличаются конструктивным исполнением ротора. На сегодняшний день существует ряд способов по уменьшению радиальных размеров. Один из таких: использование дробной зубцовой обмотки, направленной на уменьшение диаметра статора и, следовательно, радиальных размеров. Второй рассматриваемый способ заключается в использовании внешнего ротора, который способствует уменьшению пространства и позволяет в полной мере реализовать возможности по размещению обмотки возбуждения.*

*The article compares two synchronous generators designed for the same power and rotation speed. They differ in the design of the rotor. To date, there are a number of ways to reduce the radial dimensions. One of these is the use of fractional tooth winding, aimed at reducing the diameter of the stator and, consequently, the radial dimensions. The second method under consideration is to use an external rotor, which helps to reduce the space and allows you to fully realize the possibilities of placing the excitation winding.*

*Ключевые слова: генератор, синхронный генератор, внешний ротор, дробно зубцовая обмотка, микроГЭС.*

*Keywords: generator, synchronous generator, external rotor, fractional tooth winding, micro HPP.*

В России для производства электроэнергии активно использовали малые реки со второй половины XIX века. Сначала гидравлическую энергию преобразовывали в механическую с помощью водяных колёс, а позже, с появлением водяных турбин, водяные мельницы были замещены гидроэлектростанциями. В годы Советской власти особое внимание было уделено укреплению энергетической основы страны. Значительная роль в этом отводилась гидроэлектростанциям, дающим электроэнергию независимо от доступности топлива и состояния транспорта. В результате наблюдается глобальная тенденция к использованию большего количества возобновляемых источников энергии, и ожидается, что доля альтернативной энергетики в мировом производстве электроэнергии увеличится в следующие десятилетия.

В настоящее время снова проснулся интерес к малым и микроГЭС. Их применение позволяет электрифицировать промышленность в отдельных районах в труднодоступных местах, для которых передача электроэнергии нецелесообразна, а стоимость энергии, вырабатываемой

другими способами, велика; а помимо этого решить ряд социальных и экономических проблем, в том числе проблем интеграции страны, что особенно важно в развивающихся странах. Кроме того, процессу вовлечения в оборот энергоресурсов малых рек способствуют непрерывный рост затрат на производство электроэнергии на ТЭС и АЭС и ужесточения экономических требований к этим объектам. Энергия, вырабатываемая микроГЭС, может использоваться как объединенной энергосистемой, так и для снабжения отдельных потребителей.

Один из центральных этапов в сооружении гидроэлектростанции – создание и ввод в эксплуатацию гидрогенератора. На малых ГЭС получили наибольшее распространение синхронные генераторы. Они применяются при автономном режиме работы на изолированного потребителя промышленной частоты, при работе на маломощную систему, если мощность СГ составляет более 15% от мощности системы.

Наблюдается растущий интерес к машинам мощностью от 5 кВт до 100 кВт со скоростями от 30 до 100 об/мин для малых и микро ГЭС. Синхронные генераторы имеют высокую частоту вращения, которая не может быть обеспечена низким напором малых рек. Также возникают трудности с размещением обмотки возбуждения. Выполнение обмотки в классическом варианте многополюсного генератора, где  $q > 1$ , приводит к тому, что диаметр статора становится большим.

В электрических машинах малой мощности используются обмотки с  $q < 1$ , называемые “однозубцовой”, как правило, они охватывают один зубец, что позволяет проектировать машины с большим количеством полюсов [1,2,3]. Теория дробных зубцовых обмоток развита в работах кафедры электромеханики Московского энергетического института и Новосибирского государственного технического университета. По их практическому применению следует отметить работы А.Ф. Шевченко [4,5]. В его работах проведена систематизация дробных зубцовых обмоток с  $q < 1$ , рассмотрены особенности их устройства и принципа действия.

Использование таких обмоток позволяет значительно уменьшить диаметр статора и, следовательно, радиальные размеры. Однако уменьшение внутреннего пространства создает трудности с размещением обмотки возбуждения и не позволяет в полной мере реализовать возможности минимизации геометрии машины. Решение этой проблемы может быть реализовано путем разработки генератора с внешним ротором. Так же часто микро ГЭС с такой обмоткой предлагается использование машин с постоянными магнитами, но при этом возникают сложности с регулированием выходного напряжения на

генераторе. При использовании обмотки возбуждения возрастают размеры ротора.

В докладе будет представлено сравнение двух синхронных генераторов, рассчитанных на одинаковую мощность и частоту вращения и отличающихся конструктивным исполнением ротора.

Литература:

1. Многополюсные синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками. В 2-х ч.: Ч1 – Основы теории и конструкции. – Новосибирск: НГТУ, 1995. – 39 с.

2. *Честюнина Т.В.* Исследование многополюсных синхронных магнитоэлектрических генераторов с дробными зубцовыми обмотками. – Новосибирск: НГТУ, 2012 – 18 с.

3. *Бухгольц, Ю.Г.* К вопросу расчета индуктивностей дробных зубцовых обмоток / Ю.Г. Бухгольц, А.Г. Приступ, Т.В. Честюнина // Электро. – 2012. - №1. – С. 48-52.

4. *Шевченко, А.Ф.* Анализ магнитодвижущих сил дробных зубцовых обмоток электрических машин / А.Ф. Шевченко, Т.В. Честюнина // Электротехника. – 2009. - № 12. - С. 3-7.

5. *Васичкин М. С.* Синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов с дробной зубцовой обмоткой для привода транспортного средства / М. С. Васичкин ; науч. рук. А. Ф. Шевченко // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 5. – С. 61-62.

# ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЛЮСА РОТОРА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ДРОБНЫМИ ОДНОЗУБЦОВЫМИ ОБМОТКАМИ ДЛЯ ПРИЛИВНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

**И.Л. Попов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, select12345@yandex.ru**

**Научный руководитель: Топорков Д.М. к.т.н., доцент**

*В данном исследовании проведен краткий анализ существующих альтернативных источников энергии, в частности выделены преимущества приливных электростанций и выделена проблема при проектировании электрогенераторов для нужд таких станций – неудовлетворительная форма ЭДС, а также предложены пути решения данной проблемы.*

*In this study, a brief analysis of existing alternative energy sources is carried out, in particular, the advantages of tidal power plants are highlighted and a problem in the design of power generators for the needs of such stations is identified - an unsatisfactory form of EMF and ways to solve this problem are proposed.*

Современный мир невозможно представить без энергетической системы. Высокие цены на углеводородные энергоносители влекут за собой ухудшение экономической обстановки во всех сферах общества.

На данный момент, львиная доля мировой электроэнергии вырабатывается за счет углеводородов. Помимо экономических проблем, это приводит и к экологическим проблемам, в том числе, приближая глобальное потепление.

Альтернативой источникам энергии, получаемых из углеводородов, служат возобновляемые или «зеленые» источники энергии. Возобновляемые источники энергии отличаются большим разнообразием и высоким потенциалом. Несмотря на свое разнообразие, работа «зеленых» источников энергии во многом зависит от условий окружающей среды, главным образом от погодных условий. Например, солнечные панели будут иметь низкую эффективность при высокой облачности, а ветроэнергетические установки не будут работать при отсутствии ветра.

Среди всех альтернативных источников энергии особо выделяются приливные электростанции (ПЭС). Работы ПЭС основывается на таком природном явлении, как приливы. Движение луны и солнца вызывает периодическое повышение уровня воды в прибрежных зонах. В отличие от остальных альтернативных источников энергии, приливные электростанции имеют абсолютно предсказуемое поведение, что может иметь решающее преимущество.

Скорость вращения гидротурбины в ПЭС невысокая – в среднем около 50 об/мин, из-за чего электрогенератор либо приводится во вращение мультипликатором, либо работает с частотным преобразователем. Оба эти случая повышают общую стоимость системы, снижают уровень надежности и усложняют обслуживание.

Для того, чтобы генератор вырабатывал напряжение промышленной частоты (50 Гц), электрическая машина должна обладать большим количеством полюсов, однако в случае применения традиционной обмотки спроектировать такой генератор в приемлемых габаритах невозможно. Однако применение дробной однозубцовой обмотки позволит спроектировать многополюсный генератор в габаритах, удовлетворяющих требованиям гидрогенераторам в ПЭС.

Вопрос проектирования электрических машин с дробными однозубцовыми обмотками с электромагнитным возбуждением не раскрыт окончательно, в частности, не существует рекомендаций по выбору параметров полюса ротора, которые обеспечили бы удовлетворительную форму выходного напряжения. Главным образом, форму полюса ротора определяют следующие параметры: расчетный коэффициент полюсного перекрытия, отношения максимального значения воздушного зазора к минимальному и высоты полюсного наконечника. В связи с этим, можно заключить, что наработка рекомендаций по выбору вышеперечисленных параметров для синхронных машин с дробными однозубцовыми обмотками является важной и актуальной задачей.

#### Литература:

1. Mehmet Melikoglu. Current status and future of ocean energy sources: A global review. Ocean Engineering. 2016
2. Попов И.Л., Топорков Д.М. Оптимизация геометрии ротора гидрогенератора с дробной однозубцовой обмоткой для нужд ПЭС и малых ГЭС; Электротехника, 2022, №10, стр. 58-62
3. Шевченко А. Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными  $q$  меньше 1 зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов[Текст] / А. Ф. Шевченко // Электротехника. - 2007. – №9. С. 3-9.
4. Ю.Г. Бухгольц, А.В. Комаров, А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко Многополюсные синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками часть 1; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 1996
5. Ю.Г. Бухгольц, А.В. Комаров, А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко Многополюсные синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками часть 2; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 1996

# **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ФАСОВОЧНОЙ ЛИНИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

**А.А. Темляков В.Ю. Нейман, В.В. Гречкин**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, maksidor@inbox.ru**  
**Научный руководитель: В.Ю. Нейман, д.т.н., профессор,**  
**заведующий кафедрой теоретических основ электротехники**

*Дана общая характеристика автоматизированной фасовочной линии производства лекарственных препаратов малых доз. Описаны преимущества использования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором вместо двигателя постоянного тока в электроприводе экструдера автоматизированной фасовочной линии.*

*The general characteristics of the automated packaging line for the production of small-dose medicines are given. The advantages of using an asynchronous motor with a short-circuited rotor instead of a DC motor in the electric drive of an automated packing line extruder are described.*

В настоящее время наблюдается тенденция внедрения в практику производства упаковочных материалов лекарственных препаратов на основе полимеров. Такой подход обеспечивает ряд преимуществ полимерных материалов перед традиционными, изготовленными из стекла, бумаги, металла. К основным преимуществам следует отнести:

- меньший вес упаковочного фрагмента;
- более низкую себестоимость;
- по сравнению со стеклом полимеры имеют меньшую хрупкость, относительно высокую механическую прочность.

Появление новой специфической техники обусловило появление специальной технологии, основанной на методах термоформирования изделий из плоских заготовок.

Рассматриваемый в работе асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором установлен на автоматизированной поточной линии bottelpack, приобретенной АО ПФК «Обновление» у зарубежного производителя (Швейцария). Этот двигатель был установлен вместо двигателя постоянного тока [1].

При эксплуатации установки bottelpack на одном из участков поточной линии используется технология экструзии. Экструзия представляет собой непрерывный технологический процесс,

закрывающийся в продавливание высоковязкого материала на основе расплава через экструзионную головку (рисунок 1) с целью получения ампул нужной формы.

Принципиально установка bottlpack состоит из следующих блочных элементов: источник питания (сеть); преобразователь частоты; электрический двигатель; редуктор; экструдер; далее расположены следующие участки: участок выдувания ампул, участок наполнения ампул жидким лекарственным препаратом и герметизация ампул (рисунок 2). Адаптация установки bottlpack к условиям предприятия изготовителя лекарственных препаратов АО ПФК «Обновление» обусловило изменение ряда технических показателей.

При описании общей характеристики автоматизированной фасовочной линии производства лекарственных препаратов малых доз целесообразно отметить два обстоятельства. Во-первых, система bottlpack содержится в «чистых помещениях» класса С, во-вторых технологический процесс производства лекарственных препаратов малых доз является непрерывным циклом.

На сегодняшний день одна из главных задач, которая ставится перед производственными предприятиями, это увеличение производительности труда. Так как на участке розлива малых доз лекарственных препаратов линия работает в непрерывном цикле при номинальной скорости, то единственный способ увеличения производительности состоит в уменьшении времени простоя линии. Простой линии делятся на технологические простои, которые жестко регламентируются нормативными актами предприятия, нормами и правилами производства лекарственных препаратов; простои на техническое обслуживание и аварийные технические простои, которые зависят от конструктивных особенностей каждого элемента линии.

Одним из главных технико-экономических преимуществ применения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по сравнению с двигателем постоянного тока является меньшее время технического обслуживания [2].

Так как техническая система bottlpack представляет собой систему непрерывного цикла, то основная технико-экономическая задача состоит в уменьшении времени на простои, которые состоят из времени планового технического обслуживания и времени аварийных простоев. Этот фактор в значительной степени влияет на себестоимость продукции и на производительность участка розлива препаратов малых доз в целом.

А именно (данные АО ПФК «Обновление»):

1. Из-за конструктивных особенностей асинхронной машины время на плановое техническое обслуживание при наработке на часы уменьшилось на 30%, что дало прирост производительности линии в целом 10% или 1 млн. ампул в месяц в абсолютных цифрах.
2. Из-за более надежной и устойчивой работы асинхронного двигателя уменьшилось время аварийных простоев по причине аварий электропривода в целом на 80% и от всех аварий на линии разлива на 20%, что дало прирост производительности на 5% или на 500 тыс. ампул в месяц в абсолютных цифрах.

Последовательность операций машины bottlerpack:

- Загрузочная воронка ((1) на рисунке 1) для гранулята загружается пластмассовым гранулятом.
- Из воронки (1) продукт поступает в шнек (2) экструдера. Там он сжимается, пластицируется с помощью нагревания и выдавливается через экструзионную головку под высоким давлением.
- Расплавленный продукт выходит из головки экструдера (2) в форме заготовки (рисунок 1).
- Частота вращения шнека экструдера регулирует скорость поступления гранулята.
- Зажим заготовки зажимает конец заготовки и запаивает его.
- Стерильный воздух внутри возникающего мешка способствует созданию формы изделия.
- Зажимы захватывают заготовку и удерживают ее при помощи вакуума.
- При помощи зажимов нагретый нож отрезает заготовки.
- Экструдер откидывается вверх и тем самым предотвращает проливание из заготовок на запирающий модуль (рисунок 2).

На рисунках 1 и 2 показаны фрагменты схем формирования ампул и наполнения ампул лекарственным продуктом.

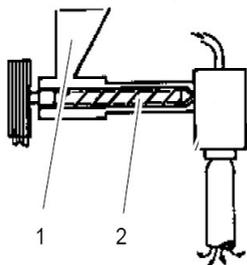


Рис. 1 - Фрагмент схемы формирования ампул:

1 - загрузочная воронка для гранулята, 2 - шнек экструдера

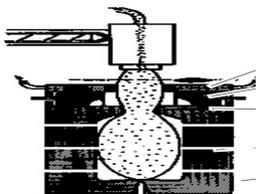


Рис. 2 - Фрагмент схемы наполнения и захвата ампул

**Закключение:** Использование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в силу его конструктивно технических особенностей обеспечивает снижение затрат времени на техническое обслуживание по сравнению с двигателем постоянного тока, который был установлен на автоматизированной поточной линии производства лекарственных препаратов малых доз bottelpack до модернизации. Из-за более надежной и устойчивой работы асинхронного двигателя уменьшилось время аварийных простоев по причине аварий электропривода в целом на 80% и от всех аварий на линии розлива на 20%, что дало прирост производительности на 5% или на 500 тыс. ампул в месяц в абсолютных цифрах.

#### Литература:

1. ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009. Машины электрические вращающиеся. Часть 17. Руководство по применению асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей. – Введ. 2011-03-25. – М: Стандартинформ, 2011. – 9.
2. 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.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДРОБНО-ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКИ КАК СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ В МАЛЫХ ГАБАРИТАХ

А.О. Холод, Е.Д. Сергиенко, А.А. Носиков

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, dok13.1@bk.ru

Научный руководитель: Честюнина Т.В., к.т.н., доцент

*Работа направлена на определение наиболее выгодных конструктивных решений с точки зрения мощности и габаритов электрической машины. Проведены расчеты, сравнение и анализ нескольких видов обмоток для синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов. Сделан выбор в пользу обмотки с числом пазов на полюс и фазу меньше единицы.*

*The work is aimed at determining the most advantageous design solutions in terms of power and dimensions of an electric machine. Calculations, comparison and analysis of several types of windings for synchronous machines with excitation from permanent magnets have been carried out. The choice was made in favor of a winding with the number of slots per pole and phase less than one.*

В современном мире человек заинтересован в освобождении пространства от крупногабаритных устройств, не теряя их эффективности. Поэтому сейчас большое внимание уделяют разработке устройств, в том числе и двигателей, малых размеров, но с высоким уровнем эффективности, другими словами, большой мощности.

В данной работе стояла цель спроектировать синхронный двигатель с постоянными магнитами малого габарита, который имеет номинальную частоту вращения 5000 об/мин и момент 3 Н\*м.

Проектирование проведено аналитическим методом с помощью программной среды MathCad, а затем проверено программным моделированием в Ansys MotorCad.

Так как в данной работе проектировался синхронный двигатель с постоянными магнитами дробно-зубцовой обмоткой было принято решение проработать два двигателя: с числом зубцов на полюс равным  $\frac{2}{3}$  и числом зубцов на полюс  $\frac{3}{8}$ . На этапе моделирования стал вопрос невозможности использования спроектированных двигателей в режиме постоянной работы (S1), так как данный двигатель не имел охлаждения. Поэтому было принято решение смоделировать повторно-кратковременный режим (S2). В данном режиме двигатель работал не перегреваясь.

В двигателях малых габаритов большое количество полюсов и относительно малое полюсное деление, что ставит необходимость в выборе числа зубцов на полюс равное дробному числу [1].

Чтобы получить желаемый двигатель малых габаритов и большой частоты вращения необходимо учитывать среду и режим его работы. В данном случае, получилось спроектировать синхронный двигатель с постоянными магнитами малого габарита и большой частоты вращения только для повторно-кратковременного режима работы (S2). В режиме постоянной работы (S1) данный двигатель перегревается, так как не имеет охлаждения.

#### Литература:

1. Проектирование электрических машин с постоянными магнитами : учебное пособие / А.Ф. Шевченко, А.Г. Приступ, Ю.Г. Бухгольц, Т.В. Честюнина, Д.М. Топорков, Г.Б. Вяльцев ; под общ. ред. А.Ф. Шевченко. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – 152 с.

## **ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ СЕТКИ НА ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ FEMM**

**Г.Н. Чусовитин**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, chusovitin.2018@stud.nstu.ru**

**Научный руководитель: Топорков Д.М. к.т.н., доцент**

*Одной из особенностей синхронных машин с постоянными магнитами является наличие пульсаций момента. Целью данной работы являлся обзор и исследование тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе. Также была выявлена точность получаемых результатов в зависимости от размеров сетки в программном пакете FEMM.*

*One of the features of synchronous machines with permanent magnets is the presence of torque pulsations. The purpose of this work was to review and study a traction synchronous motor with permanent magnets on the rotor. Also the accuracy of the obtained results depending on the grid size in the FEMM software package was revealed.*

Одним из недостатков электрических машин с постоянными магнитами является наличие пульсаций момента, даже при разомкнутой обмотке статора. В некоторых электроприводах иногда требуется разработка и использование машин с низким уровнем пульсаций. [1]

Любую двух- и трехмерную задачу можно разделить на простые элементы, настолько мелкие, что можно считать материалы внутри элемента однородными. Данный метод называется методом конечных элементов. Однако для таких задач требуется рассмотреть не менее 1000 отдельных конечных элементов. Произвести все необходимые расчёты для данного количества элементов вручную проблематично. В качестве рабочего инструмента может быть применена программа FEMM. [2]

Рассматриваемый двигатель был сконструирован на кафедре электромеханики при НГТУ. На его примере было исследовано влияние размеров сетки на точность расчётов зубцовых пульсаций момента в программном пакете FEMM. [3]

Модель построенная в программном пакете FEMM приведена на рисунке 1.

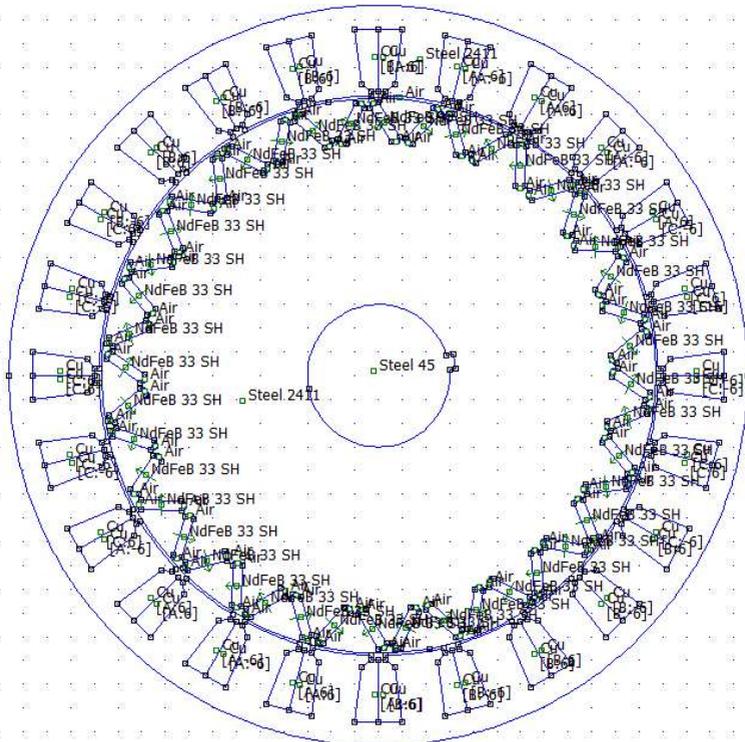


Рис.1 – Модель синхронного двигателя с V-образными магнитами на роторе, построенная в программе FEMM

Для облегчения и ускорения процесса симулирования множества положений ротора, при различных размерах сетки, был использован скрипт изображенный на рис. 2. [2]

Поскольку амплитуда зубцовой пульсации момента изменяются в зависимости от положения ротора, то график пульсаций момента будет иметь форму синусоиды, если по оси абсцисс расположить угол поворота ротора. Также поскольку сила притяжения магнита при приближении к зубцу равна силе притяжения магнита при его удалении от зубца равны, то идеальный график момента должен иметь форму синусоиды и без разницы амплитуд.

Поэтому для сравнения точности моделирования достаточно сравнить максимальные значения момента при приближении магнитов и их удалений от зубцов.

```
mi_modifycircprop("A", 1, 0)
mi_modifycircprop("B", 1, 0)
mi_modifycircprop("C", 1, 0)

for al = 0, 9, 0.1 do
    --поворачиваем
    mi_selectgroup(1);
    mi_moverotate( 0, 0, -al);

    --считаем
    mi_analyze(1);
    mi_loadsolution();

    --снимаем момент
    mo_groupselectblock( 1 );
    M = mo_blockintegral(22);
    mo_clearblock();

    file1 = openfile("Torque.txt", "a")
    write( file1, al, " ", M, "\n" )
    closefile( file1 )

    --поворачиваем
    mi_selectgroup(1);
    mi_moverotate( 0, 0, al);
    mi_clearselected()
end
```

Рис.2 – Скрипт, написанный для облегчения симуляции модели

На рисунке 3 изображен график расхождения значений моментов в зависимости от размеров сетки. Изучив полученные результаты, можно сделать выводы, что при увеличении размеров сетки точность моделирования повышается на порядок.

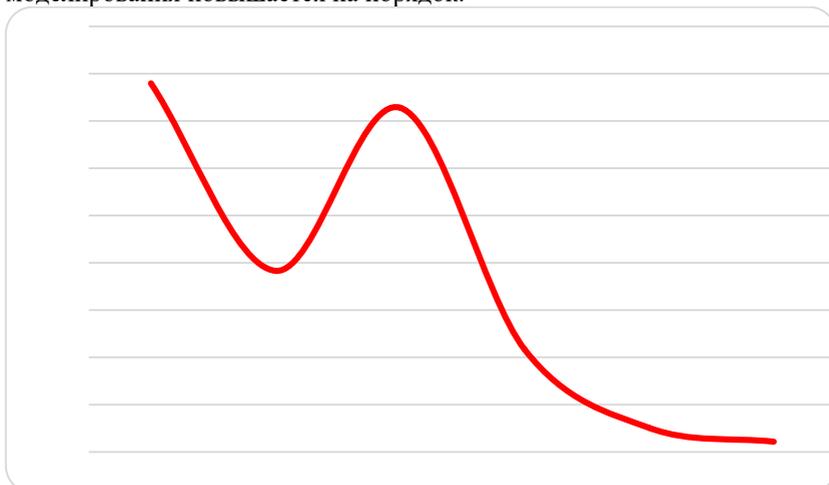


Рис.3 – График расхождения значений моментов в зависимости от размеров сетки

Однако, чем меньше размер сетки, тем большее число отдельных конечных элементов сетки создаёт программа. И поскольку для каждого из этих элементов необходимо произвести расчёты, то время симуляции увеличивается. В особенности это проявляется при моделировании на персональном компьютере с комплектующими малой производительности.

Для сравнения приведена таблица 1 с затраченным временем симуляций при различных размерах сетки и количество конечных элементов.

**Таблица 1 – Скрипт, написанный для облегчения симуляции модели**

Размер сетки	Количество конечных элементов	Время симуляции, мин
Auto Mesh	169110	3,76
Mesh 1 мм	169536	3,8
Mesh 0.75 мм	171084	4,06
Mesh 0.5 мм	176464	4,14
Mesh 0.3 мм	201174	4,3
Mesh 0.25 мм	216174	4,8
Mesh 0.2 мм	248868	5,2
Mesh 0.15 мм	309922	20,3
Mesh 0.1 мм	474334	40,8
Mesh 0.05 мм	1293808	91,5

Беря во внимание полученные данные можно отметить, что использование малых размеров сетки не целесообразно для большого количества симуляций из-за того, что достаточную точность можно получить при моделировании сетки размером 0.2 мм. То есть в рассматриваемом случае выбор размера сетки равный 1/5 величины воздушного зазора оптимален по причине того, что достигается баланс между точностью расчетов и временем симуляции.

#### Литература:

1. Шевченко А.Ф. Электрические машины с постоянными магнитами: учебное пособие / А.Ф. Шевченко, А.Г. Приступ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 64 с.

2. Расчет магнитных полей методом конечных элементов в программе FEMM для решения задач электромеханики: учебное пособие / Г.Б. Вяльцев, Д.М. Топорков, Т.В. Честюнина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018 – 115 с.

3. Моделирование магнитных полей а программе FEMM: учеб.-метод. пособие/А.Г.Приступ, А.В.Червяков.-Новосибирск: Изд-во НГТУ,2012.– 92 с.

## **ВАРИАНТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛЕНТОЧНОЙ НАМОТКИ СТАТОРА МОМЕНТНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

**А.А. Трубачев**

**Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
г. Томск, [aat@tpu.ru](mailto:aat@tpu.ru)**

**Научный руководитель: Долгих А.Г., к.т.н., с.н.с.  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники**

*Указана возможность создания моментного электродвигателя с повышенными удельными характеристиками. Традиционная обмотка статора заменяется ленточной намоткой, изготовленной методами аддитивных технологий. Приведены результаты экспериментальных исследований.*

*The possibility of creating a torque electric motor with increased specific characteristics is indicated. The traditional stator winding is being replaced by a tape winding made using additive technologies. The results of experimental studies are presented.*

Среди большого разнообразия электродвигателей существуют такие, которые предназначены для создания на их валах момента, при этом вращение ротора не происходит, или вращение осуществляется с очень малой угловой скоростью. Такие электродвигатели носят название моментных. В настоящее время моментные электродвигатели преимущественно выполняются в виде бесконтактной машины с магнитоэлектрическим возбуждением, у которой на роторе расположены постоянные магниты из высококоэрцитивного материала. Активный элемент, связанный с корпусом двигателя (обмотка) выполняется обмоточным проводом и имеет два варианта исполнения: пазовый и беспазовый. Пазовый является традиционным, при этом проводники обмотки лежат в пазах магнитопровода статора; беспазовый вариант характерен тем, что обмотка формируется на немагнитной основе и помещается в рабочий воздушный зазор между магнитами ротора и магнитопроводом статора. В связи с тем, что традиционная характеристика эффективности "коэффициент полезного действия" для моментных двигателей не подходит (равен нулю), то для оценки последних применяется ряд относительных характеристик [1], из которых наиболее распространена "статическая добротность". Последняя представляет собой отношение величины развиваемого момента к произведению массы активных элементов двигателя и величины, потребляемой от источника питания мощности. Такая

характеристика удобна для сравнения двигателей, которые работают в непрерывном режиме. Однако на практике возможны случаи, когда от двигателя, к которому приложены жесткие массогабаритные ограничения, требуется создание момента достаточно большой величины в короткий промежуток времени; величина потребляемой при этом мощности (электрической энергии) имеет меньшее значение. В качестве примера можно указать на двигатель-маховик, работающий в импульсном режиме на борту космического аппарата и предназначенный для компенсации воздействий на ориентацию последнего при выстреле из бортовой пушки. В данном случае такие двигатели оценивают по характеристике "коэффициент удельной отдачи", представляющий отношение развиваемого момента к объему активных элементов двигателя. В двигателе с магнитоэлектрическим возбуждением момент линейно зависит от индукции в рабочем зазоре, размеров и количества активных элементов обмотки, по которой протекает электрический ток, и от величины этого тока. Если к настоящему времени индукция потока постоянных магнитов ограничена свойствами имеющихся магнитных материалов, размеры активных элементов определяются конструктивными ограничениями, то единственный путь увеличения момента заключается в увеличении протекающего по обмотке тока. Существующее ограничение при реализации такого подхода заключается в том, что большая плотность тока приводит к повышенному тепловыделению в проводниках обмотки и дальнейшему их разрушению. Следовательно, активный элемент (обмотка) должен иметь хороший отвод выделяющегося тепла на корпус двигателя и затем в окружающее пространство. Анализ различных конструкций двигателей и приемов повышения теплостойкости активного элемента привел к предложению использовать в качестве последнего ленточную рулонную структуру (намотку) из электропроводящего материала с дополнительными боковыми вырезами [2]. Принцип работы такого двигателя и его основные свойства изложены в ряде источников, в частности [3]. Авторы предлагают называть активный элемент "намоткой", для исключения путаницы с традиционным конструктивным элементом "обмотка". "Намотка", несмотря на характер ее выполнения, в том числе и методами аддитивных технологий, является аналогом рулонной намотки ленты на основу, связанную с корпусом двигателя.

На рисунке 1 (слева) схематично показан однофазный двигатель, где ротор-магнит 1, магнитопровод 2, активный элемент статора – ленточная намотка 3. Начало и конец намотки подключаются к источнику питания посредством контактов 4, которые, также как и намотка, монтируются на корпусе двигателя (рисунок 1 справа). Конструктивные особенности

двигателя в настоящей работе не рассматриваются, так как они зависят от способов изготовления ленточной намотки, которые в настоящее время находятся в стадии разработки.

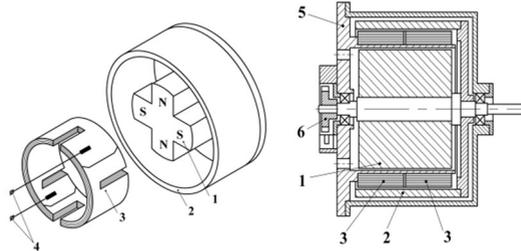


Рис.1 – Двигатель с ленточной намоткой

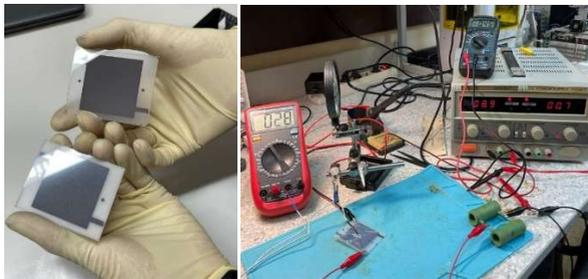
К настоящему времени разработана методика расчета упомянутого двигателя. В частности, если принять, что намотка, выполненная из медной ленты толщиной  $\Delta=10^{-4}$  м и шириной  $b=0,05$  м, содержит  $N=50$  витков и ее средний радиус  $R_{cp}=0,059$  м, то при индукции в воздушном зазоре  $B=0,2$  Тл развиваемый двигателем пусковой момент достигает  $M=7,3$  Нм [3]. Эта величина будет при токе  $I=50$  А, протекающем по намотке. Эта величина тока определена из условия, что плотность тока в месте контакта пластин (сужения ленты) длиной  $b_k=0,005$  м составляет  $100$  А/мм<sup>2</sup>, что является предельно допустимой, полученной ранее экспериментально при исследовании протекания тока по пластине из фольги [4].

Очевидно, что технология изготовления активного элемента путем намотки ленты из тонкой фольги малоперспективна. Поэтому стоит задача поиска современных технологий, обеспечивающих максимальную автоматизацию процесса изготовления при сохранении параметров, заданных при проектировании двигателя. По мнению авторов, такими свойствами обладают методы нанесения металлического порошка и напыления керамики на керамическую гильзу, основу «ленточного» активного элемента [5].

На данном этапе создание макета ленточной намотки на вращающейся гильзе, нецелесообразно ввиду сложности изготовления. Необходимые сведения, которые позволят оценить возможные технические характеристики намотки, можно получить при экспериментальном исследовании пакетного элемента, который был предложен в качестве статора моментного двигателя [6]. Пакетный элемент практически можно рассматривать как фрагмент ленточной намотки. Для проведения исследований пакетный элемент должен быть выполнен согласно предложенному выше способу – нанесением

металлического порошка и последующим напылением порошка керамики.

В качестве основы макета выбрана подложка из сапфира толщиной 0,25 мм и размерами 60х48 мм. Напыление металлического (как медного, так и алюминиевого) и керамического слоев произведено на вакуумной ионно-плазменной установке ТЕМП-74М. Толщина наносимого медного слоя 0,5 мкм. Для получения необходимой конфигурации последнего проведены процессы фотолитографии. Были рассмотрены два варианта нанесения диэлектрического слоя: а) магнетронное напыление позволило получить слои оксида кремния толщиной 195 нм и нитрида кремния толщиной 149 нм; б) при плазмохимическом осаждении в слое пленки обнаружилось включение, нарушающее однородность материала. Затем на слой диэлектрика наносился слой металла с аналогичными характеристиками предыдущего металлического слоя. Окончательно на слой металла нанесен слой керамики. В итоге макет содержит два слоя металла окруженных керамикой. Слои металла имеют зоны контактов для проведения электрических исследований. На рисунке 2а приведен вид изготовленных пакетных элементов, на 2б установка для проведения исследований.



а)

б)

Рис.2 – Исследования макета пакетного элемента

В первую очередь интерес представляет максимально допустимая плотность тока в зоне контактов, определяющая максимальный ток в катушке и, в конечном итоге, максимальную величину развиваемого момента. Площадь сечения контакта  $S_k = \Delta \cdot b_k = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$ . При длительном протекании тока  $I = 2,1 \text{ А}$  через контакт плотность тока составляет  $j = 1,4 \cdot 10^3 \text{ А/мм}^2$  и температура пакета, замеренная термопарой, не превышает  $92^\circ \text{ С}$ . Как видно, полученная плотность тока более чем на порядок превышает величину, по значению которой рассчитывался выше приведенный момент. Последнее означает, что катушка, изготовленная

методами аддитивных технологий, позволит создать двигатель с высокими эксплуатационными характеристиками.

Литература:

1. Демагин А.В., Электрические машины для непосредственного привода приборных систем. СПб.: Научн.-произв. объединение "Азимут", 1991. – 81 с.

2 Патент 2441310 МПК H02K 26/00 .Российская Федерация. Моментный двигатель / В.М. Мартемьянов, А.Г. Иванова-№2010135113/07; заявл.20.08.2010; опубл.27.01. 2012, Бюл.№3. – 6 с.

3. Долгих А.Г., Мартемьянов В.М. Механическая характеристика моментного двигателя с ленточной намоткой статора // Изв. ВУЗов. Электромеханика.2021. Т.64.№1.С.37 – 42. DOI:10.17213/0136-33602021-1-37-42.

4. Дмитриева Е.М., Иванова А.Г. Экспериментальное определение температурных характеристик пакетного элемента // Совр. техн. и технологии: Труды XVI Международн. научн-практ. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск:Изд.ТПУ,2010. Т.1. С.413 – 414.

5. Патент 2713217 МПК H02K 15/02.Российская Федерация. Способ изготовления спирального активного элемента статора моментного двигателя / В.М. Мартемьянов, А.Г. Долгих - №2019127317; заявл. 30.08.2019; опубл. 04.02.2020, Бюл. №4. – 7 с.

6. Патент 2378755 МПК H02K 26/00 .Российская Федерация. Моментный двигатель/Мартемьянов В.М., Плотников И.А., Горячок Е.Н., Квадяева А.В – 2008147477/09; заявл. 01.12.2008; опубл. 10.01.2010.Бюл.№1.

**Секция ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИКА**  
**ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК**  
**И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА В  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ С ПОГРУЖНЫМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

**В.И. Аниброев, А.В. Стоянова**  
**Новосибирский государственный технический университет,**  
**г. Новосибирск, v.anibroev@corp.nstu.ru**  
**Научный руководитель: Котин Д.А., к.т.н., доцент**

*С целью увеличения мощностей для выработки конечных продуктов, появляется необходимость в модернизации технологического процесса, которая заключается во внедрении современных промышленных установок и разработке систем управления ими. Такая модернизация, в свою очередь, приведет к увеличению таких показателей как: срок службы оборудования, энергоэффективность и уровень автоматизации. В работе представлены структурная схема электротехнического комплекса с погружным электроприводом и обоснование применения установки электрического плунжерного насоса в электротехническом комплексе с погружным электроприводом.*

*In order to increase the capacity for the production of final products, there is a need to modernize the technological process, which consists in the introduction of modern industrial installations and the development of control systems for them. Such modernization, in turn, will lead to an increase in such indicators as: equipment service life, energy efficiency and automation level. The paper presents a block diagram of an electrical complex with a submersible electric drive and a justification for the use of an electric plunger pump installation in an electrical complex with a submersible electric drive.*

Погружные электротехнические комплексы имеют специфичную конструкцию, поскольку эксплуатируются в тяжелых условиях. Эти условия обусловлены погружением оборудования на большие глубины скважин, кривизной и малым диаметром скважин, высокими

температурами пластовой жидкости, высокое внешнее давление на оборудование [1]. Соответственно, новые технологии в системах с погружным комплексом должны решать такие задачи, как: высокая производительность погружного комплекса; малые габариты установки; эффективная система охлаждения; усовершенствованная гидрозащита.

Электротехнический комплекс с погружным электроприводом, который представлен на рисунке 1, представляет из себя совокупность электротехнических устройств, таких как: погружной электрический двигатель, трансформатор, кабельная линия и насос[2].

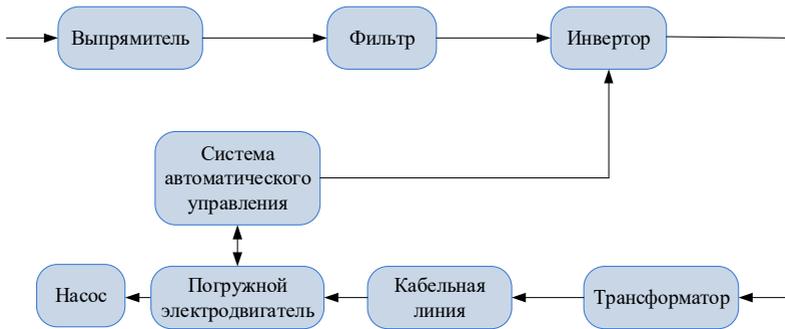


Рис. 1 – Структурная схема электротехнического комплекса с погружным электроприводом

В зависимости от того, какой насос применяется в системе, выделяют следующие основные электротехнические комплексы:

- установка электроприводного центробежного насоса (УЭЦН);
- установка штангового глубинного насоса (УШГН);
- установка электрического плунжерного насоса (УЭПН).

В современных реалиях происходит рост трудноизвлекаемых запасов полезных ископаемых. Доля малодобитного рынка крайне высока и продолжает стремительно расти[3].

На смену традиционным технологиям УЭЦН и УШГН приходят инновационные решения, которые повышают эффективность работы всего электротехнического комплекса посредством большого углубления в скважину и функционирования в искривленных месторождениях.

Установка электроплунжерного насоса – это устройство, которое выполняет подъем пластовой жидкости из скважин. Такая установка включает в себя:

- плунжерный насос, который выполняет функции по перекачке пластовой жидкости под необходимым напором;
- электрический двигатель, который создает тяговое усилие к штоку плунжера;
- гидрозащиту;
- наземную часть, состоящую защиты от аварийных ситуаций, коммутационной аппаратуры, выпрямителя.

Плунжерный насос, представленный на рисунке 2, – это насос объемного действия. Это означает, что давление пластовой жидкости создается посредством изменения объема камеры. Принцип действия оборудования основан на возвратно-поступательном движении плунжера внутри корпуса рабочей камеры. В результате в ней создаются попеременно стадии разрежения и нагнетания.

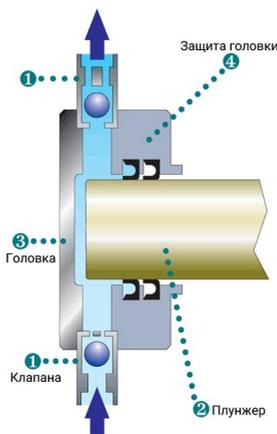


Рис. 2 – Устройство плунжерного насоса

УЭПН сочетает в себе положительные стороны в работе УЭЦН и УШГН, и имеет ряд преимуществ, позволяющих повысить эффективность работы электротехнического комплекса:

- 1) работа на глубинах, достигающих 3000 м, что, в свою очередь, превышает возможности УЭЦН и УШГН;
- 2) возможность эксплуатации в наклонных и искривленных скважинах с углом отклонения от вертикали до 40° без ухудшения эксплуатационных характеристик;
- 3) работа в скважинах с температурой до 150°C;

4) увеличенный не менее чем в 1.2 раза КПД в сравнении с УЭЦН и УШГН;

5) сокращение материалоемкости при изготовлении установки;

6) повышенная надежность, связанная с отсутствием сложных узлов, таких как у центробежных установок.

Таким образом, в работе приведена структурная схема комплекса, рассмотрены основные электротехнические комплексы в зависимости от применяемого насоса в системе и приведено обоснование использования комплекса с плунжерным насосом. В дальнейшем планируется выявить влияние плунжерного насоса на режимы работы электропривода, синтезировать контура регулирования с учетом трансформатора, кабельной линии на выходе автономного инвертора напряжения.

Литература:

1. Bafghi M. B., Vahedi A., A Comparison of Electric Motors for Electrical Submersible Pumps Used in the Oil and Gas Industry. 2nd International Conference on Engineering Sciences, 2018, p. 12.

2. Zhang J.T., Wan J.T., Application of the cable laying coiled tubing in electric submersible pump. 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field, 2021, pp. 293-296.

3. Артыкаева Э.М., Определение параметров работы станков-качалок нефти в режиме энергосбережения / Вестник Чувашского университета. – 2010. №3. – С.181-187.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ ГТУ В SIMINTESH

Д. Н. Белкова

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, belkova34diana@gmail.com  
Научный руководитель: В.Н. Аносов, д.т.н., профессор

*В работе рассматривается один из проблемных вопросов эксплуатации объектов распределенной генерации – повышенная виброактивность газотурбинной установки (ГТУ) автономной электроэнергетической системы (АЭС). Такое явление рассматривается как субсинхронный резонанс (ССР) ввиду того, что оно происходит на частоте ниже основной. Для подавления резонансных явлений в работе используется принцип максимума Понтрягина для разработки оптимального регулятора (ОР) на основе упрощенной модели ГТУ.*

*One of the problem issues of operation of distributed generation facilities is considered in this paper - increased vibration activity of a gas turbine unit (GTU) of an autonomous electric power system (AEPS). Such a phenomenon is considered as subsynchronous resonance (SSR), since it occurs at a frequency below the main one. To suppress resonance phenomena, the work uses the Pontryagin maximum principle to develop an optimal controller (OC) based on a simplified GTU model.*

В части проблемных технических вопросов, связанных с эксплуатацией автономных электростанций, присутствует такое явление, как отключение ГТУ защитой от повышенной виброактивности из-за возникновения субсинхронных крутильных колебаний роторов генераторов ГТУ, вызванных влиянием мощных ЧРП. Такие аварийные события из-за ССР возникали на электростанции Мохаве (запад Соединённых Штатов) в 1970 и 1971 годах [1], на Ванкорской ГТЭС (Россия) в 2013 г [2], также в ноябре 2015 г на теплоэлектростанции Вунг Анг 1 (Вьетнам) и др. Подобные отключения приводят к большим экономическим и технологическим потерям.

Для оценки возможности использования вспомогательных устройств целесообразно провести моделирование ГТУ, в котором будут учтены необходимые параметры для возникновения резонансных явлений, а также аналитический синтез управления по оптимальному закону, обеспечивающего подавление резонанса.

На основании [3, 4, 5] система уравнений упрощённого математического описания ГТУ, включающее в себя колебания электромагнитного момента через коэффициент обратной связи представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} J_2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + b \frac{d\varphi}{dt} + C\varphi = M_c + k_{oc} \frac{d\varphi}{dt}, \\ k_{oc} = \frac{k_m k_f k_i i_f}{\sqrt{1 + X_1^2 k_i^2}} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $J_2$  – приведенный момент инерции генератора,  $C$  – приведенный к валу генератора коэффициент жёсткости упругой связи;  $\varphi$  – угол закручивания муфты;  $M_c$  – модуль момента сил сопротивления;  $b$  – приведённый коэффициент сопротивления;  $k_{oc}$  – коэффициент связывающий ГТУ и электрические нагрузки;  $k_m$  – коэффициент пропорциональности между моментом и током нагрузки;  $k_f$  – коэффициент формы кривой поля возбуждения;  $k_i$  – коэффициент связи входных напряжения и тока нелинейных потребителей (приведенная общая проводимость нагрузок и сети);  $i_f$  – ток возбуждения генератора;  $X_1$  – полное индуктивное сопротивление статора.

Введя параметры, которые определяют коэффициент демпфирования  $\gamma = \frac{b}{2J_2}$  и квадрат собственной частоты  $-\lambda^2 = \frac{c}{J_2}$ , получаем систему

уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_c}{J_2} - 2\gamma\omega - \lambda^2\varphi + \frac{k_m k_f k_i i_f}{J_2 \sqrt{1 + X_1^2 k_i^2}} \omega \end{cases}. \quad (2)$$

Для определения функции управления оптимальным регулятором на основании полученных уравнений целесообразно применять принцип максимума Понтрягина, который используется при решении линейных задач [6].

Следуя определенному алгоритму, с помощью вспомогательных функций было получено уравнение оптимального регулятора

$$\frac{dp_\omega}{dt} = -\lambda^2 \int p_\omega dt + 2\gamma p_\omega - \frac{p_\omega k_m k_f k_i}{J_2} + 2k_m k_i k_u \omega$$

или

$$\frac{d^2 p_\omega}{dt^2} = \left( 2\gamma - \frac{k_m k_f k_i}{J_2} \right) \frac{dp_\omega}{dt} - \lambda^2 p_\omega. \quad (3)$$

Упрощенная модель вместе с подключенным ОР представлена в виде структурной схемы (Рис. 1). Моделирование проводится в среде динамического моделирования технических систем SimInTech.

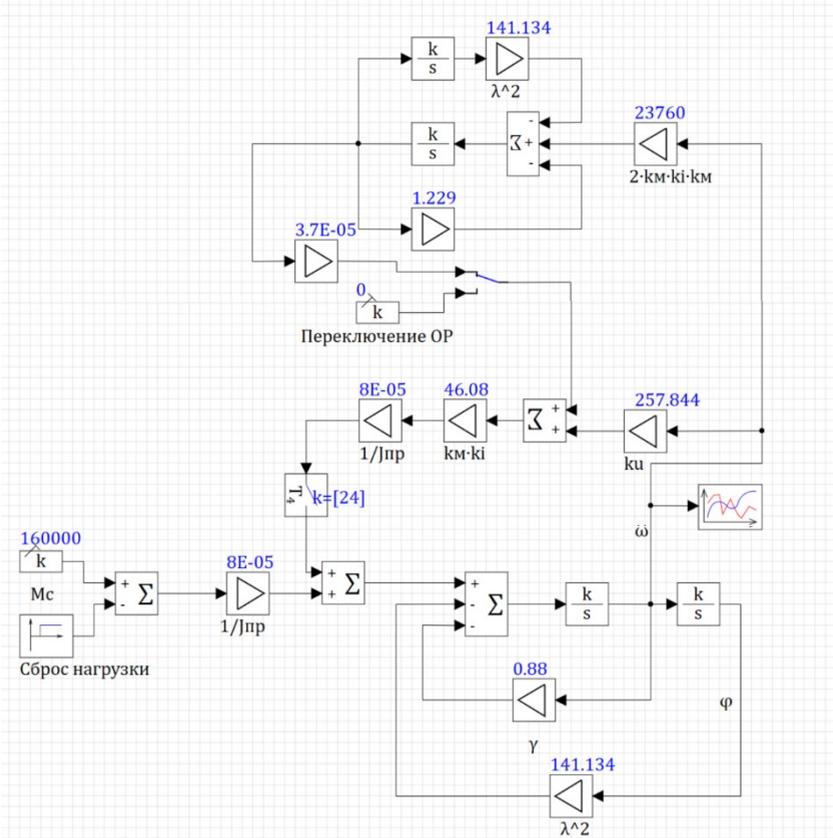


Рис. 1 - Структурная схема системы с оптимальным регулятором в SimInTech

В результате провокации (сброс 10% нагрузки) наблюдается расходящийся колебательный переходный процесс, что свидетельствует о неустойчивости системы (Рис. 2, а). В случае подключения оптимального регулятора переходный процесс (Рис. 2, б) в результате той же величины сброса нагрузки при прочих равных условиях носит выраженный затухающий характер, что соответствует подавлению резонанса.

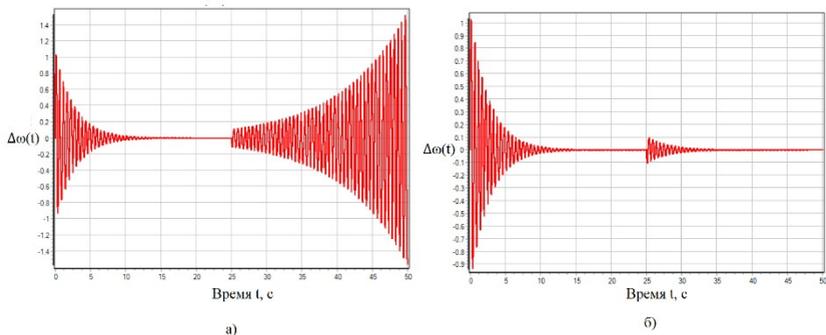


Рис.2 - Скорость вращения вала ГТУ в переходном процессе без ОП(а) и с подключенным ОП (б)

В качестве метода вариационного исчисления был выбран метод принципа максимума Понтрягина, который позволил получить структуру и параметры регулятора. В процессе моделирования была проведена проверка эффективности действия, полученного аналитическим путём оптимального регулятора на процесс возникновения и развития явления ССР.

#### Литература

1. Hall, M.C. and Hodges, D.A. (1976) Experience with 500 kV subsynchronous resonance and resulting turbine generator shaft damage at Mohave generating station, in IEEE PES Winter Meeting, New York.
2. Задание на выполнение работ по «Выявлению причин субсинхронных колебаний ТГ Ванкорской ГТЭС и разработки мероприятий по их исключению».
3. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. В 2 т. Т. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МЭИ, 2004. 532 с. ISBN 5-7046-0913-9; 5-7046-0914-7.
4. Левитский Н. И. Теория механизмов и машин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1990. 592 с.
5. Аносов В. Н., Белкова Д. Н., Кавешников В. М. Применение принципа максимума для оптимизации активного фильтра субгармоник тока // Омский научный вестник. 2019. № 6 (168). С. 20–26. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-20-26.
6. Теория автоматического управления. В 2 т. / под ред. А. В. Нетушила. М.: Высшая школа, 1972. Ч. 2. 430 с.

# СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

А.А. Блинов

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, a.blinov.2015@stud.nstu.ru

Научный руководитель: Кучер Е.С., к.т.н., доцент

*Работа посвящена синтезу нечеткого регулятора скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением системы управления электроприводом, а также приведены результаты сравнительного анализа эффективности работы системы автоматического управления рассмотренным двигателем на основе нечеткого регулятора и классического ПИ-регулятора.*

*The work is devoted to the synthesis of a fuzzy speed controller of a DC motor with independent excitation as part of an electric drive, as well as a comparison of the efficiency of regulation of an automatic control system based on a fuzzy controller and a classical PI controller.*

На текущем этапе развития вычислительной техники с новой силой возобновились исследования в области нечеткой логики применительно к проектированию систем автоматического управления (САУ) технологическими процессами. САУ на базе нечеткой логики получили широкое распространение в различных областях техники: автоматическое управление воротами платины на гидроэлектростанциях (Tokio Electric Pow), наведение телекамер при трансляции спортивных событий (Omron), управление электромобильными двигателями (Nissan), производство полупроводников wafer-steppers (Canon), оптимизация промышленных систем управления (Aptronix, Omron, Meiden, Sha, Micom, Mitsubishi, Nisshin-Denki, Oku-Electronics) и т.д. [1].

Широкая применимость САУ на базе нечеткой логики также объясняется сложностью систем современной промышленности, которые далеко не всегда поддаются полному математическому описанию. Иными словами, многие современные технологические системы представляют собой сложные нелинейные слабоформализуемые модели, существующие в рамках условий неопределенности, неполноты знаний априорной информации и о текущем состоянии как о самой системе, так и внешних воздействующих на нее факторах.

Актуальность нечетких САУ также подтверждает множество исследований по данной тематике, в частности работы [2, 3, 4]. Основной рекомендацией к применению нечетких САУ является слабая формализуемость объекта управления (ОУ), а также наличие неопределенностей. Графическая интерпретация области применения нечетких САУ представлена на рисунке 1 [1].



Рис. 1 – Область применения нечетких систем автоматического управления

В качестве ОУ взят электропривод (ЭП) на базе электродвигателя (ЭД) постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ) 2ПН132ЛУХЛ4. Основные характеристики ЭД приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики 2ПН132ЛУХЛ4

$P_n, кВт$	$U_n, В$	$n_n, об/мин$	$\eta_n$	$J, кг \cdot м^2$
5,5	440	1600	0,81	0,21

С целью сравнения эффективности регулирования скорости синтезированы два регулятора системы управления ДПТ. Структурные схемы САУ скоростью ЭП с ПИ-регулятором, синтезированным методикой подчиненного регулирования (СПР) и нечетким регулятором (НР) в программном пакете MATLAB Simulink представлены на рисунках 2 и 3.

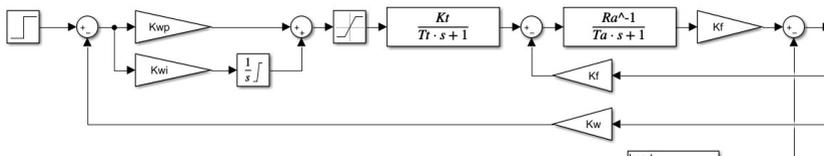


Рис. 2 – Структурная схема САУ скоростью ЭП с ПИ регулятором

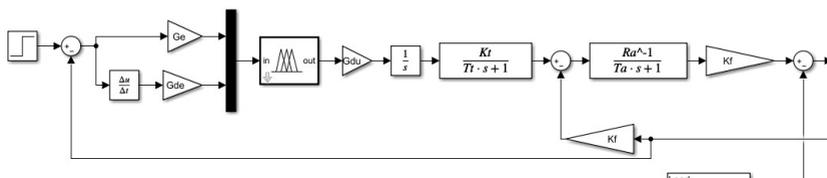


Рис. 3 – Структурная схема САУ скоростью ЭП с НР

ПИ-регулятор скорости настроен на симметричный оптимум. За малую некомпенсируемую постоянную времени принята постоянная времени преобразователя.

В качестве структуры НР используется универсальная структура на базе которой возможно реализовать различные типы ПИД-подобных регуляторов. Входными сигналами НР являются ошибка угловой частоты вращения ротора ДПТ и ее производная [5].

По результатам проведенного исследования установлено, что наиболее эффективным является НР с сорока девятью правилами [6]. Использование большего количества правил несущественно сказывается на показателях качества переходного процесса скорости ЭП, но ведет к сложности восприятия базы правил НР. Область каждой нечеткой переменной разделена на девять множеств с функциями принадлежности (ФП) треугольной формы.

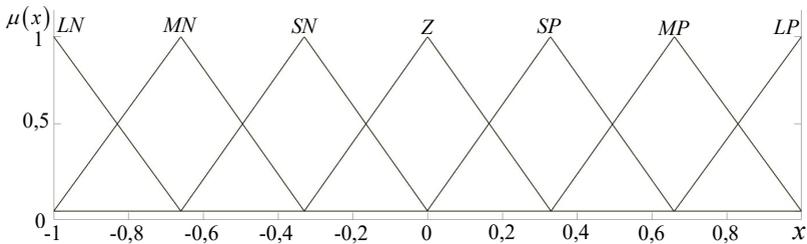


Рис. 4 – Графики функций принадлежности

Таблица 2 – База нечетких правил

$dU/dt$		$e$						
		LP	MP	SP	Z	SN	MN	LN
$de/dt$	LP	LP	LP	LP	LP	MP	SP	Z
	MP	LP	LP	MP	MP	Z	Z	SN
	SP	LP	MP	MP	MP	Z	SN	MN
	Z	LP	MP	Z	Z	SN	MN	LN
	SN	MP	SP	MN	MN	MN	MN	LN
	MN	SP	Z	MN	MN	MN	LN	LN
	LN	Z	SN	LN	LN	LN	LN	LN

На рисунке 5 представлены результаты сравнительного анализа результатов моделирования САУ ДПТ в среде MATLAB Simulink. Моделирование проводилось при подаче управляющего воздействия равного 10% от номинального значения с последующим набросом и сбросом нагрузки.

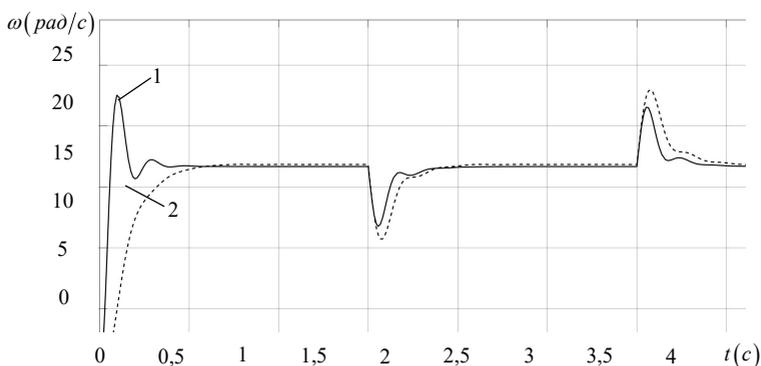


Рис. 5 – Графики переходных процессов скорости САУ ДПТ с классическим ПИ-регулятором (1) и НР (2)

Как видно из рисунка 5 при подаче управляющего воздействия на вход САУ ЭП на базе НР, наблюдается монотонно возрастающий переходный процесс скорости ДПТ, в то время как в САУ с классическим ПИ-регулятором имеет место аperiodический переходный процесс. При подаче и снятии возмущающего воздействия показатели качества переходных процессов обеих систем сопоставимы. Также, стоит отметить, что САУ ЭП на базе НР, по сравнению с САУ с классическим ПИ-регулятором скорости, обладает астатизмом как по управляющему, так и возмущающему воздействиям.

В работе приведены результаты моделирования САУ скоростью ЭП постоянного тока на основе НР и традиционного ПИ-регулятора. Проведен сравнительный анализ результатов цифрового моделирования разработанных алгоритмов САУ ДПТ. САУ ЭП с НР показывает лучшие результаты по сравнению с традиционным ПИ-регулированием. Традиционный ПИ-регулятор скорости двигателя предпочтительнее использовать в системах, к качеству регулирования которых не предъявляется высоких требований, в виду его простоты технической реализации.

#### Литература

1. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.
2. В.В. Игнатъев, В.В. Соловьев, А.А. Воротова. Метод автоматического синтеза нечетких регуляторов // Программные продукты и системы. – 2019. – Т. 32, № 32. – С. 759–769.
3. Ф.К. Донаев, Р. Х. Диёров, Н. Хасанзода. Система управления электроприводом переменного тока на основе нечеткой логики //

Политехнический вестник. Серия: инженерные исследования. – 2020. – № 2. – С. 42-47.

4. G. I. Babokin, D. M. Shprekher and E. B. Kolesnikov. Application of Fuzzy Logic Algorithms in Load Control System of Electric Drive of Coal Combine // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2019. – P. 1-5.

5. Г.Л. Демидова, А.Ю. Кузин, Д.В. Лукичев. Особенности применения нечетких регуляторов на примере управления скоростью вращения электродвигателя постоянного тока. Научно – технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т. 16, №5. – С. 872-878.

6. Синтез нечёткого регулятора при помощи пакета прикладных программ системы Matlab: методическое пособие / [А.В. Кузнецов, Г.М. Макарьяну]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2016. – 59 с.: ил.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ УСКОРИТЕЛЯ ПРОКЛАДЧИКА УТОЧНОЙ НИТИ ТКАЦКОГО СТАНКА С КРИВОШИПНО- ШАТУННОМ МЕХАНИЗМОМ

С.А. Бурманов

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, burmanov99@bk.ru

Научный руководитель: Котин Д.А., к.т.н., доцент

*В настоящее время системы выбора утка и управления кромками, доступные на ткацком станке, не поддерживают точное управление устройствами выбора утка и кромки, что снижает динамические характеристики и эффективность производства ткацкого станка. Наиболее близким к предлагаемому по технической сущности и получаемому результату, взятому за прототип, является рапирный механизм ткацкого станка, содержащий по меньшей мере одну рапиру и привод рапиры, включающий закрепленную на бруске батана звездочку, входящую в зацепление с перфорацией рапиры и соединенную посредством редуктора с приводным элементом. На основе это была разработана 3D-модель ускорителя прокладчика уточной нити, включающая в себя кривошипно-шатунный механизм.*

*Currently, the weft selection and selvedge control systems available on the weaving machine do not support precise control of the weft and selvedge selection devices, which reduces the dynamic performance and production efficiency of the weaving machine. The closest to the proposed prototype is a rapier mechanism of a weaving machine containing at least one rapier and a rapier drive including a sprocket fixed to the bantam bar which is engaged in the rapier perforations and is connected to the drive element by a reducer. Based on this, a 3D model of the weft insertion gape pedal was developed, including a crank mechanism.*

Кривошипно-шатунный механизм (КШМ) является примером шарнирного четырехзвенника. Он получается из кривошипно-балансирного механизма, если заменить балансир ползуном. Кривошипно-шатунный механизм состоит из четырех звеньев: стойки, кривошипа, шатуна и ползуна. Если ведущим звеном является ползун, то механизм преобразует возвратно-поступательное движение ползуна во вращательное движение кривошипа, например механизмы паровой машины, двигателя внутреннего сгорания[1].

Адаптируя технологию для ускорителя уточной нити получим устройство состоящие из следующих частей: синхронного электродвигателя с постоянными магнитами (СДПМ); кривошипа, совмещающего роль маховика; шатуна; ползуна – штока;

балансирующих грузов  $m_1$  и  $m_2$  компенсирующих набегающий момент создаваемый шатуном и ползуном (рисунок 1).

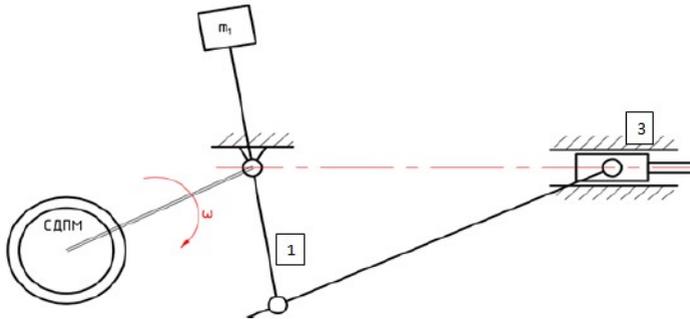


Рис. 1 – Кинематическая схема ускорителя на основе КШМ

Когда при вращении кривошипа 1 точка А его сочленения с шатуном занимает положение на оси движения ползуна слева от оси вращения кривошипа, ползун 3 вместе с толкателем 2 оказываются в левой мертвой точке с практически нулевой скоростью. В этот момент на направляющие, расположенные вдоль оси движения толкателя (положение 4), выкладывается прокладчик. При дальнейшем движении кривошипа скорость толкателя плавно возрастает по синусоидальному закону, безударно подхватывая прокладчик, и разгоняет его до требуемой скорости на угле поворота кривошипа 100–110 градусов. При дальнейшем движении кривошипа скорость толкателя начинает снижаться, а прокладчик свободно движется через зону ткачества. Путь толкателя с прокладчиком при этом составляет 1,2 длины кривошипа, т.е. 180 мм при длине кривошипа 150 мм. Толкатель в зону ткачества не заходит, оказываясь в правой мертвой точке со скоростью, близкой к нулю, и немедленно возвращается в левую мертвую точку для приема следующего прокладчика.

Основываясь на принципах работы была предложена концепция 3D-модели ускорителя на основе КШМ (рисунок 2).

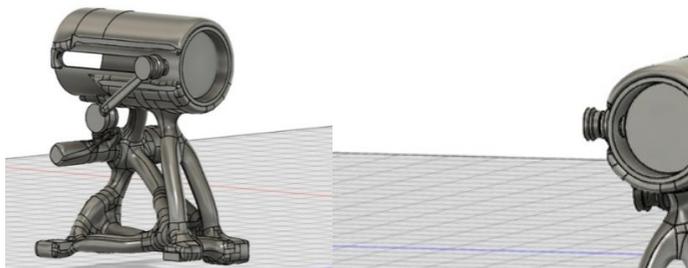


Рис. 2 – 3D-модель ускорителя на основе КШМ

Данная концепция базируется на принципе кривошипно-шатунного механизма. Благодаря использованию искусственного интеллекта(ИИ) все элементы конечного устройства были оптимизированы с учётом сохранения прочностных характеристик и уменьшения массы. Модель была создана в autodesk fusion 360, данная программа представляет собой облачную платформу САПР, которая является доступной, высокоэффективной альтернативой другим аналогичным программным продуктам. Он прост в использовании и обладает всеми функциями, которые содержат популярные пакеты САПР.

Программное обеспечение часто обновляется, а новые функции появляются каждые несколько месяцев. Fusion 360 идеально подходит для компаний разрабатывающих продукт от концептуальной модели до реализации его конечному потребителю, а также для начинающих пользователей, которые ищут профессиональный инструмент для вывода своего продукта на рынок

Fusion 360 может выполнять ресурсоемкие операции в облаке, включая рендеринг, моделирование, оптимизацию формы и генеративный дизайн. Это означает, что работа над сложным продуктом может не требовать высокопроизводительного оборудования, т.к. все ресурсоемкие операции выполняются в облаке.

Следующим шагом развития модели будет добавление посадочного места для сенсорной панели управления, а также контроллера для обеспечения управления привода.

Так как модель создается путем применения ИИ формы деталей получаются не правильной формы, в связи с этим не подходят такие методы изготовления деталей как штамповка или прокатка. Так же по причине необходимости обеспечить плотное прилегание деталей с минимальным необходимым зазором используется именно полимерная печать, которая обеспечивает точность печати до 20 мкм.

Данный тип ускорителя прост и надежен. КШМ широко описан в различной литературе, а опыт применения данной конструкции в ДВС на частоте вращения даже большей, чем принята в разработанной имитационной модели, делает возможным построение опытного образца ускорителя [2].

К преимуществам можно отнести: типовой электрический двигатель, типовой преобразователь частоты, типовой насос для подачи масла (или внедрение в общую смазочную систему станка), типовой ПЛК для синхронизации моментов запуска.

Однако стоит отметить и недостатки предложенного подхода: довольно большие габаритные размеры кривошипа; большие линейные ускорения, которые необходимо ограничивать средствами системы управления электроприводом КШМ; необходимость применения смазочно-охлаждающей жидкости.

Для реализации ускорителя на КШМ потребуются детально спроектировать механический узел, а также разработать ПО для ПЛК, реализующее алгоритм управления электромеханическим узлом ускорителя.

#### Литература:

1. Гоц А.Н. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей: учеб. пособие / А.Н. Гоц; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2005. – 124 с.

2. Грабовский А.А. Кинематика кривошипно-шатунного механизма с двумя коленчатыми валами // Известия МГТУ МАМИ. – 2009. – № 2 (8). – С. 56-63.

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЛОАГРЕГАТА ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ОКИСЛИТЕЛЯ В ТОПКУ КОТЛА**

**К.А. Можейкин**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, Kirill26012001@gmail.com**

**Научный руководитель: Кавешников В.М., к.т.н., доцент**

*Материал статьи включает в себя описание технологического процесса подачи окислителя для горения пылеугольного факела в котле на тепловых электростанциях. Проводится анализ эффективности сжигания топлива исходя из требуемой нагрузки котла и описание принципа регулирования выходного давления пара от количества поданного окислителя. Формулируется цель работы, задачи для ее достижения и методы их решения.*

*The material of the article includes a description of the technological process of supplying an oxidizer for the combustion of a pulverized coal torch in a boiler at thermal power plants. An analysis of the efficiency of fuel combustion is carried out based on the required load of the boiler and a description of the principle of regulating the outlet steam pressure from the amount of oxidizer supplied. The purpose of the work, the tasks for its achievement and methods of solving them are formulated.*

На сегодняшний день основу энергетического комплекса России составляет тепловая энергетика, преимущественно использующая бурый и каменный угли. Богатые запасы ископаемого топлива дают нашей стране возможность уверенно развивать электроэнергетический потенциал. Однако, ресурсы не бесконечны, поэтому в настоящее время особенно актуальной становится проблема энергетической эффективности технологий генерации и теплоснабжения. Достигается это в том числе путём совершенствования технологических процессами внедрением принципиально новых решений.

Одним из фундаментальных процессов, определяющих суть тепловой энергетика, является горение топлива. Энергоэффективность станции в целом зависит от характера работы котлоагрегатов, сжигающих определенный вид топлива. Технология горения, в свою очередь, определяет КПД работы котла. Работа котлоагрегата зависит в целом от множества параметров системы, которые подбираются с учетом технологии сжигания топлива. Таким образом, совершенствование технологии горения является одним из ключевых факторов к энергоэффективности котлоагрегата, развитие которого поможет существенно повысить выработку электрической и тепловой энергии.

Процесс горения любого топлива нуждается в окислителе. Однако, с учетом постоянного изменения потребления электроэнергии в течении суток, котлоагрегат вынужден менять режим своей работы, исходя из требований к вырабатываемой мощности.

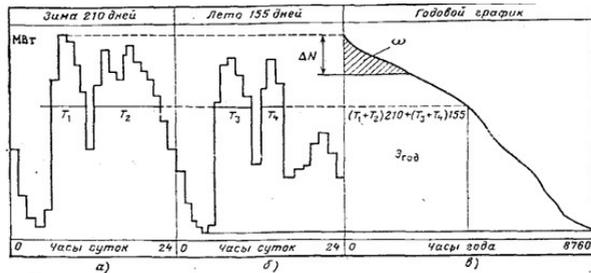


Рис. 1 – Среднестатистические суточные графики электрической нагрузки энергосистемы в течении 3 периодов (лето, зима, целый год)

Соответственно, для режима малонагруженного требуется существенно меньше топлива, чем для периода максимальной нагрузки. Учитывая, что с изменением требуемого количества топлива изменяется и количество подаваемого окислителя, необходимого для обеспечения качественного сгорания топлива и экономичной работы котла. Таким образом, возникает необходимость оперативного регулирования подачи окислителя в топку кольцевого котла с применением автоматического регулирования системы.

Принцип регулирования подачи воздуха в котлах с вентиляторным дутьём имеет свои особенности. Основным элементом системы является регулятор давления воздуха – РДВ, который отвечает за формирование управляющего сигнала на привод воздушной заслонки и блок управления дутьевыми вентиляторами. В этом регуляторе суммируются сигналы по давлению атмосферного воздуха –  $p_A$ , избыточному давлению воздуха в коробе котла –  $p_K$ , и сигнал заданного значения нагрузки котла, поступающий от РДП. Суммарный сигнал выдается на регулирующий орган РДВ – регулятор давления воздуха; ЭВК – котельный электровентильатор; ВЗ – регулирующая воздушная заслонка;  $p_K$  – давление воздуха котла;  $p_A$  – атмосферное давление воздуха;  $p_{зад}$  – заданное значение давления воздуха для данной нагрузки котла.

В котлах с вентиляторным дутьем с целью обеспечения бездымного сгорания топлива система регулирования осуществляет опережающую подачу окислителя при наборе нагрузки и опережающее снижение подачи топлива при сбросе нагрузки котла.

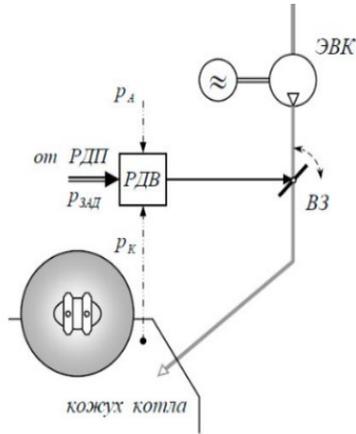


Рис. 2 – Схема регулирования воздуха в котлах с вентиляторным дутьём

Количество нагнетаемого воздуха, или производительность вентиляторов, определяется расчётной формулой:

$$Q_B = \beta_1 \cdot B_p \cdot [\alpha_T - \Delta\alpha_T] \cdot V^o \cdot \frac{273 + t_B}{273} \quad (1)$$

Где  $\beta_1$  – коэффициент запаса по производительности;

$\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха в конце топки;

$t_B$  – температура воздуха, поступающего в вентилятор, °С;

$V^o$  – объём газов, за рассматриваемой поверхностью,  $\text{нм}^3/\text{кг}$ ;

$B_p$  – расчётный расход топлива,  $\text{кг/с}$ .

Широко применяемые традиционные системы пылепитания котлов хорошо работают в статических режимах в соответствии с формулой (1) и ей подобными, однако в динамических режимах, связанных с изменением качества окислителя, топлива, их входной температуры, состояния горения в каждый момент времени и некоторых других параметров работы котла и агрегата в целом, стехиометрическое соотношение между мгновенными значениями количества топлива (угольной пыли) и окислителя (воздуха), обеспечивающего полное сгорание того и другого и следовательно полное использование теплотворной способности топлива, может нарушаться, снижая энергоэффективность работы котла.

Целью настоящей работы является разработка системы автоматического управления воздухоподачей, обеспечивающей

минимальное отклонение от стехиометрического соотношения как в статических, так и в динамических режимах при парировании основных возмущающих воздействий (изменения нагрузки котла, температуры и свойств топлива и окислителя и др.).

Основные задачи, которые должны быть решены для достижения указанной цели:

- анализ технологического процесса работы котла и, исходя из расчётных данных и компоновки котла, подбор силового оборудования системы воздухоподачи;

- разработка математического описания системы воздухоподачи;

- определение математической формулировки критерия качества системы воздухоподачи;

- разработка регулятора воздухоподачи, обеспечивающего поддержание стехиометрического соотношения в динамических режимах;

- разработка математической модели автоматической системы воздухоподачи с разработанным регулятором;

- проведение моделирования процесса функционирования системы для подтверждения качества спроектированного регулятора при парировании возмущающих воздействий;

- решение вопроса реализации полученного регулятора в рамках существующей системы воздухоподачи.

Для решения поставленных задач предполагается применение следующих методов:

- теории автоматического управления;

- теории оптимального управления динамическими процессами;

- имитационного моделирования элементов системы;

- анализа качества динамических процессов в смысле выбранного критерия.

Полученные в работе результаты должны способствовать экономии топлива угольных котлов с традиционной системой регулирования без нарушения их бесперебойной работы.

Литература:

1. Серант Ф.А., Пылеугольные котлы с кольцевой топкой для крупных энергоблоков. – 2021. – 264 с.

2. Болдырев О. Н. Судовые энергетические установки. – 2004. – 200 с.

3. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Анализ показателей электромагнитных ударных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – № 2. – С. 72–80.

# ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

М. Е. Мосин

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, mosinmisha1997@yandex.ru

Научный руководитель: Вильбергер М. Е., к.т.н., доцент

*Развитие автомобильной отрасли, в которой автомобили приводятся в движение электрическими двигателями, в последнее время происходит все интенсивнее и интенсивнее. Развитие электрических транспортных средств, достигших таких же скоростных характеристик, как свои бензиновые и дизельные собратья, в настоящее время направлено на поиски способов повышения энергетической эффективности силовой установки электрического автомобиля. Этого можно достичь с помощью улучшения алгоритмов управления электроприводом электромобиля. В данной работе приводится обзор литературы, на основе которого делается обоснование применения метода скользящих режимов для повышения энергоэффективности электромобиля.*

*The development of the automotive industry, in which cars are driven by electric motors, has been happening more and more intensively lately. The development of electric vehicles that have achieved the same high-speed characteristics as their gasoline and diesel counterparts is currently aimed at finding ways to increase the energy efficiency of the power plant of an electric car. This can be achieved by improving the algorithms for controlling the electric drive of an electric vehicle. This paper provides a review of the literature, on the basis of which a justification is made for the use of the sliding mode method to improve the energy efficiency of an electric vehicle.*

Для поддержания на заданном уровне какой-либо механической, либо электрической переменной двигателя, а также для компенсации некоторых возмущающих воздействий, наиболее распространенным является использование ПИД-регуляторов. Их работа основана на компенсации ошибки между задающим воздействием и сигналом обратной связи. В общем сложности они состоят из трех параллельных звеньев: П – пропорционального, И – интегрального, Д – дифференциального. Выходной сигнал пропорционального звена пропорционален сигналу ошибки, интегрального звена – интегралу ошибки, дифференциального звена – производной ошибки. Недостатком ПИД-регуляторов является их нечувствительность к изменениям со временем внутренних параметров объекта управления.

В свою очередь метод управления в скользящих режимах не предъявляет высоких требований к постоянству входного напряжения

автономного инвертора напряжения (АИН). В работе [1] автор показывает, что скользящие режимы сохраняются при изменении величины входного напряжения АИН в широких пределах, однако существует ограничение нижнего предела его изменения. Таким образом, для электроприводов переменного тока возможно упростить схему звена постоянного тока и отказаться от сглаживающей емкости. Также автор приводит доказательства обеспечения инвариантности электропривода к изменениям параметров объекта управления и внешним возмущениям при управлении в скользящих режимах.

В статье [2] авторами производится сравнение трех типов регуляторов: классического ПИД-регулятора, регулятора на основе нечеткой логики (Fuzzy controller), а также регулятора, основанного на скользящих режимах (Sliding Mode Controller (SMC)). Классический ПИД-регулятор является наиболее простым и старым, его недостатком является то, что он применим в основном к линейным системам, в то время как другие два регулятора применимы к нелинейным системам. В качестве объекта управления авторами выбран бесколлекторный двигатель постоянного тока (BLDC). Моделирование работы системы было проведено в пакете прикладных программ Matlab Simulink, полученные сравнительные результаты работы трех контроллеров показаны в таблице 1.

**Таблица 1 – Показатели качества переходных процессов**

Параметр	ПИД	Fuzzy	SMC
Время нарастания, с	0,034	0,027	0,0035
Время регулирования, с	0,203	0,082	0,042
Статическая ошибка, с	1,067%	0,53%	0,33%

По результатам моделирования авторы делают вывод, что SMC обладает лучшими, по сравнению с ПИД и Fuzzy регуляторами, динамическими и статическими характеристиками. Сокращается время протекания переходных процессов, что ведет к уменьшению потерь энергии в переходных режимах.

В работе [3] авторами сравниваются ПИД и SMC регуляторы применительно к управлению электрическим транспортным средством на базе четырех BLDC двигателей. При равных условиях изменения скорости и траектории движения авторами с помощью моделирования получены следующие результаты величины пройденного расстояния (рисунок 1).

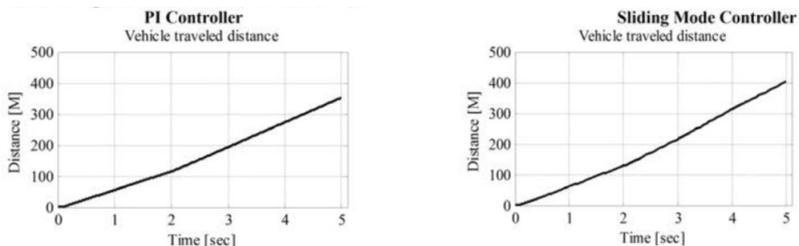


Рис. 1 – Графики пройденного расстояния электромобиля с ПИД и СМСрегуляторами

Из анализа графиков делается вывод о том, что при использовании СМСрегулятора транспортное средство проходит большее расстояние (400 м против 352 м), что говорит о более рациональном использовании энергии с регулятором скользящих режимов.

Несмотря на приведенные выше преимущества управления в скользящих режимах данный метод имеет существенный недостаток, называемый «дребезжанием» (chattering). Его суть заключается в том, что переменная состояния периодически переключается между двумя сторонами поверхности скользящего с высокой частотой, вследствие чего никогда не может быть строго стабилизирована из-за временных задержек, неопределенностей модели и других факторов контроллеров и датчиков. Данное явление может негативно сказываться на реальных системах. Например, в системах с механическими передачами, в которых обязательно имеется люфт между передачами, явление дребезжания может приводить к повышенному износу механических частей.

В работах [4, 5, 6] предложены методы борьбы с данным негативным явлением. Одним из способов решения данной проблемы является применения метода квази-скользящих режимов. Основная концепция квази-скользящего режима заключается в устранении прерывистости знаковой функции *signum* на непрерывную функцию насыщения. В статье [4] предложены три варианта функций насыщения:

- Стандартная функция насыщения  $sgn(s)$ ;
- Кусочно-линейная функция (PWL) с возможностью изменения коэффициента наклона;
- Гиперболическая функция  $\tanh(ks)$ , где  $k$  – коэффициент наклона.

Однако при настройке функций насыщения с целью уменьшения дребезжания возможно одновременное снижение производительности системы.

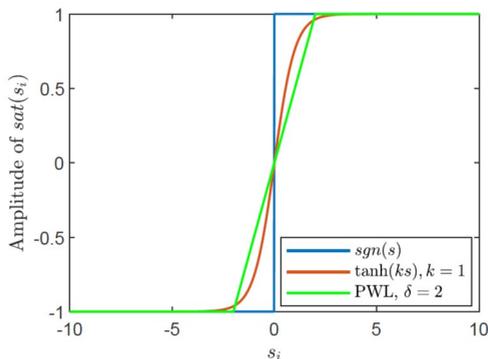


Рис. 2 – Различные варианты функций насыщения

В статье [5] помимо вышеуказанного метода внедрения функции насыщения были предложены другие способы борьбы с дребезжанием. Одним из предложенных способов является разработка рекуррентной нейронной сети Элмана (Recurrent Elman Neural Network (RENN)) для определения оптимального коэффициента коммутации скользящих режимов. Другим вариантом управления в скользящих режимах, разработанным с целью дальнейшего уменьшения дребезжания, является скользящие режимы со сглаженным супер скручиванием (Smoothed Super Twisting Sliding Mode Control (SSTSMC)). По результатам моделирования наилучшим образом себя показали последние два метода (RENN и SSTSMC), благодаря данным методам дребезжание удалось свести практически к нулю.

Таким образом, в работе проведен обзор литературы, касающейся метода управления в скользящих режимах. Данный метод, по сравнению с классическим ПИД-регулятором, имеет существенные преимущества, такие как: инвариантность к изменениям параметров объекта управления, отсутствие жестких требований к входному напряжению, устойчивость к внешним возмущениям. Также в работе рассмотрены успешные способы борьбы с недостатком скользящих режимов. Таким образом, можно сделать вывод, что по сравнению с ПИД-регуляторами управление в скользящих режимах выглядит предпочтительнее для задач управления электроприводом автономного транспортного средства.

Литература:

1. Рывкин С. Е. Синтез систем управления автоматизированными синхронными электроприводами с использованием скользящих режимов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 – Москва, 2006. – 370 с.
2. Charishma M., Chandrasekhar J. N. Comparison of PI, Fuzzy and Sliding Mode Control Techniques in Speed Control of BLDC Motor // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2019. – Vol. 8, iss. 12. – P. 29-35.
3. Nasri A., Gasbaoui B., Fayssal B. M. Sliding mode control for four wheels electric vehicle drive // Procedia Technology. – 2016. – Vol. 22. – P. 518-526.
4. On Chattering-Free Dynamic Sliding Mode Controller Design/Jeang-Lin C. // Journal of Control Science and Engineering. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1-7. – doi: 10.1155/2012/564906.
5. Methods of Chattering Reduction in Sliding Mode Control: A Case Study of Ball and Plate System / Zarma T. A., Thomas S., Galadima A. A. // 2018 IEEE 7th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST). – 2018. – P. 1-8. – doi: 10.1109/ICASTECH.2018.8506783
6. Song Y., Zhao H., Guo L. A Nearly Optimal Chattering Reduction Method of Sliding Mode Control With an Application to a Two-wheeled Mobile Robot // Added at production. – 2021. – P. 1-20.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УЧЁТА И ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

А.В. Нагель

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, nagel.2022@stud.nstu.ru

Научный руководитель: Кучер Е.С., к.т.н., доцент

*В статье рассматриваются вопросы, связанные с автоматизацией процессов учета и хранения нефти и нефтепродуктов. Описаны преимущества внедрения автоматизации на нефтеперерабатывающие заводы.*

*The article deals with issues related to the automation of accounting and storage of oil and petroleum products. The advantages of introducing automation to oil refineries are described.*

Нефтеперерабатывающая промышленность является важным сектором преобразования энергии, обеспечивающая как продукты, так и сырье для широкого круга секторов конечного использования, включая транспортную и химическую промышленности.

В условиях развития и внедрения новых технологий в нефтяную промышленность, можно сформулировать проблему, связанную с учетом и хранением нефтепродуктов. Ее решение будет способствовать значительной экономии средств и уменьшению воздействия на окружающую среду.

Одним из наиболее эффективных методов решения проблемы является усовершенствование автоматизированных процессов учета и хранения нефтепродуктов.

При автоматизации процесса управления объектами хранения нефти и нефтепродуктов, информационная задача упрощается до количественного учета нефти и нефтепродуктов, хранящихся в резервуарах для хранения [1].

Точная инвентаризация имеет решающее значение для работы терминала. Однако сложный и динамичный характер операции может затруднить точное определение текущих уровней в резервуарах или прогнозирование будущих запасов на нефтеперерабатывающем заводе. Это может привести к увеличению операционных расходов на выполнение существующих обязательств и невозможности выполнения будущих заказов.

Нефтеперерабатывающие заводы вынуждены увеличивать маржу переработки за счет сокращения складских запасов, оптимизации состава сырой нефти и снижения потерь качества продукции при одновременном производстве большего количества сортов в

соответствии с более строгими характеристиками продукта и экологическими требованиями.

Экономические выгоды являются результатом улучшенного планирования и составления графиков в сочетании с более жестким контролем, повышенной эксплуатационной надежностью и гибкостью.

Операции на нефтеперерабатывающем заводе включают в себя прием и хранение сырой нефти, подача сырья в технологические установки и смешивание сырой нефти, выбеги технологических установок, хранение промежуточных продуктов, хранение компонентов, хранение и транспортировка смешанного продукта железнодорожными вагонами, грузовыми автомобилями, танкерами и трубопроводными сетями. Значительного улучшения работы и управления внешними площадками можно добиться за счет автоматизации нефтеперерабатывающего завода.

Автоматизация движения и хранения масла, а также система контроля помогают [2]:

- снизить эксплуатационные расходы;
- оптимизировать смешивание;
- обеспечить лучшее планирование, открывая возможности для оптимизации при выборе сырья;
- уменьшить количество запасов;
- уменьшить количество ошибок маршрутизации;
- обеспечить анализ происшествий и убытков.

Автоматизация движения и хранения нефти позволяет управлять и автоматизировать все процессы резервуарного парка, и наливной площадки с максимальной последовательностью в соответствии со стандартами. Это возможно выполнить на трех уровнях автоматизации системы управления технологическими процессами [3]:

- автоматизация на уровне полевых устройств;
- автоматизация на уровне исполнительной системы управления;
- замыкание цикла путем интеграции учета масла в корпоративные системы.

Это позволит нефтеперерабатывающему заводу контролировать все автоматизированные процессы и обеспечить быстрое выявление проблем, а также экономию времени и средств.

Сбор данных, согласование, учет выхода или учет масла, а также системы отчетности по информации о нефтеперерабатывающем заводе имеют важное значение для автоматизации систем движения и хранения нефтеперерабатывающего завода.

Автоматизация движения и хранения нефти требует детального определения полной системной интеграции для эффективного

функционирования автоматизированной системы. Автоматизированное перемещение и хранение нефти может включать сложную бизнес-процедуру, включающую всесторонний ежедневный анализ всех потоков, данных о движении нефти, лабораторных данных и данных инвентаризации. Разные типы данных поступают из разных источников, и интеграция всех данных в единую систему в качестве входных данных для бизнес-процесса перемещения и хранения нефти является абсолютной необходимостью.

Автоматизация на уровне исполнительной системы управления помогает отслеживать и оптимизировать операции благодаря быстрому, точному и прозрачному перемещению данных в режиме реального времени [4]. Это помогает лучше понять, как выполняются операции в режиме реального времени. Это окажет положительное влияние на операции и бизнес, поскольку поможет своевременно и обоснованно принимать решения о запасах и производительности.

Каждый нефтеперерабатывающий завод (НПЗ) генерирует значительные объемы данных, но сталкивается с трудностями в эффективном использовании информации без хорошего уровня исполнительной системы управления. Архив данных позволяет нефтеперерабатывающему заводу легко обрабатывать большие объемы данных, генерируемых заводом и другими областями деятельности. Это гарантирует, что исторические данные легко доступны пользователям для анализа. В этом случае он обеспечивает доступность данных для других систем и приложений по перемещению и хранению нефти. Например, для расчета движения и производительности потоков и их соответствующие температуры, и давления обычно получают из архива нефтеперерабатывающего завода, а данные инвентаризации получают из системы измерения резервуара.

Ключом к рентабельности НПЗ является возможность планировать и оптимизировать операции на основе информации в режиме реального времени с обратной связью о том, что происходит в настоящее время и что фактически было сделано, чтобы регулировать операции НПЗ:

- запуск, остановка и отслеживание всех движений;
- усовершенствованные последовательности автоматизации, что повышает эффективность работы оператора и снижает загрязнение продуктов;
- автоматизация планирования движения масла;
- отчетность и мониторинг фактических объемов;
- улучшенный учет потерь масла с использованием более качественных данных в режиме реального времени для балансировки материалов;

- автоматизированные рабочие процессы для поддержки производства;
- автоматизированный сбор данных из резервуара и связанного с ним вспомогательного оборудования и датчиков;
- управление и отслеживание материалов в рабочих центрах и между рабочими центрами;
- создание документации по площади резервуаров и управленческой отчетности по топливу и потерям.

Автоматизация промышленных объектов позволяет свести к минимуму человеческий фактор, тем самым повышая точность выполнения процесса и снижая риск несчастных случаев из-за ошибок. Также, создание эффективной программы автоматизированного управления на объекте включает внедрение систем учета и мониторинга для повышения безопасности объекта путем регистрации допустимых рабочих параметров и уведомления операторов.

Внедрение автоматизированных систем управления на объектах приведет к увеличению технико-экономических показателей, улучшению качества управления и дистанционного контроля, а также повышению технологичности и безопасности процесса.

#### Литература:

1. Технологические процессы количественного учета на объектах хранения нефти и нефтепродуктов. – Текст: электронный // CyberPedia: [сайт]. – URL: <https://cyberpedia.su/1x6779.html> (дата обращения: 05.11.2022).

2. Опыт автоматизации нефтепарков и складов ГСМ. – Текст: электронный // Control Engineering Russia: [сайт]. – URL: <https://controlengrussia.com/avtomatizatsiya-neftegazovoj-otrasli/npf-krug-avtomatizatsii-nefteparkov-i-skladov-gsm/> (дата обращения: 05.11.2022).

3. Состав полевого оборудования в АСУ ТП. – Текст: электронный // helpiks.org: [сайт]. – URL: <https://helpiks.org/2-71345.html> (дата обращения: 07.11.2022).

4. Автоматизация процессов. – Текст: электронный // Менеджмент качества: [сайт]. – URL: [https://www.kpms.ru/Automatization/Process\\_automation.htm](https://www.kpms.ru/Automatization/Process_automation.htm) (дата обращения: 07.11.2022).

# РАЗРАБОТКА СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРНОГО УСТРОЙСТВА ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

**А.С. Нагорный**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [andrey-s-n2016@yandex.ru](mailto:andrey-s-n2016@yandex.ru)  
Научный руководитель: Нос О.В., д.т.н., доцент**

*В статье рассмотрены типы беспилотных летательных аппаратов по виду силовой установки, их преимущества и недостатки. Отражены результаты подготовки двигателя внутреннего сгорания и подбора электродвигателя для стартер-генераторного устройства гибридной электроустановки.*

*The objective of the study was to design starter generator for hybrid power propulsion. In the theoretical part of the study the main issues was comparison of power propulsion of unmanned aerial vehicles. The experiment was conducted. As a results of this experiment were shown the preparation of an internal combustion engine and the selection of a generator.*

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), в дальнейшем так же называемые дронами, в классическом исполнении имеют по электродвигателю на каждый винт, которые питаются от аккумуляторов через силовой распределительный блок. Такая компоновка позволяет дрону иметь высокую маневренность, удобное управление, в том числе автономное, очень быстрые и точные реакции на сигналы оператора. Но при этом такие дроны имеют малый запас хода из-за сравнительно низкой энергоэффективности аккумуляторных батарей. Жидкое топливо, такое, как бензин, дизель и другие родственные им виды имеют гораздо большую энергоэффективность по массе и объему, нежели твердотельные аккумуляторные батареи (Рисунок 1) [1].

В качестве источника питания в полностью электрических БПЛА в основном используются литий-полимерные (Li-Po) и литий-ионные (Li-ion) аккумуляторные батареи. Такие аккумуляторы имеют сравнительно высокие энергетические показатели в сравнении со многими другими, и при этом не являются сравнительно дорогими, как например литий-тионхлоридные (LiSOCL<sub>2</sub>) батареи. На основании данных из рисунка 1, литий-полимерные аккумуляторы в сравнении с бензином, имеют в 48 раз меньшую энергоэффективность по массе, и в 13 раз меньшую по объему [1-2]. Исходя из этого, использование бензина, как источника энергии для питания БПЛА, в сравнении с Li-Po аккумуляторами гораздо более эффективно с точки зрения обеспечения дальности полета и переноса грузов.

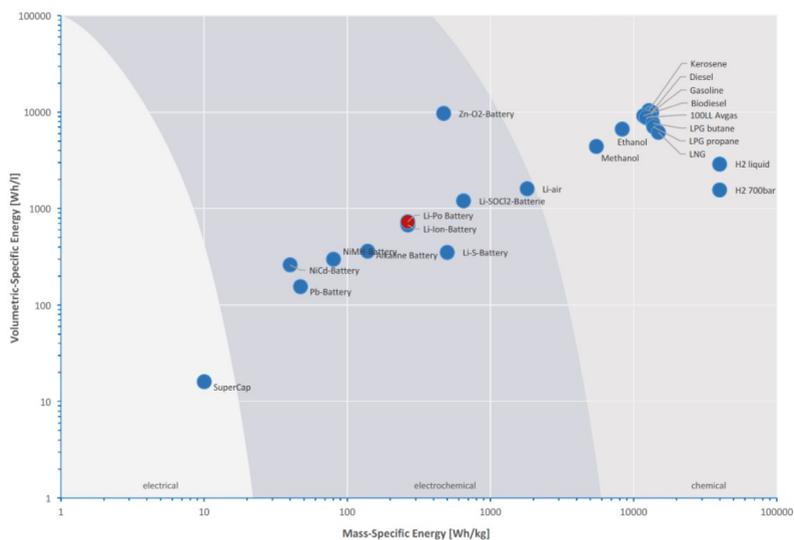


Рис.1 – Сравнение источников питания для БПЛА на основании энергетических показателей по массе и объему [1]

Но БПЛА с ДВС имеют свои недостатки. Конструктивной особенностью дронов с ДВС является то, что пропеллеры вращаются непосредственно от ДВС чаще всего посредством ременной передачи. При такой конструкции невозможно управлять БПЛА за счет изменения скорости вращения отдельных пропеллеров. Для управления обычно используются сервоприводы на винтах, изменяющие шаг винта. Это в совокупности значительно снижает маневренность дрона и повышает время реагирования, за счет инерционности ДВС и времени срабатывания сервоприводов. А так же ДВС, особенно малоцилиндровые работают с колебаниями, что может сказаться на качестве полёта [3].

Поэтому, выгодным решением для транспортировки относительно тяжелых грузов на большие расстояния может стать БПЛА с гибридной силовой установкой. То есть источник энергии должен служить ДВС, подключенный через стартер-генераторную установку к аккумулятору, от которого далее энергия распределяется, как в полностью электрическом БПЛА. А значит и система управления и основные преимущества электрического дрона полностью сохраняются, при этом используя преимущества относительно высокой энергоэффективности от ДВС.

В качестве эксперимента, для малого гексокоптера (БПЛА с шестью винтами) с максимальной тягой 6,3кг, был подобран ДВС для работы в качестве источника питания. А именно двухтактный одноцилиндровый двигатель G052НТF-II, основные характеристики которого приведены далее (Таблица 1).

**Таблица 1 – Основные характеристики ДВС G052НТF-II**

№	Характеристики двигателя	Показатели
1.	Тип зажигания	Электронное (CDI)
2.	Максимальная мощность, кВт/об/мин	1,4/7500
3.	Объем двигателя, см <sup>3</sup>	51,7
4.	Объем топливного бака, Л	0,95
5.	Масса двигателя, кг	4,74

Необходимо произвести облегчение двигателя, так как тяга БПЛА всего 6,3кг и масса ДВС в 4,74кг чрезмерно высока для нормального функционирования дрона. Так же снижение массы повысит время полета и маневренность БПЛА, и в дополнении обеспечит возможность для большей массы полезной нагрузки.

Первично для снижения массы ДВС были демонтированы некоторые элементы его корпуса, крепление бака, сцепление, стартер. Что по итогу позволило уменьшить вес двигателя до 3кг без учета топлива. При полном баке вес составит 3,7кг, а при половине бака 3,35кг. В дополнение к этому вес полезной нагрузки, например камеры, до 0,5кг.

Но необходимы ещё стартер-генераторная установка и сервопривод для регулирования открытия дроссельной заслонки. Вес сервопривода и блока управления к нему не превысит 150гр.

Подбор электродвигателя, который будет использоваться, как стартер-генераторная установка в проектируемой гибридной силовой установки, осуществлялся на основе электродвигателя для авиамodelей Scorpion SII–4025–520KV. Для данного гексокоптера необходимо при скорости вращения ДВС 7500 об/мин, что соответствует максимальной мощности двигателя, получить на выходе генератора 24В для питания БПЛА. Показатель KV электродвигателя отражает скорость вращения ротора в об/мин на один вольт подаваемый на двигатель, и наоборот. Но эти данные соответствуют режиму без нагрузки. Поэтому необходимо провести эксперимент, подсоединить электродвигатель Scorpion SII–4025–520KV через сцепной механизм к внешнему вращающему устройству и экспериментально определить характеристику KV в этом случае. Эксперимент проводился при скорости вращения 890 об/мин, результаты в виде напряжения снятого на осциллографе (Рисунок 2).

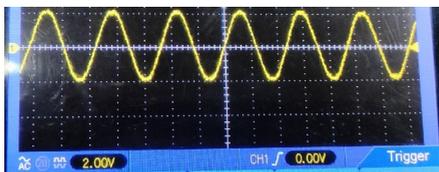


Рис.2 – Экспериментально полученное напряжение электродвигателя Scorpion SII-4025-520KV при 890 об/мин

В результате эксперимента получено, что в данном режиме электродвигатель выдает 2В на 890об/мин. Следовательно, относительный коэффициент  $K_{KV}$  равен ( $KV_{nl}$  – показатель KV без нагрузки,  $KV_{ex}$  – экспериментально полученный KV):

$$K_{KV} = \frac{KV_{ex}}{2 \cdot KV_{nl}} = \frac{890}{2 \cdot 520} = 0,85.$$

Следовательно, для генератора данной гибридной установки требуется следующий  $KV_{ген}$  ( $K_{KV}$  – относительный коэффициент KV,  $N_{max}$  – скорость вращения двигателя при максимальной мощности,  $U_{треб}$  – требуемое напряжение от генератора):

$$KV_{ген} = \frac{N_{max}}{U_{треб}} \cdot K_{KV} = \frac{7500}{24} \cdot 0,85 = 265 \text{ (об} \cdot \text{В / мин)}.$$

В результате в качестве генератора выбран двигатель Scorpion SII-4035-250KV. Вес генератора совместно со сцепным устройством 510гр. Итого общий вес гибридной установки при полном баке составит 4,36кг. С учетом веса БПЛА 0,9кг и расчета полезной нагрузки на 0,5кг, общий вес БПЛА составит 5,76кг. Что полностью соответствует максимальной тяги дрона в 6,3кг.

Электрические БПЛА имеют малый запас хода. Бензиновые требует больше технических решений и более сложную программу управления. Поэтому, оптимальным решением для транспортировки грузов на большие расстояния может оказаться гибридный дрон, совмещающий преимущества обоих видов. Как итог начала эксперимента был подготовлен ДВС и экспериментально подобран стартер-генератор для небольшого гексокоптера. Потенциально, БПЛА с гибридной силовой установкой могут стать решением для транспортировки грузов весом в сотни килограмм на сотни километров.

Литература:

1. *Schroth F.* Drone Energy Sources – Pushing the Boundaries of Electric Flight [Electronic resource] // Drone Industry Insights, Hamburg, June 2017. – Hamburg, 2017. – URL: <https://www.droneii.com/drone-energy-sources/> (accessed: 20.08.2020).
2. Complete preliminary design methodology for electric multirotor / *M. Gatti* // Journal of Aerospace Engineering. – 2017. – Vol. 30, iss 5. – doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000752.
3. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 404с.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМ ОРГАНОМ РОБОТА**

**В.К.Пешков**

**Новосибирский государственный Технический Университет,  
г. Новосибирск, vdmpekov@gmail.com**

**Научный руководитель: Кучер Е.С., к.т.н., доцент**

*В работе рассматриваются способы автоматизации системы управления рабочим органом робота.*

*The paper discusses ways to automate the control system of the robot's working body.*

Понятие автоматизации производства в нынешнем мире достаточно широко, и включает в себя как экономические, так и технические решение. Одним из вариантов решение сразу двух поставленных задач является замена человеческого труда, на использование роботов манипуляторов.

Современные производства стремятся к повышению качества и скорости выполнения работы, помимо прочего, поставленной цели помогает добиваться использование роботов-манипуляторов, которые гарантируют идентичность выпускаемой продукции и уменьшают риски влияния человеческой ошибки [4].

Устройство выполняющее специальное задание по захвату или по манипуляции называется рабочим органом робота. Рабочий орган может быть представлен как устройство захвата или специальный инструмент.

Наиболее универсальным и наиболее сложным устройством захвата является механизм функционально сравнимый с кистью человеческой руки. Захват и удержание в таких устройствах производится за счет перемещение относительных частей данного устройства. Для захвата сыпучих материалов, таких как песок, щебень и др., используются крюки, а для плоских поверхностей (стекло, стальные листы и др.) специальные гидравлический присоски [4].

Для приведение любых из вышеперечисленных устройств захвата используются электрические, гидравлические или пневматические приводы. Выбор привода зависит от поставленной задачи.

Гидравлические приводы используются при необходимости создания значительных усилий или для обеспечения высокого быстродействия, как следствие, такими приводами обычно снабжаются роботы высокой грузоподъемности.

При необходимости обеспечения лучшей точности позиционирования используются электрические приводы, которые не обладают большой силой или быстродействием.

Пневматические приводы как правило используются в роботах небольших размеров, которые выполняют быстрые циклические операции.

Основными параметрами автоматизации роботов являются:

- Обеспечение плавности перемещения
- Точность позиционирования
- Безопасность конструкции изделия
- Возможность регулирования скорости перемещения

Решение подобных вопросов должно проходить на ранних этапах проектирования. Для каждого конкретного случая создается своя система управления, но все их можно разделить на два типа: замкнутая СУ и незамкнутая СУ [3].

Замкнутая СУ – представляется собой систему управления с обратными связями по необходимым параметрам, что дает возможность отслеживать состояния робот. Недостатком такой системы является её относительно высокая сложность и стоимость [3].

Незамкнутая СУ – система которая не дает информации о состоянии функционирования робота. Является более дешевой и простой системой, однако очевидным минусом подобной системы является невозможность отследить параметры робота [3].

По современным оценкам, распределение электроприводов на рынке представлено на рисунке 1 [4].

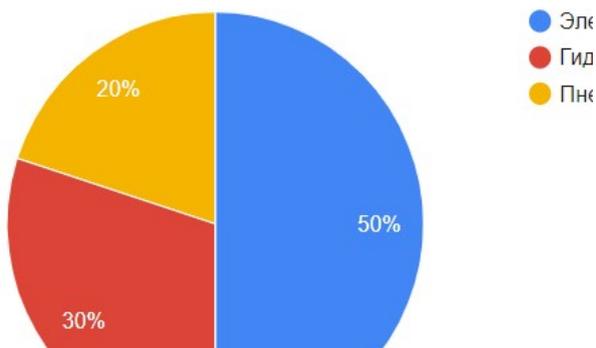


Рис. 1 - Распределение приводов на рынке промышленных роботов

На рисунке 2 представлен один из вариантов исполнения робота манипулятора.



Рис. 2 - Внешний вид робота-манипулятора

Данный тип роботов-манипуляторов имеет четыре подвижных звена со своими осями вращения и захватное устройство, закрепленное в конце последнего из звеньев. Захватное устройство так же имеет свою ось вращения, данная конструкция обеспечивает 6 степеней свободы.

В подобных роботах может применяться один из двух типов приводов: синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) или двигатель постоянного тока (ДПТ).

В данном манипулятора будет рассмотрен второй тип приводов - двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Такое решение обусловлено рядом преимуществ: простая система управления электрическим приводом (СУЭП), если сравнивать её с СДПМ, а также относительно меньшая стоимость. Недостаток данной системы в низкой динамике, если сравнивать с СДПМ, однако в зависимости от задачи данный недостаток можно опускать. [2]

Во всех узлах робота-манипулятора применяются одинаковый тип двигателя. Параметры такого двигателя представлены в таблице 1. [1]

**Таблица 1. Параметры двигателя**

Номинальное напряжение	24 В
Номинальный ток	0.7 А
Номинальная скорость	8670 об/мин
Ток холостого хода	0.05 А
Максимально допустимый ток	2 А

На всех двигателях установлены одинаковые редукторы с планетарной передачей и передаточным числом 1:800. Выбор данных редукторов обусловлен их преимуществами такими как надежность и компактность.

Дополнительно к двигателям и редукторам, в систему управления электроприводами установлены оптические датчики скорости вращения двигателей, которые находятся на валах каждого двигателя. Все датчики в системе находятся до редукторов и имеют разрешение 100 имп/об, что само по себе не очень много, но в сочетании с редукторами вполне хватает для достаточно точного позиционирования.

По результатам проведенной работы, можно сделать следующие выводы:

- главными частями робота манипулятора, обеспечивающими его корректную работу, являются двигатели и их системы управления;
- выбор двигателя обусловлен не только поставленной задачей, но и стоимостью, а также сложностью настройки и эксплуатации;
- в случае необходимости, недостаточные показатели качества, такие как точность позиционирования или др. могут быть скомпенсированы корректной структурой исполнения робота манипулятора.

#### Литература:

1. Каталог электрических двигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xn--80addceesnhi0axzh6mb.net/>- Загл. с экрана.
2. Разработка и производство электроприводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.electroprivod.ru/stepmotor-selection.htm>- Загл. с экрана.
3. Анучин А.С. Системы управления электроприводов/ Анучин А.С. : Издательский дом МЭИ, 2015. – 43 с.
4. Анализ современного состояния применения роботов в промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ УСКОРИТЕЛЕМ ПРОКЛАДЧИКА УТОЧНОЙ НИТИ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ ТКАЦКОГО БЕСЧЕЛНОЧНОГО СТАНКА

Г.С. Сидоров

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, onirs@corp.nstu.ru

Научный руководитель: Д.А. Котин, к.т.н., доцент

*Узел ускорителя прокладчика уточной нити с высокими динамическими и энергетическими показателями повышает производительность ткацкого станка и позволяет получать ткани шириной от 1 до 12 метров и более. Узел ускорителя может быть гидравлическим, пневматическим, электромагнитным и электромеханическим [1-4]. Во время работы прокладчик уточной нити работает на больших линейных скоростях с предельными линейными ускорениями. Задача снижения энергопотребления такого узла за счет непрерывного движения элементов и узлов ускорителя, механизмов подачи и возврата прокладчика нити является актуальной в области текстильной промышленности.*

*A high dynamic and energy effective inlay yarn accelerator increases the productivity of a weaving machine and allows one to produce fabrics with a width of 1 to 12 meters or more. The accelerator type can be hydraulic, pneumatic, electromagnetic and electromechanical [1-4]. The inlay yarn clamp operates at high linear speeds with extreme linear accelerations. The problem of reducing the energy consumption of such units as the accelerator, mechanisms for feeding and returning the inlay yarn clamp due to the continuous movement of elements is relevant in the textile industry.*

В рамках тезиса предлагается рассмотреть электромеханическую систему ускорителя прокладчика уточной нити на базе кривошипно-шатунного механизма (КШМ). Предложить структурную схему построения системы управления электроприводом ускорителя. Провести цифровое моделирование полученной электромеханической системы и оценить её пригодность для применения в ткацком бесчелночном станке.

Входными данными для построения модели электромеханической системы являются:

- Запуск прокладчика нити осуществляется на  $120^\circ$ , а прилет в приемную коробку происходит до  $310^\circ$  цикловой диаграммы.
- Расстояние ускорения — 150 мм.

- Частота вращения главного вала ткацкого станка 420-600 об/мин.
- Ускоритель должен быть унифицирован и должен запитываться от общепромышленной сети и в установившемся режиме работы иметь потребляемую мощность не более 4 кВт.
- Линейная скорость прокладчика не менее 45 м/с, Масса ускоряемого прокладчика 60 г.

Ускорители на базе кривошипно-шатунного механизма применялись на ткацких станках времен СССР, о чём свидетельствует ряд патентов [5-9]. Известно, что увеличение числа поршневых групп приводит к уменьшению пульсаций момента на приводном валу. [10-11] В приведенном ряде патентов изобретения направлены на повышение надежности узла, уменьшение вибраций и пульсаций момента вызываемых однопоршневым КШМ. В силу невозможности применения механизма предварительного накопления нити, как в основовязальных станках с нитераскладочной кареткой [12], невозможно и применение многопоршневого ускорителя. Поэтому для построения электромеханической системы будем считать, что однопоршневой КШМ максимально возможно сбалансирован и вносит минимум пульсаций момента. Принятая кинематическая схема ускорителя на базе КШМ изображена на рисунке 1.

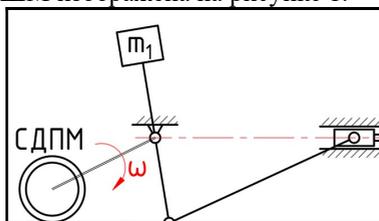


Рис. 1 – Кинематическая схема ускорителя на базе КШМ

Механическая часть модели, описывающая КШМ, построена на базе простейших динамических блоков и не учитывает детальное соединение звеньев и диссипативные силы. Диаметр кривошипа составляет 350 мм. Скорость вращения приводного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) составляет 3000 об/мин, соответственно теоретическая максимальная линейная скорость штока 55 м/с. Диаметр кривошипа намерено выбран максимально возможного размера, так как необходимо создать окно для управления электродвигателем. Для достижения скорости в 45 м/с скорость вращения СДПМ должна составлять 2456 об/мин. Так как скорость СДПМ 4 и более крат превышает скорость главного вала ткацкого станка, то и частота входа в

зону ткачества увеличивается. Следовательно, необходим дополнительный узел для ограничения количества входов в зону ткачества, но не останавливающий непрерывное движение ускорителя.

На рисунке 2 изображены кривые скорости, ускорения и перемещения поршня КШМ.

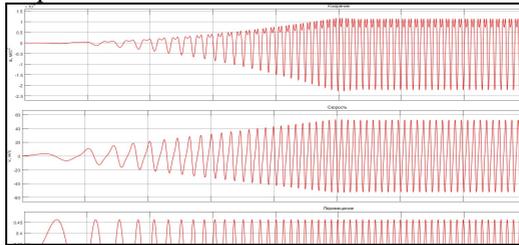


Рис. 2 – Кривые ускорения, скорости и перемещения ползуна КШМ при выходе на режим холостого хода

Максимальная скорость ползуна составляет 52 м/с. Максимальное ускорение на разгон 1200g, Максимальное ускорение на торможение и обратный ход 2200g. На рисунке 4 изображена мгновенная потребляемая мощность СДПМ без учета потерь энергии на трение в узлах и направляющих. Потребляемая мощность в установившемся режиме – 40 Вт, пиковая мощность при пуске достигает 5.8 кВт, может быть снижена за счет темпов первоначального разгона механизма.

Система управления рассматриваемой электромеханической системы должна иметь синхронизацию по скорости с главным приводным валом ткацкого станка, синхронизацию положений СДПМ и приводного АД по нулевым меткам энкодеров. Система управления должна быть построена на устройстве управления верхнего уровня, следовательно устройство верхнего уровня будет снижать динамику СДПМ. Структурная схема системы управления электромеханическим ускорителем прокладчика уточной нити представлена на рисунке 3. Блок запуска СДПМ и контроля кратности скоростей обеспечивает запуск СДПМ до скорости  $\omega_{зад\_xx}$ , затем переключается на работу от датчика скорости АД, т.е. работает по принципу «ведущий» - «ведомый» с сохранением установленной кратности скоростей. Вычислитель фазового рассогласования на основании приведенного пилообразного сигнала СДПМ к сигналу АД рассчитывает разницу и отдает команду на блок компенсации фазового рассогласования. Блок компенсации фазового рассогласования имеет окно в 544 об/мин, чтобы ускорить СДПМ для компенсации фазового рассогласования до поступления сигнала о прохождении нулевой метки энкодером АД. На



перемещающихся элементов, это повысит надежность и снизит энергопотребление ускорителя в целом.

Литература:

1. Zhang, M.Y.; Liu, Y.; Zhou, P.; Li, F. Viewing the development of US electromagnetic launch technology from patents. *Fly. Missile* 2017, 9, 36–40.
2. Juraeva, M.; Song, D.J.; Kang, D.J. Computational optimization approach to design a water-jet nozzle for a water-jet loom using the design of experiment method. *J. Mech. Sci. Technol.* 2019, 33, 631–637
3. Xu, Q.; Cui, X.; Mei, S.; He, Y.; Chen, Z.; Meng, F. Structural Performance Optimization Design of Continuously Accelerating Electromagnetic Weft Insertion System. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3611.
4. Chen, Y.D.; Zhao, C.C.; Yin, J.Q.; Cheng, Y.F.; Gu, J.Y. Structural design and flow field analysis of a new type of weft insertion piece for air-jet loom. *Basic Sci. J. Text. Univ.* 2020, 33, 59–63.
5. Патент № 490880 СССР. Привод рапир ткацкого станка: заявл. 20.06.1974 :опубл. 05.11.1975 / Горьков В.К., Степанов В. В. – 2 с.
6. Патент № 274989 СССР. Привод рапир ткацкого станка: заявл. 28.03.1969: опубл. 25.08.1976 / Ротенбург А.А., Певзнер Л. М. – 2 с.
7. Патент № 596675 СССР. Привод рапир ткацкого станка: заявл. 02.06.1976 :опубл. 05.03.1978 / Горьков В.К., Степанов В. В., Л.В. Степанова – 3 с.
8. Патент № 874792 СССР. Привод рапир ткацкого станка: заявл. 15.06.1979 :опубл. 23.10.1981 / Заботин Г.В., Крюков А.П., Андриянов В.М., Менлев В.А., Чумиков В.Г.– 3 с.
9. Патент № 1641912 СССР. Устройство для привода рапиры ткацкого станка: заявл. 29.03.1989 :опубл. 05.04.1991 / Патюков С.А., Стученков Г.В., Сиротин Ю.А., Эйюбов Х.Ч. – 3 с.
10. Грабовский А.А. Кинематика кривошипно-шатунного механизма с двумя коленчатыми валами // *Известия МГТУ МАМИ.* – 2009. – № 2 (8). – С. 56-63.
11. Гоц А.Н. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей: учеб. пособие / А.Н. Гоц; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2005. – 124 с.
12. Thomas M.; Marcus O W.; Marie-Ange B.; Process analysis and outlook for the development of a new weft yarn inlay system for warp knitting. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics.* 2022, 17.

## **ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УЧЕТА ПЕРЕГРЕВОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

**В.Д. Скотников, И.И. Сингизин,  
Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, vladskotnikov2003@yandex.ru  
Научный руководитель: Щуров Н.И., д.т.н., профессор**

Большая доля полезных ископаемых в нашей стране и в мире добывается в подземных рудниках и шахтах [1].

Добыча полезных ископаемых в шахтах и транспортировка их на поверхность осуществляется тяжелыми и ответственными механизмами – ленточными конвейерами, длина которых может достигать 2-3 километра.

Все без исключения конвейера имеют мощный электропривод состоящий из трехфазных асинхронных электродвигателей напряжением питания от 660В до 6000В и мощностью от сотен киловатт до нескольких мегаватт, управляемые различными системами, такие как преобразователи частоты и другие устройства запуска.

Условия эксплуатации для электродвигателей в горной выработке чрезвычайно тяжелые - сырость, высокая влажность воздуха, большая загрязненность, смесь грязи с водой часто покрывает двигатели толстым слоем до нескольких сантиметров.

Это ухудшает их охлаждение, не смотря на их специальное рудничное исполнение (различают исполнения рудничное нормальное и рудничное взрывозащищенное) и специальное исполнение от проникновения внутрь электродвигателя влаги и пыли (IP54 – защита от крупной пыли и капель воды, падающих со всех сторон)[2-3].

В результате невыполнения мероприятий по регулярной очистке электродвигателей от грязи и отсутствия широкого применения дорогих технических решений по дополнительному охлаждению электродвигателей они перегреваются сверх допустимой нормы для изоляции статора.

Не смотря на обязательное наличие у электродвигателей защиты от перегрева эффективность ее работы при небольших перегревах около 10 °С мала, так как тепловая защита очень инертна [4].

При этом на практике доказано, что перегрев обмоток даже на 8 °С (правило «восемь градусов») - правило Монтзигера) снижает ресурс службы изоляции обмотки электродвигателя, т.е. и самого его в 2 раза, так как изоляция обмоток электродвигателя теряет свои изоляционные

свойства, становится хрупкой и со временем разрушается, происходит ее пробой [4].

Таким образом, если двигатель конвейера, который по документам завода-изготовителя должен еще отработать 10 – 15 лет внезапно выходит из строя, то вся добыча в шахте может встать вплоть на целую смену или сутки, пока будет найдена и осуществлена замена, а это огромные убытки.

В связи с этим, актуально внедрять автоматизированные системы контроля и учета перегревов электродвигателей в шахтах, например, используя датчики контроля температуры типа Pt-100 (термосопротивление), встраиваемые в обмотку статора.

Это позволит измерять температуру статора в необходимом диапазоне и непрерывно передавать измеренные данные с помощью различных рудничных и шахтных устройств АСУ ТП (преобразователи частоты, медиаконвертеры, репитеры, усилители и преобразователи сигналов, Wi-Fi модули или оптоволоконный кабель) на поверхность для их обработки, дальнейшего хранения, а так же анализа данных, к примеру, по схеме, приведенной на рис. 1 и рис. 2 [5].

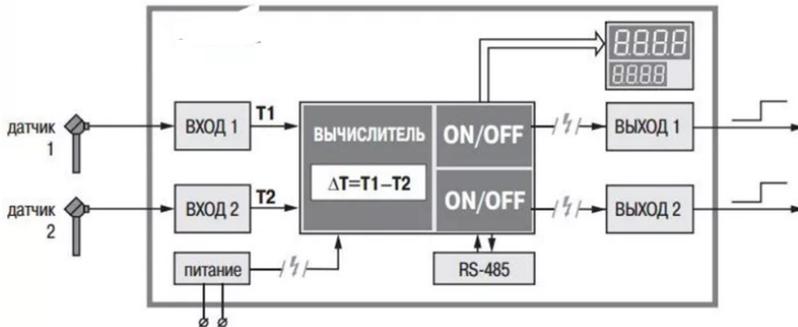


Рис.1 – Схема измерения температуры, обработки и передачи данных и сигналов с помощью датчиков-термосопротивлений Pt-100 и термопреобразователя

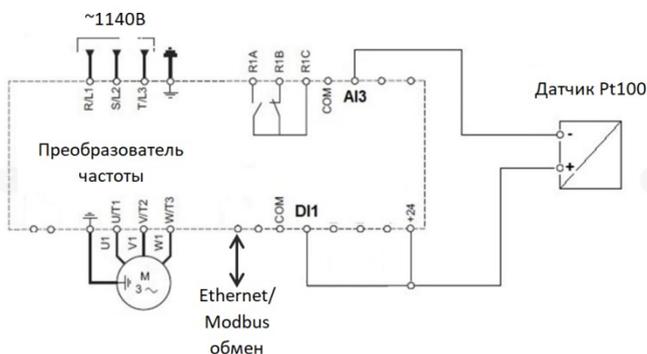


Рис.2 – Схема измерения температуры, обработки и передачи данных и сигналов управления с помощью датчиков-термосопротивлений Pt-100 и преобразователя частоты.

Это позволит фиксировать случаи перегревов электродвигателей сверх нормативного нагрева, накапливать данную информацию, автоматически анализировать ее и делать прогнозы по состоянию того или иного агрегата, тем самым предупреждая внезапные выходы его из строя или готовить ему своевременно.

#### Литература:

1. Пухов Ю. С. Рудничный транспорт 2-е издание, переработанное и дополненное, Москва, Недра1991. 255с.
2. Никиян, Н. Г. Эксплуатационная модель надежности асинхронных двигателей в условиях подземного рудника государственного университета. 2011. - N 4 (123), апрель.-С. 157-159
- 3.Классификация электродвигателей [Электронный ресурс].URL: <http://esm96.ru/article/klassifikatsiya-elektrodvigatelay>
- 4.Обслуживание электродвигателей. Контроль нагрева [Электронный ресурс].URL: <https://www.ess-ltd.ru/maintenance-repair/19/1014/>
5. Комплексный мониторинг технического состояния промышленных электродвигателей [Электронный ресурс].URL: <https://test-energy.ru/kompleksnyj-monitoring-tehnicheskogo-sostoyaniya-promyshlennyh-ehlektrodvigatelay/>

## ВОПРОСЫ СИНТЕЗА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЧЕТЫРЕХПОДВИЖНОГО МЕХАНИЗМА С ГРУППОЙ АССУРА ВТОРОГО КЛАССА, ЧЕТВЕРТОГО ВИДА

Г.Н. Чусовитин, Н.А. Чусовитин  
Новосибирский Государственный технический университет,  
г. Новосибирск

*Синтез механизма, в основу которого положена работа глазовращательных мышц человека, анализ мышечного корсета глаза человека и реализация его движений механическими приводами.*

*Synthesis of a mechanism based on the work of the human ocular muscles, analysis of the muscular corset of the human eye and the implementation of its movements by mechanical drives.*

Глазовращательные мышцы (ГВМ) помогают выполнять согласованное движение глазных яблок [1]. В движении глаза участвует шесть мышц, при этом четыре из них прямые, две косые. Именуются они так из-за особенностей хода в полости (орбите), где располагаются, а также из-за прикрепления к органу зрения. Глазные яблоки, благодаря данным волокнам, могут выполнять многочисленные передвижения, как однонаправленные, так и разнонаправленные (в механизме не реализованы). К однонаправленным относятся повороты вверх, вниз, влево и другие, а к разнонаправленным – сведение органов зрения в одну точку. Такие движения помогают слаженно работать тканям и представляют человеку одинаковое изображение, благодаря его попаданию на один и тот же участок сетчатки.

В работе использовались методы теории механизмов и машин (ТММ) [2,3,4], аналитической геометрии, математического анализа. Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставимостью результатов расчетов и физического моделирования пространственного рычажного механизма, в состав которого входит группа Ассура IV вида.

Требуется сконструировать механическое устройство, позволяющее реализовывать движения «глазных яблок» с отклонениями, соответствующими антропометрическим характеристикам среднестатистического человека: вверх  $\varphi=25^\circ$ , вниз  $\gamma=35^\circ$ , влево и вправо  $\alpha=60^\circ$  [1].

При синтезе механизма особое место уделено исключению интерференции звеньев, т.е. помимо обоснования размеров элементов, входящих в устройство, требуется определить их взаимное положение в

любой момент времени таким образом, чтобы они не препятствовали движению друг друга, и при этом их рабочие зоны занимали наименьший объем.

Данная проблема была решена, в том числе и приданием особой геометрии звеньям механизма (рис. 1).

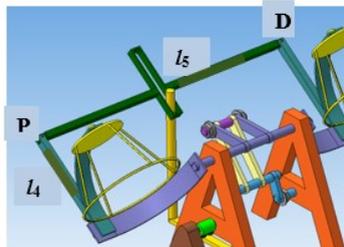


Рис.1 – Твёрдотельное моделирование механизма

Установлено, что для реализации чередований движений рабочего органа с подъема на опускание и наоборот потребуется ввести значительный участок коромысла  $l_4=K_2P$  (рис. 2а), если формировать опору, прообраз костного каркаса головы, трехзвенной фермой  $ADE$ , поскольку продольно расположенное звено  $l_5$ , связывающее вершины  $DP$  коромысел  $l_4$  (рис. 1) коснется левой стороны опоры  $AE$  и не позволит переместить «глаз» на угол  $\varphi$ .

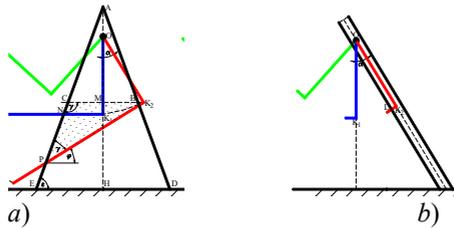


Рис. 2 – Каркас механизма

Рациональный вариант -*b*, когда опоры изначально имеют наклон, равный  $90-\varphi$ . В таком случае достаточно чтобы размер  $l_4$  был больше половины ширины звена  $OD$ , равной  $b=20$ мм, из которого изготовлена опора. Отметим, что окончательным условием при выборе размера коромысла  $l_4$  следует принять условие, исключающее касание звена с опорой при его повороте на угол  $\alpha$ .

Для реализации вертикальных «вверх-вниз» перемещений рабочего органа был выбран рычажный шарнирный четырехзвенный механизм, чья подвижность по формуле Чебышёва П.Л.

Полученные размеры звеньев удовлетворяют условию  $l_1+l_0 \leq l_2+l_3$  существования кривошипа  $l_1$  в плоскости YOX, известного как правило Грасгофа Ф. [2].

Структурная схема одноподвижного рычажного механизма, поворачивающая рабочий орган на угол  $\alpha$  вправо-влево, содержит пять звеньев и семь низших одноподвижных кинематических пар (рис. 3).

При вращении кривошипа длиной  $l_{10}$  с постоянной скоростью  $\omega_2$  вокруг  $O_3$ , ползун 7, перемещаясь по звену  $l_5$ , поворачивает коромысла  $l_4$  – звенья CD и LP равных размеров, на угол  $\alpha = \pm 50^\circ$ . Размер кривошипа должен удовлетворять условию  $l_{10} = l_4 \sin \alpha$  (рис. 3). А поскольку размер звена  $l_4$  принят равным 35мм исходя из конструктивных, ранее сформулированных соображений, то  $l_{10} \approx 26.8$  мм.

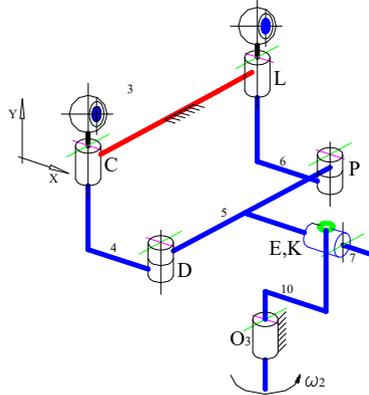


Рис. 3 – Привод горизонтальных перемещений

С учетом вертикальных перемещений звеньев пятизвенного механизма получена зависимость величины траекторного паза от размеров кривошипа  $l_{10}$ , расстояния от опоры  $l_{00}$  до центра вращения двигателя кривошипа  $l_{10}$ , плеча  $l_{44}$  и коромысла  $l_4$ . Данная зависимость определена путем составления размерных цепей, компоненты которых равны проекциям элементов механизма в особых положениях.

Итоговая величина траекторного паза равна сумме проекций элементов в положении глаза вниз и прямо (левая часть) и вверх и влево (правая часть).

Рассмотрим положение исполнительного органа «вверх и прямо», т.е.  $\varphi = 25^\circ$ ,  $\alpha = 0^\circ$  (рис. 4).



Рис.4 – Положения звеньев механизма

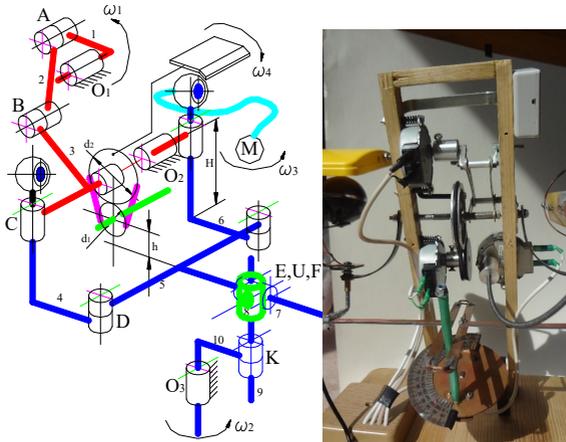


Рис.5. а – структурная, б – физическая модель механизма

При моделировании действия косых мышц была использована плетёная рубашка от «ручного» тормоза велосипеда. Она обладает достаточной упругостью, чтобы передать движение от четвёртого мотора через муфту блоку «лазерная указка-фонарик», закрепленного на одном из коромысел, например, LP (рис. 5).

Помимо самой очевидной области применения в системах видеонаблюдения, существует еще немало областей применения данного механизма.

1. Пространственный манипулятор;
2. Наглядное пособие для студентов медицинских вузов;

3. Система наведения стрелковых орудий;
4. Система крепления и наведения инструментов для астрономических наблюдений;
5. Добавленное веко может быть использовано в качестве защитной крышки, светофильтра, автоматической смены съёмных насадок и т.д.

Задачи были полностью реализованы - предложены аналоги 12 глазных мышц, представляющие собой два одноподвижных рычажных механизма, ременной и механизм с гибким валом.

Проведены:

- синтез схемы механизма с минимальным числом звеньев и одноподвижных кинематических пар;
- подбор взаимного расположения элементов механизма таким образом, чтобы они не препятствовали движению друг друга;
- сборка конструкции, занимающей наименьший объём в пространстве;
- обеспечено беспрепятственного движения элементов механизма.

Воссозданы максимальные отклонения от центрального направления в соответствии с антропометрическими отклонениями человеческого глаза.

Литература:

1. Анатомические поездки. Майерс Т.В, Скворцова Н.В., Зимин А.А. – М.: Изд-во: Меридиан-С.– 320 с.
2. Артоболевский, И. И. Механизмы в современной технике: Пособие для инж., конст. и изобретателей / И. И. Артоболевский // Рычажные механизмы. – М.: Наука, 1970. – Т. 1. – 608 с.
3. Анализ и синтез механизмов / Под ред. Н. И. Левитского: – М.: Машиностроение, 1969. – 312 с.
4. Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства / К. В. Фролов. – Волгоград: Политехник, 2003. – 120 с.

# ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

У. А. Шерматов

Ферганский политехнический институт

г. Фергана, salokhiddin.sharofov@bk.ru

Научный руководитель: Усмонов Ш. Ю., к.т.н., доцент

*Энергопотребление существующего технологического оборудования пищевых предприятий можно наблюдать в основном в электрических приборах электроприводов. Использование регуляторов скорости на предприятии показывает, что потребление энергии может быть снижено до 55%. Предложена концепция повышения производительности сложных динамических систем технологического оборудования с помощью интеллектуальных систем управления, принципы построения интеллектуальных автоматизированных систем управления технологическими процессами для объектов с повышенной интенсивностью труда. С помощью программы Matlab создана модель структурно-функциональных схем многодвигательных электрических систем, управляющих электроприводами обмоточных механизмов.*

*The energy consumption of the existing technological equipment in food establishments can be observed mainly in the electrical operations of the electrical equipment in them. Using variable speed controls in an enterprise shows that energy consumption can be reduced by up to 55%. The concept of improving the performance of complex dynamic systems of technological equipment with the help of intelligent control systems, the principles of building intelligent automated systems of technological process control for objects with increased work intensity were proposed. The structural and functional diagrams of multi-motor electrical systems controlling the winding mechanisms are modeled using Matlab software.*

Важным показателем энергосбережения является оптимальное управление динамическими объектами для минимизации энергопотребления в реальных условиях эксплуатации, т. е. при изменении параметров объекта, режимов работы, ограничений и конечного состояния задач. Рациональное использование электрических систем, входящих в состав управляемых электротехнических комплексов, обеспечивает энергосбережение, позволяет получить новые качества систем и объектов [1].

Асинхронные электродвигатели, применяемые на предприятиях пищевой промышленности на основе интеллектуальных систем электроуправления, в основном предназначены для управления по указанной выше модели. Исходя из этого, мы сможем оценить их в следующем порядке.



Рис. 1-Управление на основе интеллектуальных систем электропривода

Для анализа электроэнергетической системы предприятия пищевой промышленности и ее энергопотребления необходимо ознакомиться с их оборудованием. Для снабжения анализируемого предприятия электроэнергией использовался синхронный генератор мощностью 50 кВт (рис. 2).

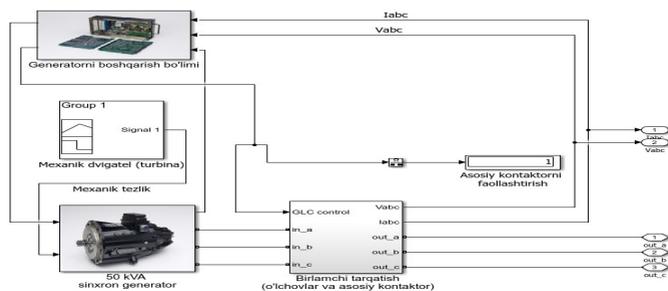


Рис. 2 - Модель электроснабжения производственного цеха предприятия пищевой промышленности

В этом случае внедряем систему управления генератором для повышения энергоэффективности. В этом случае мы можем получить следующие характеристики.

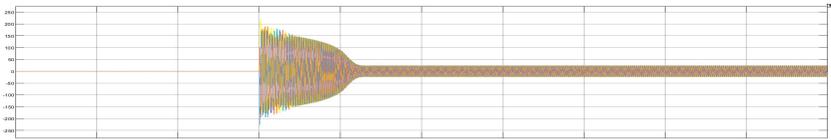


Рис. 3- График изменения тока Iab

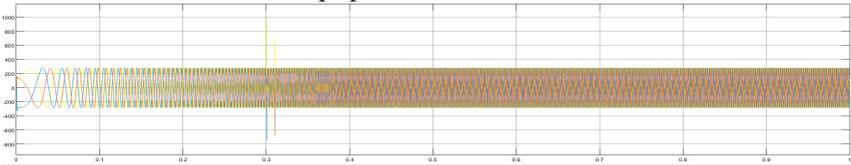


Рис. 4 - График изменения амплитуды питающего напряжения  
предприятия пищевой промышленности

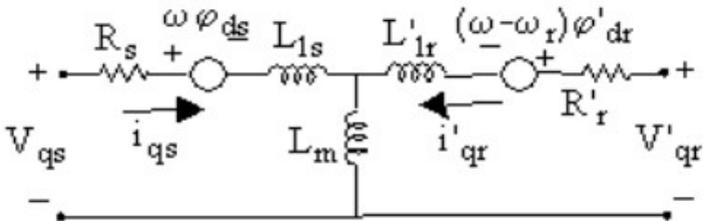


Рис. 5 - Схема подключения

Есть возможность контролировать его потребление в системе электроснабжения с учетом основной схемы подключения (рис. 5) и уравнений

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + d\varphi_{qs}/dt + \omega\varphi_{ds} \\
 V_{ds} &= R_s i_{ds} + d\varphi_{ds}/dt - \omega\varphi_{qs} \\
 V'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + d\varphi'_{qr}/dt + (\omega - \omega_r)\varphi'_{dr} \\
 V'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + d\varphi'_{dr}/dt + (\omega - \omega_r)\varphi'_{qr} \\
 T_s &= 1.5\varphi(\varphi_{qs}i_{qs} - \varphi_{ds}i_{ds})
 \end{aligned}$$

А в механической системе:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \omega_m &= \frac{1}{2H} (T_s - F\omega_m - T_m) \\
 \frac{d}{dt} \theta_m &= \omega_m
 \end{aligned}$$

Исходя из приведенных выше уравнений, можем увидеть следующую характеристику (рис. 6).

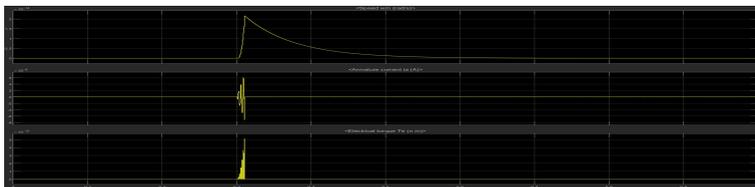


Рис. 6 - График, взятый из процесса запуска двигателя постоянного тока.

Можем определить механическую мощность в асинхронном двигателе с помощью модели, на основе которой основные величины можно увидеть на рис. 5.

Оптимальный процесс управления применяется к вышеуказанной модели и включает в себя следующее:

- минимизация чистого потребления;
- минимизация эксплуатационных расходов;
- максимизировать эффективность;
- максимальная безопасность;
- качество согласно заданному стандарту.

Использование высокоэффективных асинхронных двигателей вместо стандартных двигателей с электроприводом явно увеличивает первоначальную стоимость системы электропривода. Однако эти затраты можно компенсировать за счет снижения потерь и снижения эксплуатационных расходов [6]. Например, в двигателе мощностью 10 кВт получается увеличение КПД на 6%. Кроме того, системы управления электроснабжением могут влиять на экономические показатели предприятия в процессе потребления электроэнергии. В качестве решения этого вопроса появится возможность компенсировать потерянную энергию за счет улучшения системы управления электрическими машинами.

Литература:

1. @inproceedings {Ionel2010AdvancedCT, title = {Определение способов управления и параметров электрических машин переменного тока }, muallif = {M. Ionel va M. Stan va Ivanovici Traian va Oktavian-Marcel Ionel va E. Virjoghe va D. Enescu}, kitob sarlavhasi = {CI 2010}, yil = {2010}}
2. Benini, L., Bogliolo, A., & De Micheli, G. (2000). A survey of design techniques for system-level dynamic power management. *IEEE transactions on very large scale integration (VLSI) systems*, 8(3), 299-316.

3. Padma Priya, S.; Rai, S.K. Studies on the mechanical performance of PMMA toughened epoxy-silk and PC toughened epoxy-silk fabric composites. *J. Reinf. Plast. Compos.* **2006**, *25*, 33–41. [CrossRef]
4. Shudong Wang, Y.Z. Preparation of the silk fabric with ultraviolet protection and yellowing resistance using TiO<sub>2</sub>/La(III) composite nanoparticles. *Fibers Polym.* **2014**, *15*, 1129–1136. [CrossRef]
5. Wang, Q.; Wang, C.; Zhang, M.; Jian, M.; Zhang, Y. Feeding single-walled carbon nanotubes or graphene to silkworms for reinforced silk fibers. *Nano Lett.* **2016**, *16*, 6695–6700. [CrossRef] [PubMed]
6. Mukhhamadyusuf M., Sherzod P., Behzod A. Study of compensation of reactive power of short-circuited rotor of asynchronous motor //ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal. – 2020. – T. 10. – №. 5. – C. 625-628.
7. Yu U. S., Sulonov R. A. NONLINEAR FEEDBACK CONTROL IN INTELLIGENT AC MOTOR CONTROL //Advancing in research, practice and education. – 2022. – T. 9. – C. 188.
8. Sulonov R., Usmonov S., Kuchkarova D. INTEL-PFC-FD: Artificial Intelligence Approaches for Power Factor Correction and Multiple Fault Diagnosis in Three Phase Induction Motor //Journal of Optoelectronics Laser. – 2022. – T. 41. – №. 10. – C. 178-189.

# МЕДИЦИНСКИЕ ЭКЗОСКЕЛЕТЫ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ: ВЫБОР ТИПА ПРИВОДА И ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЭКЗОСКЕЛЕТА

**В.С. Щекотько**

**Новосибирский Государственный Технически Университет,  
г. Новосибирск, shekotko.vladislav@yandex.ru  
Научный руководитель: Котин Д.А., к.т.н., доцент**

*В существующей зарубежной и отечественной литературе, касающейся разработки и применения экзоскелетов, описано, что главными областями внедрения экзоскелетов служат реабилитационная медицина и военная промышленность, материалы разработок последних, либо кратко представлены для общего доступа, либо вовсе засекречены. Заметим, что использование экзоскелетов для больных, с ограниченным объёмом движений верхних и нижних конечностей, до сих пор затруднительно и не может применяться массово, так как существующие системы обладают высокой стоимостью, большой массой и индивидуальностью конструкции. Следовательно, сейчас актуальна задача разработки универсальных и недорогих экзоскелетов, которые позволят вернуть инвалидов к повседневной жизни.*

*In the existing foreign and domestic literature concerning the development and use of exoskeletons, it is described that the main areas of implementation of exoskeletons are rehabilitation medicine and the military industry, the materials of the latter's developments are either briefly presented for general access, or are completely classified. It should be noted that the use of exoskeletons for patients with limited movements of the upper and lower extremities is still difficult and cannot be used en masse, since existing systems have a high cost, large mass and individual design. Therefore, the task of developing universal and inexpensive exoskeletons that will allow people with disabilities to return to everyday life is now urgent.*

В настоящее время экзоскелет представляет собой сложную мехатронную (электромеханическую) систему. Механическая часть данного типа экзоскелета имеет вид ног человека и состоит из стержней, которые связаны между собой шарнирами. Привод включает в себя логическое устройство – для управления и двигателя – для движения. В экзоскелетах применяются электрический, гидравлический, пневматический и гибридный приводы [1].

Анализируя схемотехнические решения, можно определить главные требования, которые предъявляются к данным приводам:

- 1) высокая точность обработки сигнала;
- 2) быстроедействие, устойчивость и плавность движения;
- 3) достаточно высокий крутящий момент;

- 4) простота управления, компактность и надёжность;
- 5) низкий уровень шума.

Электропривод является самым распространённым типом привода, используемым во всех существующих экзоскелетах, так как он компактен, надежен, бесшумен и прост в управлении [2]. На данный момент в экзоскелетах применяются три типа электропривода, такие как:

1. электропривод, состоящий из высокоскоростного двигателя с низким крутящим моментом, например, бесколлекторный двигатель постоянного тока (БДПТ), и редуктора, который обладает большим передаточным отношением. Такая система имеет высокий вращающий момент, достаточную угловую скорость. Но в данной системе присутствует нежелательный эффект от высокого момента инерции и трения;

2. электропривод с упругими связями (упругих элементов ружинного типа) [3]. Электропривод с упругими связями имеет высокую массу, низкую пропускную способность управления и сложность системы, но при этом имеет высокую точность и устойчивость управления;

3. квазипрямой электропривод (quasi-direct drive), состоящий из двигателя с высоким крутящим моментом и редуктором, который имеет низкое передаточное отношение. Данный тип электропривода находится в экспериментальной фазе [4].

В работе рассматривается электропривод, состоящий из бесколлекторного двигателя постоянного тока и редуктора. Для того чтобы определить момент, мощность и скорость вращения вала пары БДПТ – редуктор необходимо знать нагружающие факторы: скорость, ускорение, нагрузку. Для вычисления указанных закономерностей требуется рассмотреть задачу кинематики поведения реального человека (коленного сустава). Данные для расчёта требуемых параметров системы взяты из экспериментальных данных, полученных в работе [5]. На Рис.1. представлена одна из таких функций, которая описывает зависимость приведённого момента коленного сустава во времени. В итоге пара редуктор – двигатель должны иметь характеристики не ниже следующих:

- 1) максимальный момент: 38,77 Н·м;
- 2) максимальная мощность: 52,46 Вт;
- 3) максимальная скорость: 7,05 рад/с (67,3 об/мин).

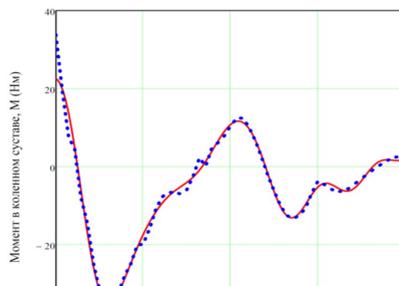


Рис.1 – Зависимость момента в коленном суставе от времени

Существует множество алгоритмов построения динамических моделей многосвязных электромеханических систем, которые опираются на уравнения Лагранжа, Ньютона, Аппеля, Кейна, Эйлера, Д’Аламбера, Гаусса.

Описание динамики движения экзоскелета (робота) было получено на основе системы дифференциальных уравнений Лагранжа, учеными Тертычный-Даури В.Ю., Lewis F.L., Chen W., Колубин С.А., которые решили прямую и обратную задачи построения динамической модели [6].

Наиболее часто применяются уравнения Лагранжа и Эйлера, представленных в виде кинематических матриц в однородных обобщенных координатах. Суть метода заключается в том, что существует механическая система, включающую  $k$  твердых тел и  $n$  звеньев со степенями свободы  $r = 6k - n$ . Положение системы определяется  $r$  обобщенными радиус – векторами  $q$ , каждого звена механической системы, образующих матрицу  $Q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$  [7].

В соответствии с работами выше упомянутых авторов, выражение для движения с учётом нелинейностей, можно записать как уравнение Лагранжа II рода:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_i} = M_i \quad (1)$$

где  $q, M_i \in R^n$  – вектора обобщенных координат и моментов, приведенных к выходу привода каждого звена электромеханической системы, соответственно;  $F$  – механическая диссипативная функция;  $K, P$  – кинетическая и потенциальная энергия звена, соответственно;  $L = K - P$  – функция Лагранжа.

Так как приводы каждого сустава механически связаны, то перемещение  $q$  является зависимой переменной, поэтому необходимо совместно решать системы уравнений, описывающие механическую и электрическую системы [8].

Полное математическое описание электропривода представляет собой систему уравнений, описывающие двигатель, редуктор и устройство управления. Исследуя полную динамическую модель экзоскелета необходимо также учитывать нелинейные элементы, такие как трение, упругость и др., которые влияют на быстродействие электропривода.

Рассматривается модель экзоскелета вместе с грудной частью, в которой зафиксирован корпус человека, два звена на каждой ноге, которые составляют бедро и голень, в итоге 5 элементов.

На основе вычисления описанных систем уравнений представим в общем виде математическую модель динамики движения экзоскелета:

$$A(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + C(q) + F(\dot{q}) + M_B = M_H \quad (2)$$

где  $M_H$  – вектор моментов, приведенных к выходу привода каждого звена электромеханической системы;  $M_B$  – вектор внешнего момента сопротивления (с учётом остаточного момента от конечностей);  $F$  – вектор, учитывающий момент вязкого трения и динамический момент трения;  $A$  – вектор моментов инерции;  $B$  – вектор центробежных и кориолисовых сил;  $C$  – вектор гравитационных сил.

Элементы данных матриц легко определяются на основе кинематического соотношения между звеньями.

Таким образом выбранная система электропривода для экзоскелета нижних конечностей, позволит сделать его надежным, бесшумным, компактным и простым в управлении. Метод Лагранжа второго рода стал основой для построения математической модели динамики движения пятизвенового экзоскелета нижних конечностей. Дальнейшим шагом будет построение и моделирование трёхконтурной системы управления электроприводами, на основе закона подчинённого регулирования.

#### Литература:

1. Zoss A., Kazerooni H. Design of an electrically actuated lower extremity exoskeleton // *Advanced Robotics*. – 2006. – Т. 20. – №. 9. – P. 967–988.
2. Kawamoto H., Kanbe S., Sankai Y. Power assist method for HAL-3 estimating operator's intention based on motion information // *The 12th IEEE*

International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2003, 02–02 nov. 2003: Proceedings. – Millbrae, 2003. – P. 67–72.

3. Чыонг Д.Д., Белов М.П. Оптимальное квадратичное управление электроприводами коленного сустава экзоскелета с упругими связями // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. Вып. 8-9. – С. 59–66.

4. Yu S. et al. Quasi-direct drive actuation for a lightweight hip exoskeleton with high backdrivability and high bandwidth // IEEE / ASME Transactions on Mechatronics. – 2020. – Vol. 25, N 4. – P. 1794–1802.

5. Труханов К.А. Анализ кинематики коленного модуля с гидравлическим исполнительным механизмом и сопоставление результатов расчета с поведением коленного сустава человека при ходьбе // Наука и Образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 11. – С. 52–71.

6. Колюбин С.А. Динамика робототехнических систем: учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 117 с.

7. Тертычный – Даури В.Ю. Динамика робототехнических систем: учебное пособие. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 128 с.

8. Юревич Е.И. Основы робототехники / Е.И. Юревич. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ–Петербург, 2007. – 416 с.

**Секция ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ  
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

**ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ОКИСЛЕНИЯ ФЕНОЛА В  
ВОДОКИСЛОРОДНОМ ФЛЮИДЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

**С.А. Алехин**

**Новосибирский государственный технический университет,  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
г. Новосибирск, alexin.2017@stud.nstu.ru  
Научный руководитель: Шишкин А.В., к.х.н., с.н.с., доцент**

*Исследованы особенности кинетики окисления фенола в водокислородных флюидах разного состава в реакторе периодического действия при его равномерном (1 °С/мин) нагреве до 600 °С. Определены частные порядки реакции окисления фенола в глобальном кинетическом уравнении. Установлено, что имеющиеся в литературе данные по кинетике окисления фенола не покрывают весь требуемый температурный диапазон, в котором происходят основные химические реакции.*

*Peculiarities of kinetics of phenol oxidation in water-oxygen fluids of various compositions in a batch reactor with its uniform (1 °C/min) heating to 600 °C have been studied. Partial orders of phenol oxidation reaction in the global kinetic equation have been determined. It has been found that the data available in the literature on the kinetics of phenol oxidation do not cover the entire required temperature range in which the main chemical reactions occur.*

Фенол (С<sub>6</sub>Н<sub>6</sub>О) относится к токсичным веществам (класс опасности 2), его предельно допустимая концентрация в воде составляет 0,001 мг/л [1]. Фенол и его производные являются наиболее распространенными загрязнителями сточных вод предприятий химической, целлюлозно-бумажной промышленности, агропромышленного и муниципального хозяйства [2]. Все эти факторы определяют необходимость изучения кинетики окисления фенола для его ресурсосберегающей электротехнологической утилизации.

Кинетике некаталитического водного окисления фенола посвящено значительное число работ (обзор на основные из них приведен в [3]), однако они различаются в зависимости от условий экспериментов: температуры, давления, концентрации реагирующих веществ, типа окислителя и других параметров. В связи с этим возникает задача установления применимости этих данных по отношению к проделанным опытам по окислению фенола в водокислородном флюиде

(в том числе с участием добавок  $N_2O$ ) в реакторе автоклавного типа при равномерном его нагреве до  $600\text{ }^\circ\text{C}$ .

Особенности проводимых экспериментов и используемое электротехнологическое оборудование описано ранее [4].

Для установления кинетических параметров были использованы данные, полученные по результатам опытов. В опытах изменяли содержание  $O_2$  в реакционной смеси (от стехиометрического количества до 25% избытка) и проводили замещение 5 и 10 % кислорода закисью азота.

Данные о количествах заправленных реагентов представлены в Таблице 1.

**Таблица 1 – Условия, проводимых экспериментов**

Опыт	Загружено						$\varphi$	$Q_{\max}$
	$C_6H_6O$	$O_2$	$N_2O$	$C_3H_8O$	$N_2$	$H_2O$		кДж
	ммоль							
1	9,996	69,96	–	–	–	$51\pm 2$	1,000	29,89
2	10,008	87,55	–	–	–	$51\pm 2$	0,800	29,93
3	9,816	65,46	6,90	–	–	$51\pm 2$	1,003	29,92
4	9,634	63,44	13,62	–	–	$51\pm 2$	0,963	29,81

В таблице обозначения:  $\varphi$  – коэффициент избытка топлива;  $Q_{\max}$  – максимальный тепловой эффект при полном окислении фенола в газовой фазе.

В условиях данной работы все выводы об особенностях кинетики окисления фенола были получены на основе измерений временных зависимостей внутренней Pt-Rh/Pt термопары  $T_{in}$ , внешней управляющей термопары  $T_{out}$  и их разницы  $\Delta T = T_{in} - T_{out}$  (Рисунок 1), а также с учетом масс-спектрометрических измерений количества  $CO_2$  после опытов (Таблица 2).

**Таблица 2 – Состав полученных по результатам опытов смесей**

Опыт	$[C]_0$ , ммоль	$[CO_2]$ , ммоль	$\alpha$ , %	Степень превращения	
				$O_2$ , %	$N_2O$ , %
1	60,0	52,4	87,3	87,3	–
2	60,1	57,3	95,5	76,4	–
3	58,9	54,4	92,4	92,7	80,7
4	57,8	54,9	95,0	93,7	68,0

В таблице обозначения:  $[C]_0$  – количество углерода в исходном топливе;  $[CO_2]$  – количество  $CO_2$ , образовавшегося при горении топлива.

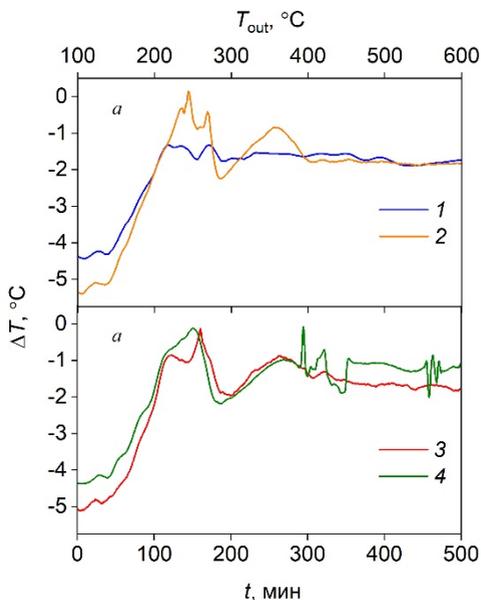


Рис. 1 – Графики зависимостей разницы температур внутренней и внешней термопар от времени и температуры управляющей термопары. Номера кривых соответствуют номерам опытов в табл. 1

Глобальное кинетическое уравнение для опытов 1-4 имеет вид:

$$-\frac{d[Ph]}{dt} = k \cdot [Ph]^a \cdot [O_2]^b \cdot [N_2O]^c \cdot [H_2O]^d.$$

где  $k$  – константа скорости химической реакции;  $[Ph]$ ,  $[O_2]$ ,  $[N_2O]$ ,  $[H_2O]$  – концентрация фенола, кислорода, закиси азота и воды соответственно;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – частные порядки реакции по фенолу, кислороду, закиси азота и воде соответственно ( $c = 0$  для опытов 1, 2).

По результатам масс-спектрометрического анализа была определена степень выгорания углерода  $\alpha$ , равная доле фенола, окисленного до  $CO_2$ . На основе отношений степеней выгорания в разных экспериментах было установлено, что частный порядок реакции по кислороду  $b = 0,4$  (что близко к значению 0,5 полученному в [5], учитывая различия в условиях проводимых опытов), а по закиси азота  $c = 0,1$ . Важно, что добавление  $N_2O$  приводит к интенсификации объёмного горения

фенола, особенно при температурах  $>400$  °С, дожигая его остатки и образовавшиеся ранее интермедиаты.

Также по данным из открытых источников был проведен расчет скорости реакции окисления фенола при известных в начальный момент концентрациях реагентов (Рисунок 2). Исходя из результатов вычислений можно утверждать, что находящиеся в открытом доступе данные о кинетике водного некаталитического окисления фенола не предоставляют исчерпывающих сведений и зависят от многих параметров, таких как:

- концентрация, температура и давление в системе;
- тип реактора (проточный или периодического действия);
- объем и форма реактора;
- тип окислителя.

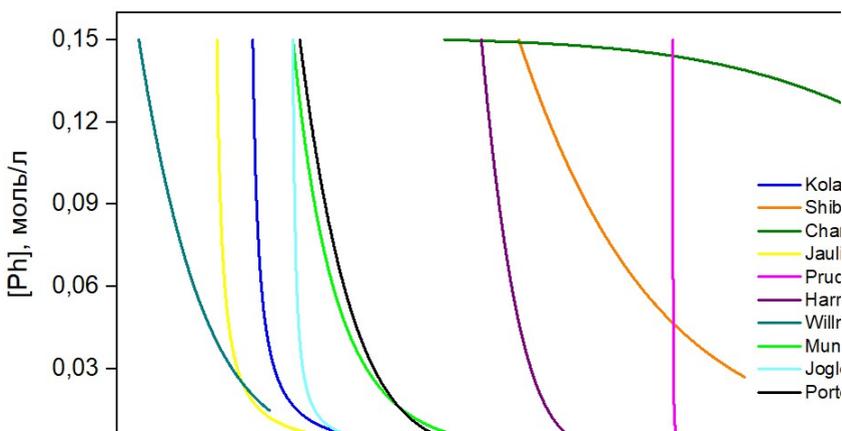


Рис. 2 – Графики зависимостей концентрации фенола от температуры внутренней термопары

Таким образом, по результатам проделанной работы были исследованы особенности кинетики окисления фенола в водокислородных флюидах разного состава. Определены и сопоставлены с источниками частные порядки реакции окисления фенола. Из полученных данных можно утверждать о необходимости проведения дальнейших исследований кинетики окисления фенола для создания экологически чистых и ресурсосберегающих электротехнологических установок по его удалению из окружающей среды.

Литература:

1. Вигдорович В.И., Пудовкина А.Ю. Экологическая характеристика фенола, его миграция и очистка сточных вод, содержащих оксибензол // Университет им. В.И. Вернадского. – 2011. – №2. – С. 45-51.
2. Anku W.W., Mamo M.A., Govender P.P. Phenolic Compounds in Water: Sources, Reactivity, Toxicity and Treatment Methods. In Phenolic Compounds - Natural Sources, Importance and Applications. – London: IntechOpen, 2017.
3. Portela J.R., Nebot E., de la Ossa E.M. Kinetic comparison between subcritical and supercritical water oxidation of phenol. Chem. Eng. J. – 2001. – Vol. 81. – P. 287-299.
4. Алехин С. А. Горение фенола в водокислородном флюиде // МНСК-2022: Материалы 60-й междунар. науч. студ. конф. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2022. – С. 107.
5. Thornton T.D., Savage P.E. Kinetics of phenol oxidation in supercritical water // AIChE Journal. – 1992. – Vol. 38. – No. 3. – P. 321-327.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГИБРИДНОГО ТРАНСПОРТА

**С.А. Внуков**

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, abakan.1998@mail.ru

Научный руководитель: Щуров Н.И., д. т. н., профессор

*Обзор и анализ накопителей энергии силовой гибридной энергоустановки для электробуса выполняется в связи с технико-экономическими показателями: энергия, КПД, рабочая температура, ёмкость, количество циклов заряда/разряда, срок службы, а также стоимость установки и обслуживания.*

*The review and analysis of the energy accumulators of the hybrid power plant for the electric bus is carried out in connection with the technical and economic indicators: energy, efficiency, operating temperature, capacity, the number of charge/discharge cycles, service life, as well as the cost of installation and maintenance.*

В таблице 1 сравниваются различные накопители, предназначенные для городского автобуса с гибридным приводом (массой 18 т). Как видно из таблицы, по технико-экономическим показателям электрохимические конденсаторы (ЭК) выглядят предпочтительней аккумуляторов. ЭК характеризуются самым высоким ресурсом и сроком службы, наименьшей массой, более широким диапазоном рабочих температур и не требуют обслуживания [1].

**Таблица 1 – Сравнение накопителей, предназначенных для городского автобуса с гибридным приводом**

Тип накопителя	Требования	Кислотный	Щелочной	Литий-ионный	ЭК
Запасаемая энергия с учётом КПД накопителя (0,9), кВт · ч*					
Запасаемая энергия (с глубиной работы аккумуляторов 5 %), кВт · ч	–		20		1,0

Масса с системой охлаждения, кг	<500	760...1500	400...1600	300...500	<b>300...600</b>
Рабочая температура, °С	–	-30...45	-40...60	-20...60	<b>-50...70</b>
Ресурс, млн. цикл.	>1	<0,1	<0,3	<0,15	<b>&gt;1</b>
Срок службы, лет	10...12	<1	<3	<2	<b>&gt;10</b>
Способ определения заряда и остаточной ёмкости	–	Ориентировочный, требуется специальное оборудование			<b>По напряжению</b>
Стоимость комплекта, тыс. руб.	–	24...96	240...720	480...1200	<b>240...480</b>
Количество комплектов за срок службы 10 лет	–	>10	>3	>5	<b>1</b>
Стоимость обслуживания, тыс. руб.	–	24...96**	48...144**	–	–
Общая стоимость, млн. руб.	–	0,5-1,9	0,9-2,6	2,4-6,0	<b>0,3-0,5</b>

\*Запас энергии, необходимый для выполнения разгона городского автобуса массой 18 т.

Расчётная энергия, необходимая для разгона автобуса массой 18 т до скорости  $V = 60 \text{ км/ч}$ , рассчитывается по формуле (1):

$$E_m = (m \cdot V^2) / 2 = (18000 \cdot (60 / 3,6)^2) / 2 = 2,5 \text{ МДж}. \quad (1)$$

Учитывая потери при трении и сопротивлении воздуха, в электродвигателе, в механических передачах через  $K_{И} = 0,75$ , получаем энергию разгона по формуле (2) [2]:

$$E_p = E_m / K_{И} = 2,5 / 0,75 = 3,33 \text{ МДж} = 926 \text{ Вт} \cdot \text{ч}, \quad (2)$$

где  $1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Дж}$ .

Принимая КПД накопителя 0,9 (90 %), получаем 1 кВт · ч.

\*\*Как показывает практика, стоимость обслуживания свинцовых аккумуляторных батарей примерно равна их продажной стоимости, а стоимость обслуживания щелочных батарей составляет 20 % продажной стоимости [3].

Стоимость аккумуляторов любого типа (особенно Li-Ion-батарей), используемых в течение всего периода эксплуатации автобуса, существенно превышает стоимость ЭК.

Исходя из расчётов, представленных выше, построена зависимость энергии для разгона автобуса от диапазона скоростей (рис. 1).

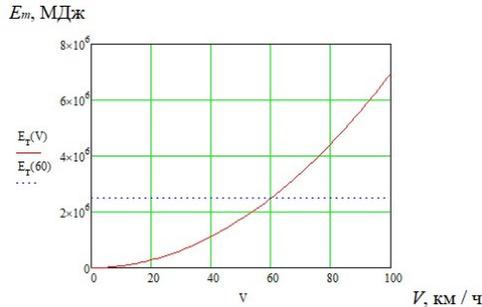


Рис. 1 – Зависимость  $E_m (V)$

Вывод: свинцово-кислотные аккумуляторы, несмотря на низкую стоимость, имеют неприемлемо малый ресурс и требуют серьёзного обслуживания, что приводит к большой суммарной стоимости накопителя. У кислотных аккумуляторных батарей (АБ) есть и ряд других недостатков – низкая надёжность (характерное влияние «внезапный отказ»), большая масса и объём (дополнительный неоправданный расход топлива), ненадёжная работа при отрицательных температурах, плохо воспринимаемый заряд, низкий КПД в цикле «заряд/разряд». Дополнительным недостатком является наличие ядовитых свинца и кадмия, которые используются в кислотных и некоторых щелочных аккумуляторах.

#### Литература:

1. Внуков С. А. Накопители энергии для гибридного транспорта [Электронный ресурс] / С. А. Внуков, В. В. Бирюков // Эффективные системы управления фундаментальными и поисковыми научными исследованиями : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 22 февр. 2021 г. – Кемерово : ЗапСибНЦ, 2021. – С. 104-106.

2. Щуров Н. И. Теория электрической тяги : учебное пособие. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 100 с.

3. Экономичный экологичный гибридный городской автобус [Электронный ресурс]. URL: <https://russianelectronics.ru/ekonomichnyj-ekologichnyj-gibridnyj-gorodskoj-avtobus/> (Дата обращения 10.10.2022).

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

**А.И.Жданова**

**Новосибирский государственный технический университет,**

**г. Новосибирск, mrvzsshk@gmail.com**

**Научный руководитель: Бирюков В.В., к.т.н., доцент**

*Приведён один из вариантов проектирования автономного электротранспортного средства – трамвая. Предложен способ для снижения его энергопотребления с помощью бортового накопителя энергии и представлен вариант размещения накопителей энергии на подвижном составе.*

*One of the options for designing an autonomous electric vehicle - a tram is given. A method is proposed for reducing its energy consumption using an onboard energy storage device and a variant of placing energy storage devices on a rolling stock is presented.*

Зарубежный опыт транспортного планирования демонстрирует потенциал развития трамвайных путей. В Венгрии трамвайные линии являются одними из самых загруженных в мире. Можно даже сказать, что трамваями пользуется большее количество пассажиров, чем метро. Трамваи курсируют по Будапешту с 04:20 до 00:20, интервалы движения не превышают 10 минут. Пути обособлены от автомобилистов. Платформы остановочных пунктов приподняты с целью облегчения пассажирам посадки и высадки. На маршрутах используются низкопольные трамваи с пониженным уровнем шума от работающего привода с шарнирно сочленёнными кузовами длиной 54 метра. Именно поэтому данный транспорт способен перевозить до 20 000 пассажиров в час.

Применение трамваев способствует успешному решению проблемы транспортной доступности центра из новых районов на окраинах города без ухудшения экологии. Развитие трамвайной сети города обходится существенно дешевле строительства линий метрополитена, что высвобождает средства на модернизацию и ремонт уже существующих.

Одной из актуальных задач на сегодняшний день для повышения энергоэффективности подвижного состава трамвая является использование энергии рекуперативного торможения, что однозначно предполагает применение накопителей энергии [1,2]. Расчёты показывают, что оптимальным вариантом является размещение его непосредственно на трамвае, т. е. использовать его в качестве бортового источника. Это решение позволяет использовать трамвай уже в качестве

автономного транспортного средства на не электрифицированных участках путей, что расширило возможности его применения в городе.

Размещение бортового накопителя энергии предполагает решение следующих вопросов:

- определение величины его ёмкости;
- определение типа накопителя, его компоновки;
- размещение накопителя на подвижном составе с учётом сохранения балансировки и развески;
- доработку принципиальной электрической схемы силовых цепей.

На величину ёмкости бортового накопителя энергии влияют следующие факторы: максимальный запас хода, протяжённость перегона, расположение путей (на обособленном полотне или в общем потоке транспортных средств) и т.д.

В качестве прототипа для создания автономного транспортного средства выбран шарнирно сочленённый трамвай большой вместимости. Основные технические характеристики трамвая приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Технические характеристики**

№ п/п	Наименование показателей	Характеристики
1	Направление движения	Одностороннее
2	Количество секций кузова	4
3	Длина трамвайного вагона (по кузову)	29690 мм
4	Собственный вес ПС	52,8 т
5	Полный вес ПС	73,9 т
6	Пассажировместимость	Не менее 300, при номинальной пассажировместимости 5 чел/м <sup>2</sup> ;
7	Площадь низкого пола	Не менее 80 %
8	Количество мест для сидения	78
9	Количество тележек	4
10	Тип тележек	Неповоротные
11	Амортизаторы на тележках	Гидравлические
12	Двигатели	Асинхронные
13	Тип преобразователя	На базе IGBT - транзисторов

### Расчёт параметров бортового накопителя энергии

При определении величины ёмкости бортового накопителя энергии приняты два варианта исходных данных:

- максимальный запас хода: а) 3км; б) 20км.
- протяжённость перегона без контактной сети – 0,5км.

Удельный расход энергии на движение ПС весом  $G$  на перегоне длиной  $L$  с заданным профилем рассчитывается аналитически следующим выражением [3]:

$$A_{y0} = 2,725 \left\{ \frac{\omega_{cp} + i_3}{\eta_{cp}} + \frac{3,86 \cdot V_m^2}{10^5 \cdot \eta_{cp} \cdot L} \cdot \left[ \frac{100(1+\gamma)}{9,81} - \frac{\omega_{cp} + i_m}{a_m} \right] + \left[ \frac{100(1+\gamma)}{9,81} + \frac{\omega_{cp} + i_n}{a_n} \right] \cdot \frac{3,86 \cdot K_n \cdot V_n^2}{10^5 \cdot L} \right\}, \quad (1)$$

где  $\omega_{cp} = 7H / \kappa H$  – среднее значение основного сопротивления движению;  $\eta_{cp} = 0,84$  – среднее значение КПД тягового двигателя;  $i_3 = 3$  – эквивалентный по расходу энергии уклон.

Коэффициент пуска определяется схемой переключения двигателей при пуске и равен 1-0,95 при импульсной системе управления. Таким образом, удельный расход энергии на движение ПС в режиме пуска:

$$A_{y0} = 2,725 \cdot \left\{ \frac{7+3}{0,84} + \frac{3,86 \cdot 60^2}{10^5 \cdot 0,84 \cdot 0,5} \cdot \left[ \frac{1000 \cdot 1,15}{9,81} - \frac{7+3}{1,5} \right] + \left[ \frac{1000 \cdot 1,15}{9,81} + \frac{7+3}{1,5} \right] \cdot \frac{3,86 \cdot (1-0,95) \cdot 20^2}{10^5 \cdot 0,5} \right\} = 133 \frac{Bm \cdot ч}{т \cdot км}.$$

При полной массе 73,9 т расход энергии составит:

$$\text{– для варианта а) } A_{y0} = A_{y0} \cdot G \cdot L = 133 \cdot 73,9 \cdot 3 = 29486 \text{ Bm} \cdot \text{ч}; \quad (2)$$

$$\text{– для варианта б) } A_{y0} = A_{y0} \cdot G \cdot L = 133 \cdot 73,9 \cdot 20 = 196573 \text{ Bm} \cdot \text{ч}. \quad (3)$$

При номинальном уровне напряжения на двигателе в 380 В, необходимая ёмкость аккумулятора составит  $29486 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / 380 \text{ В} = 77,6 \text{ А} \cdot \text{ч}$  для варианта а) и  $517 \text{ А} \cdot \text{ч}$  – для варианта б).

Удовлетворить требуемым параметрам тяговой батареи могут литий-ионные аккумуляторы модели LT-LFP 65 [4], приведённые на рис. 2. Согласно техническим характеристикам, номинальное напряжение одного элемента составляет 3,2 В, таким образом потребуется батарея:

- для варианта а) из 119 аккумуляторов, общая масса составит 214кг;
- для варианта б) из 8 параллельных ветвей, содержащих по 119 элементов в каждой, то есть всего 952 шт, при общей массе 1716 кг.



Рис. 2 – Внешний вид аккумулятора LT-LFP 65

При проработке конструктивного исполнения и размещения накопителя энергии предложен вариант размещения блоков накопителя в пространстве под полом.

Массе накопителя в 214 кг не является критичной для несущей способности вагона, поэтому накопитель можно разместить в пространстве под полом вместе с другим электрическим оборудованием.

При массе накопителя в 1713 кг, необходимо распределить аккумуляторы по возможности равномерно, разделив всю батарею на параллельные ветви. Данное решение исключит концентрацию массы в одной точке и позволит сохранить конструкцию кузова.

Анализируя полученные значения, можно сделать вывод, что вариант автономного трамвая с подзарядкой на конечных станциях является более целесообразным, так не требуется постройки сети зарядных устройств на остановочных пунктах.

#### Литература:

1. Бирюков В. В. Автономный электрический транспорт: учебник / В.В. Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 302 с: ил. (Серия «Учебники НГТУ»).

2. Тяговый электрический привод: учебное пособие / В. В. Бирюков, Е. Г. Порсев – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. - 314 с.

3. Бирюков В.В. Основы электрической тяги: учебник / В. В. Бирюков, Н. И. Щуров, А. А. Штанг. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. – 332 с. – (Учебники НГТУ).

4. Лиотех [Электронный ресурс]. URL: <https://www.liotech.ru/products/akkumulyatory/akkumulyatory-vtorogo-pokoleniya/> (Дата обращения 10.10.2022)

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ В ШЛАКОВОЙ ВАННЕ ФЕРРОСПЛАВНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ПЕРЕПЛАВА ОТСЕВОВ ФЕРРОХРОМА**

**В.Д. Кочкин, А.И. Алиферов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, kochkin.viktor1113@gmail.com**

**Научный руководитель: Алиферов А.И., д.т.н., профессор**

*Данная работа посвящена определению выделения энергии в ванне рудотермической печи, работающей в режиме шлакового переплава, для переплава отсевов феррохрома при разных параметрах посадки электродов в шлак и диаметрах их распада.*

*This work is devoted to the determination of energy release in the bath of an ore-thermal furnace operating in the slag remelting mode for remelting ferrochrome screenings at different parameters of electrode insertion into the slag and their decay diameters.*

Ферросплавы получают в восстановительных печах. После получения слитков ферросплавов, его необходимо подготовить к дальнейшей продаже на рынке. Слитки ферросплава проходят дробление и грохочения, с целью получения кусковой фракции размером от 10 до 250 миллиметров. Такой размер фракции определен технологическим процессом получения сталей. При дроблении ферросилиция образуется до 20% мелких и пылевидных фракции от общего количества ферросплава[1]. Большую часть данных отходов составляет пыль[2], что можно увидеть на рисунке 1 на примере ферросиликомарганца и ферромарганца.

Из-за сложности реализации его добавки как раскислителя в рабочее пространство ванны, цена продажи отсевов составляет лишь долю от основной фракции, а большая часть объемов не продается вовсе.

Переplав отсевов по такой же технологии, как происходит производство ферросплавов в рудовосстановительной печи, не представляется возможным. Это связано с нарушением технологического процесса, нарушения электрических режимов и вследствие чего происходит запекания колошника, нарушается его газопроницаемость [3]. Переplав отсевов в индукционных печах имеет трудности с проводимостью твердой шихты. Для получения хороших технико-коммерческих показателей необходима питающая установка повышенной частоты[4].

В данной работе была исследована руднотермическая печь для переплава мелочи высокоуглеродистого феррохрома в режиме шлакового переплава. Данный режим выбран по причине полного отсутствия дугового разряда в ванне печи, а выделение тепла происходит за счет протекания тока по объему шлака.

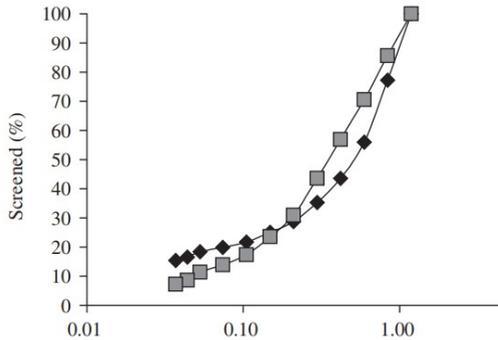


Рис. 1 - Размер частиц и процентное соотношение для отсевов фракцией менее 10 мм

Отсутствие дуги дает следующие преимущества по сравнению с дуговым режимом: 1) Снижение угара мелкодисперсных отходов. 2) Снижается газообразования и следственно улет пыли. 3) Более равномерное распределение тепла по объему ванны печи. 4) Отсутствие скачков тока. 5) Снижение шума и условий работы персонала.

Принимая то, что было описано выше, была построена расчетная модель электромагнитных процессов в программной среде Ansys для трехфазной печи. По необходимым параметрам был выбран шлак. Состав шлака показан в таблице 1.

**Таблица 1 – Состав шлака**

SiO <sub>2</sub> ,%	MgO,%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,%	CaO,%
30,5	26	26	17,5

Данные состав шлака подобран по нескольким причинам: Температура ликвидуса ниже температуры ликвидуса переплавляемого ферросплава и составляет 1350<sup>0</sup>C. Отсевы ферросплавов являются уже конечным продуктом, то восстанавливать их нет необходимости. Шлак является многоразовым и нет нужды в его сливе после каждой плавки. Только изредка придется восстанавливать состав шлака, за счет редких реакций и его улета.

В таблице 2 показаны электротехнические свойства материалов в ванне печи. Расчет электромагнитной задачи происходит в рабочем режиме печи при температуре 1650-1700 °С. Температура ликвидуса феррохрома составляет 1500 °С. Пуск печи происходит в дуговом режиме на стальную затравку и доведение ее до температуры плавления. После этого наводится шлак и добавляется шихта.

**Таблица 2 – Электрофизические данные**

Материал	Удельное электрическое сопротивление, Ом*м	Относительная магнитная проницаемость
Самоспекающиеся электроды	$8 \cdot 10^{-6}$	1
Шлак	$1.21 \cdot 10^{-2}$	1
ФХН900Б	$1.31 \cdot 10^{-8}$	1
Воздух	$1.0 \cdot 10^{30}$	1

Диаметр электродов составил 1050 мм, протекающий ток 56,5 кА. Высота ванны шлака составляет 900 мм, а высота ванны металла 70 мм. Расчеты проводились при различной посадке электродов в шлак, от 630 до 330 мм. Разницу в выделение энергии можно увидеть на рисунках 2,3.

Уменьшение глубины посадки электродов приводит к смещению области выделения энергии и ее плотность вблизи расплава металла.

Плотность тока увеличивается на поверхности ванны шлакового расплава и около электродов, а плотность тока в металлической ванне смещается в центральную часть, что указывает на изменение контуров протекания тока.

Помимо изменений глубины посадки электродов, изменялся и диаметр распада электродов. В расчетах принимались следующие значения диаметров распада электродов: от 2500 до 3100 мм с шагом 200 мм. Полученные данные приведены на рисунке 6.

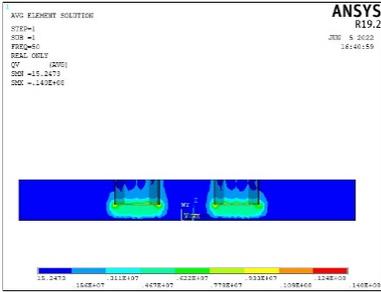


Рис. 2 - среднее выделение мощности под электродами при глубине 630 мм

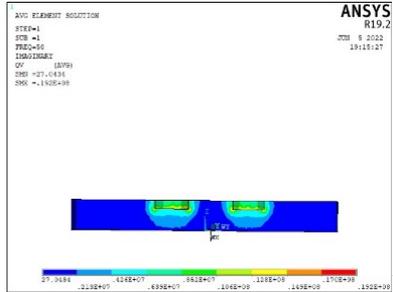


Рис. 3 - среднее выделение мощности под электродами при глубине 330 мм

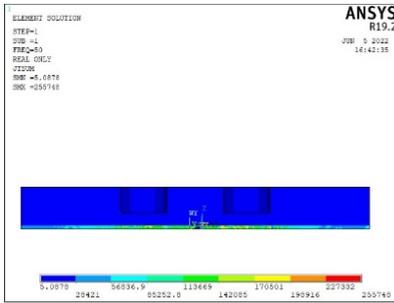


Рис. 4 - Плотность тока в ванне при глубине 630 мм

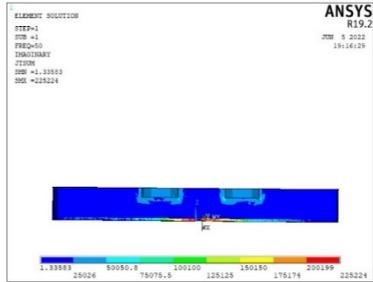


Рис. 5 - Плотность тока в ванне при глубине 330 мм

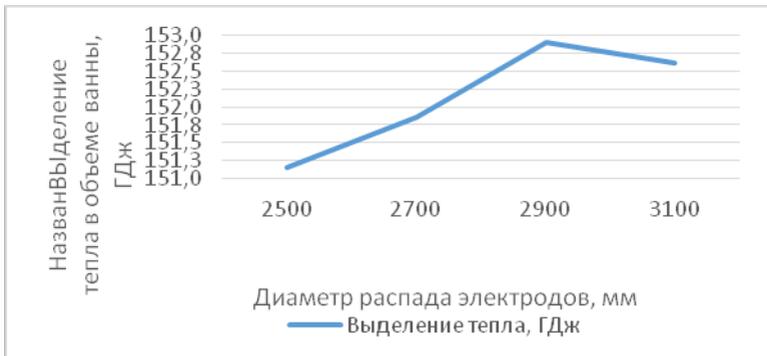


Рис. 6 - Выделение мощности в ванне в зависимости от диаметра распада электродов при глубине посадки электрода 630 мм

Изменения протекания контуров тока могут привести к тому, что колошник будет перегретым, а нижняя часть ванны, наоборот, будет остывать. Перегрев колошника приведет к угару шлака и шихты, попадающей на ее поверхность, а захолаживание подины нарушит технологический процесс, вплоть до застывания расплава металла, что может привести к аварийной остановки печи. Дальнейшие суждения можно будет привести после расчета тепловой задачи, используя данные полученные в решение электромагнитной задачи.

Литература:

1. M.V. Cherednichenko, S.P. Zuev (2019). Ferroalloy industry waste processing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 560 (2019) 012134
2. G. Lucio de Faria, F. Gabriel da Silva Araujo, C. Batista Vieira, F. Leopoldo von Kruger, N. Jannotti Jr. (2008). Characterization of Manganese Alloy Residues for the Recycling of FeSiMn and High-Carbon FeMn fines. *Materials Research*, Vol. 11, No. 4, pp. 405-408
3. V.S. Kutsin, V.I. Olshansky, I.Yu. Filippov, A.A. Chumakov, V.G. Ganotsky (2015). The development and introduction of resource saving technology of non-standard manganese ferroalloy fines recycling. *Infacon XIV: Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry* (Kiev, Ukraine, May 31- Kine 4, 2015). pp. 745-749
4. W.Schmitz, D. Trauzeddel (2013). Latest Developments in Recycling Production Residues Employing Coreless Induction Furnaces. *European Metallurgical Conference* (Weimer, Germany, June 23-26 2013). pp. 807-820.

# ОСНОВЫ ИНДУКЦИОННОГО ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАГРЕВА АЛЮМИНИЯ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**А.Д. Лапин, И.А. Смольянов**  
**Уральский Федеральный университет,**  
**г. Екатеринбург, [andrei.lapin@urfu.ru](mailto:andrei.lapin@urfu.ru)**  
**Научный руководитель: Смольянов И.А., к.т.н., доцент**

*Термическая обработка алюминия и алюминиевых сплавов нашла широкое применение в современной промышленности. Алюминиевая продукция применяется в военно-промышленном комплексе, авиастроении, машиностроении и судостроении. Наиболее распространенный способ термической обработки алюминия – это индукционный нагрев, производящийся в индукционных электротехнологических печах. В статье приведены основные проблемы, возникающие при индукционном нагреве алюминия, а также способы их решения.*

*Heat treatment of aluminum and aluminum alloys has found wide application in modern industry. Aluminum products are used in the military-industrial complex, aircraft industry, mechanical engineering, and shipbuilding. The most common method of heat treatment of aluminum is induction heating, which is carried out in induction electro-technological furnaces. The article presents the main problems that arise during induction heating of aluminum, as well as ways to solve them.*

## Введение

На сегодняшний день наиболее широко распространены три метода термообработки алюминия и его сплавов: отжиг, закалка и старение. Для осуществления вышеперечисленных способов обработки алюминиевых заготовок применяются электрические печи сопротивления (ЭПС), а также индукционные печи. Однако более эффективными являются именно индукционные установки. Такой тип нагревательных установок в сравнении с ЭПС имеет преимущество в производительности, весогабаритных показателях, а также в энергопотреблении.

## Физические основы индукционного нагрева

Под индукционным нагревом понимают нагрев тел в электромагнитном поле за счет теплового действия электрического тока, протекающего по нагреваемому телу и возбуждаемого в нем посредством явления электромагнитной индукции. Под индукционной установкой понимают совокупность устройств для осуществления индукционного электротермического процесса: источники питания, устройства автоматики и управления, токоподводы, камеру для

термообработки и механизмы для перемещения нагреваемых элементов [1].

Для индукционной термообработки алюминия применяются нагревательные установки сквозного нагрева, а также плавильные индукционные каналные печи. Индукционные установки для сквозного нагрева обеспечивают термообработку алюминиевых заготовок по всему поперечному сечению. В таких установках нагрев заготовок до необходимой температуры осуществляется непрерывно, по мере их продвижения по индуктору с шагом, равным длине заготовки. Когда крайняя заготовка нагревается до заданной температуры, она выталкивается из установки, а в этот же момент в противоположный конец индуктора помещается новая – холодная заготовка. Вышеописанный тип индукционной печи представлен на рисунке 1. Индукционная плавильная каналная печь применяется как для плавки, так и для перегрева и выдержки алюминия и алюминиевых сплавов. Такие установки позволяют осуществить термообработку большого количества заготовок за один цикл [1,2].



Рис.1 – Индукционная печь для сквозного нагрева

В индукционных установках токоподводы и витки, как правило, выполнены из проводников с относительно большой площадью сечения. При этом, как правило, по индуктору протекают токи средней либо высокой частоты. В совокупности эти обстоятельства способствуют появлению ряда эффектов при индукционном нагреве:

1) Возникновение вихревых токов в сплошных проводниках посредством явления электромагнитной индукции. Вихревые токи создают потери, приводящие к повышенному нагреву проводников;

2) Поверхностный эффект в проводниках (скин-эффект) – явление неравномерного распределения величины переменного тока по сечению проводника. При таком эффекте плотность тока вдоль постоянно увеличивается по мере приближения к краю проводника;

3) Эффект близости между проводниками – изменение магнитного поля и токораспределения проводника при приближении к нему другого проводника. Особенно важно учитывать данный эффект при проектировании высокочастотных токоподводов;

4) Катушечный (кольцевой) эффект – частный случай поверхностного эффекта. Возникает в проводниках, представляющих из себя форму кольца. В таких проводниках плотность переменного тока относительно сечения кольца будет неравномерна. С внутренней стороны проводника плотность тока выше, чем с внешней;

5) Эффект паза – вытеснение тока в проводнике, расположенном в пазу магнитопровода. Плотность тока проводника, прилегающего ко дну паза, будет существенно меньше по сравнению с плотностью тока в зоне открытого конца паза [1,3].

Каждый из вышеперечисленных эффектов вызывает неоднородность плотности тока и неравномерность распределения магнитного поля по заготовке. Основная проблема при нагреве алюминия и алюминиевых сплавов – это неравномерность нагрева, как по продольному, так и поперечному сечению заготовок. Высокий температурный градиент способен вызвать в заготовке остаточные напряжения, что приводит к трещинам, разрушениям, повышенной деформации деталей [4,5].

#### Способы повышения эффективности нагрева

Для минимизации температурного перепада по сечению заготовки применяются следующие решения:

- изменение параметров источника питания установки;
- увеличение частоты питания индуктора в установке;
- переход от односекционного индуктора к многосекционному;
- усовершенствование технологического процесса нагрева (изменение температурных режимов, времени нагрева);
- усовершенствование конструктивных элементов установки.

#### Заключение

В данной статье выделены основные способы термической обработки заготовок из алюминия и алюминиевых сплавов.

Сформулированы физические основы индукционного нагрева, а также электромагнитные эффекты, возникающие в индукционных установках. Выделена главная проблема, проявляющаяся в индукционных установках. Предложены основные подходы для улучшения технологического процесса термообработки алюминиевых заготовок.

Литература:

1. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. – Москва: Изд-во «Металлургия», 1979. – 247 с.
2. Занько Д.В. Анализ применимости индукционных канальных печей // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (67). – С. 246–247.
3. Методы расчета электрических и магнитных полей / В.Э. Фризен, И.В. Черных, С.А. Бычков, Ф.Е. Тарасов. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 176 с.
4. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 2 (50). – С. 203–207.
5. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Ключевые проблемы при эксплуатации индукционных нагревателей // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2017. – № 1 (53). – С. 179–182.

# РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ В СОСТАВЕ ИСТОЧНИКА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**П.А. Мещеряков, Е.Ю Абрамов**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, meshcheryakov.p.a@gmail.com  
Научный руководитель: Абрамов Е.Ю., м.н.с. ЦТП НГТУ**

*В данной работе рассматриваются схемотехнические решения при разработке управляемого выпрямителя для зарядки суперконденсатора в составе ИБП. Выявлены основные требования к системе. Представлены схема силовой части и модель системы управления. Определены сферы применения разрабатываемого устройства.*

*In this article, circuit design solutions are considered in the development of a controlled rectifier for charging a supercapacitor as part of a UPS. The main requirements for the system are identified. A diagram of the power part and a model of the control system are presented. The spheres of application of the developed device are defined.*

В настоящее время всё более широкое применение в технике находит такой сравнительно новый вид накопителей энергии, как суперконденсатор (СК). Так, использование СК в составе источников бесперебойного питания открывает новые возможности. В сравнении с традиционным решением на аккумуляторных батареях, применение данного вида накопителя способно существенно снизить влияние отрицательных температур на токоотдачу резервного источника, обеспечить существенно большее количество циклов заряда-разряда и снизить требования к сервисному обслуживанию [1]. Вместе с этим, анализ рынка показал, что готовых решений по ИБП на СК мощностью порядка 1 кВт и менее нет. Вследствие чего очевидна актуальность разработки такого устройства для резервирования питания маломощных электроприемников, эксплуатируемых, в частности, в тяжелых уличных условиях.

Целью данной работы является разработка схемного решения источника тока на базе управляемого выпрямителя для зарядки СК в составе ИБП, проектируемого для тяжелых условий эксплуатации.

Особенностями данной разработки являются существенно большая степень зависимости напряжения накопителя от уровня его заряда, в сравнении с аккумуляторами, большая разница между входным и

выходным напряжениями преобразователя, а также необходимость сохранения работоспособности в широком диапазоне температур [2].

Для выпрямителя были определены следующие требования:

- номинальное напряжение при наличии входного напряжения 230 В AC  $\pm 10\%$ ;
- рабочий диапазон входного напряжения, 150-250 В AC;
- диапазон выходного напряжения 6-16 В DC;
- ток заряда до 15А;
- рабочий диапазон температур  $-40\dots+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- напряжение системы управления 5 В;
- время полного заряда СК не более 15 мин;

В качестве основного принципа работы выбран метод фазового регулирования. Для реализации данного метода использована мостовая схема диодно-тиристорного выпрямителя с низкочастотным трансформатором (Рисунок 1).

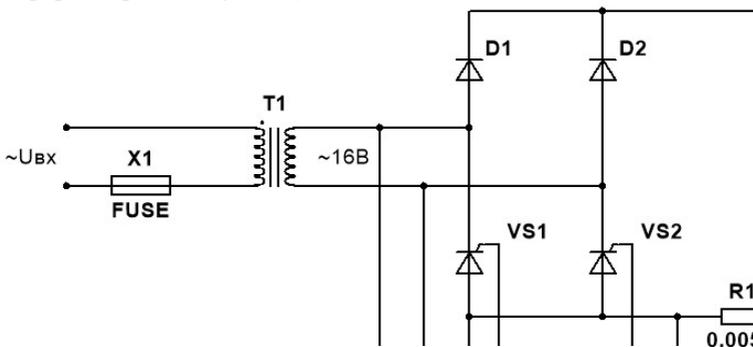


Рис.1 – Схема силовой части управляемого выпрямителя

Для обеспечения работоспособности в условиях широкого диапазона температуры окружающей среды принято решение разрабатывать систему управления на базе дискретных аналоговых компонентов. Предварительные расчёты показали, что в сравнении со схемой на базе микроконтроллера, этот подход способен обеспечить низкий температурный дрейф параметров и стабильное выполнение функций контроля и управления даже при пассивной системе охлаждения и без дополнительных нагревательных элементов.

Разработана схема управления, для проверки которой в программной среде Multisim создана имитационная модель (Рисунок 2).

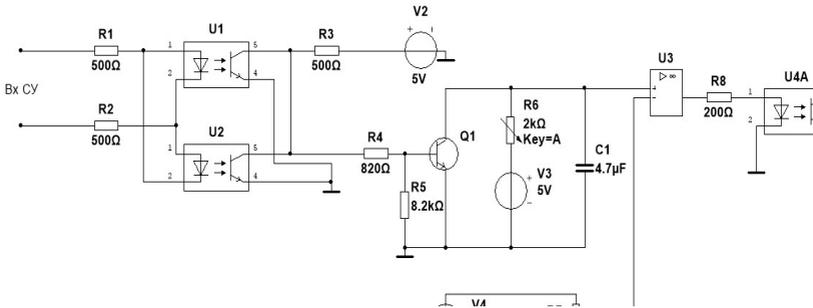


Рис.2 – Модель схемы управления выпрямителем с ручным заданием угла управления тиристорами

Данная схема успешно прошла испытания на экспериментальном стенде. Для автоматической стабилизации тока зарядки СК создана модель регулятора с обратной связью по току (Рисунок 3), работа которой на активную нагрузку при ступенчатых возмущающих воздействиях по входному напряжению и сопротивлению нагрузки представлена осциллограммой (Рисунок 4).

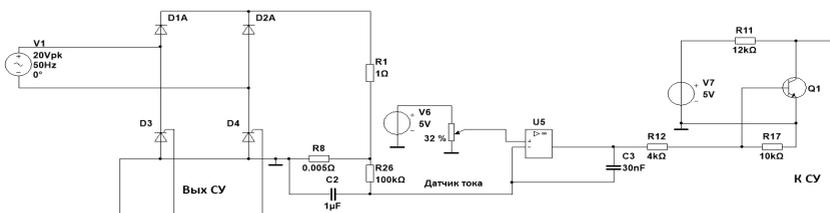


Рис.3 – Модель схемы автоматического поддержания тока заряда

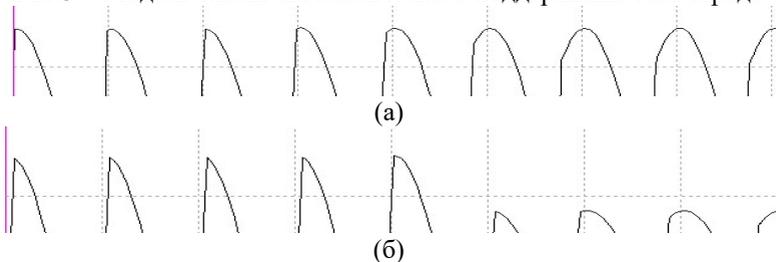


Рис.4 – Осциллограмма выходного напряжения автоматического регулирования угла управления тиристорами при ступенчатом (а)- увеличении сопротивления; (б)- уменьшении напряжения питания

Результаты моделирования наглядно демонстрируют, что разработанная схема обеспечивает стабильный ток зарядки при изменениях питающего напряжения и нагрузки.

Работа схемы поддержания тока заряда на ёмкостную нагрузку представлена осциллограммой (Рисунок 5).



Рис.5 – Осциллограмма выходного напряжения автоматического регулирования угла управления тиристорами при зарядке суперконденсатора

Из осциллограммы видно, что угол управления тиристорами изменяется для поддержания постоянного тока заряда суперконденсатора.

В ходе работы были получены следующие результаты:

- разработана и собрана силовая часть выпрямителя в составе физического стенда ИБП;
- протестирована работа управляемого выпрямителя при ручном регулировании углом управления тиристорами;
- разработана схема управления, обеспечивающая стабилизацию тока зарядки СК, работа проверена с использованием имитационного моделирования;
- спроектирована и собрана плата управления.

В дальнейшем планируется:

- протестировать схему зарядки СК с автоматическим поддержанием тока заряда на физическом стенде;
- выполнить комплекс измерений для оценки энергетических характеристик разработанного управляемого выпрямителя;
- провести серию испытаний при низких и высоких температурах окружающей среды.

Разрабатываемый ИБП на основе СК позволит резервировать питание ответственных маломощных устройств, находящихся в тяжелых условиях эксплуатации, например, телекоммуникационного и измерительного полевого оборудования систем автоматизации технологических процессов.

Литература:

1. *Десноутли А.Л., Андреева А.В.* Суперконденсаторы для электроники // Современная электроника. - 2006. - №5. - С. 10-14.
2. *Abramov E. Y., Shtang A. A., Rozhkova M. V.* Effective use of supercapacitor batteries for urban electric transport // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018) : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. Т. 1, ч. 5.. - Новосибирск: НГТУ, 2018. - С. 16-18.

## ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

М.А. Тимохина

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, mgt2012@bk.ru

Научный руководитель: Бирюков В.В., к.т.н., доцент

*Работа направлена на определение наиболее эффективного накопителя энергии для электромобиля. Проведен сравнительный анализ существующих видов накопителей энергии, рассмотрены основные характеристики, конструкция, достоинства и недостатки, а также перспективы применения данных накопителей в условиях городской электрической тяги на основе емкостных, массогабаритных показателей.*

*The work is aimed at choosing the most efficient energy storage for an electric vehicle. A comparative analysis of existing types of energy storage devices is carried out, the main characteristics, design, advantages and disadvantages, as well as prospects for the use of these storage devices in urban electric traction conditions based on capacitive, weight and size indicators are considered.*

В современном мире электромобили становятся популярнее автомобилей с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) по ряду причин:

- Автомобили на электрической тяге эффективнее, чем автомобили с ДВС;
- На данный момент активно развиваются силовая электроника и источники энергии, которые являются важными элементами для реализации электромобиля;
- Использование электромобиля в качестве транспортного средства приведет к улучшению экологии из-за снижения вредных выбросов в атмосферу;
- Для работы ДВС требуется больше дополнительных деталей и механизмов, что уменьшает надежность и увеличивает массу такого агрегата.

Сегодня в качестве накопителя энергии используются аккумуляторные батареи (АКБ), так как это химический источник тока. Суперконденсаторы не способны сами вырабатывать необходимую энергию, а лишь способны отдавать и запасать энергию от другого источника.

Самой большой популярностью пользуются разновидности литий-ионных АКБ. Они имеют следующие преимущества: низкую скорость саморазряда, широкий диапазон температур, обладают высокой плотностью энергии, у них отсутствует «эффект памяти». Но есть и

недостатки: высокая стоимость и особые требования к эксплуатации. Виды литий-ионных АКБ, которые могут использоваться как источники энергии для электромобилей [1]:

- Литий-кобальтовые (LiCoO<sub>2</sub>);
- Литий-марганцевые (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>);
- Литий-никель-марганец-кобальт-оксидные (LiNiMnCoO<sub>2</sub>);
- Литий-железо-фосфатные (LiFePO<sub>4</sub>);
- Литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные (LiNiCoAlO<sub>2</sub>);
- Литий-титанатные (Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>).

Суперконденсатор (ионистор) – электрохимическое устройство, представляющее собой конденсатор с органическим или неорганическим электролитом [2]. В сравнении с литий-ионными АКБ, суперконденсаторы имеют высокую скорость зарядки и намного меньшую емкость, так при равной емкости, масса суперконденсаторов значительно больше массы АКБ, что является не перспективным для использования такого накопителя энергии для электромобиля [3].

В таблице 1 приведены основные характеристики, на которые необходимо ориентироваться при выборе наиболее эффективного накопителя энергии для электромобиля [1], а на рисунке 1 – гистограмма одной из наиболее важных характеристик, влияющих на массогабаритные показатели источника электрической энергии – удельная энергоёмкость, приходящаяся на единицу веса.

**Таблица 1 – Характеристики источников тока**

Параметр/ название	Свинцово- кислотные	Никель- кадмиевые	Никель-ме- таллогидрид	Литий- ионные	Супер- конденсатор
Удельная энерго- ёмкость, Вт·ч/кг	30-40	40-60	30-80	90-140	5
Удельная мощность, Вт/кг	180	150	250-1000	1800	10000
Номинальное напряжение, В	2	1,2	1,2	3,7	2,7
Среднее время заряда, ч	>10	8	6	2	0,006
Количество циклов заряда/разряда, шт	500-800	2000	800	2000	100000

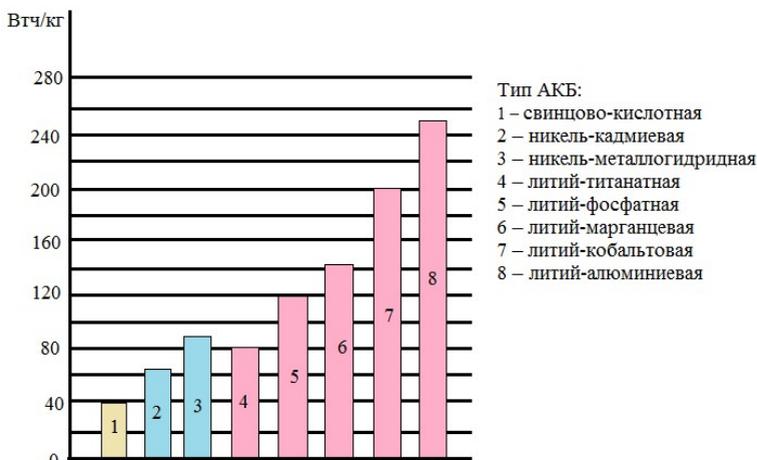


Рис. 1 – Показатели удельной энергоёмкости для АКБ

Из рисунка 1 видно, что наиболее перспективными в качестве тяговых элементов являются литий-ионные АКБ. По основным характеристикам такие АКБ превосходят остальные типы источников энергии, относительно быстро заряжаются, имеют достаточное количество циклов заряда, высокие значения допустимых токов, большие показатели удельной энергоёмкости и мощности. На сегодняшний день такие АКБ имеют высокую стоимость, однако переход на массовое их производство и совершенствование технологии изготовления приведёт к снижению их стоимости.

Таким образом, применение литий-ионных АКБ на современных электромобилях более эффективно по сравнению с другими накопителями энергии.

#### Литература:

1. Типы литий-ионных аккумуляторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-205/>, свободный. – Загл. с экрана.

2. Ионистор [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ионистор#cite\\_note-7](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ионистор#cite_note-7), свободный. – Загл. с экрана.

3. Суперконденсаторы: что это, зачем и где применяется [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/547310/>, свободный. – Загл. с экрана.

## СПОСОБ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ГОРОДСКОМ РЕЛЬСОВОМ ТРАНСПОРТЕ

**А.А.Широких**

**Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, [alina.shirokih.777@yandex.ru](mailto:alina.shirokih.777@yandex.ru)**

**Бирюков В.В. — доцент, к.т.н.**

*Приведен способ для снижения энергопотребления трамвая с бортовым накопителем энергии, предложен вариант размещения накопителей энергии на подвижном составе.*

*A method for reducing the energy consumption of a tram with an on-board energy storage is given, a variant of placing energy storage devices on rolling stock is proposed.*

Использование для массовых пассажирских перевозок в крупных городах наземного электрического транспорта позволяет существенно снизить вероятность возникновения транспортных заторов на улицах. Наибольшей привлекательностью для этой цели обладает трамвай, который может в зависимости от конструктивного исполнения осваивать пассажиропотоки до 20 000 пассажиров [1,2].

Обладая большей по сравнению с другими видами наземного электрического транспорта вместимостью, он потребляет и большее количество энергии. Наличие электрического привода на нём создаёт условия для снижения энергопотребления трамваем за счёт использования режима рекуперативного торможения, при котором часть затраченной на движение энергии может быть возвращена. Поскольку вероятность возврата электроэнергии в сеть, как показывают расчёты, крайне мала, то приём и хранение её в трамвае является наиболее приемлемым вариантом. В качестве бортового накопителя энергии могут использоваться электрохимические накопители (аккумуляторы), либо конденсаторного типа. Электрохимические накопители энергии, как известно, отличаются высокой энергетической плотностью, но в отличие от конденсаторных более подвержены влиянию температурных изменений.

Использование подвижного состава трамвая с бортовым накопителем энергии расширило возможности его применения в тех местах, где сооружение питающей его контактной сети осложнено улично-дорожной сетью, либо экономически нецелесообразно.

На величину ёмкости бортового накопителя энергии влияют следующие факторы: максимальный запас хода, протяжённость

перегона, расположение путей (на обособленном полотне или в общем потоке транспортных средств) и т.д.

В большинстве случаев в реальных условиях при движении в общем потоке добиться классической схемы движения «пуск-выбег-торможение» на всей длине перегона фактически невозможно. Поэтому в качестве расчётного цикла движения был принят европейский ездовой цикл NEDC (New European Driving Cycle – Новый Европейский Ездовой Цикл), кривая движения  $V(t)$  которого представлена на рис. 1. Согласно Urban Driving Cycle имитация движения в городе подразумевает 4-е отдельных блока: каждый длительностью 195 секунд и с дистанцией 1,013 км. В ходе этих тестовых блоков автомобиль разгоняется до скорости 15-32-50 км/ч; средняя скорость составляет 18,7 км/ч. [2]

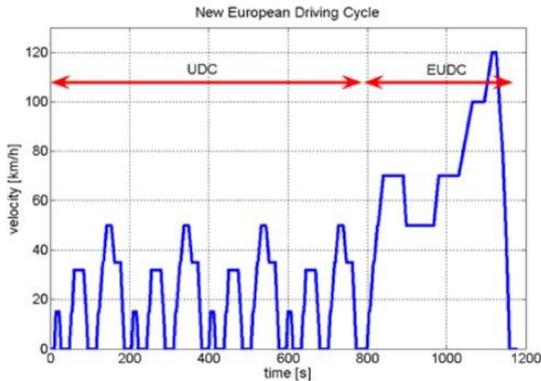


Рис. 1 – Кривая движения  $V(t)$  NEDC

Энергия, потребляемая тяговым приводом, идёт на изменение кинетической энергии транспортного средства, а следовательно, может быть определена по формуле:

$$A_{номр} = \frac{A_{\kappa}}{\eta_p \eta_{\text{дв}} \eta_{нр}} = (1 + \gamma) \frac{mV^2}{2} / \eta_p \eta_{\text{дв}} \eta_{нр}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент инерции вращающихся частей,  $\eta_p$  – КПД редуктора,  $\eta_{\text{дв}}$  – КПД двигателя,  $\eta_{нр}$  – КПД преобразователя,  $m$  – масса подвижного состава.

Таким образом, для транспортного средства массой 32600 кг, а также  $\eta_p=0,85$ ,  $\eta_{\text{дв}}=0,93$ ,  $\eta_{нр}=0,98$  [1] можно вычислить потребляемую мощность согласно формуле 1 для значений скорости 15, 32 и 50 км/ч:

$$A_{\text{ном}15} = (1 + 0,15) \frac{32600 \left( \frac{15}{3,6} \right)^2}{2} / (0,85 \cdot 0,93 \cdot 0,98) = 4,34 \cdot 10^5 \text{ Дж};$$

$$A_{\text{ном}32} = (1 + 0,15) \frac{32600 \left( \frac{32}{3,6} \right)^2}{2} / (0,85 \cdot 0,93 \cdot 0,98) = 1,98 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$A_{\text{ном}50} = (1 + 0,15) \frac{32600 \left( \frac{50}{3,6} \right)^2}{2} / (0,85 \cdot 0,93 \cdot 0,98) = 4,82 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

При этом суммарный расход энергии на прохождение 1,013 км составит  $0,434 + 1,98 + 4,82 = 7,23$  МДж. При необходимом пробеге в 5 км, необходимый запас энергии составляет  $(5 \cdot 7,23) / 1,013 = 35,7$  МДж (9,92 кВт·ч).

При номинальном уровне напряжения на двигателе в 467 В, необходимая ёмкость аккумулятора составит  $9,92 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 467 \text{ В} = 21 \text{ А} \cdot \text{ч}$ .

Удовлетворить требуемым параметрам тяговой батареи могут литий-ионные аккумуляторы модели LT-LFP 100 [3] (рис. 2). Согласно техническим характеристикам, номинальное напряжение составляет 3,2 В, таким образом потребуется батарея из  $467 \text{ В} / 3,2 \text{ В} = 146$  аккумуляторов. Общая масса составит 560 кг.



Рис. 2 – Внешний вид аккумулятора LT-LFP 100

### Размещение накопителей энергии

Для равномерного распределения веса накопителей предложено использовать боковое пространство между тележек вагона.

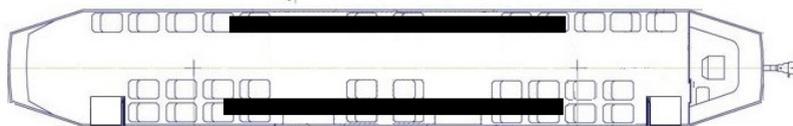


Рис. 3 – Размещение накопителей энергии

Стоит отметить, что данное решение по размещению аккумуляторных батарей наиболее безопасно, так как наиболее часто повреждаемыми частями кузова при дорожно-транспортных происшествиях являются кабина и задняя часть кузова.

Равномерное расположение накопителей не влечёт за собой концентрированного воздействия на кузов вагона и не требует его доработки.

#### Литература

1. Бирюков В. В. Тяговый электрический привод : учебное пособие / В. В. Бирюков, Е. Г. Порсев —Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. - 312, с.
2. Ездовые циклы NEDC, EPA, WLTC и JC08 [Электронный ресурс]. URL: <https://ecotechnica.com.ua/stati/1854-zapas-khoda-elektromobilya-ezdovye-tsikly-nedc-epa-wltc-i-jc08-kakoj-pravilnee.html> (Дата обращения 26.09.2022)
3. Лиотех [Электронный ресурс]. URL: <https://www.liotech.ru/products/akkumulyatory/akkumulyatory-vtorogo-pokoleniya/> (Дата обращения 26.09.2022)

## ПОИСК АПЕРТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ В КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-4М ПРИ ПОМОЩИ ДАТЧИКОВ ПОТЕРЬ ПУЧКА

**С. В. Щукин**

**Новосибирский государственный технический университет,  
Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, г. Новосибирск,  
[stepan.shchukin2001@mail.ru](mailto:stepan.shchukin2001@mail.ru)**

**Научный руководитель: Мальцева Ю. И., к.ф.-м.н., с.н.с., ст.  
преподаватель**

*Наличие ограничений апертуры существенно влияет на эффективность работы коллайдера ВЭПП-4М. Данная работа посвящена поиску апертурных ограничений при помощи сцинтилляционных датчиков потерь пучка. Была выполнена относительная калибровка чувствительности датчиков с использованием радиоактивного источника Sr-90. Представлены результаты измерений потерь пучка и определено местоположение апертурного ограничения.*

*Aperture limitations significantly affect the efficiency of the VEPP-4M collider. This work is devoted to the search for aperture limitations using scintillator-based beam loss monitors. The relative sensitivity calibration of the monitors using the Sr-90 radioactive source was performed. The results of beam loss measurements are presented and the location of the aperture limitation is determined.*

Ускорительный комплекс ВЭПП-4 [1] предназначен для проведения экспериментов по физике высоких энергий, экспериментов по ядерной физике и экспериментов с использованием синхротронного излучения. Основная часть комплекса – электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М, работающий на энергии от 1.9 ГэВ до 5 ГэВ.

Пучок заряженных частиц циркулирует внутри вакуумной камеры, которая представляет собой сложное устройство с множеством соединений и компонентов (вставные устройства, пробники, шиберы, приемники излучения, элементы ВЧ системы). Различные дефекты в этих компонентах могут приводить к ухудшению прохождения пучка по вакуумной камере, что является апертурным ограничением.

В настоящий момент наличие таких ограничений в коллайдере ВЭПП-4М существенно снижает производительность комплекса, поэтому задача поиска апертурных ограничений в коллайдере ВЭПП-4М является актуальной.

В данной работе предложен метод определения ограничений, основанный на пооборотных измерениях тока пучка при помощи стационарных датчиков положения пучка (пикапов) [2] и на измерениях потерь пучка при помощи переносных сцинтилляционных датчиков потерь [3].

Орбита пучка локально искажалась в местах ожидаемых потерь пучка. Далее по пучку производился удар импульсным электромагнитным полем, в результате чего, возбуждаются свободные колебания вокруг искаженной орбиты с амплитудой, зависящей от амплитуды удара. Пикапы позволяют измерять ток на каждом обороте после удара. Ступенчатое изменение тока между пикапами позволяет локализовать апертурное ограничение с точность до участка между ними. При помощи пикапов было установлено, что ограничение находится в техническом промежутке ВЭПП-4М, где расположены ВЧ резонаторы и куда происходит инжекция пучка.

Для дальнейшей локализации места ограничения используется система из нескольких сцинтилляционных датчиков потерь пучка, которые располагаются на выделенном участке ускорителя с их последующей перестановкой. На Рисунке 1 представлена схема расположения датчиков потерь в техническом промежутке ВЭПП-4М.



Рис. 1 – Схема технического промежутка ВЭПП-4М с указанием местоположения датчиков потерь (зеленым цветом)

### *Принцип работы датчиков и их калибровка*

Принцип работы сцинтилляционного датчика потерь пучка основан на регистрации сцинтилляционного света, возникающего при прохождении частиц электромагнитного ливня [4] сквозь объем сцинтиллятора. Частицы ливня, в свою очередь, рождаются при попадании релятивистского пучка заряженных частиц на стенку вакуумной камеры. Сцинтилляционный датчик состоит из сцинтиллятора и подсоединенного к его торцу фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Интенсивность светового сигнала, поступающего на ФЭУ, пропорциональна количеству регистрируемых теряемых частиц пучка [5].

В работе использовались четыре однотипных датчика потерь, состоящих из сцинтиллятора СЦ-201\_ИФВЭ на основе полистирола и

ФЭУ Hamamatsu R1924, сечения которых согласованы. Максимум спектральной чувствительности ФЭУ соответствует максимуму спектра высвечивания сцинтиллятора.

Для того, чтобы непосредственно сравнивать сигналы потерь со всех датчиков была проведена относительная калибровка их чувствительности. На Рисунке 2 показаны результаты калибровки ФЭУ, выполненной двумя способами: при помощи белого светодиода и радиоактивного источника Sr-90. В первом случае, свет от светодиода падал прямо на фотокатод ФЭУ, во втором – сцинтиллятор преобразовывал электроны от распада Sr-90 в свет.

Был сделан вывод о том, что наиболее подходящей является калибровка ФЭУ изотопом, поскольку спектр излучение от сцинтиллятора согласован с областью максимальной спектральной чувствительности ФЭУ. При помощи изотопа была также выполнена калибровка сцинтилляторов, разброс относительного световыхода составил не более 15 %.

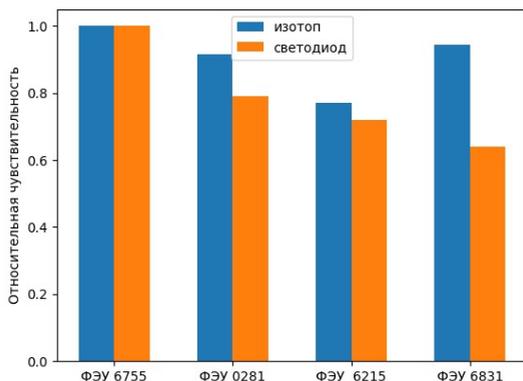


Рис. 2 - Относительная чувствительность ФЭУ, измеренная светодиодом и радиоактивным изотопом Sr-90

### *Измерения потерь пучка электронов*

Для измерений потерь пучка с целью поиска апертурного ограничения было исследовано шесть мест в технической промежутке ВЭПП-4М. Сигналы с датчиков потерь регистрировались при помощи однотипных цифровых вольтметров.

Измерения потерь проводились при локальном искажении орбиты пучка: поднимали и опускали орбиту по вертикали. Было установлено, что апертурное ограничение не симметрично расположено снизу вакуумной камеры. На Рисунке 3 показано распределение потерь электронного пучка в зависимости от искажения его орбиты в техническом промежутке. Было установлено, что место апертурного ограничения находится между положениями датчиков 4 и 5, указанных на Рисунке 1. Для устранения ограничения необходимо произвести демонтаж вакуумной камеры в выделенной области для устранения ограничения.

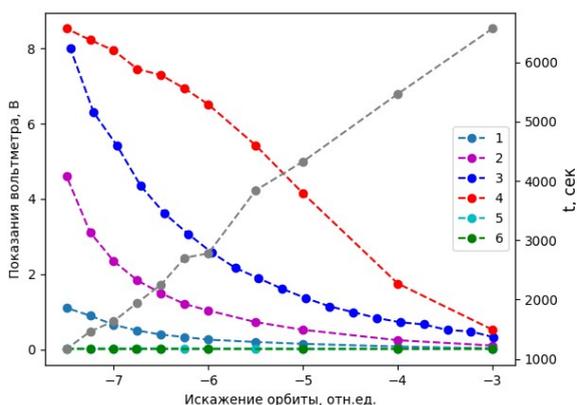


Рис. 3 – Потери пучка и время жизни пучка (серым цветом) в зависимости от искажения орбиты

В результате работы был предложен метод поиска апертурных ограничений на основе измерений датчиков потерь пучка, который позволил локализовать место такого ограничения в техническом промежутке ВЭПП-4М. Данный метод поиска ограничений апертуры применим на других аналогичных ВЭПП-4М ускорителях заряженных частиц.

#### Литература

1. Статус ускорительного комплекса ВЭПП-4 / А. Н. Журавлев, С. Е. Карнаев, Е. Б. Левичев, О. И. Мешков, С. А. Никитин, И. Б. Николаев, П. А. Пиминов // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т.17, № 7(232). С. 876-893
2. BPM System for VEPP-4M Collider / E. A. Bekhtenev and G. V. Karpov // ISSN 1547-4771, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 929-932.

3. Beam loss monitoring system for the SKIF synchrotron light source / Yu. I. Maltseva et al // Journal of Instrumentation 17 T05004 (2022)
4. *Онучин А. П.* Экспериментальные методы ядерной физики. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – 220 с.
5. *Wittenburg K.* Beam loss monitors // CAS – CERN Accelerator School: Course on Beam Diagnostics, Dourdan, France, 28 May – 6 June 2008: Conference proceedings. – Geneva, 2009. — P. 249–280.

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ – ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

#### Секция ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Ф.К. Айрапетян	г. Новосибирск	3
И. А. Артюх, З.С. Темлякова,	г. Новосибирск	8
П. В. Морозов		
Г.О. Гейнрих, А.Ф. Шевченко	г. Новосибирск	12
А. В. Гусева	г. Новосибирск	17
О.А. Жилин	г. Новосибирск	21
Д.К. Иванов	г. Новосибирск	26
А.С. Лобачева	г. Новосибирск	31
Н.К. Маломошнов	г. Новосибирск	35
Р.О. Никулин, А.Г. Приступ	г. Новосибирск	40
А.А. Отставнов	г. Новосибирск	45
А.А. Отставнов	г. Новосибирск	48
И.Л. Попов	г. Новосибирск	51
А.А. Темляков В.Ю. Нейман,	г. Новосибирск	53
В.В. Гречкин		
А.О. Холод, Е.Д. Сергиенко,	г. Новосибирск	57
А.А. Носиков		
Г.Н. Чусовитин	г. Новосибирск	59
А.А. Трубачев	г. Томск	63

#### Секция ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В.И. Анибросов, А.В. Стоянова	г. Новосибирск	68
Д. Н. Белкова	г. Новосибирск	72
А.А. Блинов	г. Новосибирск	76
С.А. Бурманов	г. Новосибирск	81

К.А. Можейкин	г. Новосибирск	85
М. Е. Мосин	г. Новосибирск	89
А.В. Нагель	г. Новосибирск	94
А.С. Нагорный	г. Новосибирск	98
В.К.Пешков	г. Новосибирск	103
Г.С. Сидоров	г. Новосибирск	107
В.Д. Скотников, И.И. Сингизин	г. Новосибирск	112
Г.Н. Чусовитин, Н.А. Чусовитин	г. Новосибирск	115
У. А. Шерматов	г. Фергана	120
В.С. Щекотько	г. Новосибирск	125

**Секция ТЕХНОЛОГИЯ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ  
МАТЕРИАЛОВ**

С.А. Алехин	г. Новосибирск	130
С.А. Внуков	г. Новосибирск	135
А.И.Жданова	г. Новосибирск	138
В.Д. Кочкин, А.И, Алиферов	г. Новосибирск	142
А.Д. Лапин, И.А. Смольянов	г. Екатеринбург	147
П.А. Мещеряков, Е.Ю Абрамов	г. Новосибирск	151
М.А. Тимохина	г. Новосибирск	155
А.А.Широких	г. Новосибирск	158
С. В. Щукин	г. Новосибирск	162
С.А. Алехин	г. Новосибирск	130
С.А. Внуков	г. Новосибирск	135
А.И.Жданова	г. Новосибирск	138
В.Д. Кочкин, А.И, Алиферов	г. Новосибирск	142
А.Д. Лапин, И.А. Смольянов	г. Екатеринбург	147
П.А. Мещеряков, Е.Ю Абрамов	г. Новосибирск	151
М.А. Тимохина	г. Новосибирск	155
А.А.Широких	г. Новосибирск	158
С. В. Щукин	г. Новосибирск	162

**НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ**

**XVI Всероссийская научная конференция молодых ученых  
г. Новосибирск, 05-08 декабря 2022 г.**

**Сборник научных трудов в 11 частях**

**Часть 5**

*Под редакцией Казьминой А.С.*

Подписано в печать 15.12.2022. Формат 60×84/16. Бумага  
офсетная. Уч.-изд. л. 10. Печ. л. 10,75. Тираж 100 экз. Заказ №  
Р-01692 Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20