

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Сафин Альфред Робертович

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОЗДАНИЕ  
СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ  
В СОСТАВЕ ГЕНЕРИРУЮЩИХ И ПРИВОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант – профессор, д.т.н

Ившин И.В.

Казань 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ИНДЕКСОВ, СОКРАЩЕНИЙ.....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	15
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СЭМПИМ В СОСТАВЕ ГЕНЕРИРУЮЩИХ И ПРИВОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ.....	29
1.1. Обзор и классификация автономных источников электроснабжения на базе электромеханических генераторов. Анализ методов и способов повышения энергоэффективности автономных источников электроснабжения.....	29
1.2. Использование различных типов линейных электрических машин возвратно-поступательного действия в автономных источниках электроснабжения.....	35
1.3. Проектирование СЭДПИМ в составе приводных комплексов.....	52
1.4. Модели, алгоритмы, методы проектирования и оптимизации электрических машин.....	55
1.5. Постановка задачи исследования.....	63
1.6. Выводы по главе 1.....	65
2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ СЭМПИМ.....	67
2.1 Моделирование термодинамических процессов в свободно-поршневом двигателе.....	67
2.1.1. Разработка модели СПДВС.....	70
2.1.2. Рассмотрение особого случая работы СПДВС.....	77
2.2. Моделирование электромеханических процессов в синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами .....	79

2.2.1. Разработка математической модели синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия .....	79
2.2.2. Линейная токовая нагрузка.....	82
2.2.3. Расчет результирующего значения магнитной индукции в воздушном зазоре.....	87
2.2.4. Расчет электромагнитной силы.....	89
2.2.5. Расчет индуктивных сопротивлений .....	91
2.2.6. Активное сопротивление обмотки .....	94
2.2.7. Расчет потерь в синхронной ЭМВПД с ПМ .....	96
2.2.8. Расчет коэффициента полезного действия.....	98
2.3. Моделирование управляемого преобразователя с активной коррекцией коэффициента мощности.....	100
2.4. Тепловая модель обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия.....	108
2.4.1. Теплопередача между пакетом статора и катушкой.....	110
2.4.2. Теплопроводность в пакете статора в радиальном направлении.....	114
2.4.3. Теплопроводность в пакете статора и кожухе охлаждения в аксиальном направлении.....	115
2.4.4. Теплопроводность в радиальном направлении от кожуха охлаждения к каналу охлаждения.....	116
2.4.5. Теплопроводность от пакета статора к кожуху охлаждения....	118
2.4.6. Теплопроводность от индуктора к статору.....	122
2.5 Выводы по главе 2.....	125
<b>3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИВОДНОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ СЭМПМ.....</b>	<b>126</b>
3.1. Математическая модель станка-качалки и штанговой скважинной насосной установки .....	126
3.2. Математическое описание синхронного электродвигателя с постоянными магнитами в составе СУ ШСНУ .....	128

3.2.1	Выбор магнитных материалов.....	128
3.2.2	Конструкция ротора СЭДПМ.....	132
3.2.3	Математическая модель магнитной цепи СЭДПМ.....	135
3.8.	Выводы по главе 3.....	143
4.	ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ СЭМПМ.....	145
4.1.	Система моделирования термодинамических процессов в свободнопоршневом двигателе внутреннего сгорания.....	145
4.2.	Система моделирования электромеханических процессов в линейной электрической машине.....	149
4.2.1.	Разработка численной модели синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия в специализированном программном обеспечении.....	149
4.2.2.	Моделирование механических процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ.....	157
4.3.	Система моделирования электромагнитного поля в синхронной ЭМВПД с ПМ .....	160
4.4.	Система моделирования управляемого преобразователя с активной коррекцией коэффициента мощности.....	165
4.5.	Моделирование тепловых процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ на основе электротепловой аналогии.....	173
4.6.	Разработка численных моделей СЭДПМ и проведение численных исследований характеристик электропривода	179
4.7.	Использование СЭДПМ в качестве компенсатора реактивной мощности.....	182
4.8.	Система управления базами данных и оптимизации параметров.....	186
4.9.	Выводы по главе 4.....	188
5.	ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЭМПМ В СОСТАВЕ	

ГЕНЕРИРУЮЩИХ И ПРИВОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ .....	189
5.1. Оптимизация конструктивных параметров синхронной ЭМВПД С ПМ .....	189
5.1.1. Оптимизация конструктивных параметров электрической машины по критерию максимума электромагнитной силы.....	189
5.1.2. Методика оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимальной генерируемой мощности .....	196
5.2. Оптимизация конструктивных параметров СЭДПМ.....	202
5.3. Разработка метода топологической оптимизации электрической машины возвратно-поступательного действия .....	209
5.4. Программная реализация концепции параллельного моделирования генерирующих комплексов .....	224
5.5. Выводы по главе 5.....	233
6. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ.....	235
6.1. Испытательный стенд для проведения исследований экспериментального образца электрической машины возвратно- поступательного действия.....	235
6.1.1. Назначение и область применения испытательного стенда...	235
6.1.2. Технические характеристики.....	235
6.1.3. Описание и обоснование выбранной конструкции.....	236
6.1.4. Система контроля и управления испытательного стенда.....	244
6.1.5. Система привода и нагружения испытательного стенда.....	247
6.2. Система управления синхронной ЭМВПД с ПМ .....	251
6.2.1. Описание программы.....	252
6.2.2. Описание применения программы управления .....	268

6.3. Изготовление экспериментального образца электрической машины возвратно-поступательного действия возвратно-поступательного действия.....	280
6.4. Сравнительный анализ результатов имитационного и физического моделирования, верификация.....	282
6.4.1. КПД синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме генератора.....	282
6.4.2. Расчет потерь в стали.....	289
6.4.3. Индуцируемое напряжение в обмотках статора.....	291
6.4.4. Моделирование и измерение тепловых режимов синхронной ЭМВПД с ПМ .....	292
6.6. Выводы по главе 6.....	298
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	300
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	304
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	305
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	330
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	340
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	342
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	343
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	344
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	345
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	346
ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	348
ПРИЛОЖЕНИЕ К.....	350
ПРИЛОЖЕНИЕ Л.....	352

# ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ИНДЕКСОВ, СОКРАЩЕНИЙ

## Условные обозначения

$b$	диаметр цилиндра.
$x_m$	максимальный ход индуктора.
$x_s$	ход индуктора.
$P_L(x)$	мгновенное давление в левом цилиндре.
$P_R(x)$	мгновенное давление в правом цилиндре.
$A_B$	площадь поперечного сечения цилиндра.
$F(x)$	электромагнитная сила и сила трения.
$m$	масса индуктора (поршневой группы); масса топливной смеси.
$x$	положение индуктора (позиция).
$P_m$	средняя точка давления в сжимаемом цилиндре.
$V_m$	объем цилиндра в средней точке.
$V_R$	объем правого цилиндра.
$P_R$	давление в правом цилиндре.
$n$	политропный коэффициент сжатия.
$P_u$	средняя точка давления в цилиндре расширения.
$P_2$	давление сжатия.
$T_2$	температура в конце сжатия.
$c_v$	теплота сгорания топлива.
$T_3$	температура сгорания.
$P_3$	давление в начале расширения.
$C_p$	теплоемкость при постоянном давлении.
$C_v$	теплоемкость при постоянном объеме.

$R$	газовая постоянная.
$r$	степень сжатия.
$L_a$	индуктивность рабочей обмотки.
$R_0$	активное сопротивление рабочей обмотки.
$L_L$	индуктивное сопротивление нагрузки.
$R_L$	активное сопротивление нагрузки.
$E_v$	ЭДС движения, наводимая в рабочей обмотке при перемещении магнитов
$x_m$	амплитуда движения магнитов.
$\omega$	круговая частота перемещения магнитов.
$C_{MW}$	коэффициент электромагнитной силы.
$k_{MW}$	коэффициент линеаризации электромагнитной силы.
$\mu_0$	магнитная проницаемость вакуума.
$l$	длина окружности магнита.
$F_M$	магнитодвижущая сила магнита.
$w$	число витков обмотки.
$k_\mu$	коэффициент насыщения.
$a$	параметр, зависящий от длины магнита и воздушных зазоров.
$U_L$	напряжение нагрузки.
$A$	линейная токовая нагрузка.
$B_\delta$	магнитная индукция в воздушном зазоре.
$b_N$	ширина катушки.
$b_Z$	ширина зубца статора.
$\tau_s$	полюсное деление статора.
$\tau_N$	обмоточное деление.

$h_N$	высота катушки.
$h_Z$	высота зубца статора.
$A_0$	постоянный коэффициент.
$A_k$	коэффициенты Фурье.
$B_k$	коэффициенты Фурье.
$\nu$	номер гармоники.
$\omega_n$	количество витков обмотки.
$i_{n2}$	ток во второй обмотке.
$\xi_n$	коэффициент распределения обмотки в статоре.
$\xi_s$	коэффициент укорочения шага обмотки.
$W$	шаг витка обмотки.
$\tau_p$	полюсное деление.
$\mu_0$	магнитная постоянная.
$\Phi$	магнитный поток.
$\delta$	величина воздушного зазора.
$b_m$	ширина магнита.
$h_m$	высота магнита.
$\tau_m$	полюсное деление магнита.
$B_0$	остаточная намагниченность.
$\tau_m$	полюсное деление индуктора.
$p$	число пар полюсов.
$l_{sp}$	длина воздушного зазора.
$l_l$	длина индуктора.
$\psi$	потокосцепление.
$L$	индуктивность.
$L_{\sigma n}$	индуктивное сопротивление пазового рассеяния.
$\lambda_n$	относительная магнитная проводимость рассеяния паза.
$L_{\sigma z}$	индуктивное сопротивление рассеяния по коронкам зубцов.

$\lambda_z$	относительная магнитная проводимость рассеяния по коронкам зубцов.
$R_{sp}$	активное сопротивление обмотки.
$\rho_{cu}$	сопротивление меди.
$l_{Le}$	длина проводника.
$A_{Le}$	сечение проводника.
$r_{spm}$	средний радиус катушки обмотки.
$\theta$	температура обмоток.
$P_{vfe}$	потери в стали статора.
$P_{vcu}$	потери в обмотках.
$P_{vfe,Hu}$	потерь на перемагничивание в электротехнической стали (потери на гистерезис).
$P_{vfe,Wi}$	потери от вихревых токов.
$W_{hys}$	энергия на потери гистерезисе.
$p_{1,5/50}$	удельные потери в стали на единицу массы при частоте 50 Гц и индукции 1,5 Т.
$B$	средние значения индукции.
$k_z$	коэффициент, учитывающий увеличение потерь вследствие обработки стали.
$\sigma_{wb/50Hz,1,5T}$	потери от вихревых токов при частоте 50 Гц и индукции 1,5 Тл.
$I_{eff}$	эффективный ток.
$P_{эл}$	выходная мощность ОЭМВПД в режиме генератора.
$P_{мех}$	механическая мощность, передаваемая от приводного механизма.
$P_{ст}$	потери мощности в стали статора.
$P_{меди}$	потери мощности в обмотке статора.
$P_{доб}$	добавочные потери.
$f$	частота перемещения индуктора.

$i(t)$	проекция пространственного вектора тока на оси двухфазной стационарной системы координат $\alpha$ - $\beta$ ; проекции пространственного вектора тока на оси трёхфазной системы координат $a, b, c$ .
$p(t)$	действительная мгновенная мощность.
$q(t)$	мнимая мгновенная мощность.
$Q$	тепловой поток.
$R_{th}$	тепловое сопротивление.
$P_{эл}$	мощность электрических потерь.
$G$	теплопроводность.
$R_{th}$	тепловое сопротивление.
$T$	температура.
$x_i$	коэффициент.
$P_{общ}$	общая мощность потерь.
$R_w$	сопротивление обмотки.
$R_0$	сопротивление обмотки при нормальных условиях.
$\alpha$	температурный коэффициент.
$\rho$	плотность материала.
$V$	объем катушки.
$A$	поперечное сечение обмотки.
$s$	длина обмотки; толщина слоя.
$\lambda$	коэффициент теплопроводности
$Nu$	число Нуссельта.
$\alpha_{kk}$	коэффициент теплопередачи канала охлаждения.
$d_i$	характерный размер.
$\lambda_{в}$	коэффициент теплопроводности воды.
$b_{kk}$	ширина канала охлаждения.
$h_{kk}$	высота канала охлаждения.

$Pr$	число Прандтля.
$l_k$	длина канала охлаждения.
$\nu_{\text{воз}}$	вязкость воздуха.
$C$	теплоемкость.
$N$	количество витков.
$F_{\text{мех}}$	сила, приложенная к валу ОЭМВПД.
$F_{\text{торм}}$	тормозная сила, создаваемая потерями на трение, магнитными и добавочными потерями.
$F_{\text{элмагн}}$	электромагнитная сила, развиваемая транслятором.
$F_{\text{инерц}}$	сила инерции подвижных частей ОЭМВПД.
$v$	скорость движения индуктора.
$P_e$	максимальная электрическая мощность генератора.
$f_{\text{мод}}$	частота модуляции.
$I_{\text{IGBT}}$	мгновенное значение тока в модуле IGBT.
$V_{ce}(I_c)$	зависимость потери напряжения в IGBT модуле от тока.
$E_{sw}(on)$	потери на включения.
$E_{sw}(off)$	потери на отключения.
$F$	полезная сила на валу индуктора.

### Индексы

$min$	минимальный объем.
$max$	максимальный объем.
$s$	статор
$er$	постоянный магнит.
$sp$	воздушный зазор.

## Сокращения

ЭМВПД	электрическая машина возвратно-поступательного действия.
НИИ	научно-исследовательский институт.
АИЭ	автономный источник электроснабжения.
ЭМГ	электромеханические генераторы.
ЭХГ	электрохимические генераторы.
АБ	аккумуляторные батареи.
МГП	массо-габаритные показатели.
ГТД	газотурбинный двигатель.
ДС	двигатель Стирлинга.
АД	адиабатный двигатель.
АСГ	асинхронизированный синхронный генератор.
СГ	синхронный генератор.
СГВВ	синхронный генератор с вращающимися выпрямителями.
САЭ	система автономного электроснабжения.
СЭМПМ	синхронная электрическая машина с постоянными магнитами
СЭДПМ	синхронный электрический двигатель с постоянными магнитами
ВПД	высокоскоростной приводной двигатель.
КСПД	комбинированный свободно-поршневой двигатель.
СПДВС	свободно-поршневой двигатель внутреннего сгорания.
КШМ	кривошипно-шатунный механизм.
БЭМ	бесконтактная электрическая машина.
СГПМ	синхронный генератор с постоянными магнитами.

АГ	асинхронный генератор с конденсаторным возбуждением.
ПМ	постоянные магниты.
ПЭ	подвижный элемент.
ИМ	индукторная машина.
СГВПД	синхронный генератор возвратно-поступательного движения.
ФНЧ	фильтр низких частот.
ФАПЧ	фазовая автоподстройка частоты.
ККМ	корректор коэффициента мощности.
МКЭ	метод конечных элементов.
УВ	управляемый выпрямитель.
ГА	генетический алгоритм.
УЗО	устройство защитного отключения.
ИБП	источник бесперебойного питания.
СУММЭМ	система управления макетом модуля электрической машины.
ШИМ	широтно-импульсная модуляция
<i>БКПС</i>	блок компенсации перекрестных связей.
<i>НССИ</i>	<i>Homogeneous charge compression ignition.</i>
<i>PLL</i>	<i>Phase Locked Loop.</i>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

Синхронные электрические машины с постоянными магнитами (СЭМПМ) находят все большее применение в различных технических комплексах.

Синхронные электрические двигатели с постоянными магнитами (СЭДПМ) используются в областях, где традиционно применялись двигатели постоянного тока (ДПТ) или асинхронные двигатели (АД), таких, как привод циркулярных насосов, привод компрессоров в холодильной технике, в системах вентиляции, в буровых установках, в станках-качалках добычи нефти. Причинами этого являются существующая тенденция к уменьшению стоимости магнитных материалов (внедрением сплавов редкоземельных металлов), а также совершенствование аппаратной базы управления. Появление соответствующей преобразовательной и цифровой вычислительной техники позволяет применять СЭДПМ как альтернативу ДПТ в регулируемом электроприводе. Существенный толчок дало внедрение преобразователей на транзисторах с изолированным затвором *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)* и использование принципов широтно-импульсной модуляции.

В дополнение к высокой энергоэффективности современные СЭДПМ имеют более компактную конструкцию. Структура СЭДПМ делает их значительно меньше и легче, чем аналогичные асинхронные двигатели. Габариты СЭДПМ соответствуют типоразмеру, который меньше на два стандартных размера, что создает возможность для более компактной конструкции машины.

Большой вклад в развитие теории, разработку методов и алгоритмов проектирования синхронных электрических машин с постоянными магнитами внесли коллективы НИУ «МЭИ», НИУ «МАИ», СПбГЭТУ ЛЭТИ, НГТУ, ЧГУ, РГУПС, КАИ, КНИТУ и ряд других организаций, известные отечественные и зарубежные ученые А. К. Аракелян, А. А. Афанасьев, А.Ф. Шевченко, А.В. Иванов-Смоленский, Ф.М. Юферов, И.Л. Осин, П.Г. Колпахчян, М.Я. Хитерер,

И.Е. Овчинников, А.И. Москвитин, М.М. Соколов, Л.К. Сорокин, Е.В. Козаченко, И.В. Черных, Ф.Н. Сарапулов, Р.Т. Шрейнер, Л.В. Клименко, Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев, Е.В. Сергеенкова, F. Milanesi, N. Bianchi, S. Bolognani, H. Polinder, J.F. Gieras и многие их коллеги.

Однако большинство методов, рассмотренных в работах вышеперечисленных авторов, ограничено проектированием СЭМПМ без учета их работы в составе генерирующих и приводных комплексов и влияния динамических и тепловых процессов, не рассмотрены методы топологической оптимизации индукторов и роторов СЭМПМ, позволяющие определить новые конструктивные решения для создания энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

За счет высокого коэффициента мощности и КПД СЭДПМ, снижаются потери в системе электроснабжения, растет КПД всей системы по сравнению с применением асинхронных двигателей. Использование СЭДПМ вместо асинхронных двигателей, например, для привода станков-качалок позволит повысить энергоэффективность нефтедобычи.

СЭМПМ применяются в составе генераторных комплексов малой энергетики.

На сегодняшний день подавляющая часть электрической энергии в Российской Федерации вырабатывается на крупных электростанциях и распространяется по электрическим сетям общего пользования. Тем не менее, по разным оценкам, 60 –70% территории России не охвачены централизованным электроснабжением. На этой территории проживает более 20 млн. человек и жизнедеятельность людей обеспечивается главным образом средствами малой энергетики.

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года определила развитие малой энергетики в качестве одного из ключевых направлений развития энергетического сектора. В стране уже сегодня функционируют порядка 50 тысяч

объектов малой распределенной генерации. Однако в ближайшие 7 –10 лет должна быть поставлена задача в несколько раз увеличить их суммарную установленную мощность, которая в настоящее время составляет 12 ГВт, и увеличить на них производство электроэнергии (сейчас – 24 млрд.кВт·ч) с целью еще более надежного электроснабжения потребителей (по официальным данным МинЭнерго России).

Основные направления совершенствования роторов и индукторов СЭМПМ связаны с повышением магнитных свойств и характеристик постоянных магнитов, обеспечением стабильности свойств и характеристик в условиях повышенных температур и механических нагрузок, совершенствованием конструкций и технологий их изготовления.

Широкое применение получают мобильные и стационарные энергоустановки малой энергетики (мощностью до 100 кВт) на базе двигателей внутреннего сгорания, производящие электроэнергию для сверхмалых одиночных потребителей, а также используемых в качестве источников энергии в гибридном автотранспорте.

В качестве электромеханического преобразователя энергии в таких энергоустановках рационально использовать синхронную электрическую машину возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами (ЭМВПД с ПМ), построенные по модульному принципу. Это позволит масштабировать энергоустановку по мощности для конкретной задачи.

Работа электрической машины совместно в одном корпусе с свободно-поршневым двигателем внутреннего сгорания (СПДВС) накладывает особые ограничения по температуре, которая может достигать 150°C. Электромагнитное управление ходом индуктора электрической машины и контроль положения индуктора позволяют упростить конструкцию свободно-поршневого двигателя и улучшить массогабаритные показатели энергоустановки в целом.

Предлагаемая тема является новой и не достаточно изученной в ключе

совместного использования электрической машины возвратно-поступательного действия и свободно-поршневого двигателя внутреннего сгорания.

В работе предлагается современный метод проектирования и оптимизации СЭМПМ с использованием генетического алгоритма.

Разработан алгоритм анализа, многокритериальной и топологической оптимизации роторов и индукторов СЭМПМ. Предполагается, что ротор и индуктор с постоянными магнитами должен иметь несложную конструкцию для простоты изготовления и повышенный вращающий момент или линейную силу по сравнению с базовым образцом.

Проектирование электрической машины как эвристический процесс - не гарантирует нахождение лучшего решения. Необходимы методы дополняющие опыт и интуицию проектировщика для нахождения оптимального (рационального) решения. Топологическая оптимизация на данный момент выполняется с помощью метода конечных элементов (МКЭ) для снижения массы и улучшения жесткостных характеристик конструкций. Предлагаемый метод позволяет перенести топологическую оптимизацию на электромагнитные процессы в СЭМПМ для определения направления намагниченности постоянных магнитов, размеров пазов статора и постоянных магнитов с целью повышения КПД и надежности электрической машины при заданных массо-габаритных показателях.

Таким образом, развитие методических решений проектирования, оптимизация конструктивных параметров и разработка энергоэффективных СЭМПМ в составе генерирующих и приводных комплексов является важной научной задачей.

**Объект исследования:** синхронные электрические машины с постоянными магнитами.

**Предмет исследования:** методы расчета параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и

приводных комплексов.

**Целью** диссертационной работы является создание энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами, предназначенных для генерации электрической энергии в составе автономных энергоустановок и привода различных механизмов.

Для достижения поставленной цели в настоящей диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

- 1) исследование и анализ основных направлений создания, алгоритмов, методов проектирования и оптимизации синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов;
- 2) разработка математических моделей термодинамических, электромеханических процессов в генерирующих и приводных комплексах, включающие в себя проектируемые параметры СЭМПМ.
- 3) разработка методов и алгоритмов для оптимизации конструкции статора, ротора, индуктора и элементов магнитной цепи СЭМПМ с целью повышения энергетических характеристик электрической машины и, соответственно, генераторных и приводных комплексов в целом;
- 4) разработка комплекса программ для моделирования и оптимизации конструктивных параметров элементов СЭМПМ в составе генерирующих и приводных комплексов, учитывающих взаимное влияние кинематических, динамических, энергетических и тепловых характеристик СЭМПМ, что позволяет осуществить подробную параметризацию геометрии СЭМПМ для проработки различных конфигураций электрической машины;
- 5) создание конструкции СЭМПМ с повышенными энергетическими характеристиками с учетом влияния динамических и тепловых процессов на основе разработанных алгоритмов и программ;
- б) разработка экспериментального стенда для проведения исследований

кинематических, динамических, энергетических и тепловых характеристик СЭМППМ.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы теории электротехники, теории электрических машин, теории теплотехники, теории оптимизации. Исследования проводились с использованием сред математического моделирования *Matlab 2010*, *Comsol Multiphysics*, *Elcut*. Для проверки корректности математических моделей использовались экспериментальные исследования на испытательном стенде.

**На защиту выносятся.**

1. Математическая модель генерирующего комплекса с СПДВС на базе синхронной ЭМВПД с ПМ, позволяющая детально провести выбор и оптимизацию ширины воздушного зазора, ширины и высоты паза статора, ширины зубца статора, ширины ярма статора, ширины ярма индуктора, высоты магнита электрической машины возвратно-поступательного действия.

2. Математическая модель приводного комплекса штанговой скважинной насосной установки (ШСНУ) на базе синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, позволяющая провести выбор и оптимизацию размеров магнитов по заданному значению магнитного потока и заданным размерам ротора и статора двигателя, а также определить магнитный поток при известной конструкции ротора и статора.

3. Программный комплекс, реализующий алгоритмы расчета термодинамических процессов в СПДВС, электромеханических процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ, тепловых процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ, а также позволяющий производить прочностные расчеты конструкции синхронной ЭМВПД с ПМ и оптимизацию конструктивных параметров генерирующего комплекса с СПДВС на базе синхронной ЭМВПД с ПМ.

4. Методики оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора

синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимума электромагнитной силы и максимальной генерируемой мощности.

5. Методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами по критерию максимизации номинального момента  $M_n$  и минимизации массы магнитов  $m_{ПМ}$  для уменьшения стоимости электрической машины.

6. Новый метод топологической оптимизации СЭМПМ с целью получения максимально возможной электромагнитной силы или электромагнитного момента, на основе рационального распределения материалов в индукторах и роторах СЭМПМ с использованием генетического алгоритма, а также повышения технологичности их изготовления путем объединения однотипных материалов по кластерам и внедрения процедуры «очистки» для получения однородной структуры кластеров.

7. Экспериментальный образец синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 3-11 кВт, с температурным рабочим диапазоном от 0°C до 150 °C и усилием на индукторе электрической машины до 11 кН, разработанный с использованием новых методических решений, имеющего модульную конструкцию и предназначенного для генерации электрической энергии и привода механизмов в агрессивной среде в составе автономных объектов.

**Теоретическая значимость** заключается в развитии теории расчета параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов, а также разработке методов многокритериальной и топологической оптимизации конструкции роторов и индукторов СЭМПМ, что позволяет улучшить энергетические и массогабаритные характеристики СЭМПМ.

**Практическая значимость работы.**

Предложенные в диссертации методы и алгоритмы расчета параметров синхронной ЭМВПД с ПМ и конструкторская документация для испытательного стенда использованы в прикладных научных исследованиях в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно - технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» Соглашение № 14.577.21.0121 от 20.10.2014 г. «Разработка экспериментального образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 10-20 кВт для тяжелых условий эксплуатации», приоритетное направление развития науки, технологий и техники в Российской Федерации: Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика.

Методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя использована при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства на тему: «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений», в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218, договор № ДР-936/17 от 26 октября 2017 года с участием ФГБОУ ВО «КГЭУ» и АО «ЧЭАЗ».

Метод топологической оптимизации СЭМПМ реализован в рамках грантов Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка нового метода проектирования и программно-аппаратного комплекса для повышения энергоэффективности и надежности линейных электрических машин возвратно-поступательного действия» № 17-48-160438 и «Разработка метода проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными

магнитами для привода станков-качалок с целью повышения энергоэффективности нефтедобычи» № 18-48-160023. Приоритетное направление, определённых Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации - Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии. Разработано программное обеспечение для проектирования индукторов и роторов СЭМПМ (Свидетельство № 2018613530, Свидетельство № 2019610240).

Разработанное математическое и программное обеспечение для расчета и выбора рациональных параметров СЭМПМ могут быть использованы НИИ и проектными организациями электротехнической промышленности на этапе проектирования СЭМПМ.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается корректной постановкой исследовательских задач и их физической обоснованностью, использованием современного программного обеспечения и комплексным подходом к проведению исследований; сходимостью теоретических и экспериментально полученных результатов; непротиворечивостью результатам подобных исследований других авторов и основным положениям науки; использованием сертифицированных и поверенных образцов и контрольно-измерительной аппаратуры, а также применением математического анализа при обработке полученных результатов с использованием современных средств вычислительной техники.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем.

1. Разработана математическая модель работы свободнопоршневого двигателя (СПДВС) стандартного цикла Отто с учетом диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, степени сжатия, хода поршня, теплоты сгорания топлива и сил трения, позволяющая определить положение и скорость индуктора

синхронной ЭМВПД с ПМ в составе автономного источника электроснабжения, для последующего расчета энергетических характеристик и оптимизации конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ.

2. Разработана методика расчета электромагнитной силы синхронной ЭМВПД с ПМ через отображение уравнения линейной токовой нагрузки и индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, в виде ряда Фурье, что позволяет ввести в расчетные формулы конструктивные параметры статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ с целью повышения качества алгоритма оптимизации.

3. Разработана тепловая модель синхронной ЭМВПД с ПМ, позволяющая определить конструкцию системы охлаждения статора, рассчитать максимально допустимую выдаваемую мощность синхронной ЭМВПД с ПМ, определить параметры, влияющие на теплоотдачу, определить меры по тепловой защите синхронной ЭМВПД с ПМ.

4. Предложена эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с встроенными магнитами в составе станка-качалки нефти. Полученная на основе данной схемы система уравнений позволяет аналитически определять требуемые размеры магнитов по заданному значению магнитного потока и заданным размерам ротора и статора двигателя и магнитный поток, рабочую точку магнита при известной конструкции ротора и статора.

5. Разработан комплекс имитационных моделей автономного источника электроснабжения на базе синхронной ЭМВПД с ПМ, что позволяет на основе единой базы данных совместить моделирование тепловых, механических и электромагнитных процессов и оптимизацию конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ.

6. Разработаны новые методики оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимума

намагничивающей силы и максимальной генерируемой мощности на основе генетического алгоритма, что позволяет рассматривать при проектировании двигательный и генераторный режимы синхронной ЭМВПД с ПМ.

7. Предложена методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами позволяющая получить множество допустимых решений, что предоставляет возможность проектировщику, имея информацию о предпочтительных характеристиках, определить наиболее приемлемое решение.

8. Разработан новый метод топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах СЭМПМ с использованием генетического алгоритма, что позволяет проектировать СЭМПМ с новыми топологиями ( в том числе и с новыми композиционными материалами), более высокой энергоэффективностью и низкой стоимостью производства.

#### **Соответствие паспорту специальности.**

Диссертация соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты.

Полученные в работе научные результаты соответствуют пп. 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов», пп.3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии», пп.5 «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов» Паспорта специальности.

#### **Внедрение результатов.**

Полученные в диссертации алгоритмы и методы расчета параметров синхронной ЭМВПД с ПМ использованы при разработке экспериментального

образца синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 3-11 кВт и испытательного стенда для проведения углубленных исследований ее характеристик. Получены акты изготовления экспериментального образца и испытательного стенда для проведения углубленных исследований характеристик синхронной ЭМВПД индустриальным партнером ЗАО «МПОТК «Технокомплект».

Разработанная методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами использована при создании опытных образцов синхронных электрических двигателей с постоянными магнитами. Получен акт внедрения результатов диссертационной работы на предприятии АО «Чебоксарский электроаппаратный завод».

Теоретические результаты диссертации и разработанное программное обеспечение применяются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», которое используется бакалаврами, магистрантами и аспирантами при выполнении научно-исследовательских работ.

#### **Апробация работы.**

Основные положения и научные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: III Всероссийской научно–практической конференции «Системы управления электротехническими объектами» (г.Тула, 2005 г.), V Международном симпозиуме «Ресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2004 г.); VI Международном симпозиуме «Ресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2005 г.); X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2015 г.); XV Международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2015 г.); Семинаре «Развитие научно-технического сотрудничества России и ЕС в области повышения

энергетической эффективности» (г. Москва, 2015 г.); VII Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (г. Новосибирск, 2015 г.); X открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в энергетике» (г. Казань, 2015 г.); Выставке «ВУЗПРОМЭКСПО-2015» (г. Москва, 2015 г.); Международной специализированной выставке «Энергетика. Ресурсосбережение-2016» (г. Казань, 2016г.); Выставке «ВУЗПРОМЭКСПО-2016» (г. Москва, 2016 г.); Международная научно-практическая конференция посвященная 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой области», 28-29 октября 2016 г., Россия, г. Альметьевск, Альметьевский государственный нефтяной институт; Поволжской научно-практической конференция "Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», 8-9 декабря 2016 г., Россия, г. Казань, Казанский государственный энергетический университет; International Scientific and Technical Conference SES-2019 (Kazan, September 18-20, 2019); Заседаниях кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ» (2005-2019 г.г.).

**Публикации результатов исследования.** По теме диссертации опубликованы 47 печатных работ в журналах и сборниках, в том числе 14 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 11 статей индексируемых в международных базах данных SCOPUS или/и Web of Science, 1 монография, также получено 2 патента на полезную модель, 7 свидетельств на программы для ЭВМ и 12 работ в сборниках материалов конференций. Список основных публикаций автора приведен в конце автореферата, полный список – в диссертации.

**Личный вклад автора.** Поставил цели и задачи исследования. Сформулировал и предложил математические модели генерирующего и приводного комплекса на базе СЭМПМ. Разработал имитационные модели генерирующего

комплекса на базе синхронной ЭМВПД с ПМ, учитывающая конструктивные параметры электрической машины, а также усилия на шток индуктора и длину его хода. Разработал методику оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимальной генерируемой мощности. Участвовал в разработке методики оптимизации конструктивных размеров статора и ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами по критерию максимального номинального момента. Совместно с научным коллективом по грантам РФФИ разработан метод топологической оптимизации СЭМПИ для распределения материалов в роторах и индукторах с использованием генетического алгоритма. Предложена концепция кластеризации материалов и процедура «очистки» материалов. Сформулировал алгоритмы для программного комплекса по оптимизации конструктивных параметров СЭМПИ. Автор провел экспериментальные исследования на испытательном стенде для углубленных исследований характеристик синхронной ЭМВПД с ПМ.

Постановка задач, направление и методология исследований осуществлялась совместно с научным консультантом, д-ром техн. наук профессором Ившиным И.В.

Постановка задач, направление и методология исследований осуществлялась совместно с научным консультантом профессором Ившиным И.В.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 352 страницах текста, включает 148 рисунков, 27 таблиц, библиографию из 209 наименований, содержит 10 приложений.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному консультанту д-ру техн. наук, профессору Ившину И.В. за помощь и ценные замечания в ходе выполнения диссертационной работы.

## 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СЭМПИМ В СОСТАВЕ ГЕНЕРИРУЮЩИХ И ПРИВОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ

1.1. Обзор и классификация автономных источников электроснабжения на базе электромеханических генераторов. Анализ методов и способов повышения энергоэффективности автономных источников электроснабжения

К генераторам автономных источников электроснабжения (АИЭ) предъявляются ряд особых требований, основными из которых являются:

1) Поддержание амплитуды, частоты и формы напряжения при влиянии внешних факторов, таких как переменная частота приводного механизма, высокие температуры, вибрации, переменная нагрузка.

2) минимальные массо-габаритные характеристики при необходимости постоянно увеличивать установленную (расчетную) мощность;

3) высокий КПД и надежность работы АИЭ;

4) низкая стоимость и небольшие эксплуатационные расходы.

Параметры АИЭ представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Основные показатели АИЭ

Тип АИЭ	Диапазон мощности, кВт	Напряжение, В	КПД	Удельная масса, кг/кВт
ЭМГ	1-10 <sup>4</sup>	10-10 <sup>4</sup>	0,8-0,9	0,2-12
ЭХГ	1-100	10-100	0,4-0,7	5-50
АБ	0,1-10	10-100	0,6-0,9	0,002-0,01 (кг/кДж)

Анализ научной и технической литературы показал, что на данный момент электромеханические генераторы (ЭМГ) являются наиболее универсальными источниками электроэнергии как переменного, так и постоянного тока с широким диапазоном мощностей и напряжений. Стоит отметить, что бесконтактные ЭМГ

обладают хорошими массо-габаритными показателями (МГП), КПД, а также имеют готовый технологический цикл изготовления [1].

Электрохимические генераторы (ЭХГ) обладают хорошим КПД и значительным ресурсом работы. Их основные недостатки: большая масса и габариты, сложность регулирования параметров электроэнергии.

Аккумуляторные батареи (АБ) используются в АИЭ как резервные источники или как накопители энергии, как и ЭХГ имеют средний уровень ресурса и относительно высокую стоимость.

Электромеханические генераторы (ЭМГ) являются наиболее распространёнными источниками электроэнергии переменного и постоянного тока с широкой линейкой мощностей и напряжений. ЭМГ обладают хорошими МГП, КПД и обработанностью серийного производства.

Недостатком является наличие вращающихся частей, что приводит к снижению ресурса.

Приводные двигатели ЭМГ оказывают решающее значение на эксплуатационно-технические характеристики АИЭ, и как следствие на ресурс работы.

Аналитический обзор продукции ведущих отечественных и зарубежных фирм показывает, что основным трендом в развитии двигателестроения в ближайшем будущем является оптимизация рабочего процесса, что повышает эксплуатационно-технические характеристики приводных механизмов ЭМГ. Значительное внимание уделяется развитию и внедрению свободнопоршневых двигателей, двигателей Стирлинга (ДС) и адиабатных двигателей (АД).

В настоящее время в автономной энергетике используются ЭМГ переменного тока – асинхронизированные синхронные генераторы (АСГ), которые объединяют в своем составе электрические машины и полупроводниковые преобразователи электроэнергии.

АСГ устойчиво работают во всех эксплуатационных режимах, в том числе и при изменении частоты вращения приводного двигателя (ПД). Требования к приводам АСГ по точности стабилизации частоты вращения значительно

снижены в сравнении с требованиями, предъявляемыми к приводам традиционных синхронных генераторов (СГ). Области устойчивости АСГ, при прочих равных условиях, всегда больше областей устойчивости СГ, особенно в режимах глубокого потребления реактивной мощности.

Стоит отметить следующие недостатки АСГ: трудность установки демпферных контуров на роторе; значительная масса; низкие показатели надежности генератора в целом из-за сложности системы управления.

Большие перспективы имеют синхронные генераторы с вращающимися выпрямителями (СГВВ).

Отечественной промышленностью освоен выпуск СГВВ мощностью 10 – 2500 кВА, частотой вращения ротора 750 – 1800 об/мин, имеющие КПД 0,82 – 0,95 и удельную массу 3,6 – 18 кг/кВт.

Недостатками СГВВ являются: сложная силовая электрическая схема, наличием на роторе обмоток, полупроводниковых приборов, фильтров и т.п., что снижает надежность, ограничивает предельно допустимые частоты вращения ротора и температуры.

Требуются новые методы и принципы конструирования АИЭ для повышения их энергетических и технических характеристик.

Одним из перспективных направлений позволяющим значительно улучшить характеристики систем автономного электроснабжения (САЭ) является применение в составе АИЭ высокоскоростных приводных двигателей (ВПД) ГТД или комбинированных свободно-поршневых двигателей (КСПД).

Одним из перспективных направлений является использование в АИЭ свободно-поршневых двигателей внутреннего сгорания (СПДВС) (рисунок 1.1) [2].

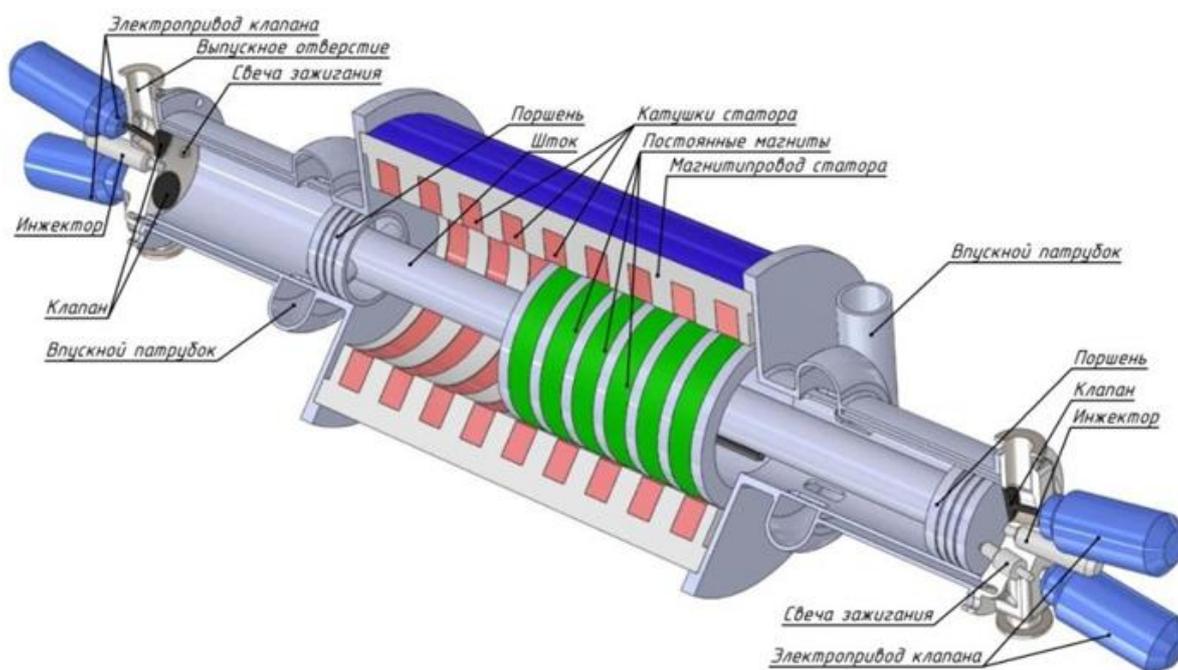


Рисунок 1.1. Конструкция электрической машины возвратно-поступательного действия на основе свободнопоршневого двигателя

В сравнение с эксплуатируемыми в настоящее время дизельными двигателями СПДВС согласно литературным источникам имеет следующие преимущества:

- работают на любых сортах топлива, включая мазут и сырую нефть;
- обладают способностью экономичной работы на малых нагрузках;
- отсутствие кривошипно-шатунного механизма и механизма газораспределения повышает их надежность и ремонтпригодность;
- имеет относительно высокий КПД (до 40%, а при изготовлении поршней на керамической основе может достигнуть до 50%);
- имеет хорошие МГП, удельная масса равна 3,5 – 5,5 кг/кВт;
- имеет большой ресурс работы (более 50000 ч) [3].

В номенклатуре СПДВС на 40 % меньше элементов, чем в классическом двигателе с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) и в нем отсутствуют

вращающиеся детали. Все это позволяет улучшить МГП и снизить механическую нагрузку на детали двигателя.

Механический КПД СПДВС может достигать значения 0,93–0,95, что существенно превышает уровень ДВС с КШМ, находящийся в диапазоне 0,8–0,85. Простая конструкция СПДВС позволяет снизить расходы на изготовление, эксплуатацию и обслуживание АИЭ с данными силовыми агрегатами [4].

Важным преимуществом СПДВС при использовании его с синхронной ЭМВПД с постоянными магнитами является возможность изменения геометрической степени сжатия в двигателе, что позволяет работать не только на бензине всех марок, но и на дизельном топливе, биотопливе и газовом топливе. При этом в случае использования бензина реализуется процесс управляемого самовоспламенения *НССИ* (*Homogeneous charge compression ignition*), что повышает экономичность АИЭ [5].

Еще одним преимуществом СПДВС является его модульность. В зависимости от необходимой мощности используется несколько установок равной мощности, что позволяет повысить МГП, в сравнении с энергоустановкой на базе ДВС с КШМ.

Необходимо отметить недостатки АИЭ на базе СПДВС:

- одноцилиндровый СПДВС является инерционно неуравновешенным, что приводит к значительному виброакустическому воздействию;
- СПДВС, не содержащий вращающихся частей, что вызывает трудности для системы газораспределения посредством распределительного вала, а прямой привод клапанов находится на стадии экспериментальных разработок [6].

СПДВС должны работать совместно с бесконтактными электрическими машинами (БЭМ), обладающие высокой надежностью и имеющие улучшенные характеристики в сравнении с контактными генераторами электроэнергии.

БЭМ в будущем составят основу развития автономной электроэнергетики в диапазоне мощностей от десятков ватт до сотен киловатт. К ним, несомненно, относятся СЭМПМ и асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением (АГ) [7].

СЭМПМ просты в конструкции, имеют высокий КПД, надежны, малоинерционны в переходных процессах, имеют хорошие энергетические характеристики.

Широкие перспективы в создании СЭМПМ открывает промышленное освоение материала неодим–железо–бор ( $NdFeB$ ), имеющий высокие магнитные свойства и тенденцию к уменьшению цены, используемого для изготовления постоянных магнитов (ПМ) систем возбуждения СГПМ. Использование редкоземельных материалов улучшает МГП генераторов. Сдерживающим фактором в применении данных материалов является их относительно высокая стоимость, однако намечается тенденция к снижению их цены. [8].

Таким образом, отличительной особенностью СЭМПМ является зависимость их мощности от объема (массы), распределения в объеме машины (топологии) и качества (энергетических показателей) материала ПМ, используемых для создания магнитного поля.

Важная особенность СЭМПМ в сравнении с СГ с электромагнитным возбуждением – сложность регулирования и стабилизации выходного напряжения [9].

Одним из возможных способов стабилизации напряжения СЭМПМ – является установка во внешнюю электрическую цепь генератора емкостных элементов, способствующих появлению продольно намагничивающей реакции якоря или полупроводниковых преобразователей.

Таким образом, широкие перспективы раскрываются перед бесконтактными генераторами электроэнергии переменного тока СЭМПМ, обладающих повышенной надежностью, высокими динамическими качествами, малыми массами и габаритными размерами за счет повышенных механических, электромагнитных и тепловых нагрузок, возможностью работать в нестандартных окружающих условиях. Их роль в автономной электроэнергетике быстро возрастает. Повысить энергетические характеристики СЭМПМ возможно за счет использования новых материалов (на основе редкоземельных материалов,

высокопрочных сплавов), новых топологий и конструктивных решений, полученных на основе современных систем проектирования и оптимизации.

## 1.2. Использование различных типов линейных электрических машин возвратно-поступательного действия в автономных источниках электроснабжения

Несмотря на сравнительно ограниченное распространение по сравнению с вращательными, разновидностей возвратно-поступательных машин не меньше, а, скорее, даже больше. В основу положено принцип - явление электромагнитной индукции. Поэтому все виды вращательных машин имеют свои аналоги в линейном исполнении: асинхронные, синхронные, постоянного тока и шаговые.

Наличие возможности легко менять конструкцию магнитной цепи линейной машины в зависимости от условий эксплуатации, обуславливает большое количество типов данного типа машин.

Они могут быть плоскими или цилиндрическими, с движущимися первичной или вторичной частями, с продольным или поперечным направлением движения подвижной части относительно направления магнитного потока, одно- и двухкоординатными и т.д. [10].

По соотношению размеров статора и подвижного элемента линейные машины можно разделить на две группы: короткий подвижный элемент (ПЭ) – длинный статор, длинный подвижный элемент – короткий статор, как показано на рисунке 1.2 [11].

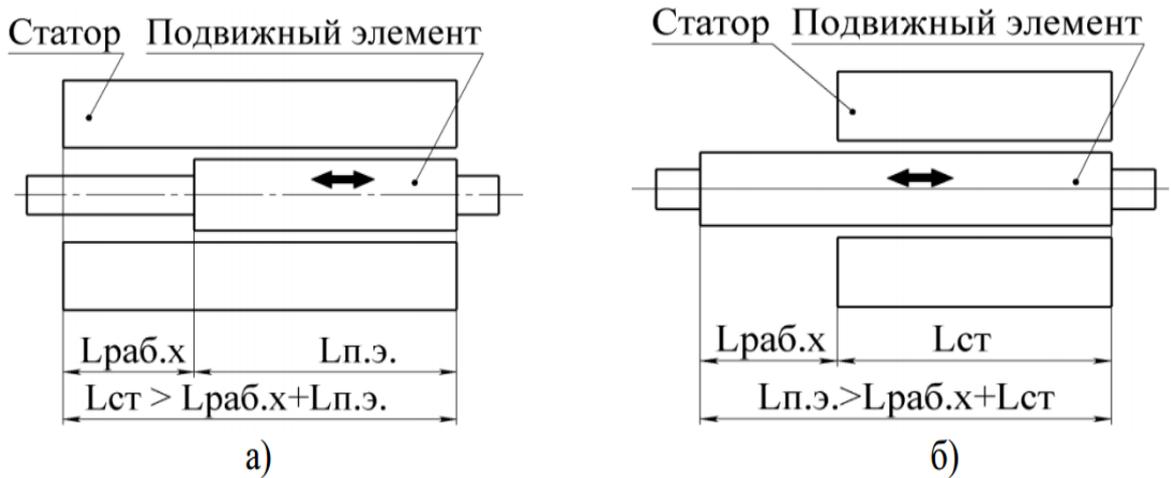


Рисунок 1.2. Варианты соотношения размеров линейной электрической машины

а) короткий ПЭ – длинный статор; б) длинный ПЭ – короткий статор

Конструкция с коротким подвижным элементом имеет меньшую массу индуктора, но увеличивает массу меди в длинном статоре, что приводит к увеличению стоимости электрической машины. Конструкция с длинным индуктором, что вызывает увеличение массы подвижного элемента, позволяет получить более высокую удельную производительность. Для эффективного использования активного материала, по крайней мере, одна из составных частей машины должна быть не меньше длины хода, а другая – длиннее на величину рабочего хода. В конструкциях с коротким подвижным элементом, последний определяет активную длину, в то время как в конструкциях с коротким статором определяющей становится длина статора [12].

Недостатком плоских машин является наличие поперечного краевого эффекта, что приводит к рассеиванию магнитного потока, что приводит к снижению КПД. Плоская форма затрудняет установку в моторном отсеке транспортного средства.

Одна из схем основана на различных исполнениях конструкции подвижного элемента, приведенных на рисунке 1.3 [13]:

а) подвижный элемент с подвижными катушками;

- б) подвижный элемент с постоянными магнитами;
- в) подвижный элемент в виде стального сердечника (коммутатора) с электромагнитным возбуждением;
- г) подвижный элемент в виде стального сердечника (коммутатора) с возбуждением от постоянных магнитов.

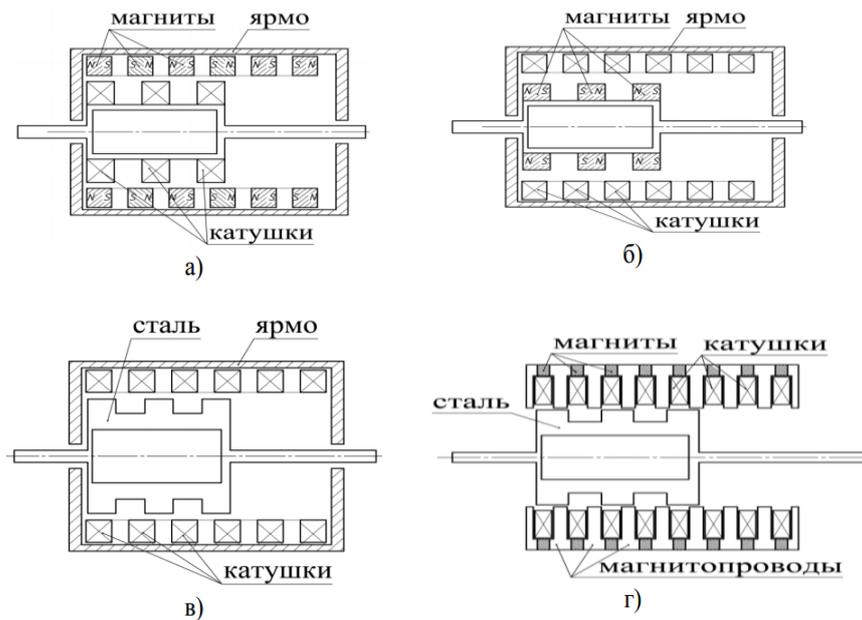


Рисунок 1.3. Классификация линейных электрических машин по типу конструкции

Выбор той или иной машины для конкретного механизма определяется его свойствами, а также режимами работы, позволяющими наиболее эффективно его использовать.

Не существует двигателей, которые решали бы весь спектр технических задач. Линейные асинхронные и синхронные двигателя используются для скоростей 3 – 6 м/с, т.е. в транспортных устройствах.

Универсальных двигателей, пригодных для решения любой технической задачи, как известно, нет. Так, линейные асинхронные и синхронные двигателя применяются главным образом для перемещений до нескольких метров со скоростями 3 – 6 м/с, т.е. в транспортных устройствах. Линейные двигатели

постоянного тока позволяют регулировать скорость в широком диапазоне, чем выгодно отличаются от асинхронных и синхронных. Вместе с тем необходимость наличия равномерного магнитного поля на всем пути перемещения якоря, а также большой воздушный зазор, внутри которого находится обмотка, требуют развитой магнитной системы [14].

Внедрение постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов позволяет получать высокие удельные электромагнитные усилия.

В настоящее время во многих отраслях промышленности внедряются электромеханические линейные преобразователи энергии, работающий в режимах генератора или двигателя.

Отличительной особенностью линейных генераторов является многообразие и специфика конструкций и характеристик, что объясняется условиями эксплуатации и требованиями, которые к ним предъявляются. В связи с этим возникает необходимость проведения классификации линейных генераторов, которая позволит использовать известные математические модели при анализе существующих и разработке новых конструкций, а также подобрать генератор с требуемыми конструктивными и выходными характеристиками для использования в конкретных условиях.

По конструктивным признакам линейные генераторы на постоянных магнитах (ПМ) могут быть цилиндрической, плоской или комбинированной формы. Линейные генераторы с подвижной обмоткой и статором на ПМ выполняются преимущественно цилиндрической формы [15,16].

Постоянные магниты, применяемые как источник магнитного поля генератора, дают высокую плотность потока в воздушном зазоре, по сравнению с электромагнитным генератором для того же самого объема, что приводит к уменьшению массы и является важным условием при проектировании линейного генератора.

Магнитоэлектрические генераторы с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) имеют множество отличительных особенностей, таких как высокая плотность энергии и высокий КПД, они более предпочтительны в

качестве линейных генераторов возвратно-поступательного движения и принадлежат одной из следующих категорий: [16]

- 1) с подвижной обмоткой и статором на ПМ;
- 2) с подвижным ПМ;
- 3) с подвижным магнитопроводом и статором на ПМ.

При равных объемах активного пространства (объем обмоток на статоре и объем воздушного зазора) использование высокоэнергетических постоянных магнитов существенно выгоднее, чем подвижной обмотки возбуждения по величине силы, развиваемой на единицу объема и единицу массы, и как следствие, по удельной мощности. Кроме того, КПД при использовании ПМ выше, а условия охлаждения более благоприятны. При этом в определенных случаях магнитоэлектрический генератор значительно надежнее электромагнитного ввиду отсутствия скользящих контактов или гибких токопроводов, работающих в режиме вибрации. Линейные генераторы на ПМ могут иметь систему возбуждения, выполненную с радиально намагниченными ПМ, аксиально намагниченными ПМ. В цилиндрическом линейном генераторе с аксиальным (осевым) намагничиванием постоянного магнита, высокая сила сцепления («магнитная пружина») создается при взаимодействии постоянного магнита с зубцами статора. Так как сила сцепления становится серьезной проблемой, для ее уменьшения применяются радиально намагниченные постоянные магниты. Результатом решения проблемы также может быть использование радиально-тангенциальной конфигурации магнитов, имеющих чередующееся намагничивание (конфигурацию Хальбаха), что дает возможность повысить выходную мощность по сравнению с генераторами с радиальными магнитами и приводит к уменьшению массы подвижной части генератора. В эту же классификацию могут быть внесены и конструктивные исполнения системы возбуждения: одноименнополюсное, переменноплюсное, с односторонним по отношению к статору расположением подвижной части, с двухсторонним расположением и т.д. [11]

Дополнительная классификация по конструктивному признаку проводится по виду упругой связи: с помощью механических пружин, с «магнитными пружинами», комбинированной фиксации (пружины могут быть также выполнены в виде постоянных магнитов с одноименными полюсами).

На рисунке 1.5. изображена цилиндрическая трехфазная машина с постоянными магнитами, оборудована модульными статорными обмотками, которые расположены рядом друг с другом.

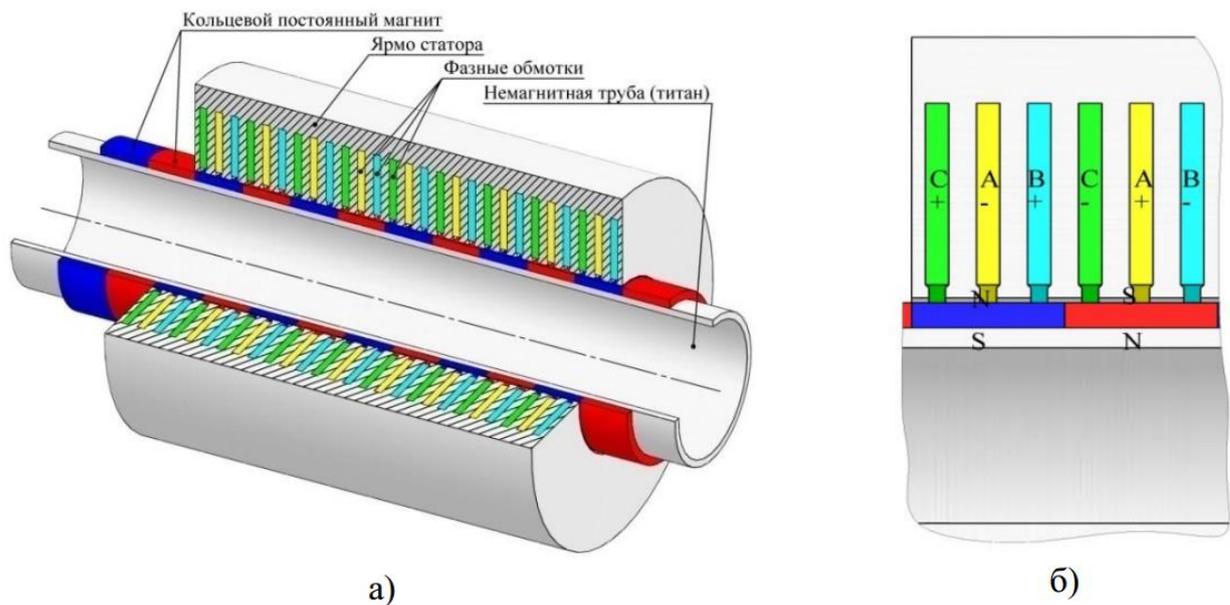


Рисунок 1.5. Структура электрической машины возвратно-поступательного действия с радиально-намагниченными магнитами на подвижном элементе: а) общий вид; б) схема фаз и полярности постоянных магнитов

Особенностью конструкции является подвижная магнитная система, использующая намагниченные магниты в виде квази-Halbach-структуры. Каждый полюс составлен из комбинации двух кольцевых магнитов, один из которых имеет радиальную намагниченность, а другой – аксиальную намагниченность. При этом получается синусоидально распределенный магнитный поток в воздушном зазоре. Особенность квази-Halbach намагниченности состоит в том, что осевые намагниченные магниты

предоставляют обратный путь для потока в воздушном зазоре, и, следовательно, поток во внутреннем отверстии арматуры относительно мал. Таким образом, постоянные магниты могут устанавливаться на немагнитной несущей трубе с высокой прочностью без большого снижения осевой несущей способности, вследствие чего значительно снижается масса подвижной конструкции, которая существенна для достижения высокой выходной мощности линейного генератора.

Кольцевые магниты на подвижном элементе могут иметь осевую (продольную) намагниченность. При этом магниты устанавливаются одноименными полюсами навстречу друг к другу. Преимуществом конструкции, изображенной на рисунке 1.6., является возможность достижения более высоких значений магнитного потока в магнитном зазоре [11].

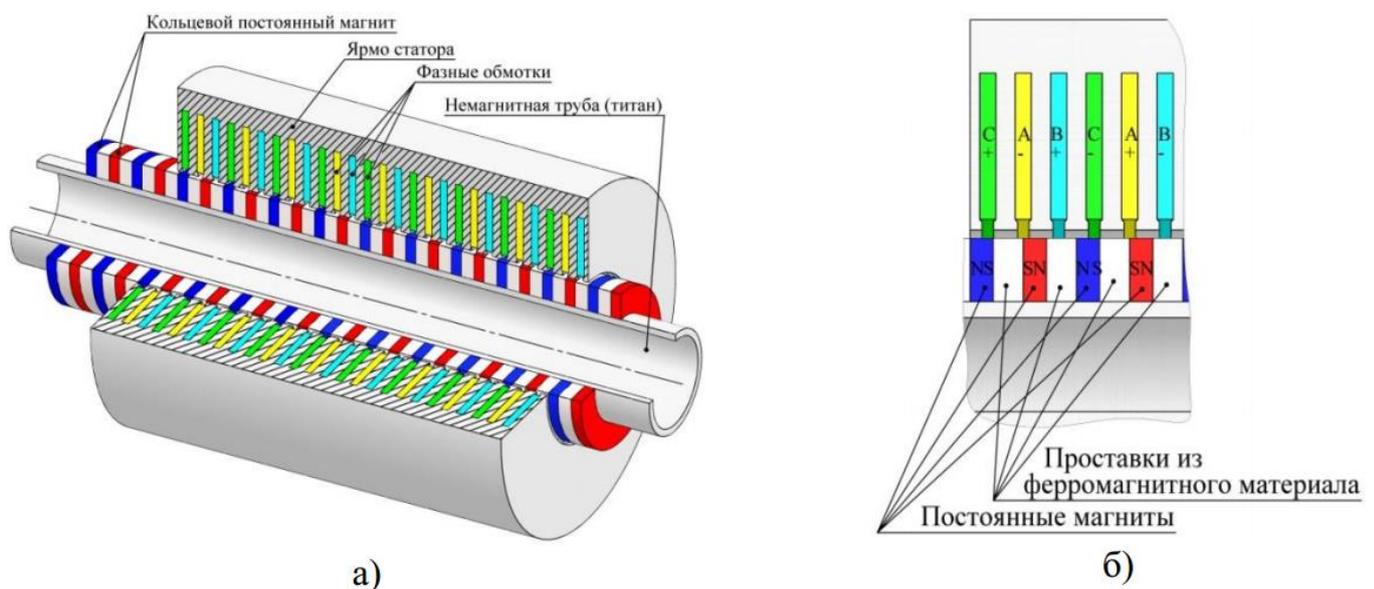


Рисунок 1.6. Структура электрической машины возвратно-поступательного действия с осевой намагниченностью на подвижном элементе: а) общий вид; б) схема фаз и полярности постоянных магнитов

Индукторные машины (ИМ), у которых магнитная индукция в каждой точке рабочего зазора меняется только по величине, имея постоянное направление, обладают следующими преимуществами:

- способность генерировать или использовать токи повышенной частоты;
- простота конструкции подвижного элемента;
- высокая надежность;
- хорошее регулирование;
- работоспособность в сложных окружающих условиях.

Однако главный недостаток индукторных машин проявляется в наличии постоянной составляющей магнитного потока, которая не участвует в наведении рабочей ЭДС, но и загружает магнитопровод, что приводит к существенному увеличению объема и массы магнитопровода по сравнению с другими типами синхронных машин. Конструкция ИМ с возбуждением от постоянных магнитов приведена на рисунке 1.7.

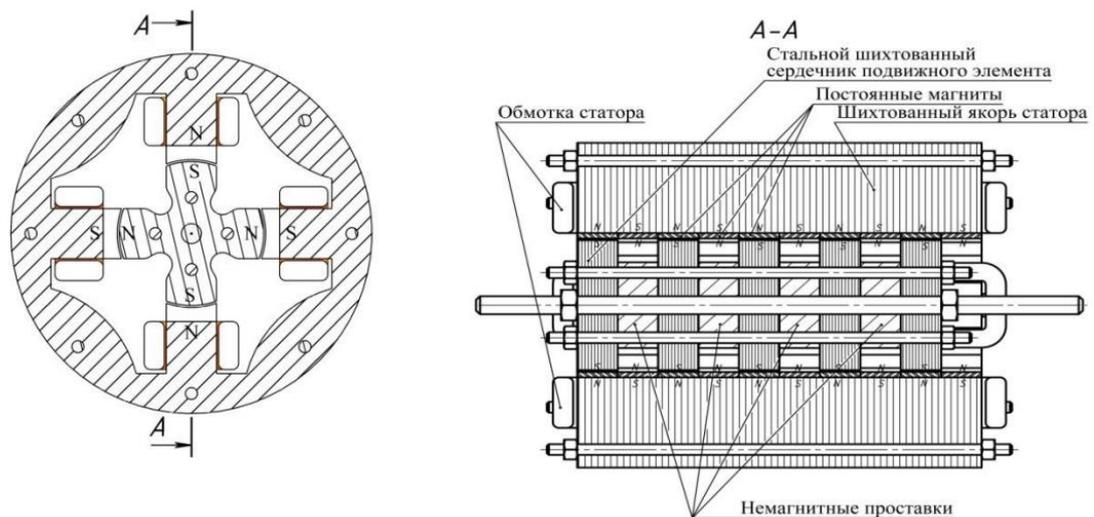


Рисунок 1.7. Конструкция индукторной машины с подвижным сердечником

Индукторные машины по типу делятся на одноименнополюсные и разноименнополюсные. В ИМ первого типа к якорю примыкают магнитные полюсы только одной полярности, а в ИМ второго типа – полюсы различной полярности. Одноименнополюсные машины являются машинами с радиально-осевым потоком и могут использоваться в линейных машинах с небольшим

отношением длины машины к поперечному размеру активной области, то есть для небольших рабочих ходов .

К индукторным машинам также относится коммутаторный генератор, изображенный на рисунке 1.8., в котором поток, сцепленный с обмотками статора, периодически изменяет знак, но в каждой точке зазора индукция не меняется по направлению. Поскольку коммутаторный генератор с обмотками возбуждения малоэффективен из-за значительных потерь на возбуждение и пульсаций потока в обмотке возбуждения, в коммутаторном генераторе используются постоянные магниты [11].

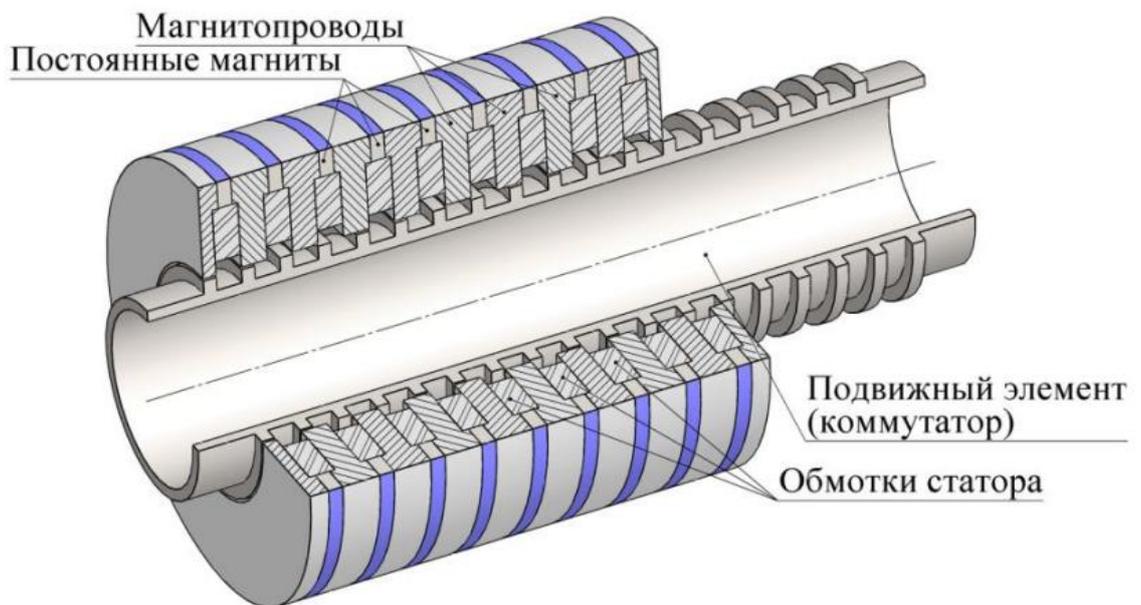


Рисунок 1.8. Конструкция коммутаторной линейной машины с периферийным расположением постоянных магнитов на статоре

При работе генератора на подвижном основании при свободно закрепленных постоянных магнитах возможно, что подвижная часть (постоянные магниты) генератора не соединена с первичным двигателем и является элементом, свободно установленным в своих опорах. В некоторых случаях могут быть использованы пружины для обеспечения надежности фиксации в пространстве и

подбора оптимальных характеристик колебательной системы. Корпус генератора, напротив, жестко закреплен на подвижном основании, перемещения которого могут носить регулярный (например, по гармоническому закону) или хаотический характер [17].

При закреплении генератора на транспортном средстве (например, автомобиле), которое движется по некоторой волнистой поверхности, колебания кузова или элементов подвески (в зависимости от места установки генератора) передаются корпусу генератора, что приводит к генерации ЭДС так, как в предыдущем примере. При изменении скорости транспортного средства, рельефа поверхности, по которой оно движется, изменяется частота и амплитуда возмущающего воздействия на корпус генератора [18].

Как было отмечено выше, синхронные генераторы возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами имеют следующие преимущества: высокую надежность, простоту конструкции, высокий КПД, надежное возбуждение, улучшенные выходные характеристики, малую инерционность при переходных процессах, и в определенном диапазоне частот тока и мощностей лучшие массогабаритные характеристики, чем генераторы с электромагнитным возбуждением. Но при этом отсутствие прямого способа регулирования напряжения из-за трудности изменения потока возбуждения от постоянных магнитов, разброс в характеристиках магнитов и высокая стоимость существенно влияют на технологичность и стоимость системы автономного источника электроэнергии в целом [19].

Общим конструктивным недостатком рассмотренных линейных генераторов возвратно-поступательного движения является наличие дополнительных пружин.

На рисунке 1.9. представлен синхронный генератор возвратно-поступательного движения (СГВПД), работа которого осуществляется без дополнительных механических пружин. Данный генератор служит автономным источником питания микросхем автономных объектов. Синхронный генератор возвратно-поступательного движения содержит цилиндрический

корпус, обмотки и магнитную систему. Цилиндрический ферромагнитный корпус герметизирован с обеих сторон заглушками, обмотки соединены последовательно. Магнитная система генератора состоит из постоянного магнита и полюсных наконечников, изготовленных из ферромагнитного материала [20].

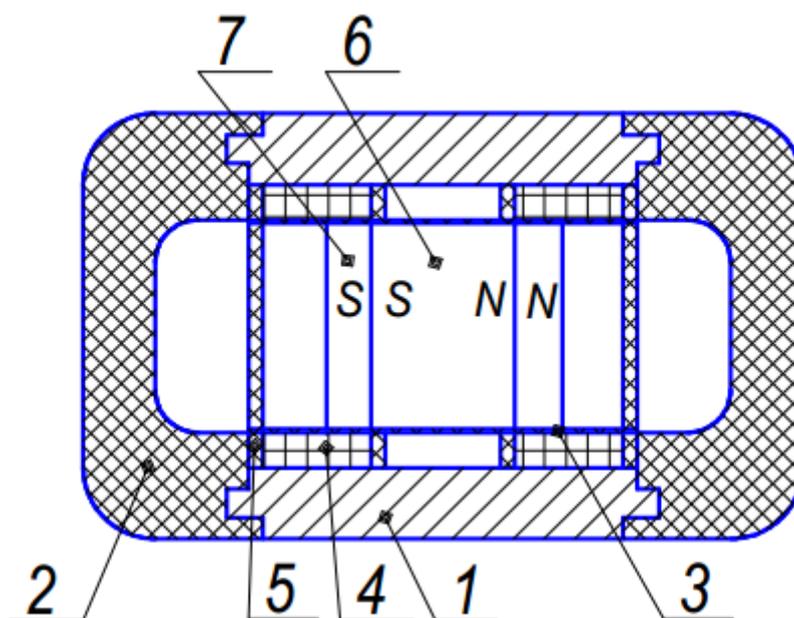


Рисунок 1.9. Конструкция синхронного генератора возвратно-поступательного движения: 1 – магнитопровод, 2 – диэлектрические заглушки, 3 – каркас, 4 – обмотки, 5 – диэлектрические кольца, 6 – постоянный магнит, 7 – полюсные наконечники

Использование предлагаемого синхронного генератора возвратно-поступательного движения в качестве автономного источника электроэнергии по сравнению с известными конструкциями обеспечит:

- прочность и надежность конструкции;
- высокую технологичность конструкции.

Создание и внедрение новых видов генераторов и усовершенствование известных конструкций, отвечающих современным требованиям, обуславливает необходимость развития теории, разработки математических моделей и экспериментального исследования.

Анализ отобранных охранных документов показал, что можно выделить несколько основных форм реализаций исследуемого объекта, сформированных по одному или нескольким отличительным конструктивным признакам.

Так в частности все конструктивные решения, описываемых в отобранных опубликованных охранных документах обратимых электрических машин возвратно-поступательного действия, можно разделить на цилиндрические и плоские линейные обратимые электрические машины.

Распределение опубликованных охранных документов по типу конструкции обратной электрической машины возвратно-поступательного движения представлено на рисунке 1.10.

Анализ рисунка 1.10 показывает, что наибольшее количество изобретений основывается на цилиндрической обратной электрической машине возвратно-поступательного движения. Это объясняется тем, что к достоинствам цилиндрических машин относят: более эффективное использование магнитного потока, отсутствие ограничений по плавности хода и наилучшие параметры теплоотвода.

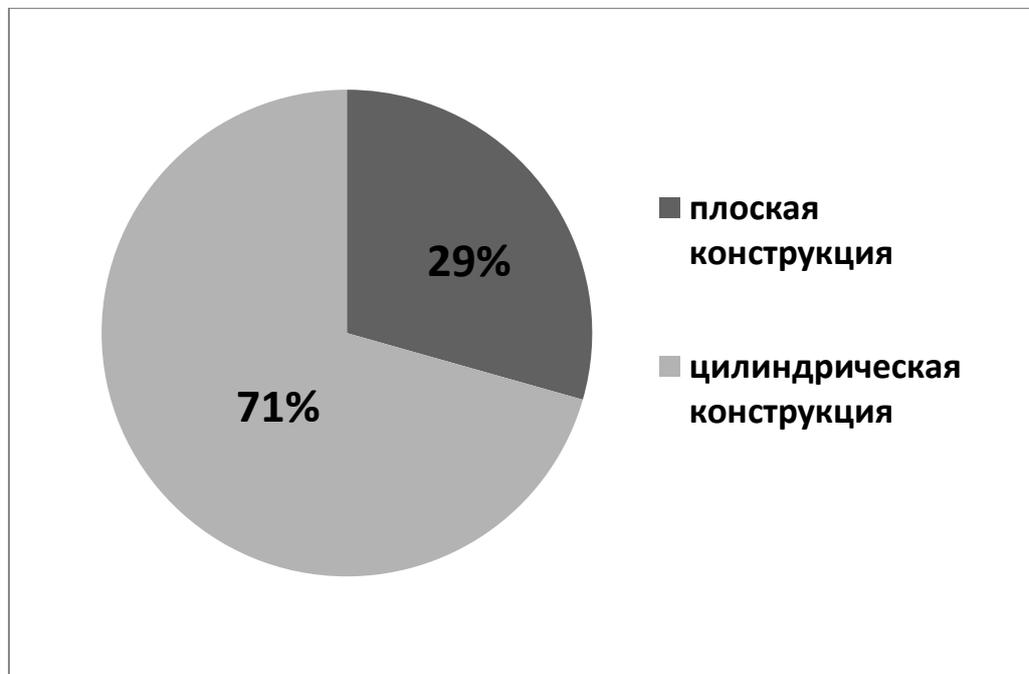


Рисунок 1.10. Относительное соотношение отобранных охранных документов по совокупности ключевых слов для разных типов конструкции

## обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения

По конструктивному исполнению индуктора и якоря отобранные реализации обратимых электрических машин можно разделить на три основные группы:

- 1) с подвижными постоянными магнитами и неподвижными системами катушек;
- 2) с подвижными системами катушек и неподвижными магнитами;
- 3) с подвижными распределителями магнитного потока и неподвижными магнитами, и системами катушек.

Распределение опубликованных охранных документов по конструктивному исполнению индуктора и якоря обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения представлено на рисунке 1.11.

Анализ рисунка 1.11 показывает, что наибольшее количество изобретений основывается на конструкции с подвижными постоянными магнитами и неподвижными системами катушек. Это объясняется тем, что подобные машины более просты в изготовлении, более надежны и ремонтпригодны. Кроме того, они обладают более низкой массой якоря и более высокой производительностью.

К недостаткам можно отнести проблемы с повторяющимися толчками на транслятор, тепловым потоком к магнитам и с высокой стоимостью.

Анализ особенностей исполнения якоря с постоянными магнитами у машин данной группы позволил выделить две группы конструктивной реализации: с поверхностно монтируемыми магнитами; с утопленными (заглубленными магнитами).

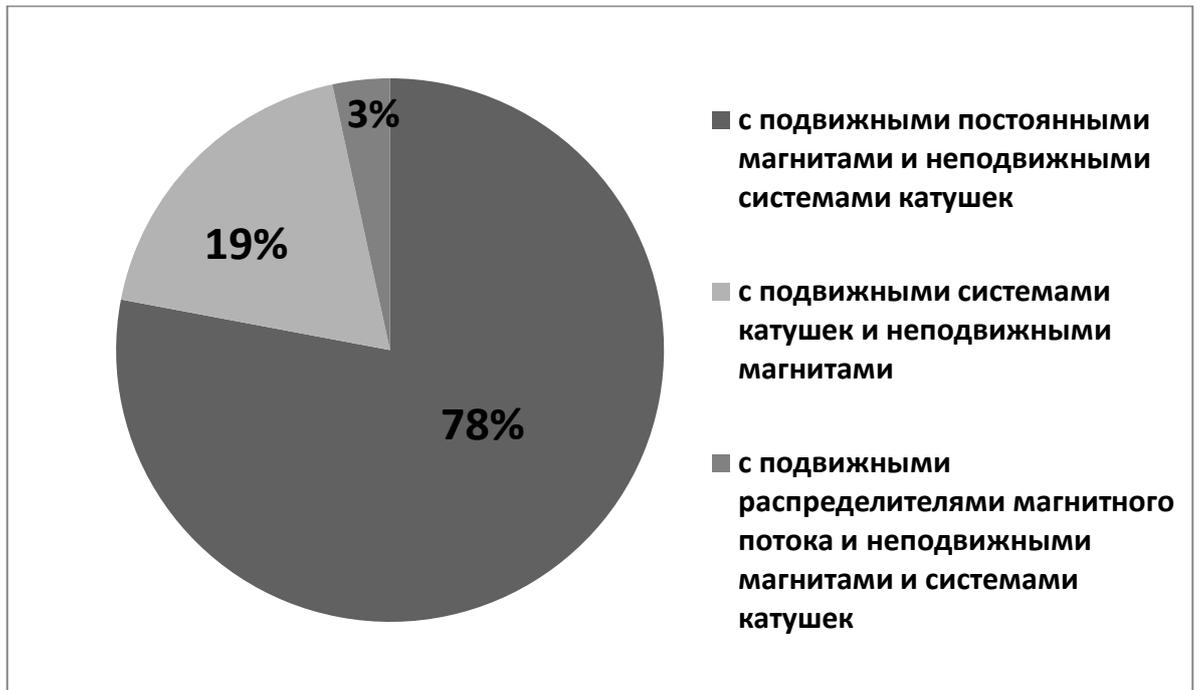


Рисунок 1.11. Относительное соотношение отобранных охранных документов по совокупности ключевых слов для различных конструктивных исполнений индуктора и якоря обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения

Распределение опубликованных охранных документов по конструктивному исполнению якоря с постоянными магнитами обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения представлено на рисунке 1.12.

Анализ рисунка 1.12 показывает, что наибольшее количество изобретений основывается на конструкции якоря с поверхностно монтируемыми магнитами постоянными магнитами. Это объясняется тем, что подобные якоря позволяют эффективнее использовать магнитный поток, просты в изготовлении, более надежны и ремонтпригодны.

Также, необходимо отметить, что анализ особенностей исполнения якоря с постоянными магнитами позволил выделить группу машин с аксиальным и радиальными магнитным полем, создаваемым якорем.

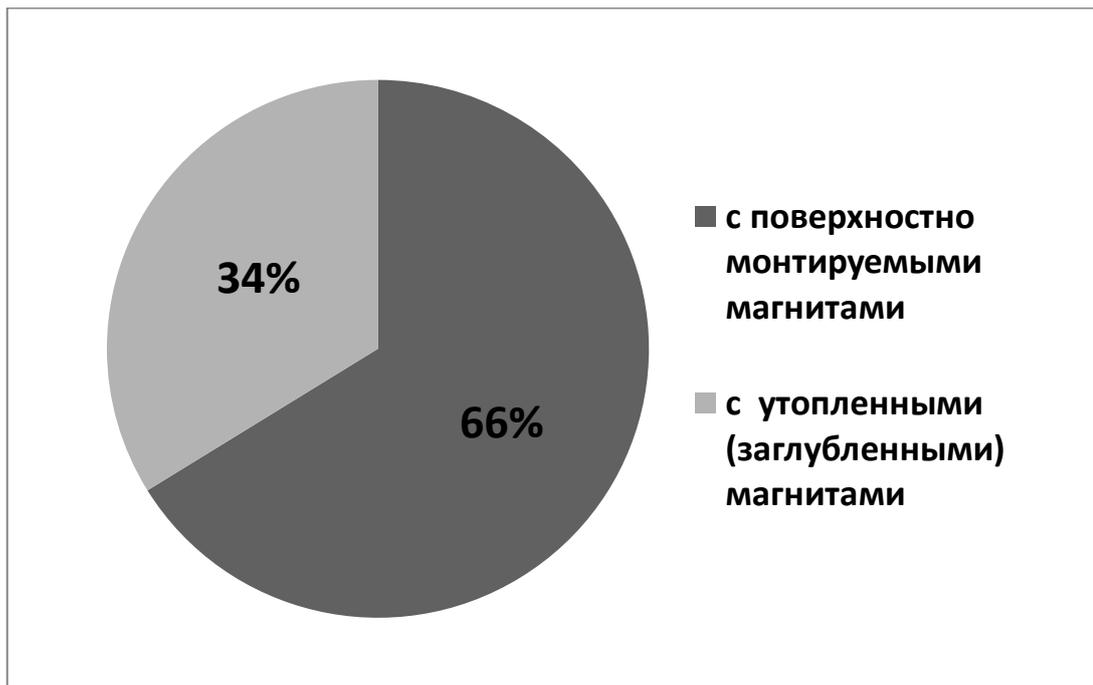


Рисунок 1.12. Относительное соотношение отобранных охранных документов по совокупности ключевых слов для различных конструктивных исполнений якоря с постоянными магнитами обратной электрической машины возвратно-поступательного движения

Распределение опубликованных охранных документов по типу создаваемого якорем с постоянными магнитами магнитного поля обратной электрической машины возвратно-поступательного движения представлено на рисунке 1.13.

Анализ рисунка 1.13 показывает, что наибольшее количество изобретений основывается на конструкции якоря, создаваемого аксиальное магнитное поле. Возможно, это объясняется тем, что подобные якоря характеризуются высокой удельной плотностью момента/силы, но при этом высокими утечками магнитного потока, низким значением коэффициента мощности и сложным процессом производства.

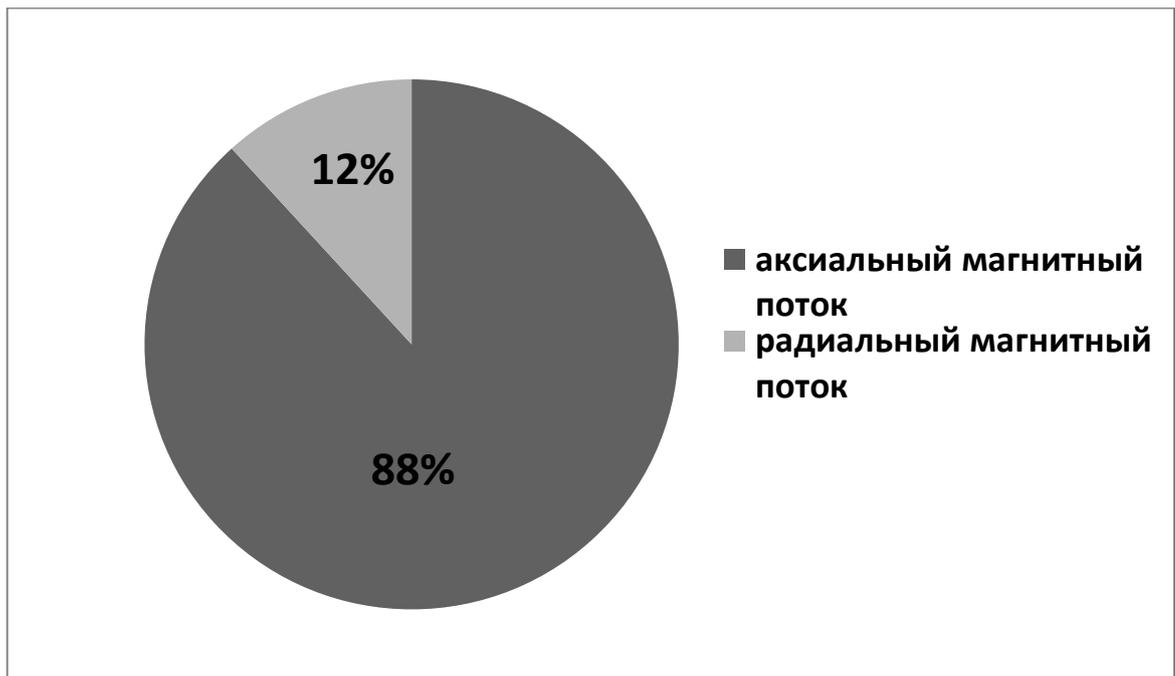


Рисунок 1.13. Относительное соотношение отобранных охранных документов по совокупности ключевых слов для различных типов создаваемого якорем с постоянными магнитами магнитного поля обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения

Анализ опубликованных охранных документов позволил определить достоинства и недостатки других типов электрических машин.

Так обратимая электрическая машина возвратно-поступательного движения с подвижными системами катушек и неподвижными магнитами обладает высокой производительностью, но при этом возникает необходимость в гибком проводном/скользящем контакте и появляются высокие требования термостойкости конструкции.

Обратимая электрическая машина возвратно-поступательного движения с подвижными распределителями магнитного потока и неподвижными магнитами и системами катушек получается более прочной, надежной и ремонтпригодной, но при этом характеризуется высокой массой подвижного элемента и низкими удельные характеристики производительности.

Учитывая вышеизложенное, приходим к выводу, что наиболее рационально

формой реализации обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия является цилиндрическая конструкция с постоянными магнитами на подвижном якоре. Конструктивно выполнять якорь целесообразно полым, с поверхностно монтируемыми магнитами, формирующими аксиальный магнитный поток. Выбранная форма реализации обеспечит наилучшие технико-экономические характеристики обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия.

Аналитический информационный поиск свидетельствует о том, что одним из наиболее перспективных направлений является использование генераторного режима электрических машин возвратно-поступательного действия при работе в системе с поршневыми тепловыми двигателями.

Использование подобных машин исключает необходимость преобразовывать возвратно-поступательное движение во вращательное, т.к. якорь генератора может совершать возвратно-поступательное движение вместе с шатуном теплового двигателя. Такие решения могут применяться как в качестве силового агрегата для транспортного средства (гибридный автомобиль), так и как стационарная энергоустановка автономного объекта (мобильная электростанция).

Результаты патентного исследования показывают, что технологии применения обратимых электрических машин возвратно-поступательного движения в качестве элемента системы тепловой двигатель-генератор электрической энергии в достаточной мере не проработаны. Усилия отечественных и зарубежных ученых преимущественно сосредоточены в направлении использования обратимых электрических машин как линейные генераторы в общем виде без учета особенностей работы в системе с поршневыми двигателями. Об этом свидетельствуют малые значения уровней внешней релевантности по ключевым словам «freepistonpowermodule» (свободно поршневой энергомодуль) и «freepistongenerator» (генератор свободно поршневой).

Аналитический анализ отобранных в результате патентного исследования опубликованных охранных документов позволил выявить достоинства и

недостатки для различных конструктивных решений обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия. В ходе работы было определено, что наиболее рационально формой реализации обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия является цилиндрическая конструкция с постоянными магнитами на подвижном якоре. Конструктивно выполнять якорь целесообразно полым, с поверхностно монтируемыми магнитами, формирующими радиальный магнитный поток. Выбранная форма реализации обеспечит наилучшие технико-экономические характеристики обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия.

### 1.3. Проектирование СЭДПМ в составе приводных комплексов

СЭДПМ всё больше распространяется на области, где традиционно применялись двигатели постоянного тока (ДПТ) или АД, таких, как привод циркулярных насосов, привод компрессоров в холодильной технике, системах вентиляции, буровые установки, станках-качалках добычи нефти. Причинами этого являются существующая тенденция к уменьшению стоимости магнитных материалов (внедрением сплавов редкоземельных металлов), а также совершенствование аппаратной базы управления. Появление соответствующей преобразовательной и цифровой вычислительной техники позволяет применять СЭДПМ как альтернативу ДПТ в регулируемом электроприводе. Существенный толчок дало внедрение преобразователей на транзисторах с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)) и использование принципов ШИМ (Pulse Width Modulation (PWM)) [21,22].

Большое влияние на динамические показатели СЭДПМ оказывают конструктивные параметры. Важно правильно выбрать конструкцию для обеспечения одновременно высоких динамических и энергетических показателей при малых габаритах и массе. Поэтому необходимо выбрать такую конструкцию, которая позволит обеспечить эти требования.

Известны три общих типа конструкций СЭДПМ:

- конструкция с внутренним ротором, описанная, например, в литературе [22, 23, 24], т.е. такая, при которой ротор располагается внутри статора, а рабочий поток при такой конструкции проходит в плоскости перпендикулярной оси вращения ротора ЭМ;

- конструкция с внешним ротором, т.е. такая при которой ротор располагается снаружи статора, рабочий поток также проходит в плоскости перпендикулярной оси вращения ротора ЭМ;

- конструкция с аксиальным магнитным потоком и ее различные разновидности отличающиеся способом выполнения обмоток и формой ПМ описаны, например, в литературе [25]; данная конструкция отличается тем, что рабочий магнитный поток проходит вдоль оси вращения ротора ЭМ.

ПМ в синхронных двигателях служат для создания постоянного по величине магнитного потока. В результате взаимодействия постоянного магнитного потока с полем статора создается вращающий момент и СЭДПМ вырабатывает механическую мощность. Следовательно, энергетические, массогабаритные и динамические показатели СЭДПМ зависят от свойств материалов, применяемых при его изготовлении.

В настоящее время развивается промышленное изготовление постоянных магнитов (ПМ) с высокими энергетическими показателями. Такие ПМ позволяют создавать в малых объемах большой магнитный поток, позволяя значительно повысить предельные мощности электрических машин [26,27].

Наиболее важными требованиями для СЭДПМ в приводных механизмах являются:

- высокие динамические показатели;
- высокие энергетические показатели;
- малые габариты и масса.

Для достижения максимальных энергетических и динамических показателей СЭДПМ при минимальных массогабаритных показателях применяют высокоэнергетические ПМ. Это позволяет:

- во-первых, уменьшить объем ПМ;
- во-вторых, вследствие уменьшения объема ПМ получить наименьший момент инерции вращающейся части – ротора электрического двигателя и, как следствие, улучшить динамические показатели ЭД;
- в-третьих, получить большой магнитный поток, как следствие, большой пусковой и электромагнитный момент, большую удельную мощность и большой КПД ЭМ, т. е. еще улучшить динамические и энергетические показатели.

Одним из перспективных направлений внедрения СЭДПМ является нефтедобывающая отрасль [150,151].

Значительную часть добываемой в России нефти получают из скважин, оборудованных для механизированной добычи, которую осуществляют насосным и компрессорным способами. В настоящее время в нефтедобывающих предприятиях России насчитывается более ста тысяч станков-качалок штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ), предназначенных для подъема пластовой жидкости из скважин, с электроприводами мощностью от 1,5 до 45 кВт.

Электропривод ШСНУ является одним из важнейших компонентов данных установок. Повышение его работоспособности является ключевой задачей для снижения себестоимости добываемой нефти.

Для привода станков-качалок наибольшее распространение получили асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором в закрытом обдуваемом исполнении с синхронной частотой вращения вала 1500 об/мин (к примеру, электродвигатели серии 4А) [28].

Асинхронные электроприводы работают с низким коэффициентом использования, в основном, вследствие тяжелого пуска станков-качалок, при котором требуемый пусковой вращающий момент электродвигателя в 5-6 раз превышает вращающий момент при установившемся режиме. Нагрузка двигателей не превышает 40 %, двигатель работает с низким значением КПД и коэффициента мощности  $\cos \varphi$ , что приводит к повышенному расходу

электроэнергии и необходимости увеличивать поперечное сечение проводов питающей сети и мощность трансформаторной подстанции [29]

В дополнение к высокой энергоэффективности современные СЭДПМ имеют чрезвычайно компактную конструкцию. Структура СЭДПМ делает их значительно меньше и легче, чем аналогичные асинхронные двигатели. СЭДПМ до 40 процентов более компактный, чем аналогичный асинхронный двигатель. Они соответствуют типоразмеру, который меньше на два стандартных размера, что создает возможность для более компактной конструкции машины. К тому же СЭДПМ весит на 50 процентов меньше и его инерция на 60 процентов ниже, чем у аналогичного асинхронного двигателя.

За счет высокого коэффициента мощности и КПД СЭДПМ, снижаются потери в системе электроснабжения нефтяных полей, растет КПД всей системы (на 5 - 6 %) по сравнению с применением асинхронных двигателей.

#### 1.4. Модели, алгоритмы, методы проектирования и оптимизации электрических машин

Оптимизация конструкции электрических машин включает в себя два основных этапа: проектирование и оптимизацию.

Основная цель этапа проектирования – определить конструкцию электрической машины (или несколько конструкций) для данных условий эксплуатации путем исследования различных материалов и размеров, типов двигателей и топологий, в том числе междисциплинарный анализ, включая электромагнитный анализ, тепловой и прочностные расчеты.

Основной целью этапа оптимизации является повышение энергетических или улучшение рабочих характеристик электрической машины (КПД, коэффициент мощности, вращающий момент), рассчитанных на этапе проектирования, с помощью алгоритмов и методов оптимизации.

Как результат, единственное оптимальное решение будет получено при одноцелевой оптимизации или совокупность некоторых недоминируемых

решений (называемые оптимальными по Парето решениями) при многоцелевой оптимизации.

Рисунок 1.14. иллюстрирует краткую структуру этапов проектирования и оптимизации электрических машин.

Не существует фиксированной процедуры оптимизации конструкции электрических машин. Тем не менее, есть некоторые общие этапы, которым нужно следовать.

Данные этапы можно сформулировать следующим образом.

Этап 1: Выбор и определение возможных типов и топологий электрической машины, материалов и размеров в соответствии с требованиями, предъявляемыми условиями эксплуатации.

Требования включают в себя такие характеристики, как КПД, крутящий момент и пульсация крутящего момента, материальные и производственные затраты, массо-габаритные характеристики и др. Основной целью этого этапа является получение ряда вариантов двигателя, которые могут быть использованы для данных условий.

Этап 2: Реализация мультифизического проектирования и анализа каждого варианта электрической машины. Мультифизическое моделирование позволяет проанализировать такие процессы, как электромагнитные, механические и тепловые [30,31,32,33,34].

Кроме того, работа силовой электроники и управление должны быть включены в исследуемую модель, так как они влияют на динамические характеристики электропривода [35].

Данный этап предназначен для оценки характеристик двигателя, в том числе электромагнитных параметров - потери в сердечнике, индуктивность, обратная электродвижущая сила (ЭДС) и тепловых параметров - распределение температуры в корпусе электрической машины.

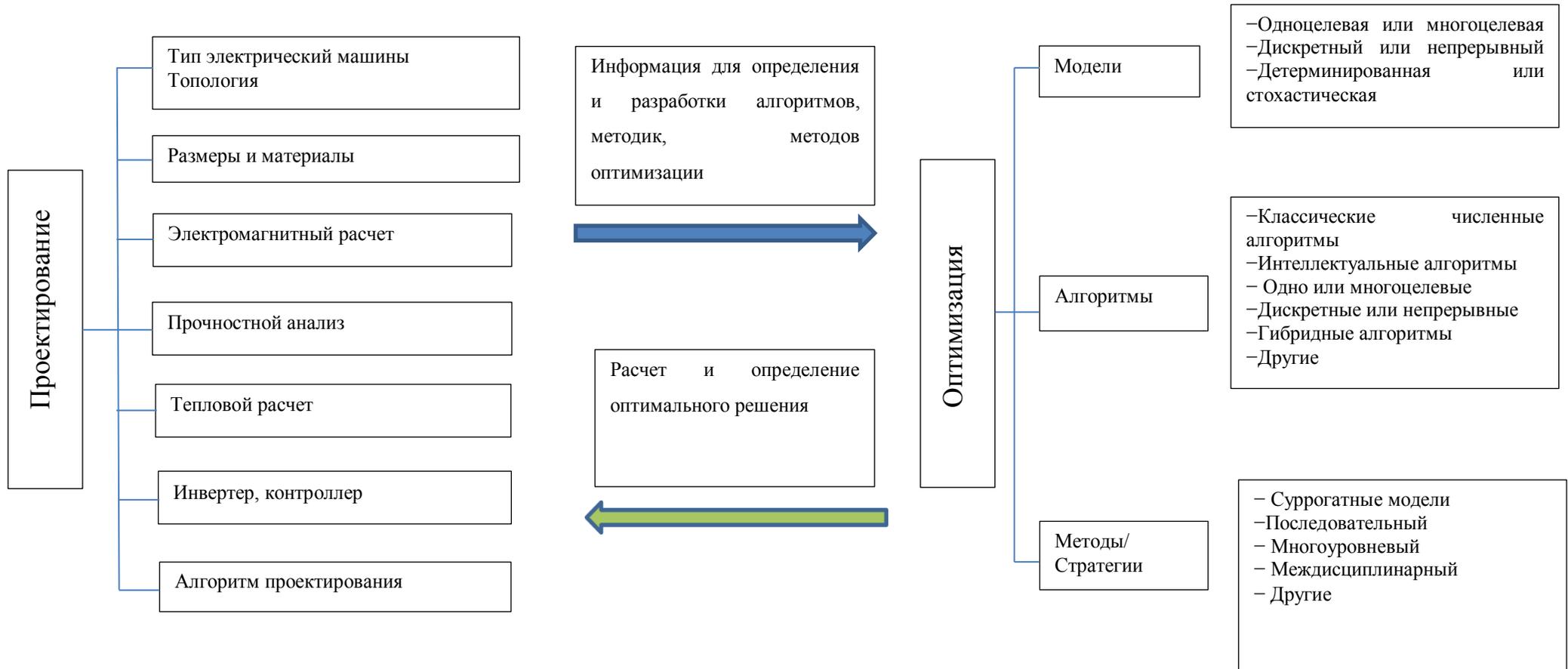


Рисунок 1.14. Структура этапов проектирования и оптимизации электрических машин

Этап 3: Оценка рабочих характеристик двигателя для каждого варианта, включая выходную мощность или крутящий момент, КПД и стоимость. На основе оценки и сравнения может быть получен один или несколько возможных вариантов.

Этап 4: Разработка алгоритмов оптимизации на основе этих возможных вариантов. Для каждого варианта задаются целевая функция оптимизации, ограничения, параметры и их типы, такие как дискретные или непрерывные.

Этап 5: Проведение оптимизации и получение оптимального решения или совокупности некоторых оптимальных решений. Реализация процесса оптимизации затрагивает алгоритмы и методы оптимизации. Для оптимизации, существуют два основных типа алгоритмов - классические и современные интеллектуальные алгоритмы.

Среди методов оптимизации, можно выделить такие, как многоуровневый и междисциплинарный [36,37,38,39,40,41,42].

После проведения оптимизации сравниваются все возможные варианты, и выбирается лучший вариант с подробными результатами моделирования.

Этап 6: Полученный оптимальный вариант проверяется с помощью прототипа и результатов эксперимента.

Если экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования, используемыми моделями и методами, такими как модель конечных элементов (FEM), то выбирается принятое решение.

Если нет, то выбирается другая модель оптимизации. Затем следует провести еще одну оптимизацию и создать новый прототип.

На рисунке 1.15. показаны наиболее распространённые алгоритмы оптимизации конструкции электрических машин, а также других электромагнитных устройств.

Как показано на рисунке 1.15., есть два основных типа, градиентные алгоритмы и интеллектуальные алгоритмы оптимизации.

Алгоритмы на основе градиентов, такие как алгоритмы сопряженных градиентов и их нелинейные версии, просты в реализации.

Например, они могут быть использованы для оптимизации электрических машин характеристики, которых оцениваются на основе модели магнитной цепи [43].

Между тем, есть ограничения на применение данных алгоритмов, например, необходимость задания аналитических выражений для целевых функций.

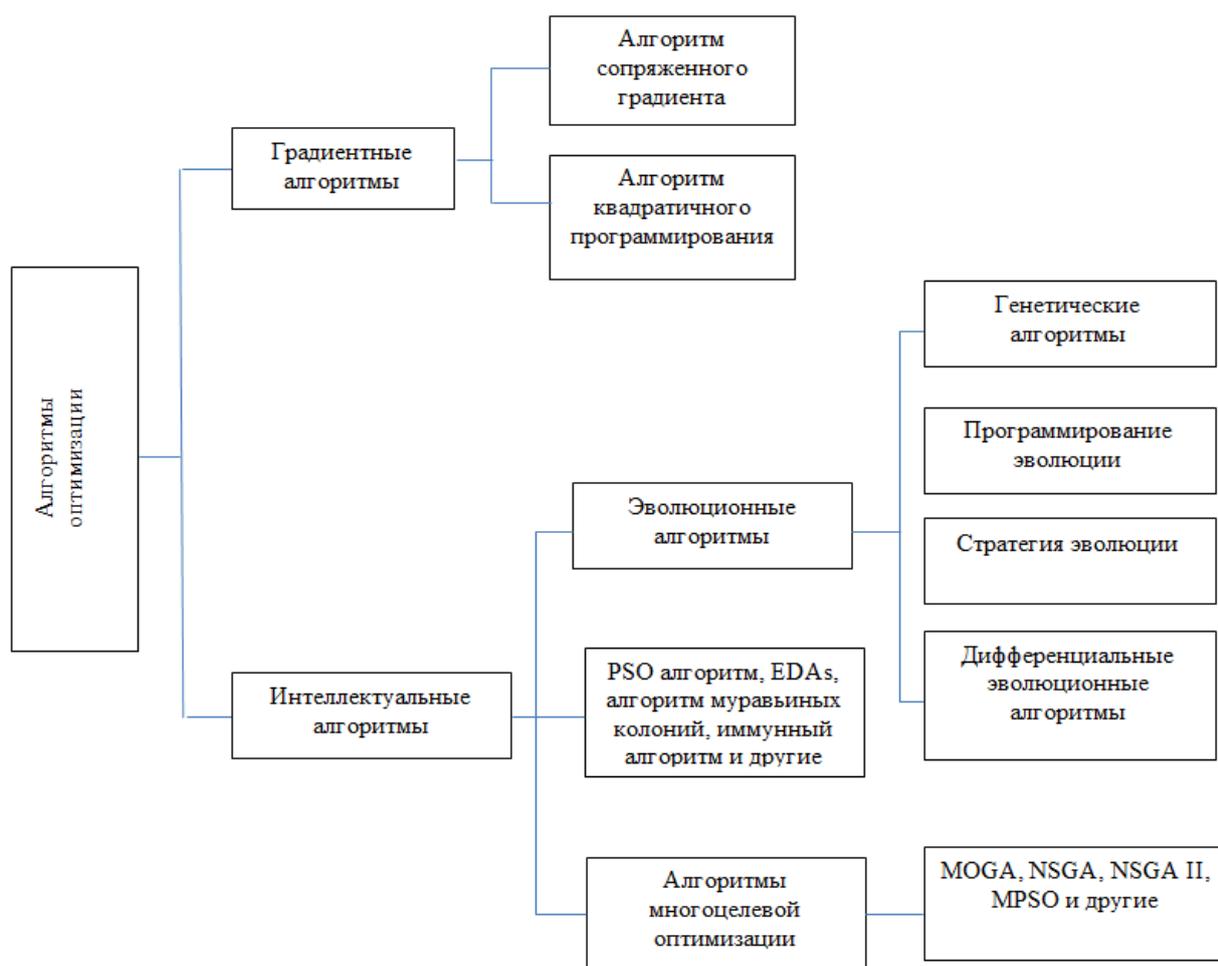


Рисунок 1.15. Алгоритмы оптимизации для проектирования электрических машин

Однако в настоящее время многие аналитические модели для электрических машин основаны на методе конечных элементов (FEM) вместо математических моделей и схем замещения.

Поэтому интеллектуальные алгоритмы активно используются для оптимизации электрических машин в последние десятилетия. Можно выделить эволюционные алгоритмы (EAS), алгоритмы оптимизации роя частиц (PSO), оценка алгоритмов распределения (EDA), иммунный алгоритм и алгоритм муравьиных колоний и их модификации [44].

Наиболее широкое распространение получили генетические алгоритмы (GA) и дифференциальные эволюционные алгоритмы (DEA).

Алгоритмы многоцелевой оптимизации стали популярными в настоящее время, так как оптимизация конструкции электрических машин имеет многоцелевой характер, например максимизация крутящего момента и минимизация пульсация крутящего момента или максимизация плотности мощности и минимизация стоимости активного материала.

Для решения таких задач требуются многоцелевые алгоритмы оптимизации. Они могут обеспечить набор решений Парето. Этот набор решений состоит из множества недоминируемых оптимальных конструкторских решений для проектировщика.

Некоторые популярные многоцелевые алгоритмы оптимизации основаны на генетических алгоритмах и алгоритмах оптимизации роя частиц, такие как многоцелевая GA, недоминирующая сортировка GA (NSGA) и ее улучшения (NSGA II), и многоцелевой алгоритм PSO [45,46].

Преимущество интеллектуальных алгоритмов от обычных градиентных алгоритмов состоит в том, что данные алгоритмы не зависят от математических свойств моделей оптимизации.

Например, целевая функция не обязательно должны быть непрерывной и дифференцируемой. По сравнению с обычными, интеллектуальные алгоритмы оптимизации имеют много преимуществ, такие как поиск глобального оптимума, более высокая надежность и возможность параллельного поиска.

Различные алгоритмы имеют разные параметры и стратегии для обновления и регенерация популяции (набора конструктивных вариантов).

Распределение материалов в роторе СЭМПМ имеет решающее значение для электромагнитных, тепловых процессов и структурных решений в электрических машинах.

Помимо широко используемых материалов, таких как стальной лист, постоянные магниты (неодим-железо-бор, самарий - кобальт), некоторые недавно разработанные магнитные материалы, такие как магнито-мягкие композиционные материалы, аморфная и зернисто-ориентированная кремнистая сталь показывают лучшие характеристики, такие как высокая плотность потока насыщения, низкие удельные потери и низкие производственные затраты. Они могут использоваться для проектирования двигателей с новыми топологиями, более высокой эффективностью и / или низкой стоимостью производства.

Методы производства также важны на стадии проектирования электрических машин, которые будут влиять на их качество изготовления и фактические характеристики в эксплуатации.

Например, для получения наилучших характеристик некоторые конструкции могут иметь сложную топологию ротора, которая трудна в изготовлении.

Магнитные и механические свойства некоторых новых материалов, таких как магнито-мягкие композиционные материалы и аморфные, сильно зависят от технологического процесса. Без хорошего знания магнитных характеристик и методов производства, эксплуатационные характеристики разработанных двигателей не могут быть полностью использованы. Это необходимо учитывать при задании настроек топологической оптимизации.

Чтобы в полной мере использовать перспективные виды материала в конструкции электрического двигателя особое внимание следует уделить разработке новых топологий двигателя на основе новых алгоритмов и методы топологической оптимизации.

В России активное использование методов топологической оптимизации стало внедряться относительно недавно, и используется в основном для повышения

удельной прочности конструкций в аэрокосмической промышленности [47], оптимизация рабочих лопаток турбин [48] или поршней ДВС [49]. Особенностями всех этих работ является топологическая оптимизация только одного материала и максимизация только одной целевой функции (в большинстве работ русскоязычного сегмента – это повышение прочности при уменьшении веса). В иностранных источниках работы по топологической оптимизации ведутся уже давно, и повышению идет как прочностных параметров, так и улучшения значений электромагнитного и теплового поля.

В статье [50] продемонстрированы преимущества топологической оптимизации нескольких материалов по сравнению со стандартной оптимизацией (один материал).

Доказательством послужила оптимизированная конструкция автомобильного двигателя для обоих случаев оптимизации, и в первом случае получается более жесткая конструкция при одинаковом весе. Отличием от темы исследования является то, что оптимизация синхронных двигателей с постоянными магнитами, производится с учетом электромагнитной составляющей, что позволяет получить наиболее эффективную конструкцию электрической машины.

Для примера представлена статья [51], в которой производится оптимизация конструкции электродвигателя без щеток постоянного тока (а именно конфигурация ротора) на основе метода конечных элементов для повышения удельной мощности за счет увеличения электромагнитного поля.

В работе [52] рассматривалась двухмерная модель для определения электромагнитного поля в воздушных зазорах синхронных двигателей с постоянными магнитами, а в научном труде [53] показан метод проектирования постоянных магнитов, которые уже можно использовать для получения оптимальных конструкций. В статье [54] представлен алгоритм локальной оптимизации, совмещенный с генетическими алгоритмами для улучшения характеристик сходимости, а в [55] оптимизация достигалась на основе использования расчета электромагнитного поля методом конечных элементов. В этих работах оптимизация была необходима для повышения значений

электромагнитного поля, в работе [56] представлен расчет двигателя с максимально возможным тепловым потоком. Конструкцию двигателей можно сделать более эффективной и за счет использования топологической оптимизации на основе композитных материалов [57]. Для повышения производительности генетического алгоритма необходимы оптимальные начальные популяции, что описано в работе [58], в которой представлен алгоритм генерации популяции с высокими значениями характеристик. Развитие генетического алгоритма может лежать и в направлении адаптивного изменения построения сетки прямо во время оптимизации [59], интересным решением является и использование метода последовательного линейного программирования [60].

В работе [61] разработано устройство электрического двигателя путем ON / OFF метода с учетом магнитной нелинейности и вращения. В следующем документе [62] показан интересный совокупный метод оптимизации конструкции ротора, объединяющий топологический метод оптимизации и ограничения, связанные с формой постоянных магнитов.

J. K. Yoon и др. предложил оптимизацию топологии с чувствительностью конструкции [203]. N. Kikuchi и др. применил оптимизацию топологию в сочетании с магнито-структурными проблемами [204]. S. Park и др. оптимизировали магнитные пускатели с использованием метода уровней [205]. K. Watanabe и др. оптимизировали индуктор с помощью эволюционного алгоритма [206].

### 1.5. Постановка задачи исследования

Технический эффект от разработки методов расчета и оптимизации параметров СЭМПМ заключается в повышении энергетических показателей генерирующих и приводных комплексов (КПД, выдаваемая мощность, вращающий момент), снижении массо-габаритных показателей, высокой стабильности поддержания параметров электроэнергии при работе в тяжелых условиях.

Для обеспечения данного эффекта методы расчета должны обеспечивать решение следующих задач:

- 1) исследование и анализ основных направлений создания синхронных электрических машин с постоянными магнитами;
- 2) разработка имитационных моделей для анализа электромагнитных, тепловых процессов и прочностного расчета с учетом конструктивных параметров СЭМПМ;
- 3) разработка алгоритмов и программ для совершенствования конструкции статора, ротора, индуктора и элементов магнитной цепи СЭМПМ с целью повышения энергетических характеристик электрической машины;
- 4) создание конструкции СЭМПМ с повышенными энергетическими характеристиками при заданных условиях на основе разработанных алгоритмов и программ;
- 5) разработка экспериментального стенда для проведения углубленных исследований характеристик и испытаний СЭМПМ;
- 6) разработка комплекса программ для моделирования и оптимизации конструктивных параметров элементов СЭМПМ в составе генерирующих и приводных комплексов.

Вопросам разработки математических и имитационных моделей СЭМПМ в составе рабочих комплексов посвящены вторая, третья и четвертые главы.

В пятой главе представлена разработка многопараметрической и топологической оптимизации параметров СЭМПМ и программной реализации концепции параллельного моделирования подсистем автономных источников электроснабжения, позволяющая учитывать взаимное влияние параметров подсистем АИЭ (в том числе и конструкционных) на достижение максимально возможного КПД.

Предложенные во второй, третьей, четвертой и пятой главах методы расчета и оптимизация параметров СЭМПМ позволяют разработать достаточно эффективное программное обеспечение для выполнения проектных решений различных типов синхронных электрических машин в составе генерирующих и приводных комплексах.

В шестой главе представлено физическое моделирование (на примере СЭМВПД) на специально разработанном испытательном стенде и сравнительный анализ результатов имитационного и физического моделирования.

## 1.6. Выводы по главе 1

1. Анализ АИЭ показал, что одним из перспективных направлений является использование в АИЭ свободно-поршневых двигателей совместно с линейными бесконтактными синхронными генераторами электроэнергии с постоянными магнитами, обладающих повышенной надежностью, высокими динамическими качествами, малыми массами и габаритными размерами за счет повышенных механических, электромагнитных и тепловых нагрузок, возможностью работать в нестандартных окружающих условиях.

2. На основе анализа (в том числе и патентного) различных типов линейных электрических машин возвратно-поступательного действия в автономных источниках электроснабжения установлено, что наиболее рационально формой реализации обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия является цилиндрическая конструкция с постоянными магнитами на подвижном якоре. Конструктивно выполнять якорь целесообразно полым, с поверхностно монтируемыми магнитами, формирующими радиальный магнитный поток. Выбранная форма реализации обеспечит наилучшие технико-экономические характеристики обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия.

3. Проектирование и оптимизация параметров СЭДПМ является актуальной задачей, так как данный тип двигателей всё больше распространяется на области, где традиционно применялись двигатели постоянного тока (ДПТ) или АД, таких, как привод циркулярных насосов, привод компрессоров в холодильной технике, системах вентиляции, буровые установки, станках-качалках добычи нефти.

Одним из перспективных направлений внедрения СЭДПМ является нефтедобывающая отрасль. Электропривод ШСНУ является одним из важнейших

компонентов данных установок. Повышение его работоспособности является ключевой задачей для снижения себестоимости добываемой нефти.

4. Для решения поставленных задач требуется разработка алгоритмов и методов многопараметрической и топологической оптимизации параметров СЭМПМ.

## 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ СЭМПМ

### 2.1. Моделирование термодинамических процессов в свободно-поршневом двигателе

Свободнопоршневой двигатель (СПДВС) стандартного цикла Отто рассматривается с использованием базовой модели двигателя для нахождения диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, а также резонансной частоты колебаний. Данная модель используется для определения влияния конфигурации и намагниченности постоянных магнитов синхронной ЭМВПД с ПМ на скорость колебаний в системе.

В рассматриваемом СПДВС два оппозитно-расположенных поршня установлены на общий шатун, что позволяет им колебаться между двумя крайними точками в цилиндрах.

Процесс горения топливной смеси происходит поочередно в каждом цилиндре, заставляя поршни совершать возвратно-поступательные движения. Рисунок 2.1. иллюстрирует конфигурацию СПДВС.

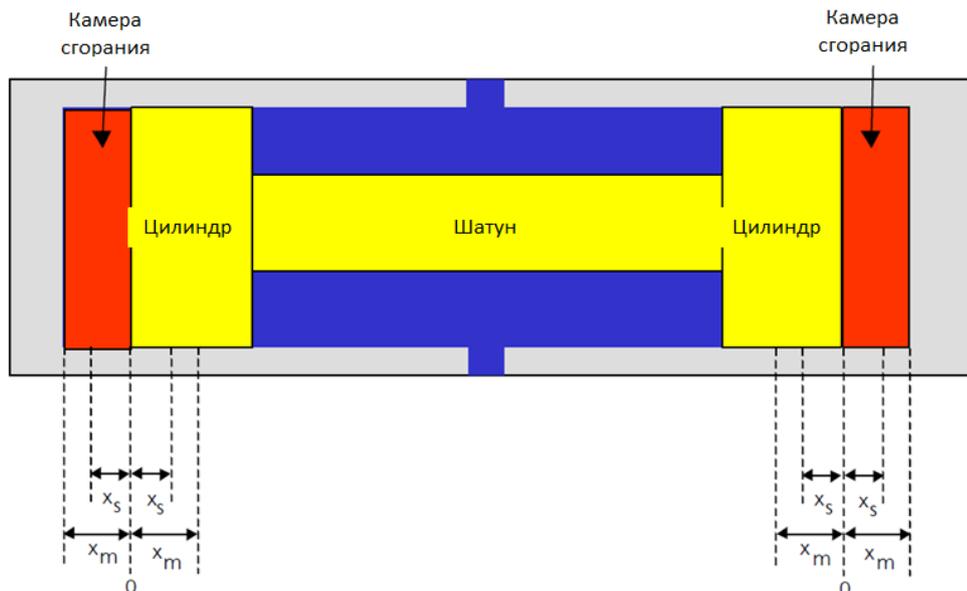


Рисунок 2.1. Упрощенный вид поперечного сечения СПДВС

На рисунке 2.1. индуктор показан в нейтральном или в нулевом положении.

Как видно из рисунка, индуктор может свободно перемещаться на максимальное расстояние  $x_m$ , в любом направлении от нулевого положения до касания головки цилиндра. Однако, на практике индуктор движется только на расстояние  $x_s$ , от нулевого положения, оставляя объем в цилиндре. Расстояние  $x_s$  равно длине половине хода индуктора (или, что то же самое, поршня). По мере того, как поршневой узел перемещается в любом направлении, один цилиндр будет проходить процесс расширения, а другой сжатия, функционируя как нелинейная пружина. Сжатие и расширение каждого цилиндра моделируется как адиабатный процесс. В дальнейших расчетах резонансная частота вычисляется через сумму силы действующей на поршни из-за давления газов при расширении и результирующей электромагнитной силы в генераторе переменного тока, равной произведению массы сборки поршня (сюда входит и масса индуктора) на ее ускорение (2 закон Ньютона).

Для дальнейших расчетов необходимо записать уравнение баланса сил для системы. Тогда решая данную систему можно найти резонансную частоту поршневой группы. Работа СПДВС моделируется на основе идеализированного цикла Отто. В идеализированном цикле Отто предполагается, что мгновенный подвод тепла происходит при минимальном объеме цилиндра, а мгновенная теплоотдача происходит при максимальном объеме.  $P$ - $V$  диаграмма цикла Отто представлена на рисунке 2.2.

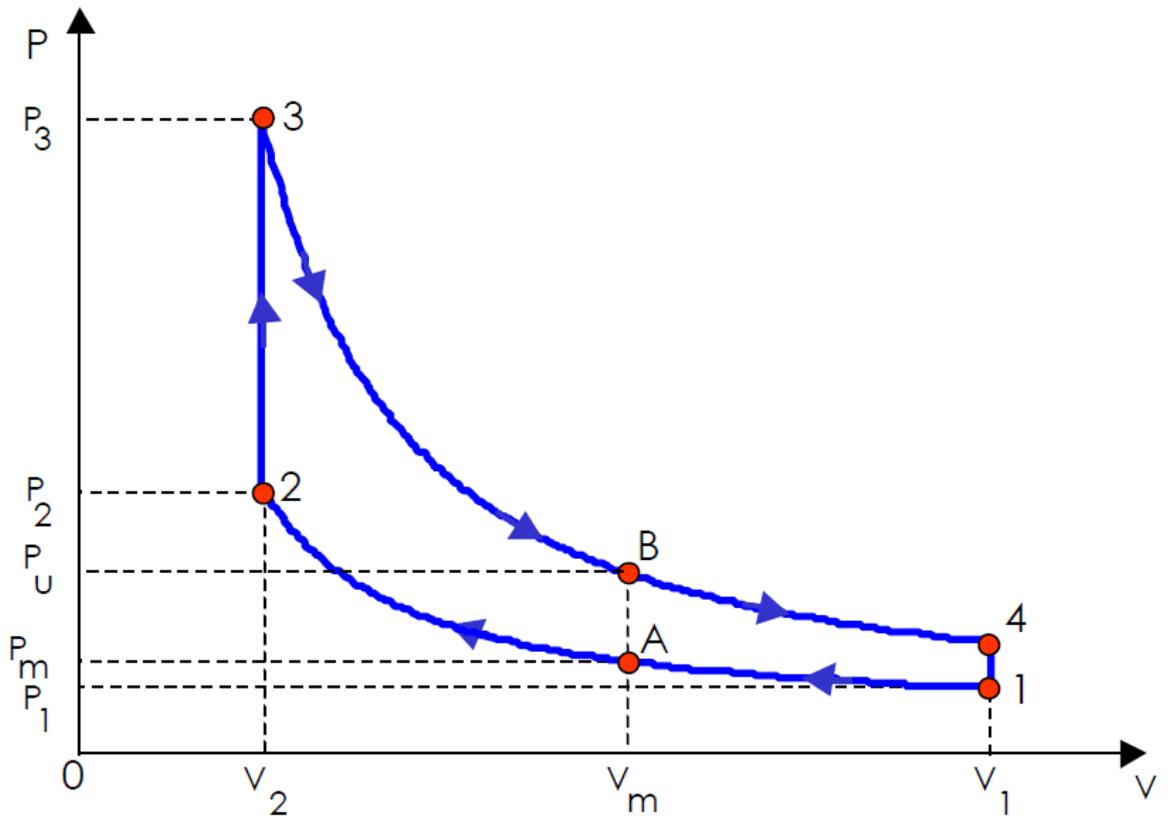


Рисунок 2.2.  $P$ - $V$  диаграмма идеализированного цикла Отто

Эта диаграмма иллюстрирует зависимость между давлением в цилиндре СПДВС и объемом цилиндра. Термодинамические процессы в СПДВС можно понять из  $P$ - $V$  диаграммы.

Начиная с точки 1 на  $P$ - $V$  диаграмме (рисунок 2.2.) цикл переходит к минимальному объему – происходит адиабатическое сжатие в цилиндре. Затем в точке 2 происходит воспламенение топлива. В цикле Отто, как показано на данной диаграмме, горение происходит при постоянном объеме. Это подразумевает, практически мгновенное сгорания топлива в верхней точке хода. В точке 3 горение прекращается, и адиабатическое расширение газов в цилиндре начинает перемещать поршень. Когда поршень достигает конца хода в точке 4, через выпускной клапан происходит продувка цилиндра от отработавших газов, что снижает давление в цилиндре до значения в точке 1 и цикл начинается снова.

## 2.1.1. Разработка модели СПДВС

Уравнение баланса сил запишется согласно выражению (2.1)

$$P_L(x)A_B - P_R(x)A_B - F(x) = m\ddot{x}, \quad (2.1)$$

где

$P_L(x)$  – мгновенное давление в левом цилиндре;

$P_R(x)$  – мгновенное давление в правом цилиндре;

$A_B$  – площадь поперечного сечения цилиндра;

$F(x)$  – электромагнитная сила и сила трения;

$m$  – масса индуктора (поршневой группы);

$x$  – положение индуктора (позиция).

Примем за положительное направление движения индуктора - слева направо. Таким образом, правый цилиндр будет подвергаться сжатию, в то время как левый цилиндр будет расширяться.

Если средняя точка давления в правом (сжимаемом) цилиндре  $P_m$  (рисунок 2.1) , где значение  $x=0$ , то используя предположение о адиабатическом сжатии давление в правом цилиндре можно записать в виде

$$\begin{aligned} P_R V_R^n &= P_m V_m^n \\ P_R &= P_m \left( \frac{V_m}{V_R} \right)^n, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где

$V_m$ - объем цилиндра в средней точке;

$V_R$  - объем правого цилиндра;

$P_R$ - давление в правом цилиндре;

$n$  - политропный коэффициент сжатия.

Средний объем может быть выражен как

$$V_m = A_B x_m = \left(\frac{\pi b^2}{4}\right) x_m, \quad (2.3)$$

где

$b$  – диаметр цилиндра.

Аналогичным образом, правый объем цилиндра можно записать следующим образом:

$$V_R = V_m - \left(\frac{\pi b^2}{4}\right) x$$

или

$$V_R = \left(\frac{\pi b^2}{4}\right) (x_m - x), \quad (2.4)$$

Подставляя уравнения 2.3 и 2.4 в уравнение 2.2, получим уравнение 2.5 для давления в правом цилиндре (сжатие)

$$P_R = P_m \left(\frac{x_m}{x_m - x}\right)^n, \quad (2.5)$$

Аналогичным способом определяется давление в левом цилиндре (расширение)

$$P_L = P_u \left(\frac{V_m}{V_L + x}\right)^n = P_u \left(\frac{x_m}{x_m + x}\right)^n, \quad (2.6)$$

Таким образом, уравнение баланса сил 2.1 можно переписать, подставив уравнения 2.5 и 2.6 в 2.2, чтобы получить следующее выражение

$$\left(P_u \left(\frac{x_m}{x_m + x}\right)^n - P_m \left(\frac{x_m}{x_m - x}\right)^n\right) \left(\frac{\pi b^2}{4}\right) - F(x) = m\ddot{x}, \quad (2.7)$$

Предположим, что стационарным состоянием является половина хода поршня  $x_s$ .

Тогда минимальный объем может быть выражен как

$$V_{min} = V_2 = \left(\frac{\pi b^2}{4}\right)(x_m - x_s), \quad (2.8)$$

Аналогичным образом максимальный объем определяется как

$$V_{max} = V_1 = \left(\frac{\pi b^2}{4}\right)(x_m + x_s), \quad (2.9)$$

Степень сжатия определяется, как отношение максимального объема к минимальному, и может быть выражена с помощью формул 2.8 и 2.9 как

$$r = \frac{x_m + x_s}{x_m - x_s}, \quad (2.10)$$

Теперь, ранее неизвестное средняя точка давления в цилиндре расширения  $P_u$ , может быть найдена в соответствии с циклом Отто из средней точки во время сжатия (точка  $A$  на рисунке 2.2) путем добавления тепла к средней точке расширения цилиндра.

Процесс поиска средней точки давления в цилиндре расширения  $P_u$  начинается в точке  $A$  рисунок 2.2 и следует циклу  $PV$  к средней точке расширения, точке  $B$ . Для расчета необходимо рассчитать давление, объем и температуру каждой отмеченной точки на цикле  $PV$ .

Давление в точке  $A$  находится в предположении адиабатического сжатия от точки  $A$  до точки 2. Таким образом,  $P_2$  можно найти как

$$P_m V_m^n = P_2 V_2^n$$

Тогда

$$P_2 = P_m \left(\frac{V_m}{V_2}\right)^n, \quad (2.11)$$

Подставляя уравнения 2.3 и 2.8 в 2.11, получим  $P_2$  как

$$P_2 = P_m \left(\frac{x_m}{x_m - x_s}\right)^n, \quad (2.12)$$

Используя закон идеального газа, получаем температуру в точке 2

$$\frac{P_m V_m}{T_m} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2 T_m}{P_m V_m} = \frac{P_2 V_2}{P_m V_m} T_m, \quad (2.13)$$

Подставив уравнения 2.3, 2.8 и 2.12 в 2.13 выражаем  $T_2$  как

$$T_2 = T_m \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1}, \quad (2.14)$$

Для постоянного объема адиабатического горения, добавленное тепло может быть выражено как

$$Q_{in} = m c_v (T_3 - T_2), \quad (2.15)$$

где

$m$  – масса топливной смеси;

$c_v$  – теплоемкость топлива.

Из уравнения 2.15 можно получить значение температуры в точке 3 из известной температуры в точке 2

$$T_3 = T_2 + \frac{Q_{in}}{m c_v}, \quad (2.16)$$

Подставляя уравнение 2.14 в 2.16 получим

$$T_3 = T_m \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1} + \frac{Q_{in}}{m c_v}, \quad (2.17)$$

Давление в точке 3 можно определить, используя закон идеального газа

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3}$$

$$P_3 = \frac{P_2 V_2 T_3}{V_3 T_2}, \quad (2.18)$$

Поскольку горение происходит при постоянном объеме  $V_3 = V_2$  уравнение 2.18 сводится к

$$P_3 = P_2 \frac{T_3}{T_2}, \quad (2.19)$$

Подставляя уравнения 2.12, 2.14 и 2.17 в уравнение 2.19 получаем

$$P_3 = P_m \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^n \left[ \frac{T_m \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1} + \frac{Q_{in}}{mc_v}}{T_m \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1}} \right], \quad (2.20)$$

При известном давлении и температуре в точке 3, давление  $P_u$  можно получить, предполагая адиабатическое расширение от точки 3 до точки В.

$$P_u V_u^n = P_3 V_3^n$$

Тогда

$$P_u = P_3 \left( \frac{V_3}{V_u} \right)^n, \quad (2.21)$$

Так как  $V_u = V_m$  и  $V_3 = V_2$ , подставив уравнения 2.3, 2.8 и 2.20 в уравнение 2.21 получим

$$P_u = \left\{ P_m \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^n \left[ \frac{T_m \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1} + \frac{Q_{in}}{mc_v}}{T_m \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{n-1}} \right] \right\} \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{-n}, \quad (2.22)$$

Упрощение дает следующее выражение

$$P_u = P_m \left[ 1 + \frac{Q_{in} \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{1-n}}{m c_v T_m} \right], \quad (2.23)$$

Теперь все члены уравнения 2.23 известны, за исключением  $T_m$ , которое можно найти следующим образом. Отношение удельных теплоемкостей равно

$$n = \frac{C_p}{C_v} \quad (2.24)$$

где

$C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;

$C_v$  – теплоемкость при постоянном объеме.

Газовая постоянная может быть записана как

$$R = C_p - C_v \quad (2.25)$$

На основании формул 2.24 и 2.25 получаем

$$R = (n - 1)C_v \quad (2.26)$$

Закон идеального газа можно записать в виде

$$PV = mRT \quad (2.27)$$

Подставляя 2.26 в 2.27, получаем следующее выражение

$$PV = m(n - 1)C_v T \quad (2.28)$$

Таким образом, в средней точке сжатия

$$P_m V_m = m(n - 1)C_v T_m \quad (2.29)$$

или

$$\frac{P_m V_m}{(n-1)} = m C_v T_m \quad (2.30)$$

Подставляя уравнения 2.3 и 2.30 в 2.23, получаем среднюю точку давления расширения

$$P_u = P_m + \frac{Q_{in} \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{1-n} (n-1)}{A_B x_m} \quad (2.31)$$

Теперь баланс сил в уравнении 2.7 можно записать в виде

$$\left( \left\{ P_m + \frac{Q_{in} \left( \frac{x_m}{x_m - x_s} \right)^{1-n} (n-1)}{A_B x_m} \right\} \left( \frac{x_m}{x_m + x} \right)^n - P_m \left( \frac{x_m}{x_m - x} \right)^n \right) A_B - F(x) = m \ddot{x} \quad (2.32)$$

Упрощение дает уравнение баланса сил, которое может быть использовано для моделирования стационарного режима работы линейного СПДВС

$$A_B P_m \left[ \left( 1 + \frac{x}{x_m} \right)^{-n} - \left( 1 - \frac{x}{x_m} \right)^{-n} \right] + \frac{Q_{in} (n-1)}{x_m - x_s} - F(x) = m \ddot{x} \quad (2.33)$$

Уравнение 2.33 содержит среднюю точку давления сжимающего цилиндра  $P_m$ , которое не может быть известно заранее. Тем не менее, давление на входе в точке 1, как правило, известно. Таким образом, средняя точка давления  $P_m$  может быть легко найдена при условии адиабатического сжатия из точки 1 в точку  $A$ , что дает следующее уравнение

$$P_m = P_1 \left( \frac{V_1}{V_m} \right)^n \quad (2.34)$$

Подставляя уравнения 2.3 и 2.9 в 2.34 получаем выражение для  $P_m$

$$P_m = P_1 \left( \frac{x_m + x_s}{x_m} \right)^n \quad (2.35)$$

Преобразуем уравнения 2.10 в следующий вид

$$x_s = x_m \frac{r - 1}{r + 1} \quad (2.36)$$

Подставляя уравнение 2.36 в 2.35 получим

$$P_m = P_1 \left( \frac{2r}{r + 1} \right)^n \quad (2.37)$$

Тогда уравнение баланса сил можно выразить через давление на входе топлива и степень сжатия

$$A_B P_1 \left( \frac{2r}{r + 1} \right)^n \left[ \left( 1 + \frac{x}{x_m} \right)^{-n} - \left( 1 - \frac{x}{x_m} \right)^{-n} \right] + \frac{Q_{in}(n - 1)}{x_m - x_s} - F(x) = m\ddot{x} \quad (2.38)$$

Решение данного уравнения позволяет определить положение и скорость поршневой группы и, соответственно, индуктора СПДВС, работающего в стационарных условиях.

### 2.1.2. Рассмотрение особого случая работы СПДВС

Рассмотрим идеализированный режим работы СПДВС без учета сил трения и при условии отсутствия нагрузки. Силы, генерируемые при сжатии и расширении газов в цилиндрах, будут поддерживать движение индуктора. Следовательно, результатом данного режима работы СПДВС без трения и нагрузки будет естественная частота индуктора СПДВС. Тем не менее, анализ данного частного случая даст информацию о скорости колебаний поршневой

группы СПДВС при нормальных условиях эксплуатации.

В данном режиме имеем

$$F(x) = 0 \quad (2.39)$$

и

$$Q_{in} = 0 \quad (2.40)$$

Подставляя 2.39 и 2.40 в 2.38, получаем следующее уравнение баланса сил

$$A_B P_1 \left( \frac{2r}{r+1} \right)^n \left[ \left( 1 + \frac{x}{x_m} \right)^{-n} - \left( 1 - \frac{x}{x_m} \right)^{-n} \right] = m\ddot{x} \quad (2.41)$$

Хотя уравнение 2.41 для специального случая работы СПДВС без сил трения и нагрузки, данные о параметрах СПДВС при нормальной загрузке можно определить на основе данного соотношения.

Если нужное количество тепла  $Q_{in}$  добавляется к СПДВС при нормальных условиях эксплуатации, величина  $\frac{Q_{in}(n-1)}{x_m - x_s}$  полностью компенсирует величину  $F(x)$  и тогда уравнение (2.41) можно рассматривать как работу СПДВС под нагрузкой.

Если же тепла будет слишком много, то тогда ход поршня увеличиться до максимального значения вплоть до соприкосновения с головкой цилиндра. Если количество теплоты недостаточно для компенсации сил трения, то ход поршня будет становиться все короче, пока движение полностью не затухает.

Однако на практике работа двигателя не следует в точности идеализированному циклу Отто и СПДВС работает с несколько меньшей частотой, чем его собственная полученная из уравнения 2.41. По мере увеличения нагрузки, реальные параметры отклоняется от модели без нагрузки. К тому же специфика работы двухтактного двигателя вызывает дополнительные отклонения от идеализированной модели. Результатом этого является уменьшение частоты перемещения поршня, поскольку нагрузка увеличивается. Тем не менее, так как это снижение скорости мало по сравнению диапазоном изменения нагрузки,

результаты идеализированной модели обеспечивают близкое приближение режимов работы СПДВС и достаточны для использования в данном исследовании.

## 2.2. Моделирование электромеханических процессов в синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами

### 2.2.1. Разработка математической модели синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия

Для полного решения уравнения баланса сил (2.38) необходимо определить значения электромагнитных сил возникающих в линейной электрической машине.

Разработка математической модели синхронной ЭМВПД с ПМ является необходимым условием для определения конструктивных параметров электрической машины, а также внешних и внутренних факторов, влияющих на ее работу [122].

Внешние возмущающие механические колебания, действующие на синхронную ЭМВПД с ПМ, зачастую носят нестабильный характер. Поэтому целесообразна работа синхронной ЭМВПД с ПМ на выпрямительную нагрузку с последующим аккумулярованием энергии.

Эквивалентная схема представлена на рисунке 2.3., где  $L_a$ ,  $R_0$  – индуктивность и активное сопротивление рабочей обмотки;  $L_L$ ,  $R_L$  – индуктивность и активное сопротивление нагрузки, с учетом сопротивления выпрямителя;  $E_v$  – ЭДС движения, наводимая в рабочей обмотке при перемещении магнитов [63,123,130].

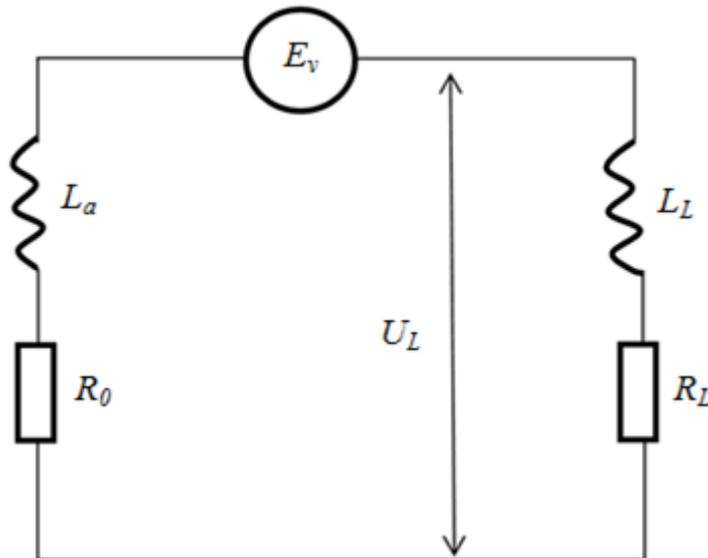


Рисунок 2.3. Эквивалентная схема электрической машины возвратно-поступательного действия

Движение магнитов подчиняется закономерности (2.42)

$$x = x_m \sin \omega t, \quad (2.42)$$

где  $x_m$  – амплитуда движения магнитов;

$\omega$  – круговая частота перемещения магнитов.

ЭДС движения  $E_v$  описывается выражением (2.43)

$$E_v = C_{MW} \frac{dx}{dt} = C_{MW} x_m \omega \cos \omega t, \quad (2.43)$$

где  $C_{MW}$  – коэффициент электромагнитной силы, находится по формуле (2.44).

$$C_{MW} = k_{MW} \frac{2\mu_0 l F_M w}{\pi k_\mu a}, \quad (2.44)$$

где  $k_{MW}$  – коэффициент линеаризации электромагнитной силы;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$ ;

$l$  – длина окружности магнита  $D_M$ ;

$F_M$  – магнитодвижущая сила магнита;

$w$  – число витков обмотки;

$k_\mu$  – коэффициент насыщения 1,05;

$a$  – параметр, зависящий от длины магнита и воздушных зазоров.

Система уравнений равновесия напряжения для тока  $i$  описана в (2.45).

$$\begin{cases} (L_a + L_L) \frac{di}{dt} + (R_0 + R_L)i + E_v = 0 \\ U_L = L_L \frac{di}{dt} + R_L i \end{cases} \quad (2.45)$$

где  $U_L$  – напряжение нагрузки.

При эксплуатации электрического линейного генератора возвратно-поступательного движения необходимо стабилизировать выходное напряжение при изменении нагрузки (тока нагрузки  $i$ ), что вызывает трудность, связанную с тем, что источником возбуждения в нашем случае являются постоянные магниты и регулировать поток которых крайне сложно.

Решение задачи стабилизации напряжения возможно за счет изменения амплитуды колебаний свободно-поршневого генератора  $x_s$  (ход индуктора), а значит и ЭДС движения линейного генератора. Воздействуя на первичный двигатель можно согласно формуле (2.43) обеспечить стабильный уровень напряжения на нагрузке  $U_L$ .

Недостатком уравнений (2.42-2.45) является то, что они не включают многие конструктивные параметры электрической машины возвратно-поступательного действия. Это не позволяет качественно провести выбор и оптимизацию конструктивных параметров электрической машины возвратно-поступательного действия.

С этой целью разработано соответствующее математическое описание электрической машины возвратно-поступательного действия для решения данной задачи.

### 2.2.2. Линейная токовая нагрузка

Важнейшими электромагнитными нагрузками электрической машины, определяющими степень использования материалов и размеры машины при заданной номинальной мощности, являются магнитная индукция в воздушном зазоре  $B_\delta$  и линейная токовая нагрузка  $A$  [64].

Линейная токовая нагрузка представляет собой сумму токов обмоток  $i$ , в нашем случае статора, на единицу длины статора  $l$ .

$$A = \frac{\sum_{v=1}^v i_v}{l} \quad (2.46)$$

Линейная нагрузка в статоре принимается равномерно распределённой по ширине катушки  $b_N$  (рисунок 2.4).

Для того чтобы отобразить линейную токовую нагрузку в виде уравнения представим его в виде ряда Фурье (распределение линейной токовой нагрузки представляет собой нечетную функцию).

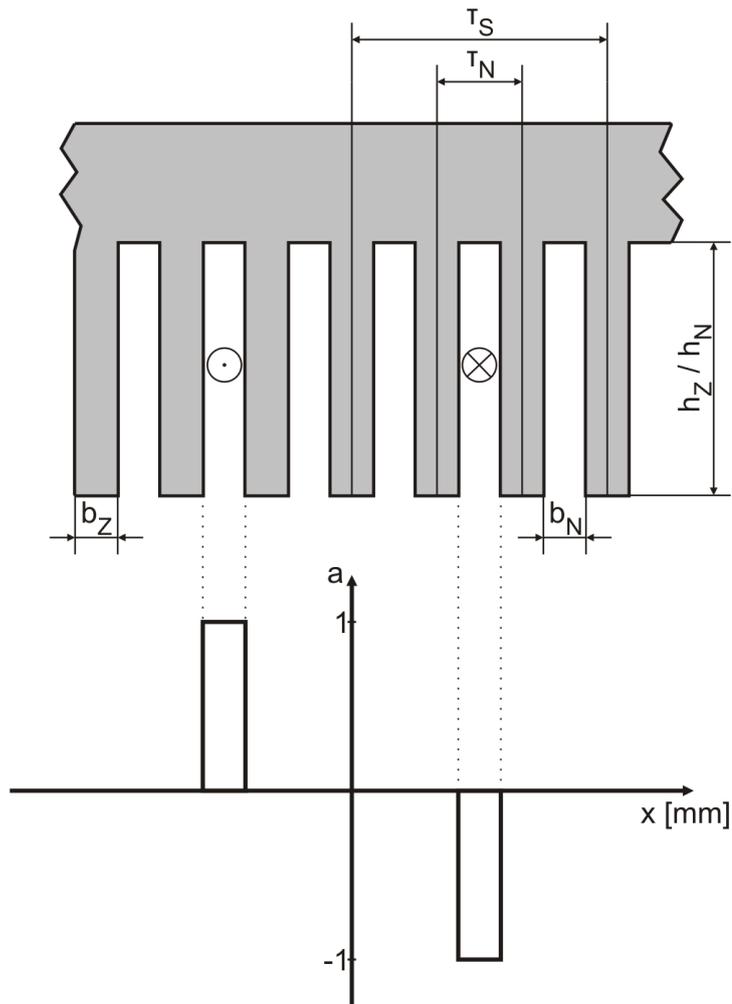


Рисунок 2.4. Геометрия статора линейной электрической машины:  $b_N$  – ширина катушки;  $b_Z$  – ширина зубца статора;  $\tau_S$  – полюсное деление статора;  $\tau_N$  – обмоточное деление;  $h_N$  – высота катушки;  $h_Z$  – высота зубца статора.

Общий подход разложения в ряд Фурье линейной токовой нагрузки в зависимости от координаты  $x$  дает следующее выражение

$$A(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{v=1}^{\infty} \left( A_k \cos \left( v \frac{2\pi}{\tau_S} x \right) + B_k \sin \left( v \frac{2\pi}{\tau_S} x \right) \right), \quad (2.47)$$

где

$A_0$  – постоянный коэффициент;

$A_k$  – коэффициенты Фурье;

$B_k$  – коэффициенты Фурье;

$v$  – номер гармоники;

$\tau_s$ - полюсное деление статора.

Так как линейная токовая нагрузка представляет собой нечетную функцию, то коэффициенты Фурье для данной функции  $A_k$  и постоянный коэффициент  $A_0$  равны нулю.

$$A_k = 0;$$

$$A_0 = 0.$$

Коэффициенты Фурье  $B_k$  в общем виде можно представить как

$$B_k = \frac{2}{T} \int_0^T A_a(x) \sin(vx) dx. \quad (2.48)$$

Линейная нагрузка согласно рисунку 2.4. для второй и пятой обмоток (слева направо) будет иметь вид

$$A(x) = \begin{cases} 1, & -\frac{\tau_s}{2} - \frac{b_N}{2} < x < -\frac{\tau_s}{2} + \frac{b_N}{2} \\ -1, & \frac{\tau_s}{2} - \frac{b_N}{2} < x < \frac{\tau_s}{2} + \frac{b_N}{2} \end{cases}, \quad (2.49)$$

где

$b_N$  – ширина паза для обмотки.

При дальнейших выкладках учитываем, что участие в создании линейной токовой нагрузки участвуют только нечетные гармоники, поэтому  $v \rightarrow (2v + 1)$  [64]. Согласно рисунку 2.4. значение линейной нагрузки для второй обмотки постоянно, в связи с этим значение  $A(x)$  в формуле 2.48 принимаем равным

$$A(x) = \frac{\omega_n \cdot i_{n2}}{b_N}.$$

Тогда для второй обмотки получим следующее выражение для линейной токовой нагрузки

$$A(x) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\omega_n \cdot i_{n2}}{b_N} \cdot \sum_{v=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{2v+1} \cdot \cos \left( (2v+1)\pi \left( \frac{1}{2} - \frac{b_N}{2\tau_s} \right) \right) \cdot \sin \left( (2v+1) \left( \frac{\pi}{\tau_s} (x) \right) \right) \right], \quad (2.50)$$

где

$\omega_n$  – количество витков обмотки;

$i_{n2}$  – ток во второй обмотке.

Преобразуем данное выражение по аналогии с теорией вращающихся электрических машин с учетом трехфазной системы

$$120^\circ = \frac{2\pi}{3} = \frac{\tau_s}{3}.$$

Получим

$$A(x) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\omega_n i_{n2}}{b_N} \cdot \sum_{v=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{2v+1} \cdot \cos \left( (2v+1)\pi \left( \frac{1}{2} - \frac{b_N}{2\tau_s} \right) \right) \cdot \left[ \sin \left( (2v+1) \left( \frac{\pi}{\tau_s} (x) \right) \right) + \sin \left( (2v+1) \left( \frac{\pi}{\tau_s} (x) - \frac{2\pi}{3} \right) \right) + \sin \left( (2v+1) \left( \frac{\pi}{\tau_s} (x) + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right] \right]. \quad (2.51)$$

Так как линейная токовая нагрузка в рассматриваемой линейной электрической машине не отличается от вращающейся электрической машины, коэффициент распределения обмотки в статоре можем записать как

$$\xi_n = \frac{\sin\left(\frac{1}{6}v\pi\frac{b_N}{\tau_N}\right)}{\frac{1}{6}v\pi\frac{b_N}{\tau_N}}, \quad (2.52)$$

где

$\tau_N$  - обмоточное деление.

Коэффициент укорочения шага обмотки диаметра обмотки при  $W=\tau_p$

$$\xi_s = \sin\left(v\frac{\pi W}{2\tau_p}\right) = \sin\left(v\frac{\pi}{2}\right), \quad (2.53)$$

где

$W$ - шаг витка обмотки;

$\tau_p$ - полюсное деление.

Подставив значения коэффициента укорочения шага (2.52) и коэффициент распределения обмотки (2.53) в выражение (2.51) получим

$$A(x) = \frac{2}{\tau_s} \cdot \omega_n \cdot \sum_{v=0}^{\infty} \xi_n \cdot \xi_s \cdot \left[ i_1 \cdot \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_s}(x)\right)\right) + i_2 \cdot \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_s}(x) - \frac{2\pi}{3}\right)\right) + i_3 \cdot \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_s}(x) - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right]. \quad (2.54)$$

Допустим, что трехфазная обмотка нагружена симметричными токами

$$\begin{aligned}
 i_1(t) &= \sqrt{2}I \cos(\omega t) \\
 i_2(t) &= \sqrt{2}I \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 i_3(t) &= \sqrt{2}I \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right).
 \end{aligned}
 \tag{2.55}$$

Получим следующее выражение для токовой линейной нагрузки

$$A(x, t) = \frac{3}{\tau_s} \cdot \omega_n \cdot I \cdot \sqrt{2} \sum_{v_D=0}^{\pm\infty} \xi_n \cdot \xi_s \cdot \sin\left(v_D \frac{\pi}{\tau_s} x - \omega t\right),
 \tag{2.56}$$

где  $v_D = 6g + 1$ ,  $g = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$

### 2.2.3. Расчет результирующего значения магнитной индукции в воздушном зазоре

Магнитная индукция в воздушном зазоре

$$B_s(x, t) = \mu_0 \cdot \frac{\Phi}{\delta} = -\frac{\mu_0}{\delta} \cdot \int A(x, t) dl,
 \tag{2.57}$$

где

$\mu_0$  – магнитная постоянная;

$\Phi$  – магнитный поток;

$\delta$  – величина воздушного зазора.

После подстановки в (2.57) формулы (2.56) получим

$$B_s(x, t) = \frac{\sqrt{2} \cdot 3 \cdot \mu_0 \cdot \omega_n \cdot I}{\delta \cdot \pi} \sum_{v_D=0}^{\pm\infty} \frac{\xi_n \cdot \xi_s}{v_D} \cdot \cos\left(v_D \frac{\pi}{\tau_s} x - \omega t\right).
 \tag{2.58}$$

Магнитная индукция, создаваемая постоянными магнитами индуктора

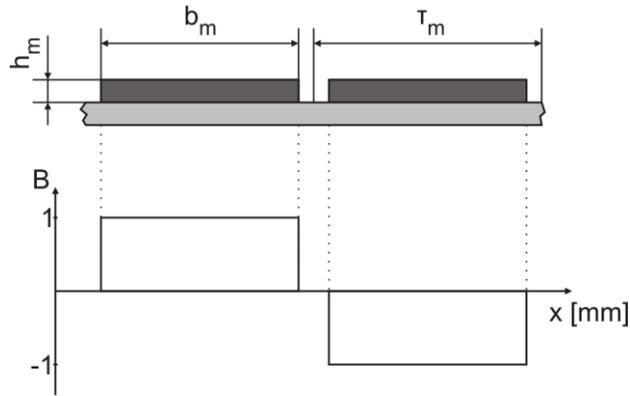


Рисунок 2.6. Магнитная индукция в индукторе:  $b_m$  – ширина магнита;  $h_m$  – высота магнита;  $\tau_m$  – полюсное деление магнита.

Распределение магнитного поля для дальнейшего его разложения в ряд Фурье выглядит следующим образом:

$$B_{er}(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < -\frac{\tau_m}{2} + \frac{b_m}{2} \\ B_0, & -\frac{\tau_m}{2} - \frac{b_m}{2} < x < \frac{\tau_m}{2} - \frac{b_m}{2} + b_m, \end{cases} \quad (2.59)$$

где

$B_0$ - остаточная намагниченность;

$\tau_m$ - полюсное деление индуктора;

$b_m$ - ширина магнита.

Данный подход, аналогичный расчету линейной токовой нагрузки, позволяет получить следующее выражения для индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами  $B_{er}(x)$ :

$$B_{er}(x) = B_0 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{v=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{2v+1} \cdot \cos \left( (2v+1)\pi \left( \frac{1}{2} - \frac{b_{pm}}{2\tau_s} \right) \right) \cdot \sin \left( (2v+1) \left( \frac{\pi}{\tau_{pm}}(x) \right) \right) \right]. \quad (2.60)$$

Складывая индукции воздушного зазора статора и индуктора получаем результирующее значение индукции в воздушном зазоре

$$\begin{aligned} B_{lsp}(x, t) &= B_{er}(x) + B_s(x, t) \\ &= B_0 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{v=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{2v+1} \cdot \cos \left( (2v+1)\pi \left( \frac{1}{2} - \frac{b_m}{2\tau_s} \right) \right) \cdot \sin \left( (2v+1) \left( \frac{\pi}{\tau_m}(x) \right) \right) \right] \\ &\quad + \frac{\sqrt{2} \cdot 3 \cdot \mu_0 \cdot \omega_n \cdot I}{\delta \cdot \pi} \sum_{v_D=0}^{\pm\infty} \frac{\xi_n \cdot \xi_s}{v_D} \cdot \cos \left( v_D \frac{\pi}{\tau_s} x - \omega t \right). \end{aligned} \quad (2.61)$$

#### 2.2.4. Расчет электромагнитной силы

Электромагнитная сила линейной машины рассчитывается как

$$F_x(x, t) = 2pl_{sp} \int_0^{\tau_s} A(x, t) \cdot B_{er}(x) dx, \quad (2.62)$$

где

$p$  – число пар полюсов;

$l_{sp}$  – длина воздушного зазора.

Подставив в данное выражение (2.62) уравнения для линейной токовой нагрузки  $A(x, t)$  (2.56) и индукции  $B_{er}(x)$  уравнение (2.60) получим разложение в ряд Фурье для намагничивающей силы в направлении  $x$

$$F_x(x, t) = 2pl_{sp} \int_{v_D=-\infty}^{+\infty} A_{vD} B_{ervD} \int_0^{\tau_s} \sin\left(v_D \frac{\pi}{\tau_s} x - \omega t\right) \cdot \sin\left(v_D \frac{\pi}{\tau_m} x\right) dx, \quad (2.66)$$

куда входят независимая от положения  $x$  и времени  $t$  составляющая поля возбуждения  $B_{ervD}$

$$B_{ervD} = B_0 \cdot \frac{4}{\pi v_D} \cdot \cos\left(v_D \pi \left(\frac{1}{2} - \frac{b_m}{2\tau_s}\right)\right), \quad (2.67)$$

и независимая от положения  $x$  и времени  $t$  составляющая линейной токовой нагрузки  $A_{vD}$

$$A_{vD} = \frac{3}{\tau_s} \cdot \omega_n \cdot I \cdot \sqrt{2} \cdot \xi_n \cdot \xi_s, \quad (2.68)$$

После тригонометрических преобразований получим значение электромагнитной силы намагничивания в направлении  $x$

$$F_x(x, t) = 2pl_{sp} \int_{v_D=-\infty}^{+\infty} A_{vD} B_{ervD} \int_0^{\tau_s} \cos\left(x\pi \left(\frac{v_E}{\tau_m} - \frac{v_D}{\tau_s}\right) + \omega t\right) - \cos\left(x\pi \left(\frac{v_E}{\tau_m} + \frac{v_D}{\tau_s}\right) - \omega t\right) dx. \quad (2.69)$$

Учитывая взаимосвязь между высшими гармоническими составляющими линейной токовой нагрузки, индукции и скоростью индуктора относительно статора, можно сделать следующие выводы:

- взаимодействие высших гармонических составляющих линейной токовой нагрузки и магнитной индукции, чьи порядковые номера не совпадают, не вносят вклад в создание электромагнитной силы в направлении оси  $x$ .

$$F_x(x, t) = 0. \quad (2.70)$$

- взаимодействие высших гармонических составляющих линейной токовой нагрузки и магнитной индукции, чьи порядковые номера совпадают и циркулируют несинхронно, не вносят вклад в создание силы в направлении оси  $x$ .

В результате в электрической машине образуется качающаяся (тормозная) сила.

$$F_x(x, t) = 2pl_{sp} \int_{v_D=0}^{\pm\infty} A_{vD} B_{ervD} \cos(w_s t). \quad (2.71)$$

- в рассматриваемой системе отсутствует относительная скорость между индуктором и полем статора из-за наличия системы регулирования линейного генератора, что приводит к следующему уравнению:

$$F_x(x) = pl_{sp} \int_{v_D=0}^{\pm\infty} A_{vD} B_{ervD}. \quad (2.72)$$

Высшие гармонические составляющие с порядковыми номерами 7 и 13 вносят значительный вклад в создание силы намагничивания. Данный вывод указывает на то, что рассмотрение линейной электрической машины в качестве машины, в которой силы формируются на основной 1-ой гармонике не допустимо.

#### 2.2.5. Расчет индуктивных сопротивлений

Для определения индуктивности трехфазной обмотки сначала необходимо определить магнитный поток, согласно выражению

$$\Phi = \int_0^A B(x, t) \cdot dA = l_l \cdot \int_0^{\tau_s} B(x) \cdot dx, \quad (2.73)$$

где

$l_l$  – длина индуктора.

Ток  $I_2$  выбирается как базовый, что приводит к смещению магнитного индукции на  $\frac{\pi}{2}$ . Подставляя в формулу (2.73) магнитного потока значение магнитной индукции  $B(x, t)$  из формулы (2.58), учитывая смещение индукции, получаем

$$\Phi(x, t) = l_l \cdot \frac{3 \cdot \mu_0 \cdot \omega_s \cdot I_2}{\delta' \cdot \pi} \int_0^{\tau_s} \cos\left(\frac{\pi}{\tau_s} x + \frac{\pi}{2}\right) dx. \quad (2.74)$$

После интегрирования получаем выражение для магнитного потока

$$\Phi = l_l \cdot \frac{6 \cdot \mu_0 \cdot \omega_s \xi_s \cdot I_2 \cdot \tau_s}{\delta' \cdot \pi^2}. \quad (2.75)$$

Потокосцепление можно выразить в общем как

$$\psi = \omega_s \cdot \xi_s \cdot \Phi. \quad (2.76)$$

После подстановки (2.75) в (2.76) получим

$$\psi = l_l \cdot \frac{6 \cdot \mu_0 \cdot (\omega_s \xi_s)^2 \cdot I_2 \cdot \tau_s}{\delta' \cdot \pi^2}. \quad (2.77)$$

Для расчета индуктивности воспользуемся общей формулой

$$\psi = L \cdot I. \quad (2.78)$$

После подстановки (2.77) в (2.78) получаем

$$L = l_l \cdot \frac{6 \cdot \mu_0 \cdot (\omega_s \xi_s)^2 \cdot \tau_s}{\delta' \cdot \pi^2}. \quad (2.79)$$

Подставляя значения электрической машины из таблицы базовых параметров, получим значение индуктивности:

$$L = 4,036 \text{ мГн}$$

Линии магнитной индукции поля рассеяния, вызванные током статора, не будучи связаны с магнитным полем индуктора, представлены на рисунке 2.7.

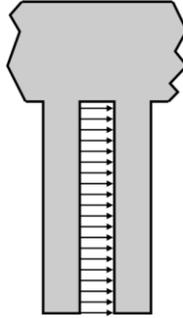


Рисунок 2.7. Поле рассеяния в пазу

Индуктивное сопротивление пазового рассеяния  $L_{\sigma n}$  рассчитывается аналогично теории вращающихся машин согласно уравнению

$$L_{\sigma n} = 2\mu_0 \frac{\omega_s}{p} l_E \frac{\lambda_n}{q}. \quad (2.80)$$

Относительная магнитная проводимость рассеяния паза рассчитывается как

$$\lambda_n = \frac{h_L}{3 \cdot b_N}. \quad (2.81)$$

После подстановки табличных значений в уравнения получим значение индуктивного сопротивления пазового рассеяния

$$L_{\sigma n} = 2,75 \text{ мГн}$$

Линии магнитной индукции поля рассеяния по коронкам зубцов, вызванные током статора, не будучи связаны с полем индуктора, представлены на рисунке 2.8.

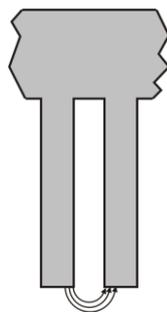


Рисунок 2.8. Поле рассеяние в зубцах

Индуктивное сопротивление рассеяния  $L_{\sigma z}$  по коронкам зубцов рассчитывается аналогично теории вращающихся машин согласно уравнению

$$L_{\sigma z} = 2\mu_0 \frac{\omega_s}{p} l_E \frac{\lambda_z}{q}. \quad (2.82)$$

Относительная магнитная проводимость рассеяния по коронкам зубцов рассчитывается как

$$\lambda_z = \frac{5 \cdot \left(\frac{k_c \delta_g}{b_N}\right)}{5 + 4 \cdot \left(\frac{k_c \delta_g}{b_N}\right)}. \quad (2.83)$$

После подстановки табличных значений в уравнения получим значение индуктивного сопротивление по коронкам зубцов

$$L_{\sigma z} = 0,35 \text{ мГн.}$$

### 2.2.6. Активное сопротивление обмотки

Согласно общеизвестной формуле сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от свойств вещества проводника, его длины, сечения и вычисляется по формуле:

$$R_{sp} = \rho_{cu} \frac{l_{Le}}{A_{Le}}. \quad (2.84)$$

Примем средний радиус катушки обмотки статора

$$r_{spm} = \frac{r_{spa} + r_{spi}}{2}. \quad (2.85)$$

Учитывая двойной слой плоской меди обмотки статора, получим сопротивление обмотки (без протекания тока)

$$R_{sp} = \rho_{cu} \frac{2\pi r_{spm}}{2b_{Le} h_{Le}}. \quad (2.86)$$

При наличии токовой нагрузки в стационарном режиме повышение активного сопротивления за счет выделения тепла учитывается температурным коэффициентом  $k_{20}$

$$R_{sp(\theta)} = \rho_{cu} \frac{2\pi r_{spm}}{2b_{Le} h_{Le}} \cdot (1 + k_{20}(\theta - 20^\circ\text{C})). \quad (2.87)$$

После подстановки табличных значений в уравнения получим значение активного сопротивления обмотки статора одной фазы состоящей из 10 катушек

$$R_{st}(20^\circ\text{C}) = 28 \text{ мОм.}$$

Схема замещения обмотки

Для определения схемы замещения используются индуктивности, полученные выше преобразованные в реактивное сопротивление. На рисунке 2.9. представлена схема замещения одной фазы.

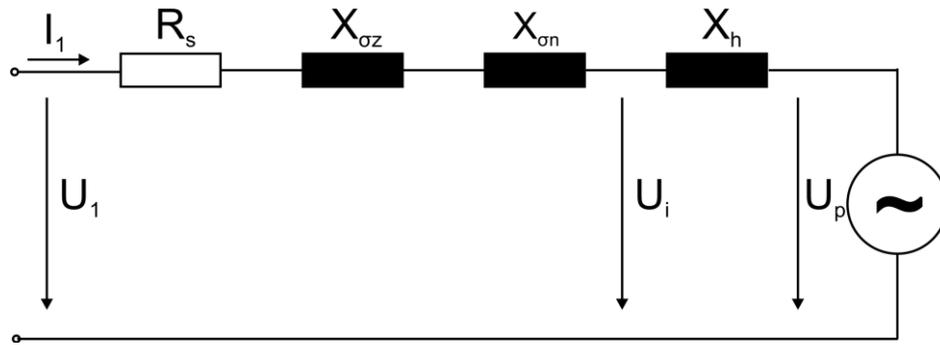


Рисунок 2.9. Схема замещения

### 2.2.7. Расчет потерь в синхронной ЭМВПД с ПМ

На рисунке 2.10. представлено распределение потерь в линейной электрической машине.

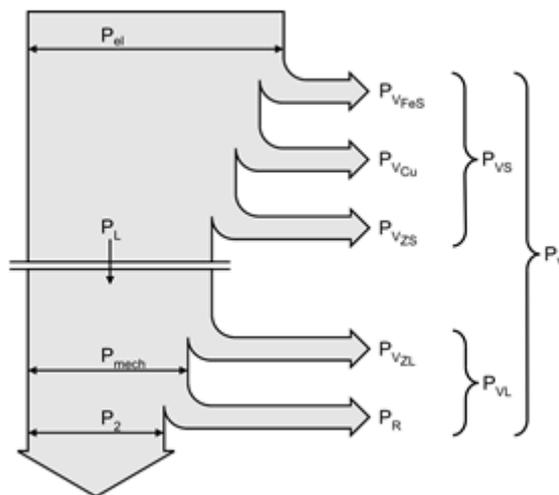


Рисунок 2.10. Распределение потерь

Большую часть потерь составляют потери в стали статора  $P_{vfe}$  и в обмотках (в меди)  $P_{vCu}$ . При этом потери в обмотках увеличиваются по мере увеличения вырабатываемой мощности, то есть зависят от силы тока.

Потери в стали напротив зависят от частоты работы машины. Дополнительные потери в машине создаются пульсационными потерями от высших гармонических составляющих, вихревых токов и т.д.

Потери в стали в электрической машине складываются из потерь на перемагничивание в электротехнической стали (потери на гистерезис) и потери от вихревых токов. Обе эти составляющие рассчитываются отдельно.

$$P_{vfe} = P_{vfe,Hy} + P_{vfe,Wi}. \quad (2.88)$$

Потери на гистерезис:

Потери на гистерезис при перемагничивании магнитопроводящего материала определяются площадью ограниченной кривой гистерезиса  $B-H$ . Энергия на потери гистерезисе преобразуется в тепло

$$W_{hys} = \int_t^{t+T} \theta d\phi. \quad (2.89)$$

Потери на гистерезис в течении одного периода, согласно [22]

$$P_{vfe,Hy} = k_{zhy} \cdot m \cdot p_{1,5/50} \left( \frac{f}{50Hz} \right) \left( \frac{B}{1,5T} \right)^2, \quad (2.90)$$

где  $m$  – масса стали статора;

$p_{1,5/50}$  – удельные потери в стали на единицу массы при частоте 50 Гц и индукции 1,5 Т;

$B$  – средние значения индукции;

$k_z$  – коэффициент, учитывающий увеличение потерь вследствие обработки стали.

Потери от вихревых токов рассчитывается согласно формуле

$$P_{vfe,Wi} = k_{zwi} \cdot m \cdot \sigma_{wb/50Hz,1,5T} \left( \frac{f}{50Hz} \right)^2 \left( \frac{B}{1,5T} \right)^2 \quad (2.91)$$

Значение  $\sigma_{wb/50Hz,1,5T}$  зависит от свойств материала и указывает на потери от вихревых токов при частоте 50 Гц и индукции 1,5 Тл (задается производителем).

Потери в меди выражаются общеизвестной формулой

$$P_{vscu} = R_0 \cdot I_{eff}^2. \quad (2.92)$$

Наряду с основными потерями в стали и в обмотках в электрической машине присутствуют дополнительные потери. Данные потери можно разделить на зависящие и независящие от нагрузки.

Добавочные потери при нагрузке  $P_{доб}$  в синхронных машинах определяют в процентах от подводимой мощности двигателей или от полезной мощности генераторов. Для синхронных машин мощностью до 1000 кВт добавочные потери при нагрузке принимают равными 0,5 %.

### 2.2.8. Расчет коэффициента полезного действия

КПД линейного генератора рассчитываются по формуле (2.1).

$$\eta = \frac{P_{эл}}{P_{мех}}, \quad (2.93)$$

где  $P_{эл}$  — выходная мощность синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме генератора, Вт,

$P_{мех}$  — механическая мощность, передаваемая от приводного механизма.

Так как механическая мощность от приводного механизма не всегда можно точно измерить, ввиду линейного перемещения индуктора между двумя крайними положениями, формулу (2.93) рациональнее представить в виде (2.94).

$$\eta = \frac{P_{эл}}{P_{эл} + P_{стали} + P_{меди} + P_{доб}}, \quad (2.94)$$

где  $P_{ст}$  — потери мощности в стали статора, Вт;

$P_{меди}$  — потери мощности в обмотке статора, Вт;

$P_{доб}$  — добавочные потери, Вт.

Средняя электрическая мощность  $P_{эл\_ср}$  при несинусоидальных токах и напряжениях за цикл  $T$  может быть выражена в виде

$$P_{эл\_ср} = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \quad (2.95)$$

Подставляя в выражение (2.95) напряжение и ток, представленные рядами Фурье и учитывая, что слагаемые второй суммы равны нулю, получаем

$$P_{эл\_ср} = \sum \frac{1}{T} \int_0^T u_k(t) i_k(t) dt = \sum P_k = P_1 + P_2 + \dots P_k \quad (2.96)$$

Из выражения (2.96) следует, что средняя активная мощность с несинусоидальными токами и напряжениями равна сумме активных мощностей отдельных гармоник. Учитывая вышеприведенные выкладки при расчете генерируемой мощности, учитываем 1-ую и последующие нечетные гармоники до 13-ой.

Данные выражения справедливы для генератора и двигателя, ротор которых двигается с постоянной скоростью в бесконечном статоре, или другими словами, работающими при постоянной частоте и напряжении. Данные выражения подходят для синхронных электрических машин возвратно-поступательного движения при оптимизации конструктивных параметров [177].

КПД синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме генератора зависит от частоты перемещения индуктора  $f$ , хода индуктора ( $x_m$  - амплитуда колебаний) и тока статора. В связи с этим характеристика КПД представлена в зависимости от выдаваемой электрической мощности. На рисунке 2.11. представлены КПД генератора при различных значениях хода индуктора.

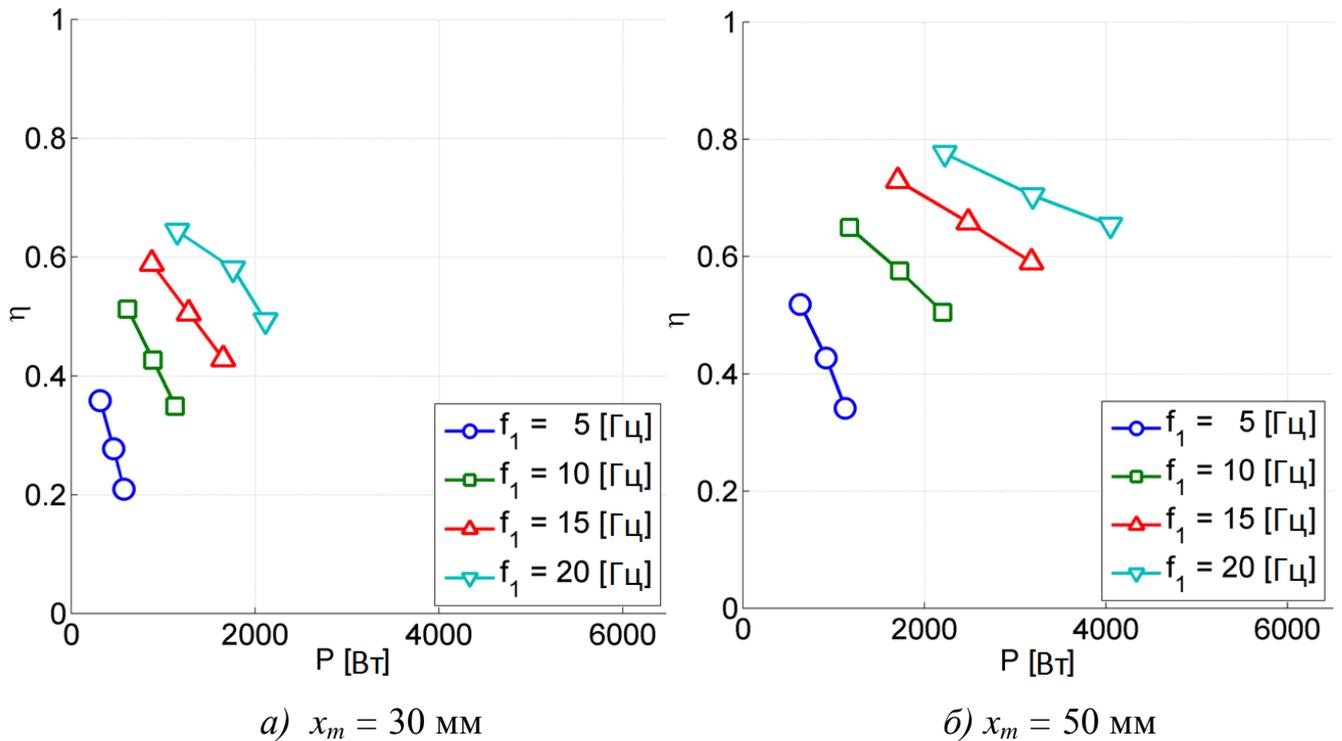


Рисунок 2.11. КПД при ходе индуктора 30 мм и 50 мм

КПД синхронной ЭМВПД с ПМ зависит от частоты перемещения индуктора, длины хода индуктора и генерируемой мощности. Зависимость КПД от трех параметров требует построения четырехмерного графика. Так как это невозможно графическое представление КПД предложено изобразить как зависимость КПД синхронной ЭМВПД с ПМ от частот перемещения индуктора и генерируемых мощностей при одном фиксированном значении длины хода индуктора.

### 2.3. Моделирование управляемого преобразователя с активной коррекцией коэффициента мощности

Внешние возмущающие механические колебания, действующие на синхронную ЭМВПД с ПМ, зачастую носят нестабильный характер [65].

Поэтому целесообразна работа синхронной ЭМВПД с ПМ на выпрямительную нагрузку с последующим аккумулированием энергии [66].

Среди трехфазных преобразователей наибольшее распространение получил типовой выпрямитель с IGBT транзисторами, функционирующий в режиме двигателя синхронный ЭМВПД с ПМ в качестве инвертора, а в режиме генератора синхронный ЭМВПД с ПМ как выпрямитель [67].

Введенные в последние годы международные и государственные стандарты жестко ограничивают эмиссию в сеть высших гармоник тока и создаваемые преобразователями искажения напряжения сети. Появление мощных высокочастотных полностью управляемых ключей позволило решать задачу электромагнитной совместимости с использованием коммутации ключей на высокой частоте и подавлением паразитных гармоник дросселями с небольшой индуктивностью. Такие установки получили название преобразователей с активной коррекцией коэффициента мощности или корректоров коэффициента мощности (ККМ) [68].

Среди трехфазных преобразователей с ККМ наибольшее распространение получил так выпрямитель, реализуемый на базе трехфазного инвертора напряжения и функционирующий как в инверторном, так и в обратимом (выпрямительном) режимах (рисунок 2.12).

Электромагнитные процессы в силовой части выпрямителя не имеют существенных отличий от работы инвертора напряжения в традиционном (инверторном) режиме.

ККМ могут функционировать с постоянной частотой коммутации (синхронное управление) либо с переменной частотой коммутации (асинхронное управление).

Асинхронные системы управления используют двухпозиционное слежение за током сети по имеющемуся задающему сетевому напряжению, когда коммутация в силовой схеме осуществляется при отклонении сетевого тока от заданного значения на величину  $\pm \Delta i$ . Применение таких систем управления в

трехфазных ККМ, подключенных к сети без нулевого провода, ограничено в связи с наличием трех проблем:

1) лишь два фазных сетевых тока из трех являются независимым, поэтому введение обратной связи по трем токовым каналам чревато сбоями в работе системы управления;

2) отмечается эффект потери управляемости, когда наблюдается выход мгновенного значения пульсаций фазного тока за пределы, задаваемые шириной петли гистерезиса релейного элемента;

3) сетевые напряжения часто искажены и несимметричны, что затрудняет синхронизацию с ними.

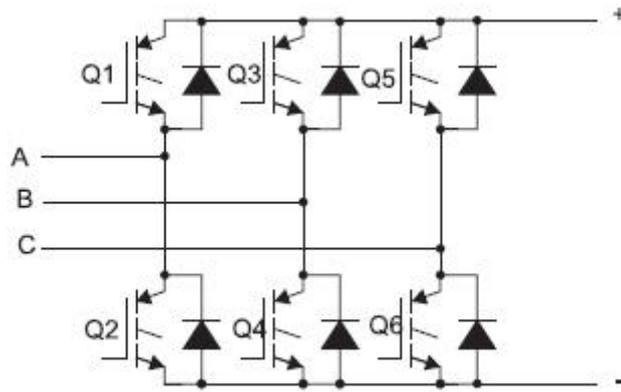


Рисунок 2.12. Типовой выпрямитель с IGBT транзисторами

Синхронные системы управления с постоянной частотой модуляции имеют проблемы определения фазового сдвига при переменной нагрузке и синхронизации с искаженной сетью.

Наиболее предпочтительным, выглядит создание синхронной системы управления трехфазными ККМ с замкнутым контуром по обобщенному вектору тока. Упрощенная структурная схема системы управления трехфазным ККМ показана на рисунке 2.13. Функционально система управления ККМ разделена на две подсистемы. Задачей первой является вычисление значений активной и реактивной составляющих мощности, которые преобразователь потребляет из АИЭ. Задачей второй подсистемы является управление переключением ключевых

элементов преобразователя напряжения для создания заданного потока мощности и фазы тока.

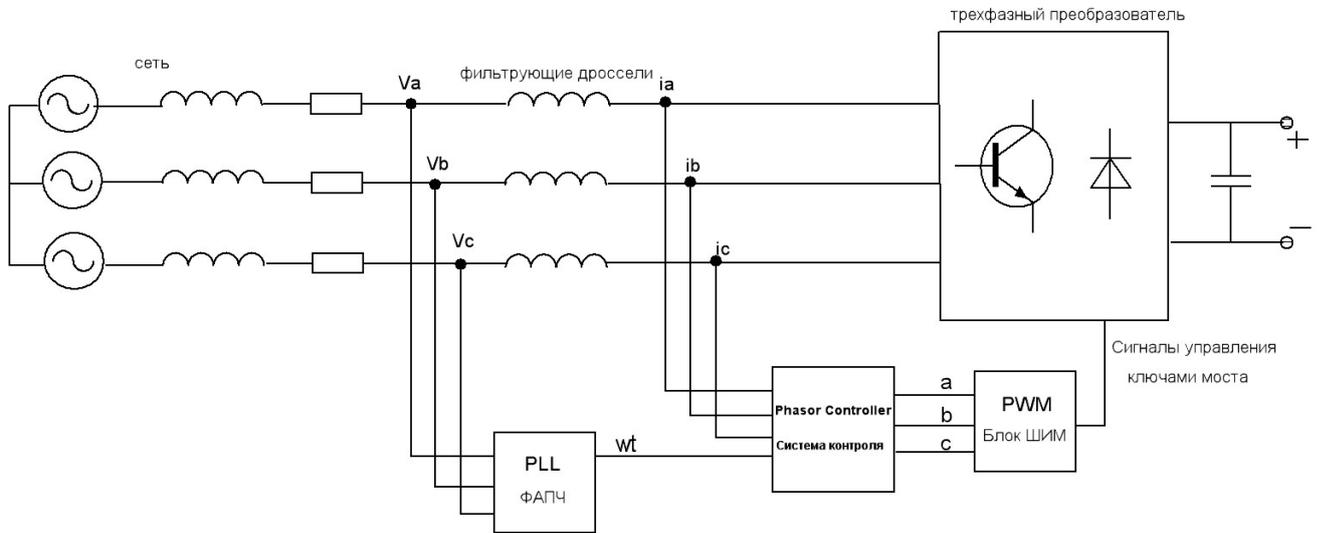


Рисунок 2.13. Структурная схема системы управления ККМ

Возможность регулирования реактивной составляющей мощности, потребляемой преобразователем из АИЭ, появляется при использовании метода «мгновенной мощности».

Метод «мгновенной мощности» основан на вычислении мощности преобразователя с использованием сетевых токов и напряжений в стационарной ортогональной системе координат. Переход к этой системе координат от трехфазной системы координат осуществляется посредством преобразования Кларка (abc- $\alpha\beta$  преобразование):

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}, \quad (2.97)$$

где  $i_{\alpha}(t)$  и  $i_{\beta}(t)$  – проекции пространственного вектора тока на оси двухфазной стационарной системы координат,  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$  – проекции пространственного вектора тока на оси трёхфазной системы координат.

Вводятся понятия действительной  $p(t)$  и мнимой  $q(t)$  мгновенных мощностей в  $\alpha - \beta$  координатах:

$$\begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha(t) & u_\beta(t) \\ -u_\alpha(t) & u_\beta(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix}. \quad (2.98)$$

Среднее значение действительной составляющей мгновенной мощности  $p(t)$  соответствует активной мощности в традиционном представлении. В то же время, мнимая мгновенная мощность  $q(t)$  не соответствует традиционной реактивной мощности. Поскольку составляющие мгновенных мощностей  $p$  и  $q$ , соответствующие активной и реактивной мощности, являются величинами постоянными (или медленно меняющимися в динамических режимах работы), то упрощается их выделение посредством фильтров низких частот (ФНЧ) с минимальной фазовой задержкой.

Возможность оперирования непосредственно активными и реактивными составляющими тока и напряжения, а не некими мгновенными мощностями, появляется при использовании метода управления в синхронной системе координат. Метод основан на прямом и обратном преобразовании Парка-Горева. Прямое преобразование заключается в нахождении проекций обобщенного вектора тока на оси ортогональной системы координат, вращающейся синхронно с вектором напряжения сети:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (2.99)$$

где  $\theta = \omega t$  - значение угла поворота вращающейся системы координат с частотой  $\omega$ .

Переменные составляющие проекций  $i_d$  и  $i_q$ , как будет показано ниже, соответствуют высшим гармоническим составляющим и обратной последовательности токов. Для выделения постоянных составляющих, несущих

информацию об активной и реактивной мощности, применяются фильтры низких частот (ФНЧ), как в методе «мгновенной мощности».

Обратное преобразование Парка-Горева осуществляется по формуле:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}. \quad (2.100)$$

Таким образом, если к трехфазной системе тока сначала применить прямое преобразование Кларка, а затем прямое преобразование Парка-Горева, то постоянные составляющие проекций на оси  $d - q$  соответствуют составляющим тока синхронной частоты  $\omega$ .

Непосредственное преобразование трехфазной системы координат в синхронную ортогональную осуществляется по:

$$\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_0(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}. \quad (2.101)$$

На рисунке 2.14. представлена схема генерации задающего сигнала, при использовании преобразование Парка-Горева.

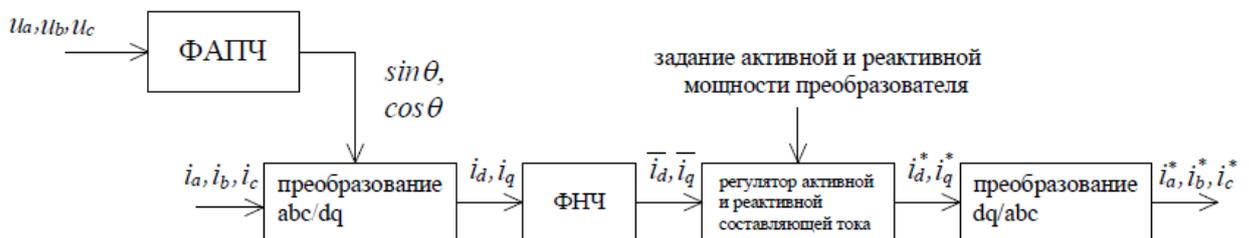


Рисунок 2.14. Схема вычисления тока задания активного выпрямителя с использованием преобразования Парка-Горева

Регулятор активной и реактивной составляющей тока вычисляет значения токов задания преобразователя в синхронной системе координат. С помощью обратного преобразования можно синтезировать обобщенный вектор тока с заданными параметрами, т.е. модулем, начальной фазой и частотой вращения.

Угол сдвига фаз между первыми гармониками сетевого тока и напряжения в синхронной системе координат описывается выражением:

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{i_q}{i_d} \right). \quad (2.102)$$

Таким образом, если прямое и обратное преобразование синхронизированы по фазе и частоте с напряжением сети, то регулирование до 0 составляющей тока АИЭ  $i_q$  позволяет полностью управляемому преобразователю работать с коэффициентом мощности близким к 1.

В общем случае средние значения составляющих и определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \bar{i}_d &= I_{1m} \cos \varphi; \\ \bar{i}_q &= I_{1m} \sin \varphi. \end{aligned} \quad (2.103)$$

Таким образом, для обеспечения контроля коэффициента мощности преобразователя достаточно отслеживать средние значения составляющих обобщенного вектора тока и формировать синусоидальный ток.

Однако вышеописанные свойства характерны лишь для симметричной сети неизменной частоты. В условиях несимметрии напряжения АИЭ необходимо, чтобы прямое и обратное преобразования Парка-Горева были синхронизированы по фазе и частоте с фазным напряжением сети. В общем случае угол поворота может изменяться произвольным образом:

$$\theta = \int_0^t \omega dt. \quad (2.104)$$

Так как в напряжении сети могут присутствовать высшие гармоники, то пересечение нуля кривой напряжения может не совпадать с нулевой фазой основной гармоники напряжения сети, что приведет к неверному заданию тока преобразователя и снижению коэффициента мощности.

Сложный спектральный состав составляющих обобщенного вектора тока в случае несимметричной несинусоидальной сети усложняет выделение постоянных составляющих  $i_d$  и  $i_q$ .

В дальнейшем одно из свойств преобразования несимметричной сети будет использовано для реализации системы фазовой автоподстройки частоты.

Необходимость синхронизации с напряжением сети эталонных единичных сигналов ( $\cos\varphi$  и  $\sin\varphi$ ) является недостатком метода управления в синхронной системе координат.

Как было отмечено выше, необходимость синхронизации преобразования Парка-Горева по фазе и частоте с напряжением питающей сети требует применение дополнительных схемотехнических решений в системе управления ККМ. Для синхронизации может использоваться система фазовой автоподстройки частоты (*Phase Locked Loop, PLL*). Система ФАПЧ обеспечивает высокую точность при несинусоидальности напряжения сети, так как она является следящей системой. Использование прямого преобразования Парка-Горева позволяет реализовать систему ФАПЧ (рисунок 2.15.), обеспечивающую отслеживание частоты сети и формирование эталонных единичных сигналов ( $\cos\varphi$  и  $\sin\varphi$ ).

В основу функционирования системы ФАПЧ положено следующее свойство преобразования Парка-Горева. Изменение частоты питающей сети можно трактовать как появление несимметрии в трехфазной системе напряжений, что вызовет отклонение от нуля составляющей обобщенного вектора напряжения  $\bar{u}_q$ . Выделение постоянной составляющей, содержащей информацию о первой гармонике фазного напряжения сети, осуществляется ФНЧ.

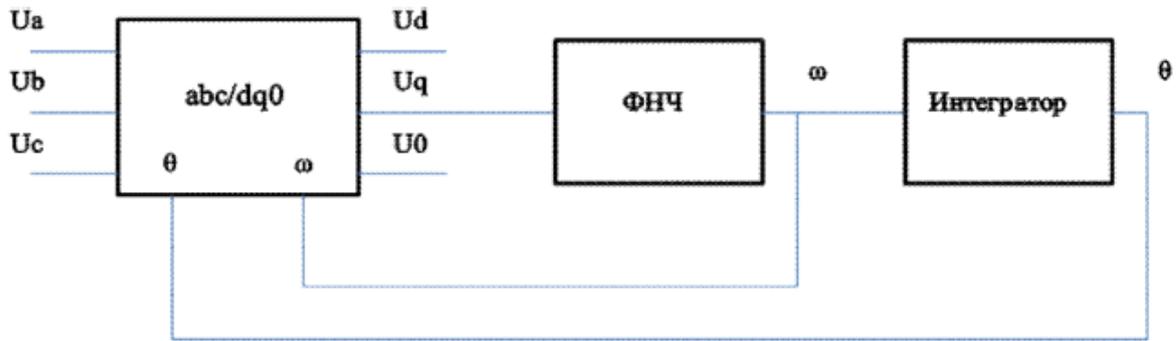


Рисунок 2.15. Схема фазовой автоподстройки частоты

Значение угла поворота вращающейся системы координат может быть получено интегрированием угловой частоты. Благодаря наличию обратной связи обеспечивается слежение за изменением частоты сети.

#### 2.4. Тепловая модель синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия

Задачи моделирования теплового режима синхронной ЭМВПД с ПМ:

- Создать как можно более точную картину тепловых процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ;
- Определить максимально допустимую потребляемую и выдаваемую мощность синхронной ЭМВПД с ПМ при температуре охлаждающей жидкости (вода) от 25 °С до 80 °С;
- Определить параметры, влияющие на теплоотдачу;
- Определить меры по тепловой защите синхронной ЭМВПД с ПМ.

Определение теплопередачи и теплопроводности элементов синхронной ЭМВПД с ПМ основано на разбиении поперечного сечения синхронной ЭМВПД с ПМ, представленного на рисунке 2.16.

22	23	24
19	20	21
16	17	18
13	14	15
10	11	12
7	8	9
4	5	6
1	2	3
<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>

Рисунок 2.16.

Разбиение поперечного сечения синхронной ЭМВПД с ПМ на области с соответствующими номерами

Области 2, 5 и 8 относятся к катушке с обмоткой, области *L1*, *L2* и *L3* относятся к индуктору синхронной ЭМВПД, области 22, 23, 24 – канал охлаждения, области 16 - 21 – кожух охлаждения, остальные относятся к пакету статора.

Построение тепловой модели синхронной ЭМВПД с ПМ представлено на рисунке 2.17.

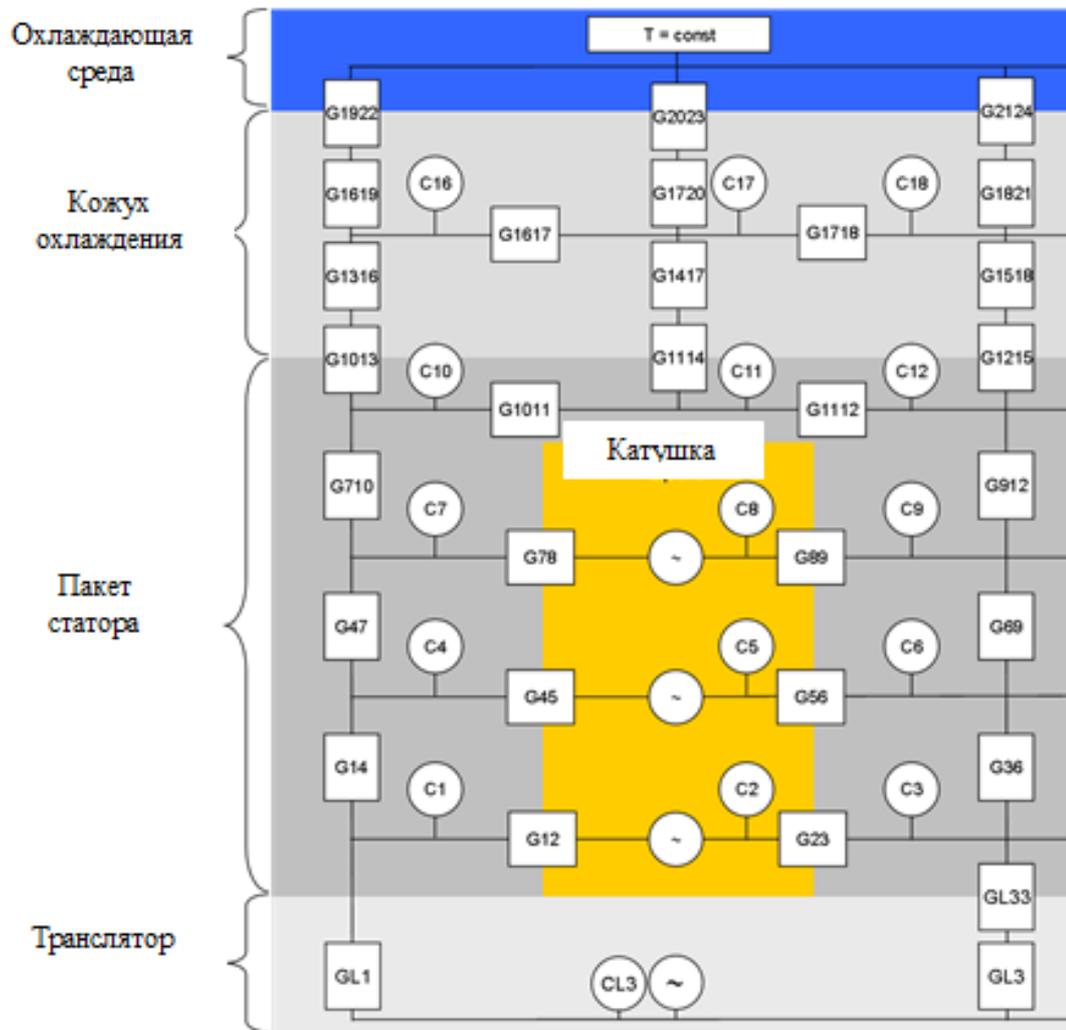


Рисунок 2.17. Тепловая модель синхронной ЭМВПД с ПМ с обозначением элементов

Ниже приведен расчет значений теплопередач и теплопроводностей, которые представлены в модели на рисунке 2.17.

#### 2.4.1. Теплопередача между пакетом статора и катушкой

Величина разности температур между пакетом статора и катушкой  $\Delta\vartheta$  представлена в (2.105).

$$\Delta\vartheta = QR_{th}, \quad (2.105)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;

$R_{th}$  – тепловое сопротивление, К/Вт.

Принимается, что все электрические потери преобразуются в тепло (2.106).

$$Q = P_{эл}, \quad (2.106)$$

где  $P_{эл}$  – мощность электрических потерь, Вт.

Зависимость теплового сопротивления  $R_{th}$  от теплопроводности  $G$  выражается уравнением (2.107).

$$G = \frac{1}{R_{th}}, \quad (2.107)$$

После подстановки формул (2.103) и (2.104) в (2.105), получим уравнение (2.108).

$$G = \frac{P_{эл}}{\Delta\vartheta} = \frac{P_{эл}}{T_2 - T_1}, \quad (2.108)$$

где  $T_2 - T_1$  – разность температур, К.

Область катушки, как видно из рисунка 2.17 разбита на три части. Необходимые для определения коэффициента теплопроводности значения потерь  $P_i$  определяются по (2.109).

$$P_i = P_{общ} \cdot x_i, \quad (i = 2, 5, 8), \quad (2.109)$$

где  $x_i$  – коэффициент;

$P_{общ}$  – общая мощность потерь, Вт.

Общая мощность потерь рассчитывается по формуле (2.108).

$$P_{общ} = R_w(T) \cdot I_{eff}^2, \quad (2.110)$$

где  $R_w$  – сопротивление обмотки, Ом;

$T$  – температура обмотки, К;

$I_{eff}$  – эффективное значение тока, А.

Содержащаяся в формуле (2.110) величина сопротивления обмотки  $R_w$  определяется выражением (2.111).

$$R_w(T) = R_0 + R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta, \quad (2.111)$$

где  $R_0$  – сопротивление обмотки при нормальных условиях, Ом;

$\alpha$  – температурный коэффициент, 1/К;

К каждому элементу катушки применимы описанные выше формулы потери мощности. Для того чтобы достичь этого, катушка делится на три равные по массе части ( $i=2,5,8$ ), где масса каждого элемента  $m$  определяется (2.112).

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s, \quad (2.112)$$

где  $\rho$  – плотность материала катушки, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – объем катушки, м<sup>3</sup>;

$A$  – поперечное сечение обмотки, м<sup>2</sup>;

$s$  – длина обмотки, м.

Так как плотность материала обмотки  $\rho = const$  и длина обмотки  $s = const$ , то масса каждой отдельной части катушки к общей массе катушки определяется через коэффициент  $x_i$  (2.113).

$$x_i = \frac{A_i}{A_{общ}}, \quad (2.113)$$

где  $A_i$  – площадь одного элемента катушки, м<sup>2</sup>;

$A_{общ}$  – общая площадь катушки, м<sup>2</sup>.

Принимая во внимание, что тепловой поток, образуемый от электрических потерь в медной обмотке  $P_i$ , в данном элементе распределяется равномерно по обеим сторонам катушки, получаем значение теплопроводности  $G_{xy}$  (2.114).

$$G_{xy} = \frac{\frac{P_i}{2}}{T_y - T_x}. \quad (2.114)$$

Например, теплопроводность  $G_{12}$  на рисунке 2.17 при условии разделения мощности потерь  $P_1$  в отдельной области обмотки будет определяться по выражению (2.115).

$$G_{12} = \frac{\frac{P_1}{2}}{T_2 - T_1}. \quad (2.115)$$

Температуры  $T_2$  и  $T_1$  измеряются на уровне  $Y1$  и  $Y2$  (рисунок 2.18) противоположно лежащими датчиками температуры, например,  $X1Y1/X2Y1$ .

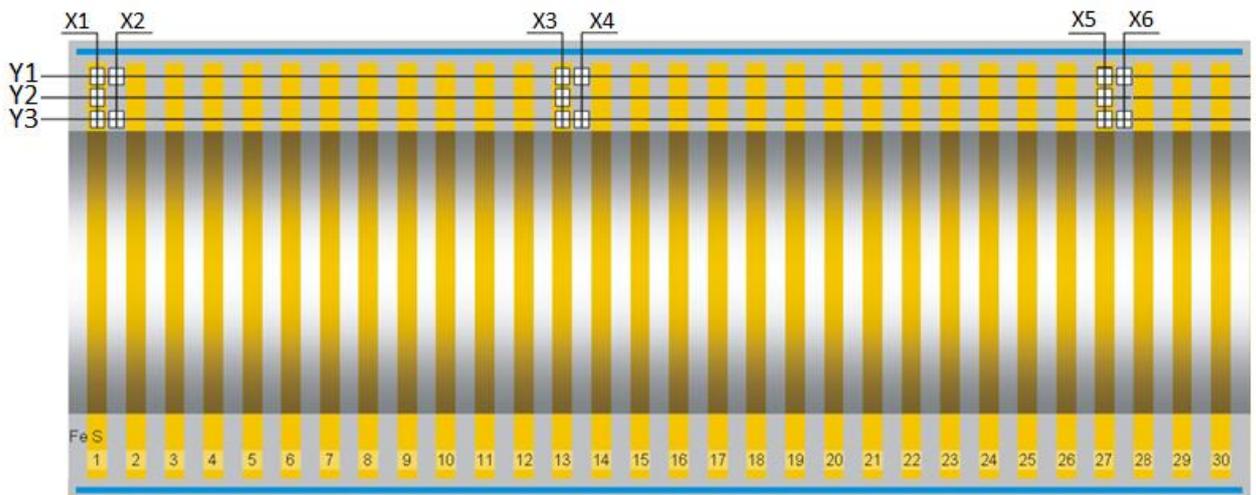


Рисунок 2.18. Поперечное сечение статора с расположением температурных датчиков в координатах  $X/Y$

Расчетные значения теплопроводности между катушкой и пакетом статора приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Расчетные значения теплопроводности

Теплопроводность	Значение	Единица измерения
$G_{12} = G_{23}$	15,99	Вт/К
$G_{45} = G_{56}$	17,52	Вт/К
$G_{78} = G_{89}$	19,04	Вт/К

#### 2.4.2. Теплопроводность в пакете статора в радиальном направлении

В радиальном направлении модель синхронной ЭМВПД с ПМ разбивается на множество элементов. Речь идет о теплопроводности цилиндра в радиальном направлении, которая описывается через внешний  $r_a$  и внутренний  $r_i$  радиусы данного цилиндра. Тепловой поток  $Q$  через слой ( $n = 1$ ) толщиной  $s$  рассчитывается по (2.116).

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot s \cdot (T_2 - T_1)}{\frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{r_a}{r_i} \right)}, \quad (2.116)$$

где  $s$  – толщина слоя, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К.

После подстановки формул (2.106) и (2.108) в (2.116) получим выражение (2.115).

$$G_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot s \cdot \lambda}{\ln \left( \frac{r_a}{r_i} \right)}. \quad (2.117)$$

Используя коэффициент теплопроводности, приведенный в паспорте электротехнической стали  $\lambda_{fe} = 17,298$  Вт/м·К, рассчитываем значения теплопроводности в статоре (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Расчетные значения теплопроводности

Коэффициент теплопроводности	Значение	Единица измерения
$G_{14} = G_{36}$	5,97	Вт/К
$G_{47} = G_{69}$	6,52	Вт/К
$G_{710} = G_{912}$	5,70	Вт/К

#### 2.4.3. Теплопроводность в пакете статора и кожухе охлаждения в аксиальном направлении

В аксиальном направлении модель линейного генератора разбивается на множество элементов. Определение теплопроводности в аксиальном направлении определяется аналитически. Речь идет о теплопроводности в аксиальном направлении данного цилиндра. Коэффициент теплопроводности  $G_a$  через слой ( $n=1$ ) определяется по (2.118).

$$Q = \frac{A \cdot (T_2 - T_1)}{\frac{s}{\lambda}}. \quad (2.118)$$

После подстановки формул (2.104) и (2.106) в (2.116) получим выражение (2.119).

$$G_a = \frac{A \cdot \lambda}{s}. \quad (2.119)$$

Используя геометрические размеры и значения коэффициентов теплопроводности пакета статора  $\lambda_{ст}$  и кожух охлаждения  $\lambda_{охл}$  рассчитываем теплопроводности статора и кожуха охлаждения в аксиальном направлении (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Расчетные значения теплопроводности

Коэффициент теплопроводности	Часть машины	Значение	Единица измерения
$G_{1011} = G_{1112}$	Статор	43	Вт/К
$G_{1617} = G_{1718}$	Кожух охлаждения	308	Вт/К

#### 2.4.4. Теплопроводность в радиальном направлении от кожуха охлаждения к каналу охлаждения

Теплопроводность от кожуха охлаждения к каналу охлаждения рассчитывается по выражению (2.120).

$$G_{H_2O} = \alpha \cdot A. \quad (2.120)$$

Данная величина рассчитывается как последовательное соединение теплопроводности цилиндра в радиальном направлении  $G_{\text{цил}}$ , например,  $G_{1619}$  и теплопроводности к каналу охлаждения (вода)  $G_{H_2O}$ , например,  $G_{1922}$ .

Контактная поверхность определяется как (2.121).

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot s. \quad (2.121)$$

Значение величины  $\alpha$  для канала охлаждения (рисунок 1.13.) можно вычислить, принимая ламинарное течение жидкости и формулу (2.122).

$$Nu = \alpha_{kk} \frac{d_i}{\lambda_B}, \quad (2.122)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта;

$\alpha_{kk}$  – коэффициент теплопередачи канала охлаждения, Вт/К·м<sup>2</sup>;

$d_i$  – характерный размер;

$\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воды, Вт/К·м<sup>2</sup>.

Геометрические свойства контура охлаждения определяются через характерную длину  $d_i$ . Для определения характерной длины  $d_i$  прямоугольного канала используется формула (2.123).

$$d_i = \frac{b_{kk} \cdot h_{kk}}{b_{kk} + h_{kk}}, \quad (2.123)$$

где  $b_{kk}$  – ширина канала охлаждения, м;

$h_{kk}$  – высота канала охлаждения, м (рисунок 2.19).

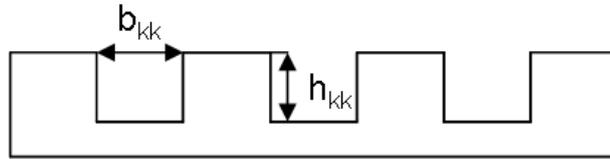


Рисунок 2.19. Схема канала охлаждения

Число Нуссельта определяется как (2.124).

$$Nu = (Nu_1^3 + 0.7^3 + (Nu_2 - 0.7^3))^{\frac{1}{3}}, \quad (2.124)$$

где

$$Nu_1 = 3.66,$$

$$Nu_2 = 1,615 \cdot \left( Re \cdot Pr \frac{d_i}{l_k} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.125)$$

где  $Pr$  – число Прандтля.

В нашем случае длина канала охлаждения  $l_k$  зависит от внутреннего диаметра  $r_i$  и количества витков канала  $n_k$ , согласно выражению (2.126).

$$l_k = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot n_k. \quad (2.126)$$

Для расчета теплопроводности к охлаждающей воде воспользуемся формулами (2.120) и (2.124).

$$G_{H2O} = \lambda_B A (Nu_1^3 + 0.7^3 + \left( 1,615 \cdot \left( Re \cdot Pr \frac{b_{kk} \cdot h_{kk}}{(b_{kk} + h_{kk}) l_k} \right)^{\frac{1}{3}} - 0.7^3 \right))^{1/3} \frac{1}{d_i}$$

Отсюда вычисляем теплопроводность от кожуха охлаждения к каналу охлаждения (табл. 2.4).

Таблица 2.4. Расчетные значения теплопроводности

Теплопроводность	Значение	Единица измерения
$G_{1922} = G_{2023} = G_{2124}$	27,88	Вт/К

Теплопроводность в алюминиевом кожухе охлаждения в радиальном направлении, согласно (2.117), сведена в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Расчетные значения теплопроводности

Коэффициент теплопроводности	Значение	Единица измерения
$G_{1316} = G_{1417} = G_{1518}$	92,6	Вт/К
$G_{1619} = G_{1720} = G_{1821}$	88,6	Вт/К

#### 2.4.5. Теплопроводность от пакета статора к кожуху охлаждения

По причине неточных данных о геометрических размерах и толщине материала, для нахождения теплопроводности от пакета статора к кожуху охлаждения строится схема замещения, в которой искомая теплопроводность определяется через одну неизвестную. Расчет производится по аналогии с электрической цепью, т.е. разница температур принимается по аналогии как напряжение. На рисунке 2.20. представлена схема замещения. Для упрощения схемы последовательное соединение, состоящее из теплопроводности алюминия к каналу охлаждения ( $G_{1619}$ ,  $G_{1720}$ ,  $G_{1821}$ ) и теплопроводности в охлаждающей

жидкости ( $G_{1922}$ ,  $G_{2023}$ ,  $G_{2124}$ ), преобразуется к коэффициенту теплопроводности  $G_r$ , согласно (2.127).

$$G_r = \frac{1}{\frac{1}{G_{al}} + \frac{1}{G_{H2O}}}. \quad (2.127)$$

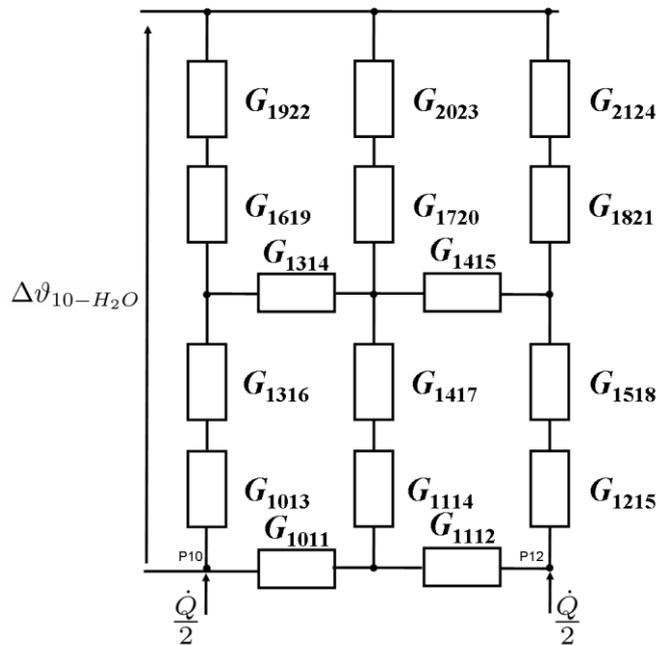


Рисунок 2.20. Первичная схема замещения ОЭМВПД

Далее производим преобразование последовательного соединения теплопроводности в алюминии и теплопроводности от пакета статора к кожуху охлаждения ( $G_{1013}$  с  $G_{1316}$  и  $G_{1215}$  с  $G_{1821}$ ) к коэффициенту теплопроводности  $G_{r2}$  (рисунок 2.21).

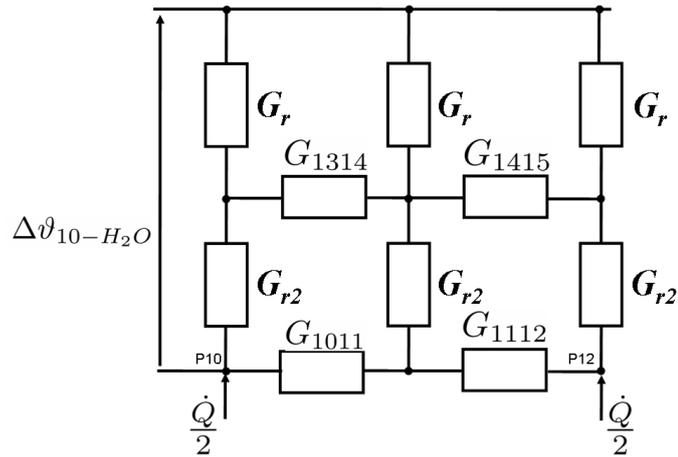


Рисунок 2.21. Вторичная схема замещения ОЭМВПД

Величина  $G_{r2}$  содержит искомую величину  $G_x$ , согласно (2.128).

$$G_{r2} = \frac{1}{\frac{1}{G_{al}} + \frac{1}{G_x}} \quad (2.128)$$

Учитывая, что в точках  $P10$  и  $P12$  доходит по половине тепловой энергии, принимаем равенство  $G_{1011}=G_{1112}=G_1$  и  $G_{1314}=G_{1415}=G_2$ , что позволяет упростить сеть через объединения точек с одинаковым потенциалом (рисунок 2.22).

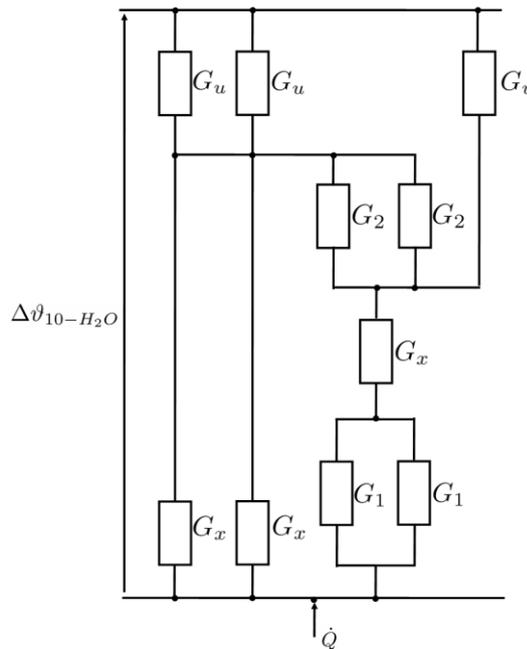


Рисунок 2.22. Первое упрощение схемы замещения ЭМВПД

Преобразовав параллельные соединения на рисунке 2.22 получаем следующую схему замещения, представленную на рисунке 2.23.

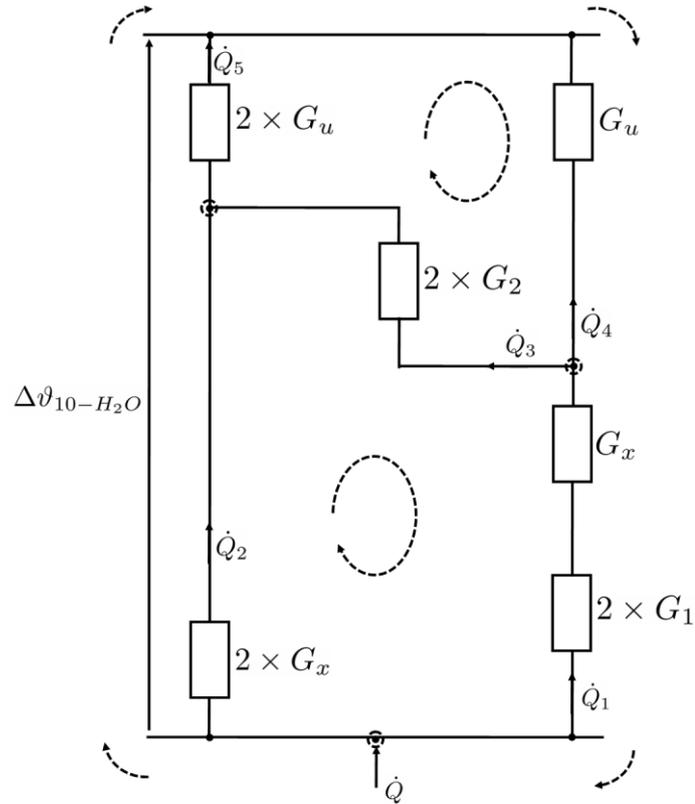


Рисунок 2.23. Второе упрощение схемы замещения ЭМВПД

Применяя метод узловых потенциалов, получаем следующие уравнения:

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

$$Q_1 = Q_3 + Q_4.$$

$$Q_5 = Q_2 + Q_3.$$

$$0 = \frac{Q_2}{2G_{r2}} - \frac{Q_3}{2G_2} - \frac{Q_1}{G_{r2}} - \frac{Q_1}{2G_1}.$$

$$0 = \frac{Q_3}{2G_2} - \frac{Q_5}{2G_r} - \frac{Q_4}{G_r}.$$

$$\Delta\vartheta_{10-H_2O} = \frac{Q_1}{2G_1} + \frac{Q_1}{2G_{r2}} + \frac{Q_4}{G_r}. \quad (2.129)$$

Из системы уравнений (2.129) можно рассчитать неизвестный коэффициент теплопроводности  $G_{r2}$ . После преобразования (2.128) по  $G_x$  получим (2.130).

$$G_x = \frac{1}{\frac{1}{G_{r2}} - \frac{1}{G_{al}}}. \quad (2.130)$$

После подстановки величины  $G_{al}$  из табл. 2.6 найдем искомый коэффициент теплопроводности.

Таблица 2.6 – Расчетные значения теплопроводности

Теплопроводности	Значение	Единица измерения
$G_x = G_{1013} = G_{1114} = G_{1215}$	7,9	Вт/К

#### 2.4.6. Теплопроводность от индуктора к статору

Радиальная теплопроводность индуктора  $G_{тр}$  также как радиальная теплопроводность воздуха при неподвижном индукторе  $G_{тр0}$  рассчитываются по формуле (2.117). Радиальная теплопроводность воздуха при подвижном индукторе  $G_{тр1}$  рассчитывается как (2.131), (2.132), (2.133).

$$Nu = Nu_m \left( \frac{T_{воз}}{T_{ст}} \right)^n, \quad (2.131)$$

где  $T_{воз}$  – температура воздуха, К;

$T_{ст}$  – температура стенки, К;

$n = 0,45$  при  $1 > \frac{T_{lu}}{T_{wa}} > 0,5$ .

$$Nu_m = (Nu_1^3 + Nu_2^3)^{1/3}, \quad (2.132)$$

$$Nu_1 = 3,66 + \left[ 4 - \frac{0,102}{\frac{d_i}{d_a} + 0,02} \right] \left( \frac{d_i}{d_a} \right)^{0,04}, \quad (2.133)$$

где  $d_i$  – длина в радиальном направлении, м;

$d_a$  – длина в аксиальном направлении, м.

$$Nu_2 = f_g \left( ReT \frac{d_h}{l} \right)^{1/3}, \quad (2.134)$$

$$f_g = 1,615 \left\{ 1 + 0,14 \left( \frac{d_i}{d_a} \right)^{0,1} \right\}, \quad (2.135)$$

$$d_h = d_a - d_i, \quad (2.136)$$

$$Re = \frac{w d_h}{\nu_{\text{воз}}}, \quad (2.137)$$

где  $\nu_{\text{воз}}$  – вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;

$$w = \max(2\pi f h \cos(2\pi f t)). \quad (2.138)$$

Коэффициент теплопроводности  $\alpha$  получаем по (2.139) после подстановки максимальной скорости потока  $w$  (2.138).

$$\alpha = 7,8 \left( \frac{\nu_{\text{воз}}}{m/s} \right)^{0,78} = 47 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}. \quad (2.139)$$

На основании формулы (2.120) и условия  $d_h = d_i$  получаем (2.138).

$$\lambda = \frac{\alpha d_h}{Nu}. \quad (2.140)$$

Теплопроводность  $G_{\text{тр1}}$  рассчитывается по (2.141).

$$G_{\text{тр1}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot s \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}. \quad (2.141)$$

Таблица 2.7. Теплопроводность индуктора в аксиальном направлении

Коэффициент теплопроводности	Значение	Единица измерения
$G_{L1} = G_{L3}$	39,032	Вт/К
$G_{L110} = G_{L330}$	0,334	Вт/К
$G_{L11I} = G_{L33I}$	37,089	Вт/К

Значения, полученные в результате теплоемкостного расчета приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8. Расчет теплоемкостей

Теплоемкость	Значение	Ед. измерения
$C_1 = C_3$	122,01	Дж/К
$C_2$	115,27	Дж/К
$C_4 = C_6$	133,64	Дж/К
$C_5$	126,25	Дж/К
$C_7 = C_9$	145,26	Дж/К
$C_8$	137,22	Дж/К
$C_{10} = C_{11} = C_{12}$	239,67	Дж/К
$C_{13} = C_{14} = C_{15}$	219,09	Дж/К
$C_{L2}$	602,00	Дж/К

Величина теплоемкости тела цилиндрической формы зависит от свойств материала и геометрических размеров (2.142).

$$C = cm, \quad (2.142)$$

$$m = V\rho = \pi(r_a^2 - r_i^2)\rho. \quad (2.143)$$

## 2.5. Выводы по главе 2

1. Разработана математическая модель работы свободнопоршневого двигателя (СПДВС) стандартного цикла Отто с учетом диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, степени сжатия, хода поршня, теплоты сгорания топлива и сил трения. Решение уравнение баланса сил позволяет определить положение и скорость поршневой группы и, соответственно, индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ, работающей в стационарных условиях.

2. Разработана методика расчета электромагнитной силы синхронной ЭМВПД с ПМ через отображение уравнения линейной токовой нагрузки и индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнатами, в виде ряда Фурье, что позволяет провести расчет и оптимизацию конструктивных параметров индуктора и статора электрической машины возвратно-поступательного действия.

3. Предложена модель управляемого преобразователя с активной коррекцией коэффициента мощности, позволяющая автономному источнику электроэнергии работать с коэффициентом мощности близким к 1.

4. Разработана тепловая модель синхронной ЭМВПД с ПМ, позволяющая определить конструкцию системы охлаждения статора, рассчитать максимально допустимую выдаваемую мощность синхронной ЭМВПД с ПМ, определить параметры, влияющие на теплоотдачу, определить меры по тепловой защите синхронной ЭМВПД с ПМ.

### 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИВОДНОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ СЭМПМ

#### 3.1. Математическая модель станка-качалки и штанговой скважинной насосной установки

Мощность, потребляемая приводным двигателем станка – качалки (СК), определяется значением результирующего крутящего момента сил на кривошипном валу редуктора  $M_{кр}$  [69, 70, 71]:

$$W_{дв} = M_{кр} \cdot \frac{\pi n}{30} \cdot \frac{1}{\eta_{дв} \eta_{пм} n_{ред} n_{крп}} = M_{кр} \cdot A \quad (3.1)$$

где  $n$  – число оборотов в минуту электродвигателя;

$\eta_{дв}$  – КПД электродвигателя;

$\eta_{пм}$  – КПД передаточного механизма, учитывающий трение в редукторе и клиноременной передаче;

$n_{ред}$  – передаточное число редуктора;

$n_{крп}$  – передаточное число клиноременной передачи, равное отношению диаметров шкивов редуктора и электродвигателя

$$n_{крп} = \frac{d_{шкред}}{d_{шкдв}}. \quad (3.2)$$

Эта формула не учитывает упругость клиноременной передачи [71,72].

Крутящий момент равен произведению касательной силы на плечо действия этой силы

$$M_{кр} = T \cdot K \quad (3.3)$$

Касательная сила на кривошипном валу редуктора при комбинированном уравнивании СК описывается известной формулой [76,77,78]:

$$T = \frac{a}{b} P_{скв} \frac{v_B}{\omega} - \frac{b}{b_1} T_6 \left( \cos \delta - \frac{b_1}{b} \frac{\alpha_B^T}{g} \right) \frac{K_1}{K} T_K \sin \varphi, \quad (3.4)$$

где  $P_{скв}$  – усилие в точке подвеса штанг;

$T_6$  и  $T_K$  – соответственно массы балансирного и кривошипного уравновешивающих грузов;

$\omega$  – угловая скорость вращения кривошипа;

$v_B$  – скорость точки В сочленения с шатуном;

$\alpha_B^T$  – касательное ускорение точки В;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\varphi$  – угол поворота кривошипа;

$a, b, b_1, K, K_1$  – геометрические параметры СК в соответствии с рисунком 3.1.

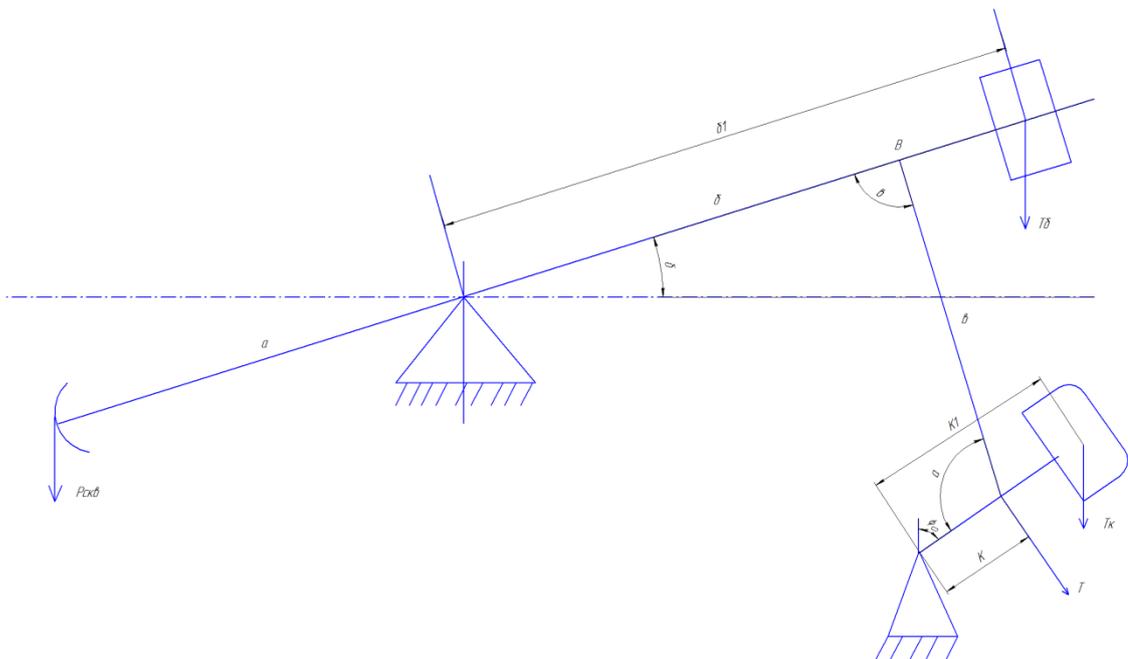


Рисунок 3.1 Кинематическая схема при комбинированном уравновешивании

При допущении, что  $v_B$  и  $\alpha_B^T$  изменяются по гармоническому закону и направлены прямолинейно,

$$v_B = \omega K \sin \varphi, \quad (3.5)$$

$$\alpha_B^T = \frac{dv_B}{dt} = \omega^2 K \cos \varphi. \quad (3.6)$$

В результате преобразований

$$\cos\delta = \sqrt{1 - \left(\frac{K}{\delta} \cos\varphi\right)^2}. \quad (3.7)$$

Тогда крутящий момент на ведущем валу редуктора:

$$M_{кр} = \frac{aK}{\delta} P_{СКВ} \sin\varphi - \frac{\delta_1}{\delta} T_{\delta} \left( \sqrt{1 - \left(\frac{K}{\delta} \cos\varphi\right)^2} - \frac{\delta_1 \omega^2 K \cos\varphi}{g} \right) - K_1 T_K \sin\varphi. \quad (3.8)$$

Мгновенная электрическая мощность, потребляемая приводным двигателем СК [73,74,75]:

$$W = \frac{\pi n}{30} \cdot \frac{1}{\eta_{дв} \eta_{пм} n_{ред} n_{крп}} \left[ \frac{aK}{\delta} P_{СКВ} \sin\varphi - \frac{\delta_1}{\delta} T_{\delta} \left( \sqrt{1 - \left(\frac{K}{\delta} \cos\varphi\right)^2} - \frac{\delta_1 \omega^2 K \cos\varphi}{g} \right) - K_1 T_K \sin\varphi \right]. \quad (3.9)$$

Или в общем виде

$$W = A[A_1 P_{СКВ} - A_2 T_{\delta} - A_3 T_K]. \quad (3.10)$$

### 3.2. Математическое описание синхронного электродвигателя с постоянными магнитами в составе СУ ШСНУ

Синхронные машины с постоянными магнитами в составе ШСНУ отличаются тем, что вместо обмотки возбуждения на роторе у них расположены постоянные магниты, создающие возбуждающий магнитный поток. Статор синхронных машин с постоянными магнитами аналогичен статору АД и имеет трёхфазную обмотку.

#### 3.2.1. Выбор магнитных материалов

ПМ в СЭДПМ служат для создания постоянного по величине магнитного потока. В результате взаимодействия постоянного магнитного потока с полем

статора создается вращающий момент и СЭДПМ вырабатывает механическую мощность. Следовательно, энергетические, массогабаритные и динамические показатели СЭДПМ зависят от свойств материалов, применяемых при его изготовлении.

Наиболее важные свойства ПМ для эффективного применения их в СЭДПМ:

- а) высокая остаточная магнитная индукция  $B_r$ ;
- б) высокая коэрцитивная сила  $H_c$ ;
- в) высокое энергетическое произведение  $(BH)_{max}$ ;
- г) высокая температурная стабильность (высокая температура Кюри);
- д) высокая степень магнитной анизотропии;
- е) низкая магнитная проницаемость;
- ж) линейность рабочего участка кривой размагничивания и сохранение намагниченности в пределах линейности кривой размагничивания.

Для достижения максимальных энергетических и динамических показателей СЭДПМ при минимальных массогабаритных показателях применяют высокоэнергетические ПМ.

Это позволяет:

- во-первых, уменьшить объем ПМ;
- во-вторых, вследствие уменьшения объема ПМ получить наименьший момент инерции вращающейся части – ротора электрического двигателя и, как следствие, улучшить динамические показатели СЭДПМ;
- в-третьих, получить больший магнитный поток, как следствие, больший пусковой и электромагнитный момент, большую удельную мощность и больший КПД СЭДПМ, т. е. еще улучшить динамические и энергетические показатели.

В настоящее время в СЭДПМ применяются высокоэнергетические ПМ на основе самария - кобальта и магнитотвердые материалы на основе сплава неодим-железо-бор.

Намагниченность насыщения, температура Кюри, магнитострикция насыщения зависят только от основного химического состава и не зависят от

структуры вещества. Магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, весь ход кривой намагничивания и вид петли гистерезиса зависят от структуры вещества [79, 80, 81].

### **Намагниченность насыщения**

Определяет уровень достижения остаточной индукции и энергетического произведения  $(BH)_{max}$  ПМ. Чем выше намагниченность насыщения, тем выше остаточная магнитная индукция и энергетическое произведение. Наибольшим энергетическим произведением обладают ПМ из сплава неодим-железо-бор. В них  $(BH)_{max}$  достигает 400 кА/м, ниже  $(BH)_{max}$  у ПМ на основе самарий-кобальта и достигает 240 кА/м.

Монокристаллы ферромагнетиков магнитно-анизотропны и имеют оси легкого намагничивания. Вектор спонтанной намагниченности домена при отсутствии внешних воздействий всегда направлен вдоль одной из осей лёгкого намагничивания. Чем выше энергия магнитной кристаллографической анизотропии, тем выше будут значения остаточной магнитной индукции  $B_r$  и коэрцитивной силы по индукции  $H_{cB}$ . ПМ на основе самарий-кобальта имеют значения  $B_r$  достигающие 1,10-1,16 Тл и  $H_{cB}$  - 780-840 кА/м. Наибольшие значения имеют ПМ на основе неодим-железо-бор  $B_r$  достигающие 1,2-1,3 Тл и  $H_{cB}$  - 1300-2300 кА/м.

### **Удельное электрическое сопротивление**

Одно из важных свойств ПМ – высокое удельное электрическое сопротивление.

Поскольку ПМ располагаемые на роторе достаточно массивны, и при вращении ротора в магнитном поле статора в них индуцируются достаточно большие вихревые токи. Высокое удельное электрическое сопротивление ПМ, позволяет снизить вихревые токи и соответственно уменьшить потери от них в ПМ. Удельное электрическое сопротивление у самарий-кобальтовых ПМ составляет  $9 \cdot 10^{-7}$  Ом/м, у неодим-железо-бор  $1,6 \cdot 10^{-6}$  Ом/м.

### **Форма кривой размагничивания**

ПМ на основе самарий-кобальта обладают прямолинейной кривой размагничивания, что является важным преимуществом по сравнению с ПМ на основе неодим-железо-бор, которые имеют кривую размагничивания с ярко выраженным «коленом». При воздействии на ПМ с линейной кривой размагничивания размагничивающего поля, изменения свойств ПМ будут обратимы, что позволяет обеспечить устойчивую работу ВДПТ при больших «пусковых» токах и в переходных режимах работы, характерных для ВДПТ в СП [79, 80, 81].

Недостатками ПМ на основе самарий-кобальта являются их высокая стоимость, хрупкость и дефицитность материала. Однако за последнее время ПМ на основе самарий-кобальта и неодим-железо-бор практически сравнялись по цене. Это связано с необходимостью вводить легирующие добавки и выполнять специальные покрытия в соединении неодим-железо-бор, поскольку существенным недостатком данных материалов является подверженность коррозии [82].

Второй существенный недостаток материала на основе самарий-кобальта – его хрупкость и сложность механической обработки.

Таким образом, ПМ на основе самарий-кобальта имеют энергетические показатели ниже, чем неодим-железо-бор и большую стоимость, чем ПМ на основе неодим-железо-бор. В то же время ПМ на основе самарий-кобальта имеют значительно более высокую температуру Кюри и как следствие температурную стабильность, что позволяет применять их в электроприводах работающих в диапазоне температур от  $-60$  до  $+220$  °С, однако данный диапазон рабочих температур не требуется для электроприводов станков-качалок, работающих при температурах от  $-50$  до  $+60$  °С.

Исходя из всех вышеперечисленных достоинств и недостатков, в исследуемых СЭДПМ принимаем ПМ на основе неодим-железо-бор.

### 3.2.2. Конструкция ротора СЭДПМ

Известно множество конструкций роторов с ПМ синхронных машин [25,23,83,84,85,127]. Наибольшими преимуществами, как показали исследования и расчеты, как с точки зрения получения наилучших показателей ЭД обладает сборная магнитная система (МС) ротора (мозаичная) [25,23,84]. Ее эффективность выше с точки зрения обеспечения энергетических показателей как самого ЭД, так и ЭП, чем у радиальной МС. Однако радиальная МС ротора имеет неоспоримые преимущества, к которым относятся простота и высокая технологичность конструкции, что является немаловажным при проектировании микромашин, габариты которых невелики. При этом, как показывают предварительные расчеты, преимущества сборной МС над радиальной начинают проявляться при полезных мощностях СЭДПМ от 1-1,5 кВт. Также в последнее время появились новые конструкции МС, основанные на эффекте Хальбаха [86]. Технология изготовления данной конструкции МС еще более сложная.

Характеристики роторов СЭДПМ и, соответственно, показатели СЭДПМ зависят не только от материала ПМ, но и от конструкций роторов. Существуют следующие конструкции МС роторов, преимущества и недостатки которых рассмотрены в [87, 83, 26,88]:

- МС типа "звездочка" (явнополюсная и неявнополюсная);
- МС коллекторного типа;
- мозаичная МС;
- МС с аксиальным магнитным потоком;
- МС на эффекте Хальбаха.

На рисунке 3.2 представлены вышеперечисленные МС.

К достоинствам конструкции ротора с радиальной МС (неявнополюсной) можно отнести [59]:

- простота и высокая технологичность;
- малое значение индуктивности, а, следовательно, высокая жесткость механической характеристики;

Основным достоинством коллекторной конструкции МС ротора является максимальное использование энергии магнитов. Коллекторная конструкция позволяет обеспечить более высокую магнитную индукцию в воздушном зазоре, чем в радиальной МС. При этом наибольший эффект коллекторная конструкция дает при большом числе полюсов при высоком отношении  $\frac{b_m}{\alpha\tau}$ , т.е. ширины ПМ к произведению полюсного деления и полюсного перекрытия.

Следует отметить недостатки магнитной системы коллекторного типа [83]:

- удельная энергия ротора значительно ниже удельной энергии магнита;
- полюса из магнитомягкой стали увеличивают индуктивность и, тем самым, снижают жесткость внешней характеристики, что затрудняет совместное использование двигательного и генераторного режима;
- сложность конструкции.

Мозаичная система обладает следующими преимуществами [89]:

- максимально возможное значение магнитного потока на единицу объема ротора;
- высокое значение индукции в воздушном зазоре;
- высокие энергетические показатели электрической машины;
- дает возможность повысить удельный момент электрической машины;
- увеличение КПД;
- самая низкая индуктивность обмотки якоря и повышенное быстродействие.

Недостатки МС:

- сложность расчета магнитной системы;
- сложность технологии изготовления и конструкции.

Одной из разновидностей мозаичной МС является МС на эффекте Хальбаха. Наибольшая концентрация магнитного потока достигается при наличии не менее пяти элементарных ПМ на полюс. В целом данная МС уступает мозаичной МС по энергетическим показателям и технологичности.

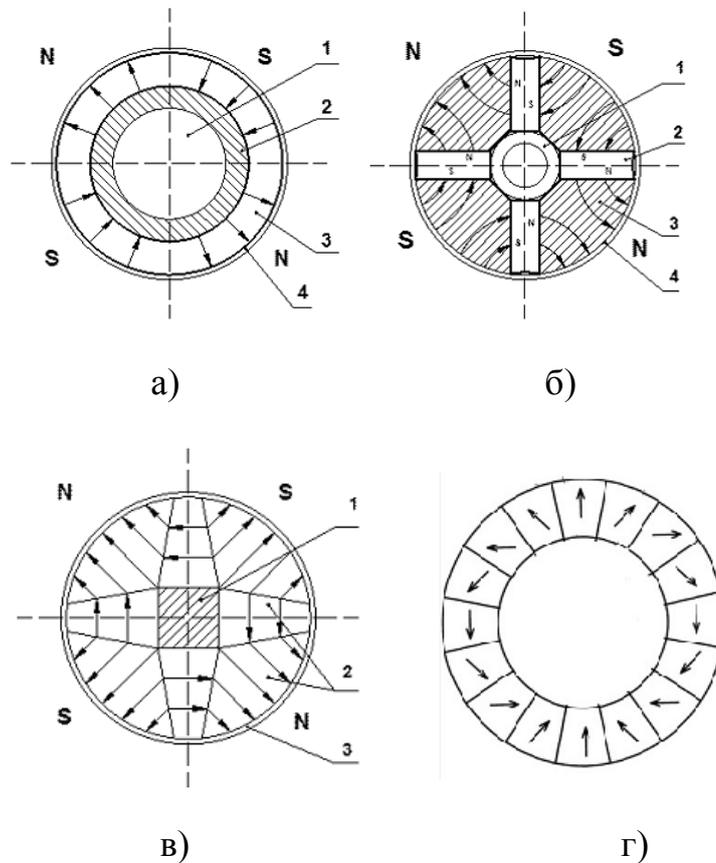
Всевозможные варианты МС с аксиальным магнитным потоком, а также особенности конструкции ВД с аксиальным магнитным потоком показаны в [87].

К достоинствам МС с аксиальным магнитным потоком относятся:

- возможность выполнения роторов больших диаметров;
- при оптимально спроектированной конструкции ВД с аксиальным магнитным потоком в условиях ограничения габарита вдоль оси вращения могут иметь лучшие удельные массогабаритные и энергетические показатели по сравнению с радиальными ЭМ;
- современные технологии позволяют сделать МС экономичными при производстве и надежными в эксплуатации.

К недостаткам МС с аксиальным магнитным потоком относятся:

- большой момент инерции вращающихся частей и, как следствие, низкие динамические показатели.



а) радиальная; б) коллекторная; в) мозаичная; г) на эффекте Хальбаха;

Рисунок 3.2. МС роторов СЭДПМ

Таким образом, выбирается коллекторная МС, как наиболее оптимальная по всем показателям.

### 3.2.3. Математическая модель магнитной цепи СЭДПМ

Многообразие исполнения роторов с постоянными магнитами можно объединить двумя конструктивными особенностями: с расположением ПМ на поверхности ротора и с внутренним расположением ПМ в роторе.

Использование встроенных магнитов имеет два преимущества с точки зрения производственных затрат: с одной стороны, автоматизированное производство роторов может осуществляться относительно легко, поскольку ПМ могут устанавливаться в выемках, предусмотренных в роторе, с помощью соответствующего устройства.

Производство дополнительно облегчается использованием только двух материалов (железо и магнитный материал).

При правильном размещении соединительных перемычек (мосты) между железом над полюсом можно не использовать опорное кольцо или бандажирование.

Чтобы минимизировать магнитный поток проходящий через эти мосты, они должны быть как можно более узкими, с другой стороны они достаточно обеспечить прочность ротора даже на максимальной скорости.

Важнейший этап проектирования СЭДПМ – расчет магнитной системы, которую можно осуществить на основе метода эквивалентных магнитных цепей.

Магнитная цепь СЭДПМ с внутренним расположением магнитов представлена на рисунке 3.3. В магнитную цепь входят четыре участка: ПМ с полюсом из магнитомягкой стали; участки рассеяния магнитного потока, включающие стальные мосты; воздушный зазор; зубцы и ярмо статора.

Проведем анализ замкнутого участка магнитной цепи вдоль силовой линии магнитного поля.

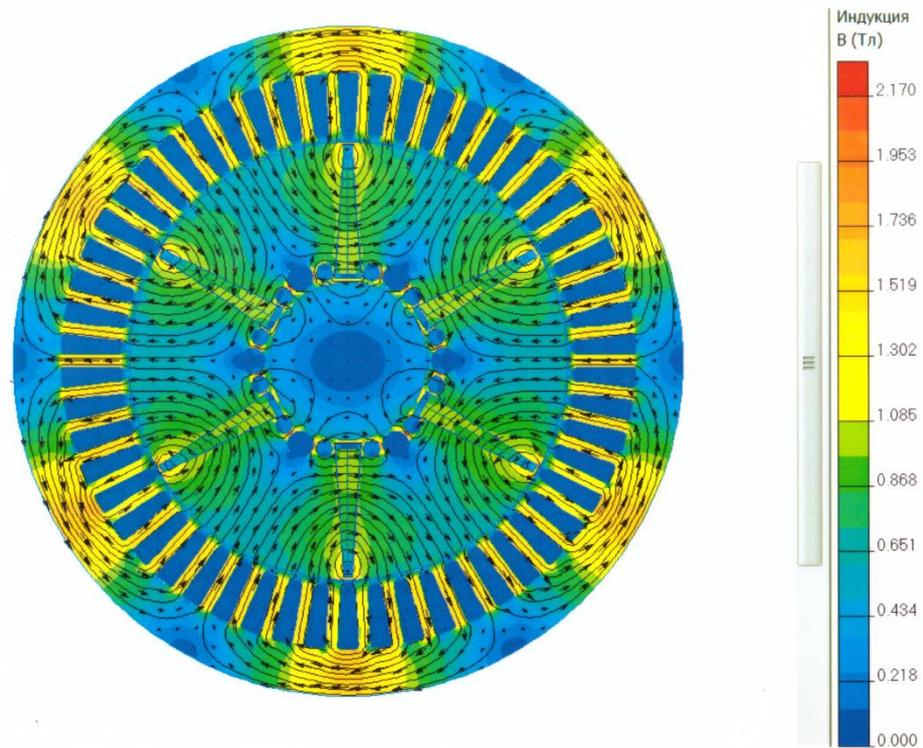


Рисунок. 3.3. Магнитная цепь СЭДПМ с внутренним расположением магнитов, коллекторная магнитная система

### Постоянные магниты с полюсом.

Для высокоэнергетических ПМ (неодим-феррум-бор) кривая возврата совпадает с кривой размагничивания [208]. Вследствие этого уравнение кривой размагничивания записывается в виде

$$B_m = B_r - \mu_m \mu_0 H_m, \quad (3.11)$$

где  $B_m$  – магнитная индукция на поверхности магнита;

$H_m$  – напряженность магнитного поля магнита;

$\mu_m$  – относительная магнитная проницаемость магнита;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха;

$B_r$  – остаточная индукция магнита.

Преобразуем уравнение 3.11 следующим образом:

$$B_m S_m = B_r S_m - \frac{\mu_m \mu_0 S_m l_m}{l_m} H_m \quad (3.12)$$

Из (3.12) получаем

$$\Phi_m = \Phi_r - P_m F_M, \quad (3.13)$$

где  $S_m = w_m L$  – площадь магнита ( $w_m, L$  – ширина и длина магнита);  $l_m$  – длина магнита по направлению магнитной индукции;  $P_m = \frac{\mu_m \mu_0 S_m}{l_m}$  – магнитная проводимость магнита;  $F_M = l_m H_m$  – магнитодвижущая сила магнита;  $\Phi_m = B_m S_m$  – полный магнитный поток магнита;  $\Phi_r = B_r S_m$  – магнитный поток магнита от остаточной индукции.

Из рисунка 3.3. видно, что один магнит создает магнитный поток на полюс. Следовательно, в соответствии с первым законом Кирхгофа для магнитных цепей запишем:

$$\Phi_M = \Phi_m; \Phi_R = \Phi_r$$

где  $\Phi_M$  – полный магнитный поток на полюс;  $\Phi_R$  – магнитный поток на полюс от остаточной индукции.

Учитывая, что магнитная проводимость полюса  $P_M = P_m$ , перепишем (3.13)

$$\Phi_M = \Phi_R - P_M F_M, \quad (3.14)$$

Уравнению (3.14) соответствует эквивалентная схема, представленная на рисунке 3.4.

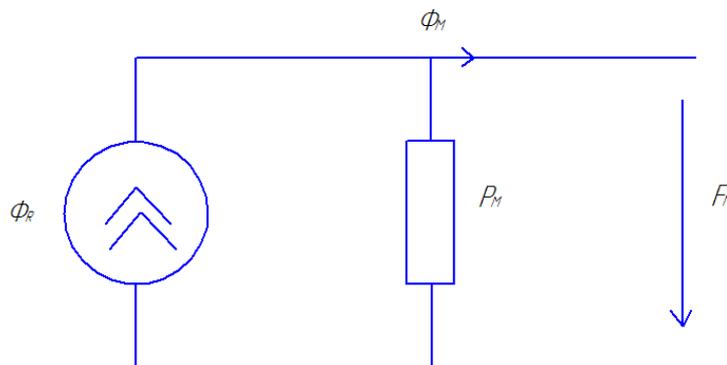


Рисунок 3.4. Эквивалентная схема постоянных магнитов

Полюсы из магнитмягкой стали, являющиеся концентраторами магнитного потока, имеют высокую магнитную проницаемость [83]. Вследствие этого тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на поверхности полюсов значительно меньше радиальной составляющей и распределение магнитной индукции по сечению ротора близко к прямоугольному. Примем допущение, что магнитная проницаемость полюсов  $\mu=\infty$  и не учитываем падение магнитного потенциала в стали полюса

### Участки рассеяния магнитного потока

По причине рассеяния магнитного потока ПМ только часть полного магнитного потока  $\Phi_M$  замыкается через воздушный зазор и магнитопровод статора.

Другая часть в виде магнитного потока рассеяния  $\Phi_\sigma$  замыкается через специальные предусматриваемые в конструкции ротора стальные мосты (рисунок 3.5). Для уменьшения потока  $\Phi_\sigma$  площадь мостов выбирается минимально возможной.

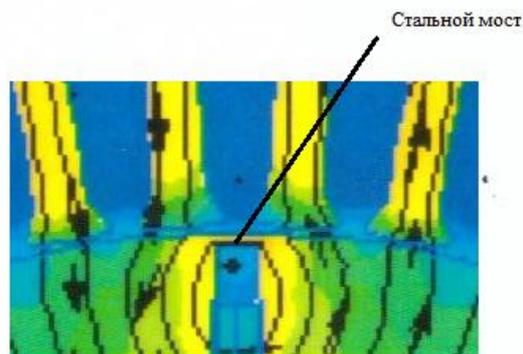


Рисунок 3.5. Магнитный поток рассеяния  $\Phi_\sigma$  через стальной мост

Аналитическое определение магнитной проводимости стального моста вследствие нелинейности кривой намагничивания стали представляет собой сложную задачу. Для ее упрощения осуществим кусочно-линейную

аппроксимацию кривой намагничивания стального моста  $\Phi_{\sigma} = f(F_{\text{ст}})$  (рисунок 3.6), представив поток рассеяния через стальные мосты на полюс в виде

$$\Phi_{\text{ст.м}} = \Phi_{\text{н.ст}} + P_{\text{ст.м}} F_{\sigma}, \quad (3.15)$$

где  $\Phi_{\text{н.ст}}$  – магнитный поток, соответствующий насыщению стальных мостов на полюс,  $\Phi_{\text{н.ст}} = B_{\text{н.ст}} S_{\text{ст.м}} = B_{\text{н.ст}} w_{\text{ст.м}} L$ ;  $w_{\text{ст.м}}$  – ширина стального моста;  $B_{\text{н.ст}}$  – индукция насыщения стального моста,  $S_{\text{ст.м}}$  – площадь стальных мостов на полюс;  $F_{\sigma}$  – падение магнитного потенциала в цепи рассеяния;  $P_{\text{ст.м}}$  – магнитная проводимость стальных мостов в состоянии насыщения.

$$P_{\text{ст.м}} = \frac{\mu_0 w_{\text{ст.м}} L}{l_{\text{ст.м}}}$$

где  $l_{\text{ст.м}}$  – длина стального моста

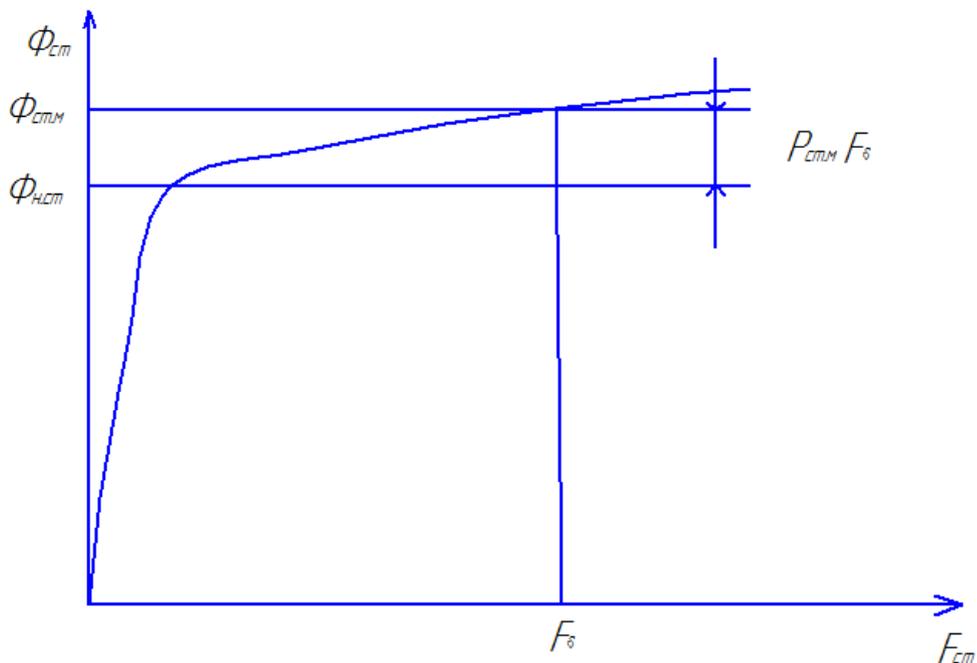


Рисунок 3.6. Линеаризация кривой намагничивания

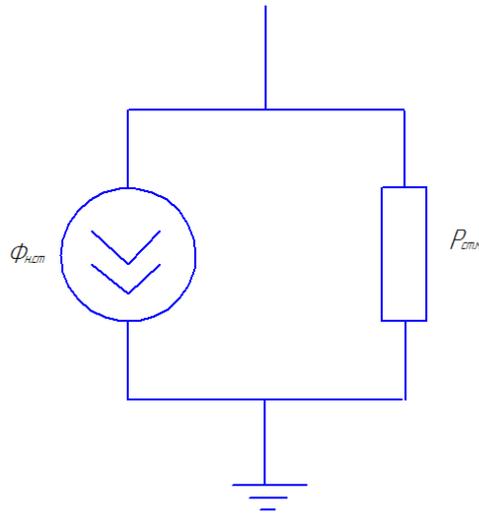


Рисунок 3.6. Эквивалентная схема магнитной цепи рассеяния через стальной мост

С учетом (3.15) и (3.16) поток рассеяния постоянных магнитов на полюс будет равен

$$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\text{ст.м}} = \Phi_{\text{н.ст}} + P_{\text{ст.м}} F_{\sigma}, \quad (3.17)$$

### Воздушный зазор

Через воздушный зазор проходит магнитный поток

$$\Phi_{\delta} = \Phi_{\text{м}} - \Phi_{\sigma}, \quad (3.18)$$

Магнитная проводимость воздушного зазора определяется выражением

$$P_{\delta} = \frac{1}{R_{\delta}} = \frac{\mu_0 S_{\delta}}{l'_{\delta}} = \frac{\mu_0 w_{\delta} L}{l'_{\delta}},$$

где  $S_{\delta} = w_{\delta} L$  – площадь, через которую проходит магнитный поток  $\Phi_{\delta}$ ;

$w_{\delta} = \frac{\pi R_p}{p}$  – длина полюса ротора;  $R_p$  – радиус ротора;  $l'_{\delta} = K_c l_{\delta}$  – длина эквивалентного воздушного зазора;  $K_c$  – коэффициент Картера;  $l_{\delta}$  – длина воздушного зазора;  $R_{\delta}$  – магнитное сопротивление воздушного зазора.

Магнитный поток  $\Phi_{\delta}$  и магнитодвижущая сила  $F_{\delta}$  в воздушном зазоре связаны соотношениями:

$$\Phi_{\delta} = F_{\delta} P_{\delta} = \frac{F_{\delta}}{R_{\delta}};$$

$$F_{\delta} = \Phi_{\delta} R_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{P_{\delta}} \quad (3.19)$$

### Пазы, зубцы и ярмо статора.

Размер магнитной цепи зубцов и ярма статора необходимо определять с учетом насыщения стали. Вследствие этого магнитные проводимости зубца и ярма являются переменными, величина которых определяется насыщением стали.

Магнитный поток на  $N_z$  зубцах полюса

$$\Phi_z = B_z(F_z) S_z, \quad (3.20)$$

где  $B_z$  – магнитная индукция в зубце;  $S_z = L w_z N_z$  – площадь зубцов полюса;  $w_z$  – ширина зубца.

Падение магнитного потенциала на зубцах

$$F_z = H_z l_z, \quad (3.21)$$

где  $H_z$  – напряженность магнитного поля в зубце,  $l_z$  – длина зубца

Магнитный поток на  $N_z$  пазов

$$\Phi_{\text{паз}} = P_{\text{паз}} F_z, \quad (3.22)$$

где  $P_{\text{паз}} = \frac{\mu_0 N_z w_{\text{паз}} L}{l_z}$  – магнитная проводимость  $N_z$  пазов;  $w_{\text{паз}}$  – ширина паза.

Магнитный поток в воздушном зазоре  $\Phi_{\delta}$  разделяется на  $\Phi_z$  и  $\Phi_{\text{паз}}$ .

Следовательно:

$$\Phi_{\delta}(F_z) = \Phi_z(F_z) + \Phi_{\text{паз}} = B_z(F_z) S_z + P_{\text{паз}} F_z, \quad (3.23)$$

Магнитный поток  $\Phi_{\delta}$  в ярме и индукция  $B_y$  в ярме определяется по формуле

$$B_y = \frac{\Phi_{\delta}}{S_y} = \frac{\Phi_y}{S_y}, \quad (3.24)$$

Где  $S_y = w_y L$  – площадь ярма;  $w_y$  – ширина ярма.

Магнитный поток  $\Phi_y$  в ярме на полюс равен

$$\Phi_y = B_y(F_y)2S_y, \quad (3.25)$$

Падение магнитного потенциала  $F_y$  на ярме

$$F_y = H_y l_y, \quad (3.26)$$

где  $H_y$  – напряжённость магнитного поля в ярме;  $l_y$  – длина ярма.

На рисунке 3.7. представлена полная эквивалентная схема магнитной цепи на один полюс.

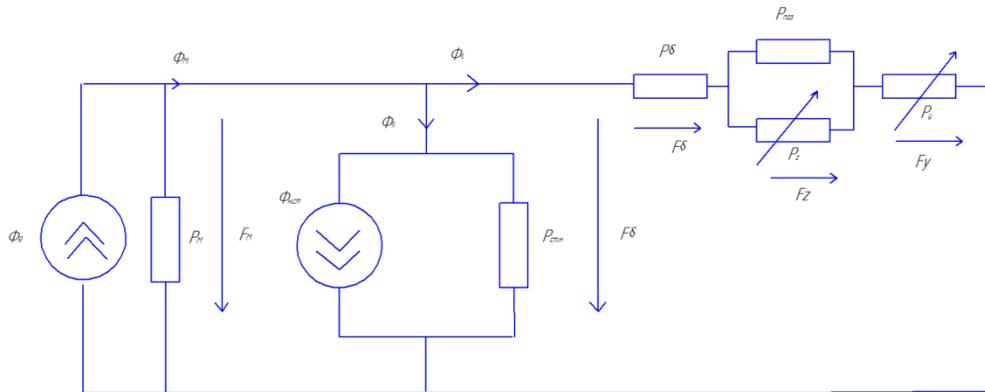


Рисунок 3.7. Упрощенная эквивалентная схема магнитной цепи

Для эквивалентной схемы на рисунке 3.7. запишем уравнение по первому закону Кирхгофа

$$\begin{aligned} \Phi_\delta(F_M) &= \Phi_M(F_M) - \Phi_\sigma(F_M) = (\Phi_R - P_M F_M) - (\Phi_{н.ст} + P_{ст.М} F_M) \\ &= \Phi_R - \Phi_{н.ст} - (P_M + P_{ст.М}) F_M. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Уравнение по второму закону Кирхгофа для схемы на рисунке 3.7 запишем следующим образом:

$$F_M(\Phi_\delta) = F_\delta(\Phi_\delta) + F_z(\Phi_\delta) + F_y(\Phi_\delta) = \frac{\Phi_\delta}{P_\delta} + F_z(\Phi_\delta) + F_y(\Phi_\delta). \quad (3.18)$$

Таким образом, получена эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с встроенными магнитами. Эквивалентная схема позволяет составить систему уравнений по первому и второму законам Кирхгофа.

Полученная система уравнений позволяет аналитически решить две задачи:

1. Рассчитать необходимые размеры магнитов по известным значениям магнитного потока и размерам ротора и статора двигателя с встроенными магнитами.
2. Рассчитать магнитный поток и необходимые свойства постоянного магнита при заданной конструкции ротора и статора.

### 3.3. Выводы по главе 3

1. Разработана математическая модель приводного комплекса ШСНУ, позволяющая рассчитать мгновенную электрическую мощность, потребляемую приводным двигателем в зависимости от конструктивных параметров станка-качалки. Синхронные машины с постоянными магнитами, которые предлагается использовать в составе ШСНУ отличаются тем, что вместо обмотки возбуждения на роторе у них расположены постоянные магниты, создающие возбуждающий магнитный поток. Статор синхронных машин с постоянными магнитами аналогичен статору АД и имеет трёхфазную обмотку, для обеспечения упрощения замены на действующих станках-качалках.

2. Обоснована конструкция ротора СЭДПМ коллекторного типа, позволяющая обеспечить более высокую магнитную индукцию в воздушном зазоре. Основным достоинством коллекторной конструкции МС ротора является максимальное использование энергии магнитов. Коллекторная конструкция позволяет обеспечить более высокую магнитную индукцию в воздушном зазоре, чем в радиальной МС.

3. Предложена эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с встроенными магнитами в составе станка-качалки нефти. Эквивалентная схема позволяет составить систему уравнений по первому и второму законам Кирхгофа. Полученная система уравнений позволяет рассчитать необходимые размеры магнитов по известным значениям магнитного потока и

размерам ротора и статора двигателя с встроенными магнитами, рассчитать магнитный поток и необходимые свойства постоянного магнита при заданной конструкции ротора и статора.



Через общую проектную *Excel* таблицу задаются входные варьируемые параметры:

$x_m$  – максимальный ход индуктора;

$x_s$  - заданный ход индуктора;

$D$  – диаметр цилиндра;

$P_1$  – давление топлива на входе;

$n$  - политропный коэффициент сжатия;

$m$  – общая масса индуктора и поршневой группы.

Данные параметры позволяют решить уравнения (2.41), что дает возможность определить положение и скорость поршневой группы (и соответственно индуктора) СПДВС работающего в стационарных условиях.

Варьируемые параметры загружаются в имитационную модель СПДВС для последующего расчета и анализа.

Выходными параметрами являются:

$x$  - достигнутый максимальный ход индуктора;

$v$ - достигнутая максимальная скорость индуктора;

$P_{\text{мех}}$  - выходная механическая мощность средняя;

$f$  – частота колебаний индуктора.

Выходные параметры используются для дальнейших расчетов в различных блоках и программах при проектировании автономной энергоустановки.

В таблице 4.1. представлены параметры СПДВС перед началом моделирования.

Масса индуктора определяется из предварительных расчетов в разделе 4.2 и построения 3-D модели синхронной ЭМВПД С ПМ.

Таблица 4.1. Параметры СПДВС

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Диаметр цилиндра	$D$	0,1	м
Максимальный ход индуктора	$x_m$	120	мм
Давление топлива на входе	$P_1$	250	кПа
Степень сжатия	$r$	10	

Продолжение таблицы 4.1

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Масса поршневой группы (включает массу индуктора)	$m$	10	кг
Политропный коэффициент сжатия	$n$	1,5	

Результаты моделирования представлены на рисунках 4.2-4.4.

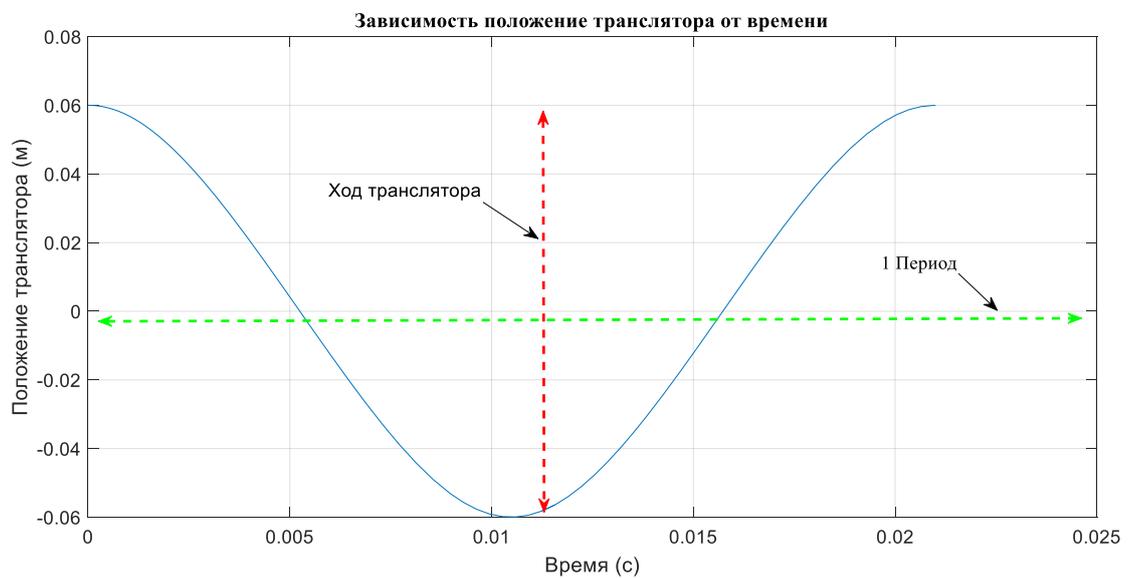


Рисунок 4.2 Зависимость положения индуктора от времени в пределах одного цикла

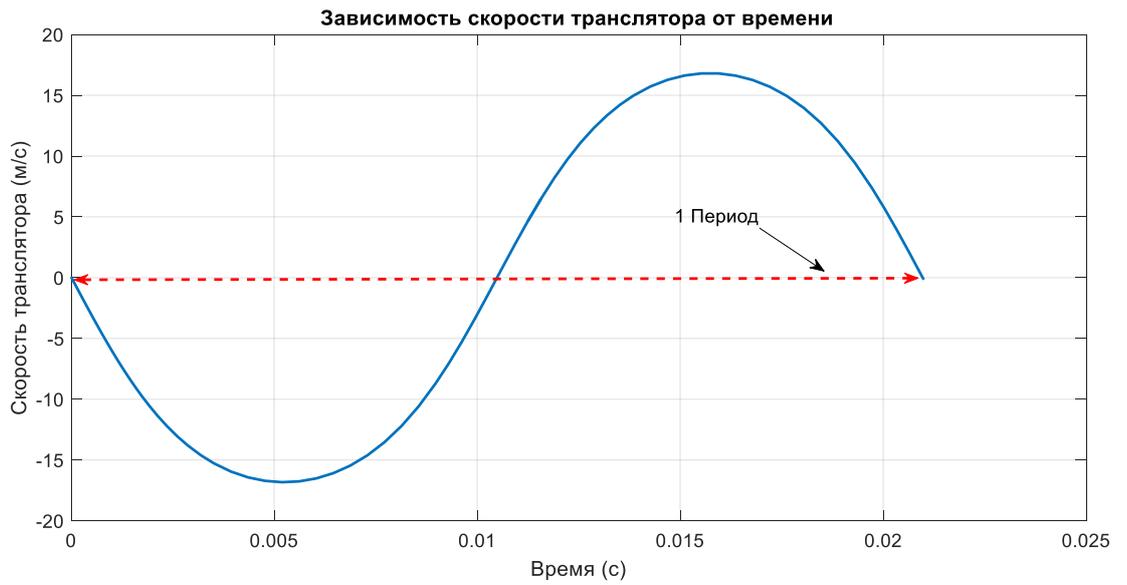


Рисунок 4.3. Зависимость скорости индуктора от времени в пределах одного цикла

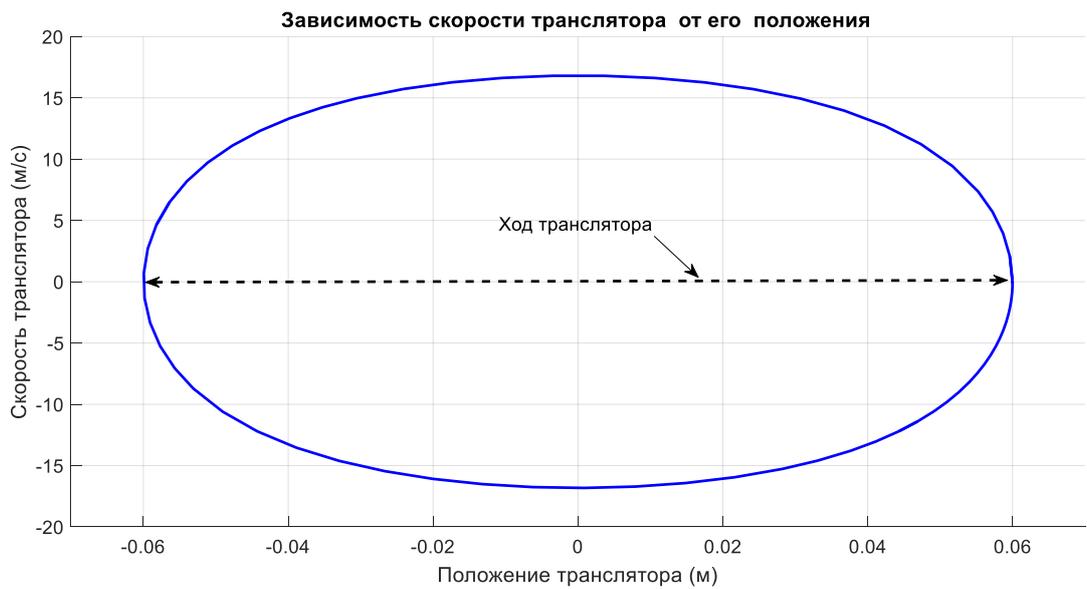


Рисунок 4.4 Зависимость скорости и положения индуктора от времени в пределах одного цикла

## 4.2. Система моделирования электромеханических процессов в синхронной ЭМВПД С ПМ

### 4.2.1. Разработка численной модели синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия в специализированном программном обеспечении

Разработка и оптимизация синхронной ЭМВПД С ПМ проводится вместе с расчетом параметров преобразователя, рассматривая линейную электрическую машину и преобразователь, как единую систему [91, 92,124,129]. В качестве среды имитационного моделирования синхронной ЭМВПД С ПМ полупроводникового преобразователя и системы управления выбран программный комплекс *Matlab-Simulink* и библиотека блоков *SimPowerSystems*, которая является одной из множества дополнительных библиотек *Simulink*, ориентированных на моделирование электротехнических устройств. *SimPowerSystems* содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств.

Совместное использование блоков *SimPowerSystems* и других библиотек *Simulink*, в том числе и блока оптимизации *Optimization Toolbox*, дает возможность моделировать практически любые электротехнические системы.

Таким образом, *SimPowerSystems* в составе *Simulink* на настоящее время может считаться одним из лучших пакетов для моделирования электротехнических устройств и систем [90,126].

Разработаны блоки расчета линейной токовой нагрузки, магнитной индукции статора, магнитной индукции, создаваемой постоянными магнитами индуктора, электромагнитной силы линейной машины, потерь в линейной электрической машине согласно теоретическим выкладкам 2 главы.

Результаты моделирования представлены на рисунках 4.5 - 4.10.

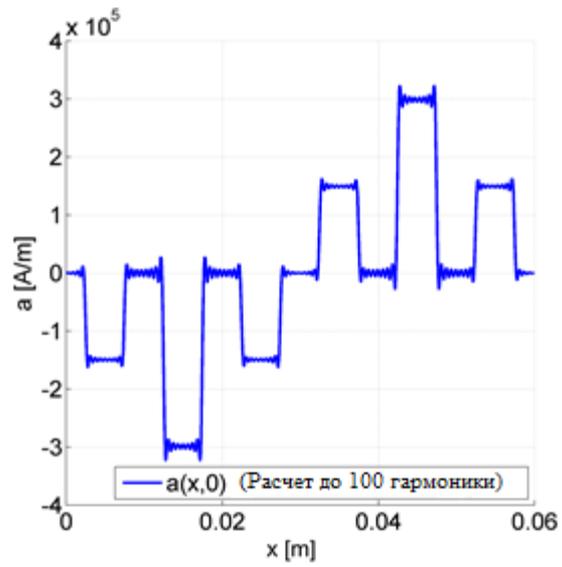


Рисунок 4.5. Линейная токовая нагрузка при  $\omega t = 0$

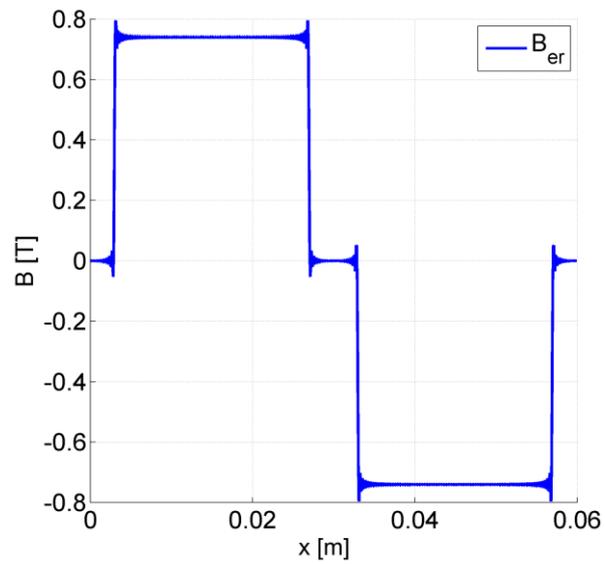


Рисунок 4.6. Значение индукции поля возбуждения

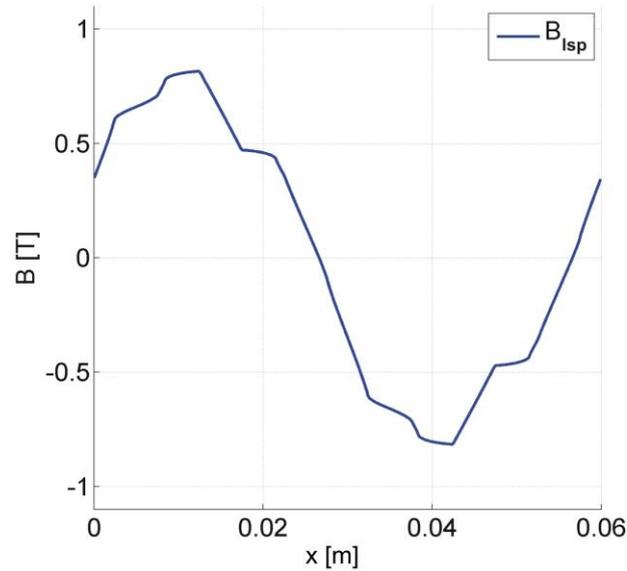


Рисунок 4.7. Результирующее значение индукции

Реакция якоря (рисунок 4.8.) рассчитывается на основе метода конечных элементов с магнитными свойствами постоянных магнитов  $\mu_r = 1$  и  $B_r = 0$ . Это дает возможность представить постоянные магниты при численном моделировании магнитного потока как воздух.

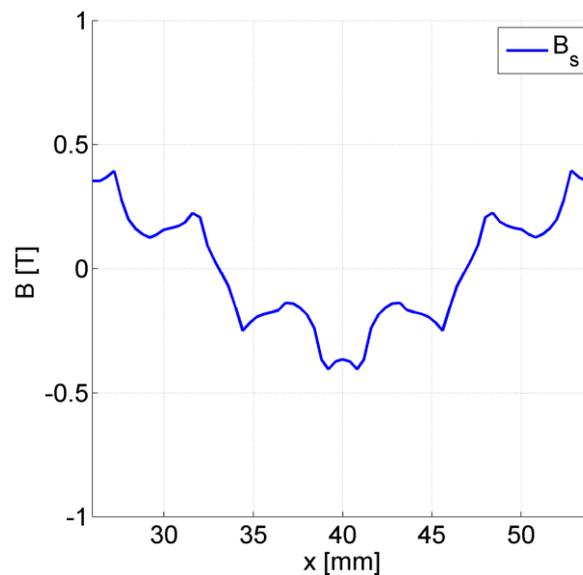


Рисунок 4.8. Реакция якоря в воздушном зазоре в границах полюсного деления

Составляющая магнитной индукции индуктора в индукции воздушного зазора образуется полем магнитов без учета влияния токов статора (реакции статора). Для этого в модели указывается плотность тока  $s = 0 \text{ А/мм}^2$ . На рисунке 4.9. представлено изменение магнитной индукции постоянных магнитов в аксиальном направлении на высоте радиуса воздушного зазора. Наблюдается влияние статорной обмотки на поле возбуждения постоянных магнитов.

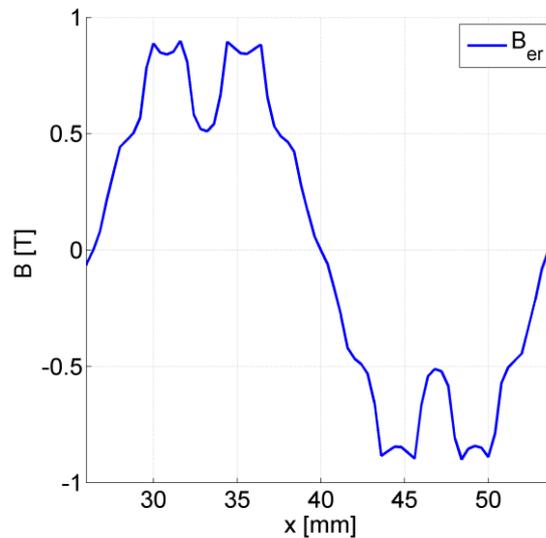


Рисунок 4.9. Поле возбуждения в границах полюсного деления

Индуктируемое напряжение в фазе генератора определяется через известное выражение

$$u_i = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.1)$$

На рисунке 4.10. представлено индуцируемое напряжение при скорости индуктора 1 м/с.

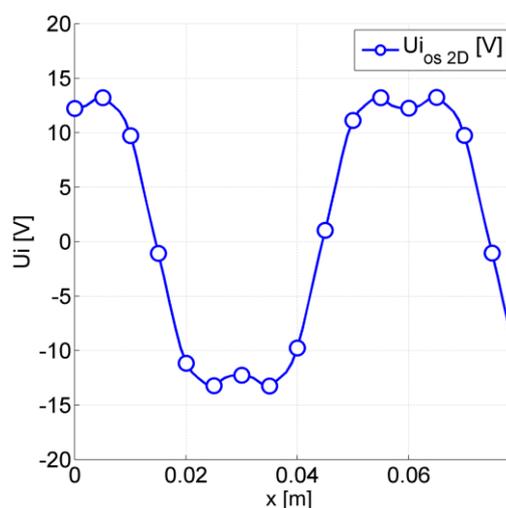


Рисунок 4.10. Индуцируемое напряжение

Расчет основных конструкционных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ

В таблице 4.2. представлен результат аналитического расчета базовых параметров синхронной ЭМВПД с ПМ, в специально разработанном программном обеспечении [93,105].

Таблица 4.2. Расчет базовых параметров машины

Область	Параметр	Значение	Единица измерения
Материал	Остаточная магнитная индукция	1,32	Т
	Коэрцитивная сила	1020	кА/м
	$\mu_{рт}$	1,030	
Геометрия	Ширина магнита	24	мм
	Высота магнита	3	мм
	Ширина паза	5	мм
	Радиус воздушного зазора	100	мм
	Ширина воздушного зазора	0,75	мм

Продолжение таблицы 4.2.

Область	Параметр	Значение	Единица измерения
Геометрия	Полюсное деление статора	30	мм
	Полюсное деление индуктора	30	мм
Конструкция	Количество пар полюсов	3	

Внешние возмущающие механические колебания, действующие на синхронной ЭМВПД с ПМ, зачастую носят нестабильный характер. Необходимо учитывать при работе синхронной ЭМВПД с ПМ наличие переходных процессов.

Поэтому целесообразна работа синхронной ЭМВПД с ПМ на выпрямительную нагрузку с последующим аккумулированием энергии.

Математическая модель трехфазной линейной синхронной ЭМВПД с ПМ, показанная на рисунке 4.11, состоит из последовательной ветви собственных параметров генератора, работающей на выпрямительный диодный мост Universal Bridge, подключенный к активно-индуктивной нагрузке, которая позволяет учесть переменный характер приводного двигателя (СПДВС) при расчете потерь в синхронной ЭМВПД с ПМ и его КПД [94,121,134].

Имитационная модель позволила получить зависимости вырабатываемой электрической мощности синхронной ЭМВПД с ПМ от частоты перемещения индуктора (рисунок 4.12.).

Прочностные расчеты являются важным этапом при конструировании машин, с этой целью рассчитаны осевые нагрузки, действующие на индуктор в зависимости от его частоты перемещения (рисунок 4.13.), что позволяет рассчитать вал индуктора и определить способ крепления магнитов на нем.

Диапазон мощности разрабатываемой синхронной ЭМВПД с ПМ лежит в диапазоне от 3 до 16 кВт, что позволяет использовать данную машину в области автономной энергетики и гибридного транспорта.

Достижение необходимой прочности необходимо рассматривать совместно с минимизацией массы индуктора с целью достижения необходимых динамических характеристик.

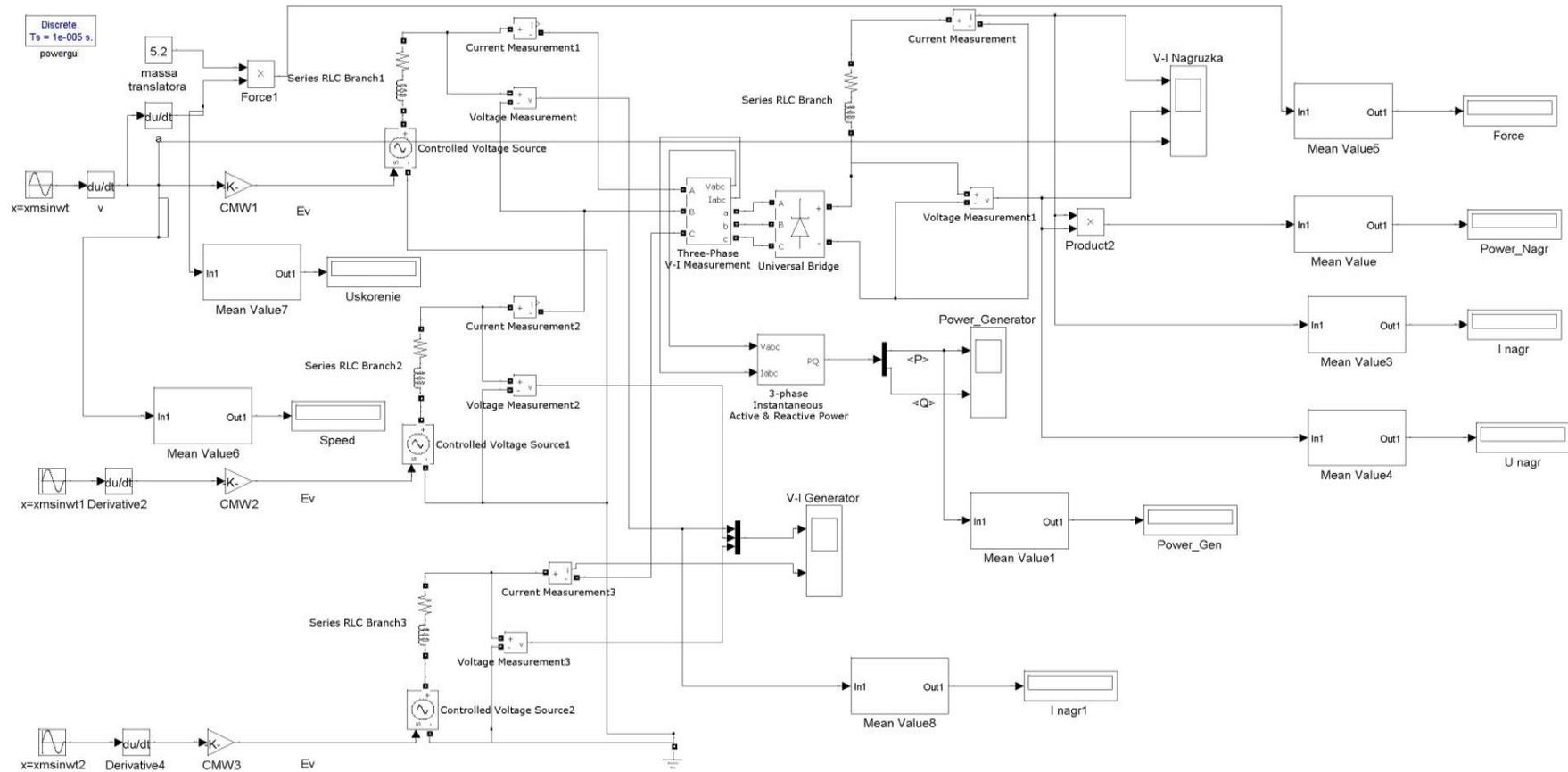


Рисунок 4.11. – Модель трехфазной линейной обратимой электрической машины  
возвратно-поступательного действия

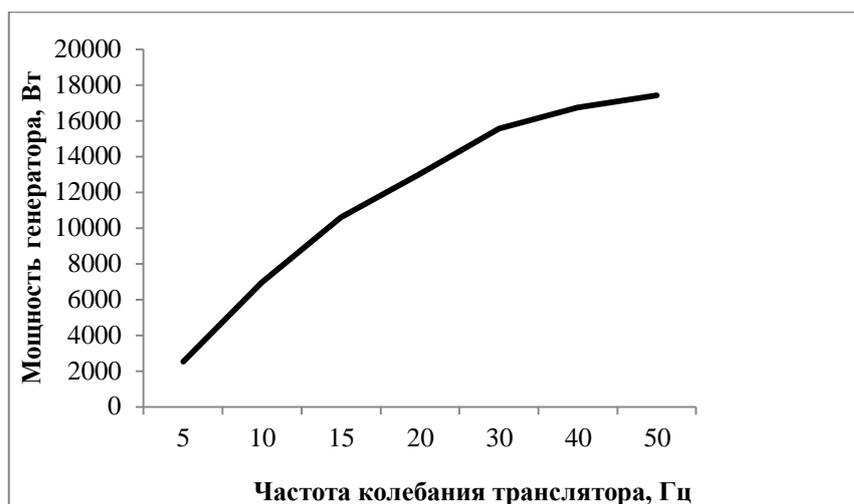


Рисунок 4.12. – Рассчитанная теоретическая зависимость мощности вырабатываемой генератором от частоты индуктора



Рисунок 4.13. – Рассчитанная теоретическая зависимость осевой нагрузки на транслятор от частоты индуктора

#### 4.2.2. Моделирование механических процессов в синхронной ЭМВПД С ПМ

Прочностной анализ конструктивных элементов синхронной ЭМВПД с ПМ является необходимым условием надежной работы всего АИЭ и позволяет произвести оптимизацию конструкции, прежде всего подвижных элементов синхронной ЭМВПД С ПМ (индуктора) с целью снижения механической и вибрационной нагрузки на элементы АИЭ.

Изначально конструктивные параметры определяются на основе расчетов численной модели синхронной ЭМВПД с ПМ, куда заложены основные размеры статора, постоянных магнитов и индуктора.

Параметры механических процессов (скорости, ускорения, нагрузки) в программном комплексе *Matlab-Simulink* на основе программ, написанных на языке *Matlab*, передаются в проектную таблицу *Excel*, которая синхронизируется с системой автоматизированного проектирования (САПР) *CatiaV5*. В *CatiaV5* строятся 3D модели статора и индуктора синхронной ЭМВПД С ПМ.

Блок *Force* в модели трехфазной линейной синхронной ЭМВПД С ПМ рассчитывает осевые нагрузки на транслятор электрической машины, которые передаются на осциллограф *Scope*. Блок *ToWorkspace* – производит запись полученных значений в файл «*naग्रuzka*».

После завершения расчетов, программа выгружает полученный ряд нагрузок в виде проектной *Excel*-таблицы, которая далее поступает в САПР *CatiaV5*. Общий вид электрической машины представлен на рисунке 4.14.

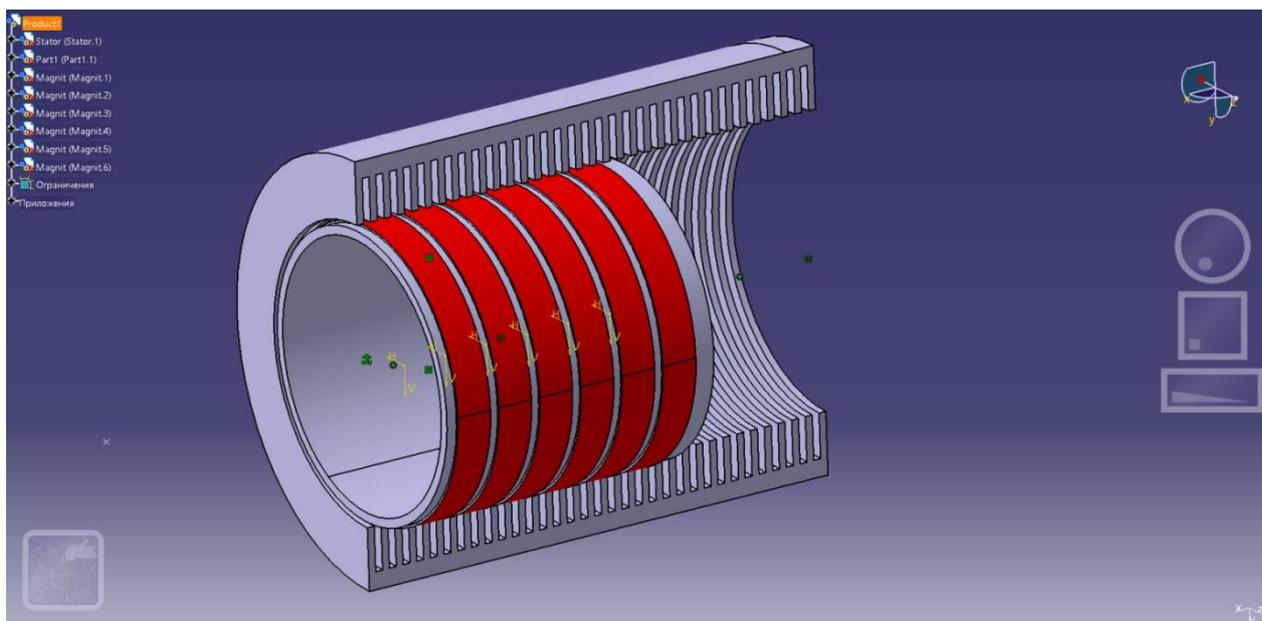


Рисунок 4.14. 3-D модель линейного генератора в программе CatiaV5

Для основы индуктора из встроенной библиотеки выбран материал – сталь, материал магнитов – NdFeB (Неодим-железо-бор). Масса индуктора, рассчитанного в САПР CatiaV5, составила 5,2 кг.

На рисунке 4.15. представлен прочностной анализ крепления магнита на трансляторе электрической машины. Рассчитанная максимальная нагрузка на крепление составляет 7,72 МПа, что влияет на способ монтажа магнитов на ярмо индуктора.

На рисунке 4.16. представлен прочностной анализ основы индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ. Предполагается наличие только осевых нагрузок. Максимальное механическое напряжение составило 110 МПа, что дает возможность использование стали в качестве основы индуктора [136].

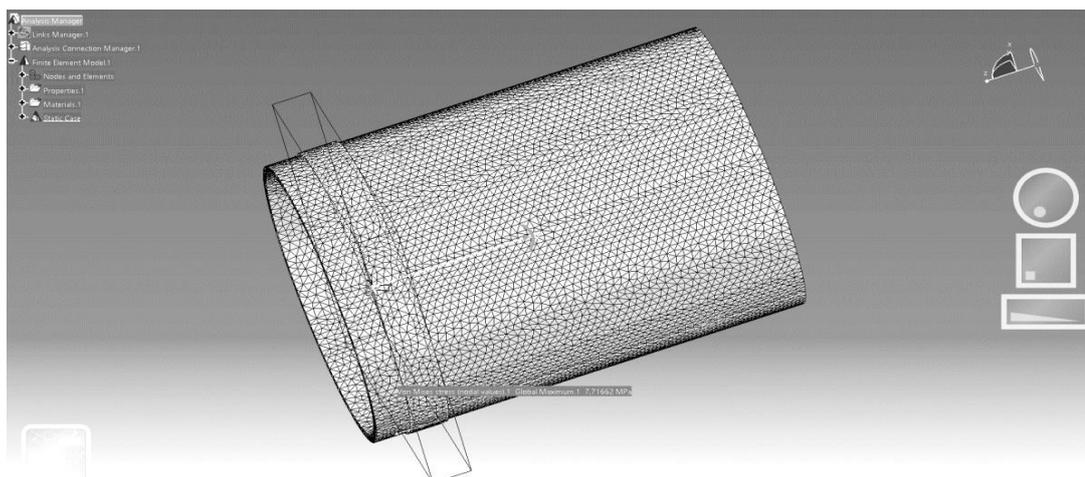


Рисунок 4.15. Проведение прочностного анализа крепления магнита на трансляторе синхронной ЭМВПД С ПМ

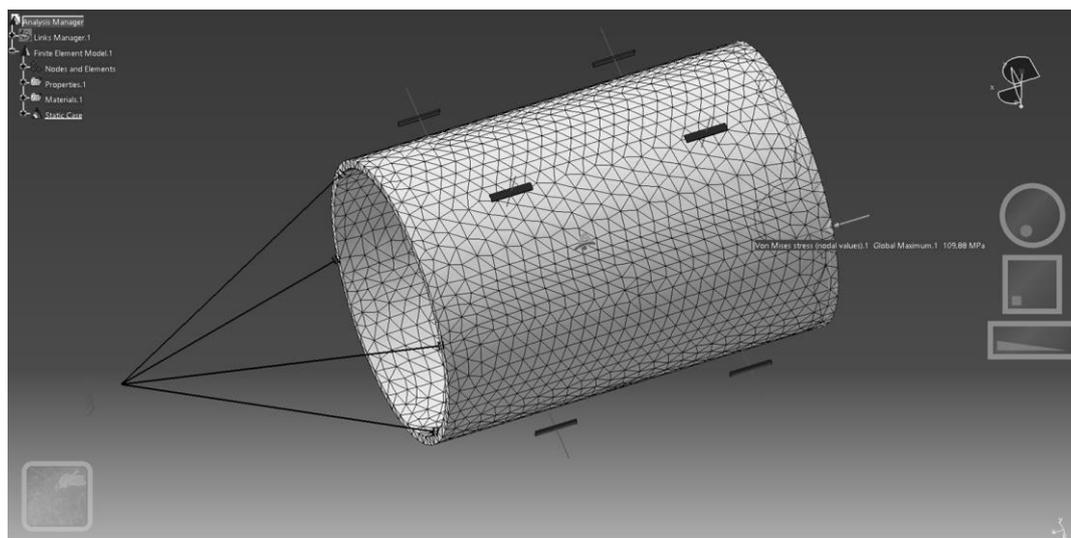


Рисунок 4.16. Проведение прочностного основы индуктора синхронной ЭМВПД С ПМ

В главе 5 представлен алгоритм оптимизации массы индуктора в САПР *Catia V5*.

### 4.3. Система моделирования электромагнитного поля в синхронной ЭМВПД с ПМ

Расчеты проводятся в программном пакете *Comsol Multiphysics*, использующий метод конечных элементов (МКЭ) для решения полевых задач. Для решения задачи за отправную точку была взята аналитически рассчитанная модель, содержащая в себе погрешность определения размеров, которые в сравнении с рассчитанными позже в *Comsol Multiphysics* были скорректированы так чтобы, удовлетворять заданным выходным характеристикам, и объему потребления материалов.

Анализ взаимосвязей величин проводился в программном пакете *Comsol Multiphysics*, использующий метод конечных элементов для решения полевых задач.

Полевой решатель программы *Comsol Multiphysics* оперирует основными дифференциальными уравнениями Максвелла.

Закон Ампера:

$$\nabla \times H = J, \quad (4.2)$$

где  $J$  – плотность тока,

$H$  – напряженность магнитного поля.

Теорема Гаусса:

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (4.3)$$

где  $B$  – плотность магнитного потока связана с  $H$  соотношением (2.3).

$$B = \mu \cdot H. \quad (4.4)$$

Для изотропных материалов магнитная проницаемость является функцией от плотности магнитного потока (4.4).

$$\mu = \frac{B}{H}. \quad (4.5)$$

Плотность потока может быть выражена через векторный потенциал  $A$  по (4.6).

$$B = \text{rot} \cdot A. \quad (4.6)$$

Метод конечных элементов использует уравнения (4.1) и (4.2) для решения  $\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right)$  с учетом характеристик изотропных материалов.

Следует внести ясность в модель, исследование которой ведется в *Comsol Multiphysics*. Так как форма линейного генератора представляет собой цилиндр – осесимметричное твердое тело, то не имеет смысла производить расчеты в 3D координатах, так как для этого требуются внушительные вычислительные мощности. Помимо этого, расчет объемной модели вносит ряд погрешностей в результаты расчета, увеличивает его время и вероятность сбоя при вычислениях. Резонным является выбор двухмерного сечения, которое также является осесимметричным телом, соответственно достаточно провести расчет для половины сечения объемной модели. Переход от расчета магнитного поля в цилиндрической системе координат в декартовой осуществляется за счет модификации уравнений Максвелла, что автоматически выполняется в *Comsol Multiphysics* [95,132]. Методика двумерного конечно-элементного моделирования деталей конструкций с равномерно распределенными по окружности геометрическими компонентами подтверждена экспериментально и путем сопоставления с результатами расчета трехмерных моделей. Расчетная модель участка синхронной ЭМВПД с ПМ показана на рисунке 4.17.

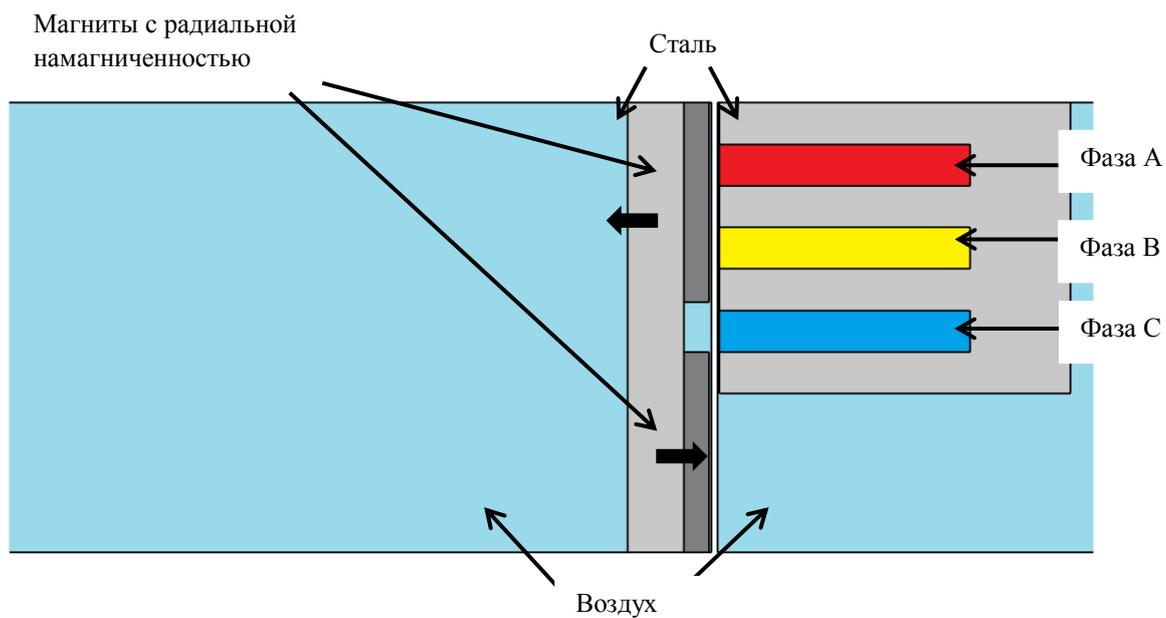


Рисунок 4.17. Участок синхронной ЭМВПД с ПМ для моделирования электромагнитного поля

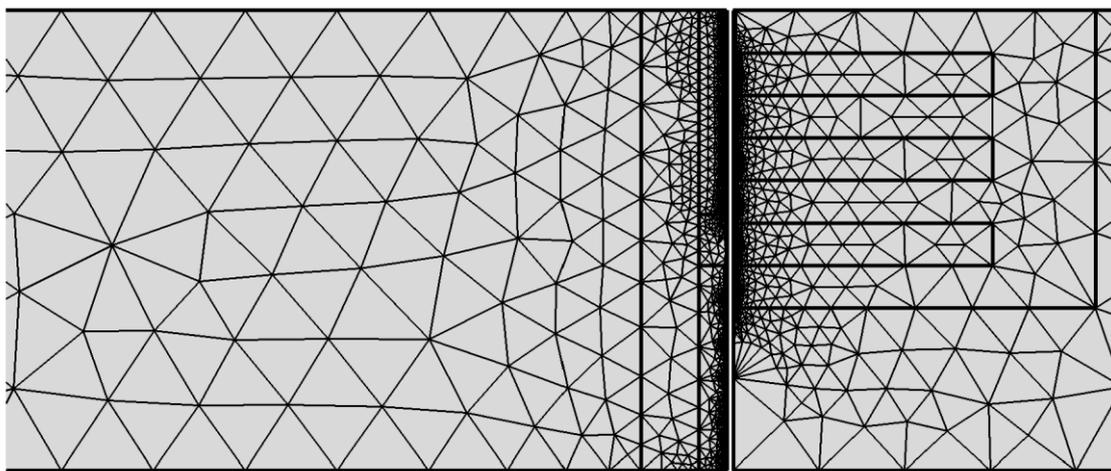


Рисунок 4.18. Наложение «сетки» на участок синхронной ЭМВПД с ПМ

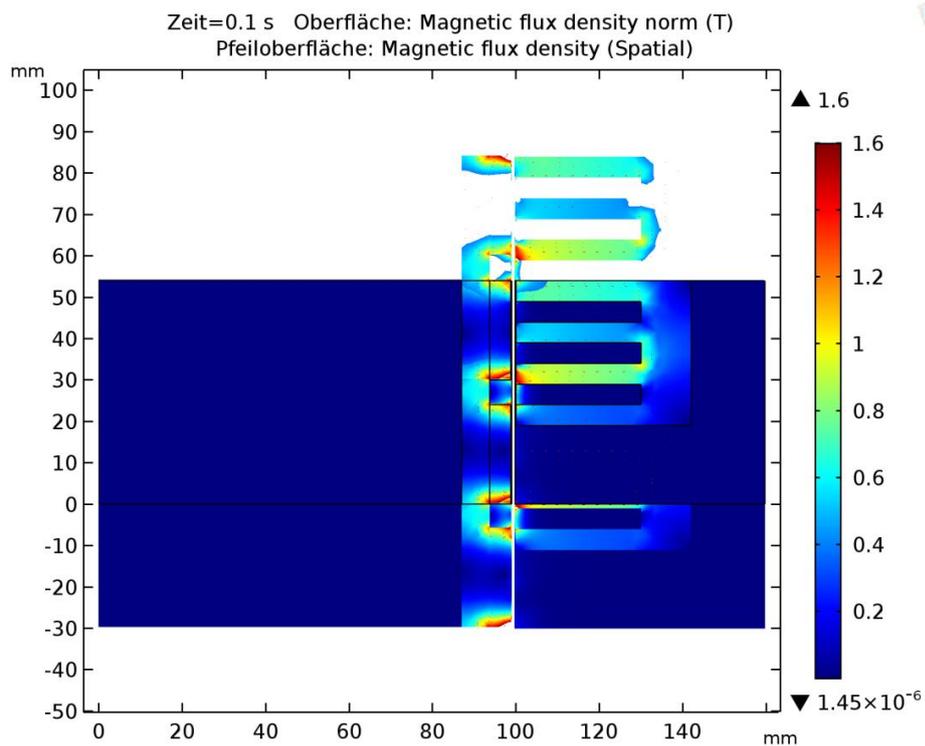


Рисунок 4.19. 2D модель участка синхронной ЭМВПД с ПМ

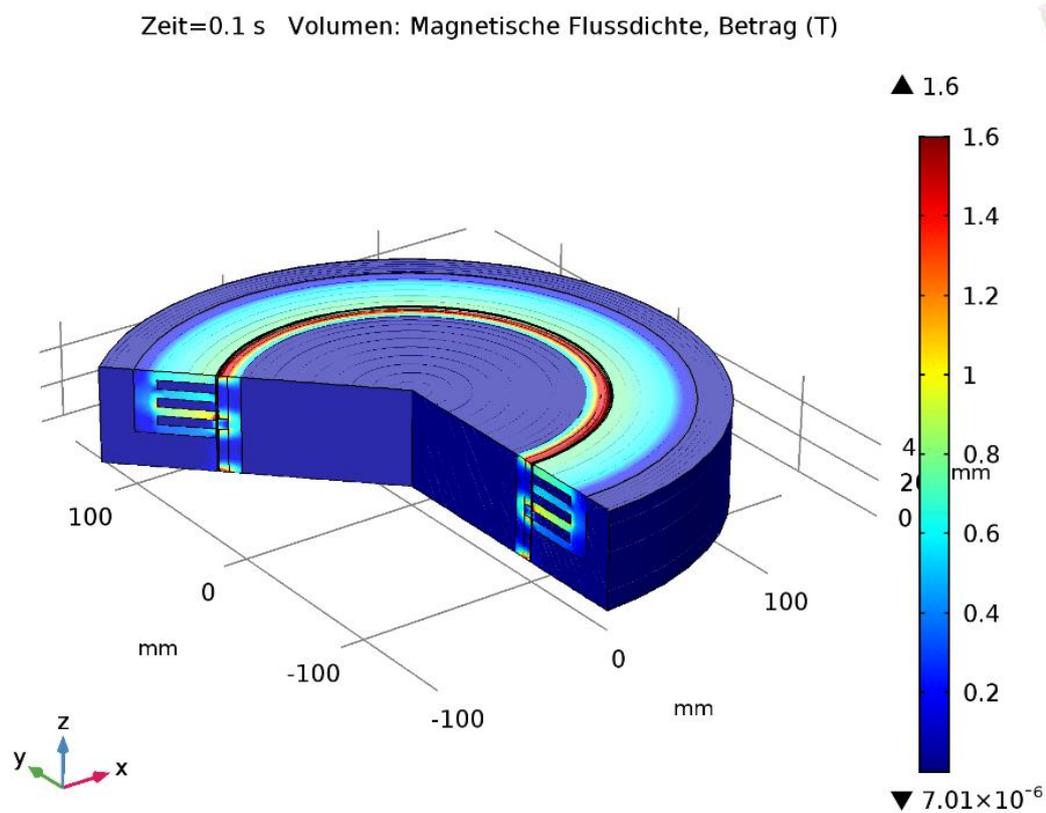


Рисунок 4.20. 3D модель участка синхронной ЭМВПД с ПМ

Напряжения в обмотках трехфазной обмотки статора синхронной ЭМВПД с ПМ, частота перемещения индуктора 20 Гц.

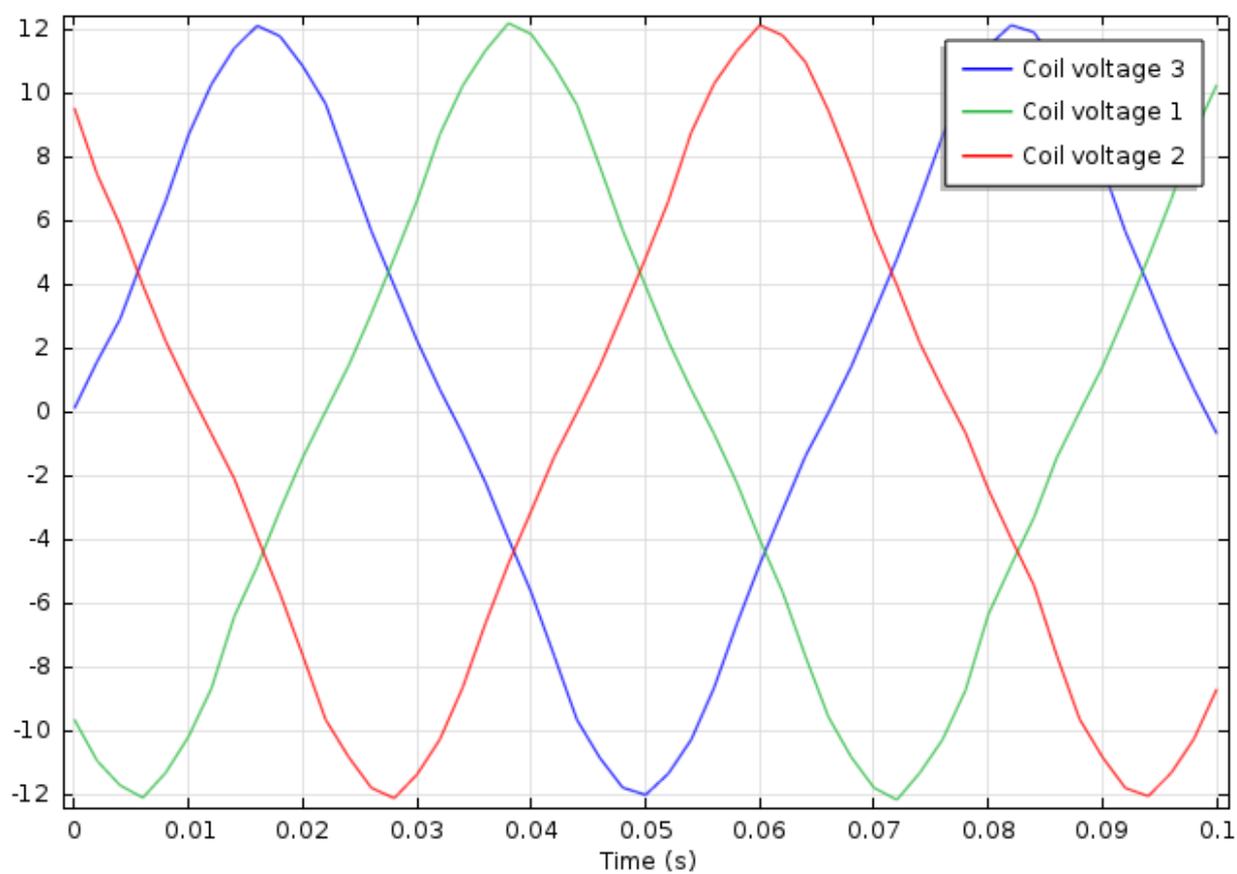


Рисунок 4.21. Индуцируемое напряжение в обмотках

#### 4.4. Система моделирования управляемого преобразователя с активной коррекцией коэффициента мощности

Целью моделирования является расчет рациональных параметров управляемого выпрямителя (УВ) с активной коррекцией коэффициента мощности синхронной ЭМВПД с ПМ для обеспечения максимально возможной энергетической эффективности с учетом заданных условий.

Предложена методика расчета статических и динамических потерь в *IGBT* транзисторах УВ.

Рассмотрено влияние работы преобразователя на коэффициент мощности и на общий КПД установки.

Имитационная модель реализована в приложении *SimPowerSystem*.

Система управления УВ реализована во вращающейся системе координат ( $d, q$ ) с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ), которая обеспечивает управление синхронной ЭМВПД с ПМ с возможностью поддержания коэффициента мощности в режиме генератора близким к единице, за счет регулирования реактивной мощности на выходе генератора.

Представленная методика позволяет рассчитать параметры УВ синхронной ЭМВПД с ПМ с их последующей отладкой и оптимизацией.

Для моделирования энергетических систем, включая устройства электротехники и промышленной электроники, служит пакет расширения *SimPowerSystem Blockset*.

Задачей моделирования является анализ потерь электроэнергии в управляемом выпрямителе, с учетом различных режимов работы, элементной базы, способов управления.

Блок *PLL*, входящий в состав библиотеки *SimPowerSystems*, представлен на рисунке 4.22. Здесь вместо фильтра низкой частоты для выделения постоянной составляющей напряжения  $\bar{u}_q$  используется блок измерения среднего значения переменного сигнала (*Variable frequency mean value*) с обратной связью по частоте входного сигнала. Пропорционально-интегральный регулятор обеспечивает

непрерывное формирование значения угловой частоты  $\omega$ .

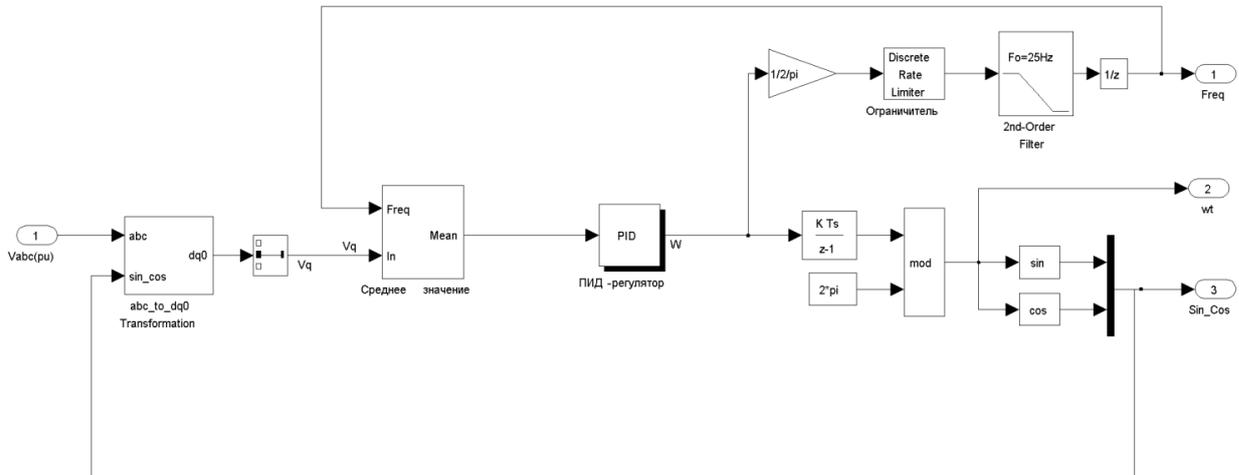


Рисунок 4.22. Структурная схема модели фазовой автоподстройки частоты

Сигналы ( $\cos\theta$  и  $\sin\theta$ ) формируются внутри блока  $PLL$  и могут использоваться для синхронизации преобразования Парка-Горева.

Трёхфазная система сетевых токов  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$  преобразуется в двухфазную ортогональную систему  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $i_0$  вращающуюся синхронно с обобщенным вектором напряжения сети. Синхронизация преобразования по фазе и частоте с фазным напряжением сети осуществляется блоком  $PLL$ , формирующим сигналы  $\cos\theta$  и  $\sin\theta$ , поступающие на вход преобразователей координат. Если фазный ток синхронен с напряжением своей фазы, то компонент  $i_q$  не будет содержать постоянной составляющей.

Можно принудительно формировать постоянную составляющую  $\bar{i}_d$ , изменяя тем самым глубину регулирования активной мощности и величины тока потребляемого из сети согласно (2.101). При этом регулирование до нуля постоянной составляющей компонента обеспечит минимальный угол сдвига фаз, а, значит, и работу преобразователя с коэффициентом мощности близким к 1.

Таким образом, задача регулирования сводится к тому, чтобы формировать обобщенный вектор тока в синхронных координатах с заданной фазой и частотой вращения, обеспечивающий необходимый угол опережения первой гармоники

фазного тока относительно первой гармоники напряжения своей фазы.

Регулятор активной и реактивной составляющей, выполненный на пропорционально-интегральных регуляторах, вычисляет значения токов задания преобразователя в синхронной системе координат. Составляющие  $i'_d$ ,  $i'_q$  содержат информацию о значении угла сдвига фаз, с которым будет синтезирован обобщенный вектор тока.

Блок модели *Universal Bridge* позволяет задавать тип и характеристики полупроводниковых элементов выпрямительной схемы.

Система управления УВ использует вращающуюся систему координат (d, q) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Частота модуляции от 3 до 10 кГц. Реализовано управление с возможностью поддержания коэффициента мощности ЭМВПД в режиме генератора близким к единице, т.е. реактивная мощность на выходе генератора приближается к нулю.

Для учета энергетических характеристик управляемого выпрямителя *Universal Bridge* в модель трехфазной линейной ЭМВПД использованы следующие блоки:

Блока управления синхронной ЭМВПД с ПМ, который реализует ШИМ на частотах от 3 до 10 кГц (рисунок 4.23). В блоке производится непосредственное преобразование трехфазной системы координат во вращающуюся систему координат (d, q).

Блок «ШИМ генератор» определяет несущую частоту широтно-импульсной модуляции. Выходные электрические и механические параметры синхронной ЭМВПД с ПМ подаются на блок m, откуда они подаются в блок вычисления потребленной электроэнергии синхронной ЭМВПД с ПМ.

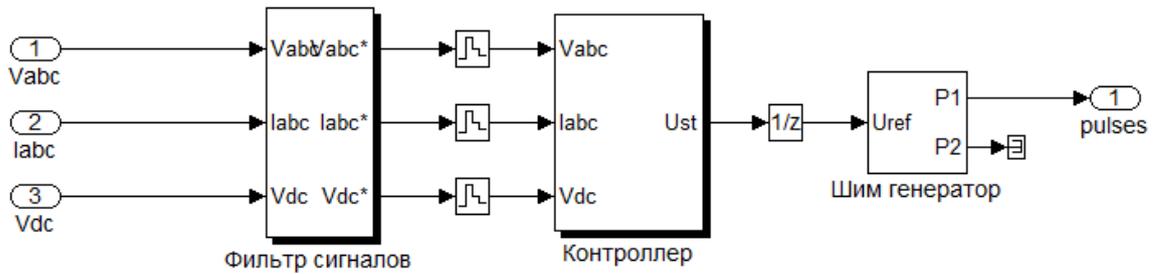


Рисунок 4.23. Блока управления линейной синхронной ЭМВПД С ПМ

Блок вычисления потерь в преобразователе (динамических, статических) (рисунок 4.24). Блок содержит функционал для задания характеристик полупроводниковых элементов, что позволяет провести тепловой расчет преобразователя для определения способа охлаждения.

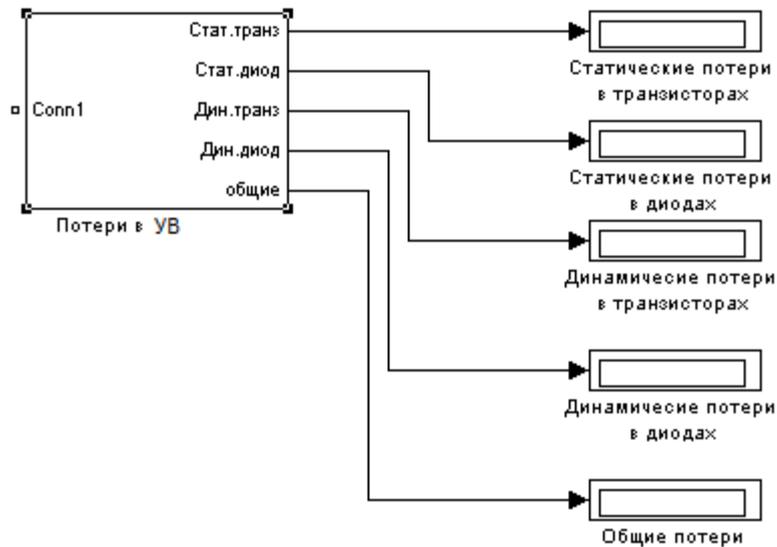


Рисунок 4.24. Блок вычисления потерь в УВ

В блок вычисления потерь в УВ включены следующие два субблока.

Мгновенное значение тока модуля *IGBT* рассчитывается в блоке статических потерь, которое преобразуется действующее значение (рисунок 4.25). Действующее значение тока необходимо для расчета прямого падения напряжения на транзисторе в блоке «Зависимость  $V_{ce}(I_c)$ ». Данные зависимости

заносятся в виде интерполяционных таблиц, на основе реальных характеристик *IGBT* транзисторов. Далее производится расчет мощности и энергии потерь во всех шести модулях

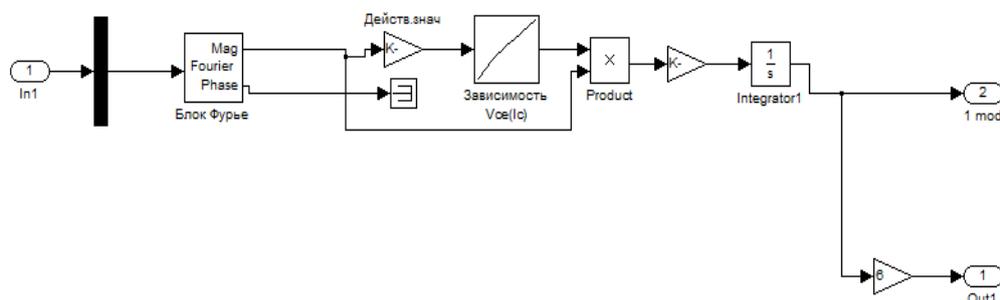


Рисунок 4.25. Блок расчета статических потерь (потерь проводимости) в модуле *IGBT* транзистора

Статические потери в обратных диодах модулей *IGBT* вычисляются аналогично.

В блоке расчета динамических потерь действующее значение тока в модуле подается в элемент «Потери на переключения  $E_{sw(on)}$ », которое пересчитывается в потери энергии на включение в мДж (рисунок 4.26). Данное значение преобразуется в Дж и умножается на несущую частоту ШИМ. Далее вычисляется мощность и энергия потерь в одном модуле и во всех шести соответственно.

Потери на выключение транзистора  $E_{sw(off)}$ , и на восстановление обратного диода транзистора  $E_{res}$ , вычисляются аналогично.

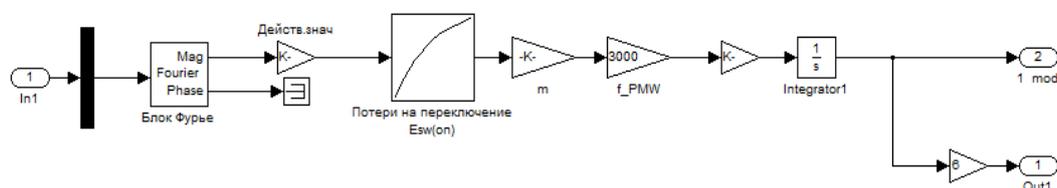


Рисунок 4.26. Блок расчета динамических потерь (потерь на переключения) в модуле *IGBT*

В блоке расчета генерируемой электроэнергии синхронной ЭМВПД С ПМ

рассчитывается активная, реактивная мощность и КПД преобразователя.

Результаты моделирования представлены в таблице 4.3. Проведено моделирование на следующих частотах ШИМ генератора – 3кГц, 5 кГц и 10 кГц при различных частотах перемещения индуктора синхронной ЭМВПД С ПМ. Рассчитаны генерируемая электроэнергия, потери в УВ, КПД УВ и коэффициент мощности на выходе синхронной ЭМВПД С ПМ. Как видно из представленной таблицы выход на номинальный КПД УВ начинается с частоты перемещения индуктора 20 Гц с последующим увеличением КПД. Уменьшаются потери в УВ с увеличением частоты перемещения индуктора. Рациональнее использовать частоты ШИМ генератора в области 3-5 кГц [96,135].

Таблица 4.3 Результаты моделирования генератора

Тип управления	Частота перемещения индуктора, Гц	Генерация электроэнергии ЭМВПД, кВт	Потери в управляемом выпрямителе (статические и динамические) – на основе учета реальных характеристик полупроводниковых элементов, кВт	КПД УВ, %	Коэфф. мощности, на выходе генератора
Управление ШИМ-10 000 Гц	10	0,76	0,16	79	0,84
	20	2,1	0,12	94	0,71
	30	4,8	0,11	97,7	0,97
	40	8	0,1	98,7	0,97
	50	10,7	0,09	99	0,97
Управление ШИМ-5000 Гц	10	0,89	0,08	91	0,75

Продолжение таблицы 4.3.

Тип управления	Частота перемещения индуктора, Гц	Генерация электроэнергии ЭМВД, кВт	Потери в управляемом выпрямителе (статические и динамические) – на основе учета реальных характеристик полупроводниковых элементов, кВт	КПД УВ, %	Коэфф. мощности, на выходе генератора
	20	3	0,07	97,7	0,86
	30	4,8	0,06	98,7	0,97
	40	7,9	0,05	99	0,97
	50	11,13	0,05	99	0,99
Управление ШИМ-3000 Гц	10	0,85	0,06	92,9	0,66
	20	2,96	0,05	98,3	0,81
	30	4,9	0,04	99	0,97
	40	8,2	0,03	99	0,98
	50	10,87	0,03	99	0,99

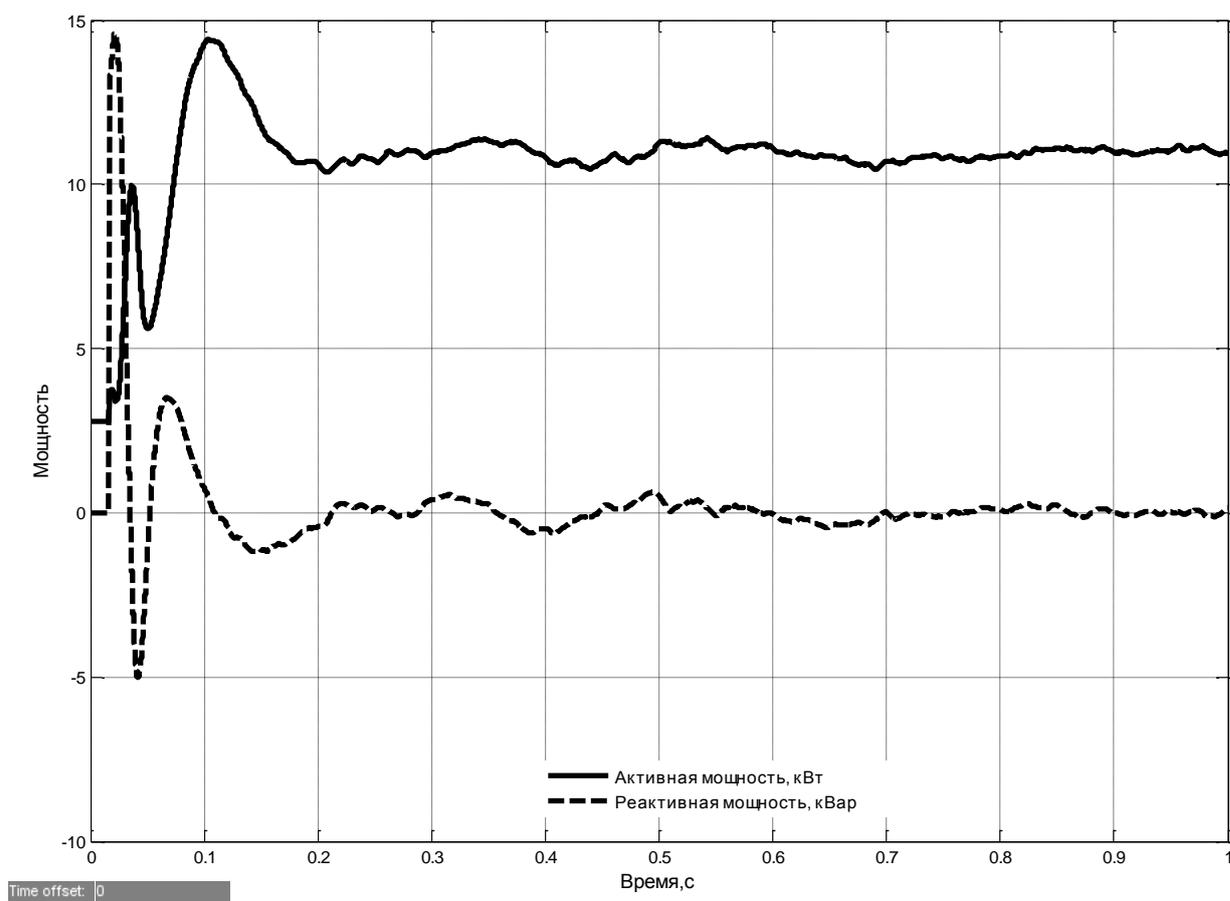


Рисунок 4.27. Регулирование выходной мощности синхронной ЭМВПД С ПМ

На рисунке 4.27. представлен график изменения выходной мощности генератора на частоте перемещения индуктора 50 Гц. Предложенное регулирование обеспечивает приемлемое качество переходного процесса в начале режима генератора и стабильное поддержание выходной активной мощности с высоким коэффициентом мощности.

Значение индуктивности входных дросселей определяется, исходя из желаемого значения искажений входного тока выпрямителя. Результаты моделирования показывают возможность получения в установившемся режиме искажений входного тока выпрямителя менее 5% и коэффициента мощности близкого к 1 при принятых в модели параметрах.

Результаты моделирования трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности в условиях неидеальной сети представлены в таблице

## 4.4.

Таблица 4.4. Параметры и основные характеристики модели трехфазного выпрямителя

Частота модуляции, кГц	4-10
Активная мощность на выходе, кВт	4-12
Коэффициент мощности	0,96-0,98
Частота генерируемого напряжения, Гц	5-50
Линейное напряжение генерируемого напряжения, В	5-15
Емкость сглаживающего фильтра, мкФ	2200
Индуктивность сглаживающего фильтра, мГн	4

Для частоты модуляции 4 кГц оптимальное значение индуктивностей дросселей составляет 1-4 мГн.

Полученные результаты в ходе имитационного моделирования синхронной ЭМВПД с ПМ показывают эффективность использования различных программных комплексов с целью повышения эффективности проектирования и оптимизации конструктивных параметров.

Таким образом, преимуществом предложенного способа управления является обеспечение высокого коэффициента мощности в широком диапазоне регулирования выходных параметров выпрямителя. Результаты моделирования в среде *Matlab Simulink* показали работоспособность следящей системы управления по компонентам обобщенного вектора тока в синхронных координатах при различных индуктивностях входного фильтра. Выпрямитель устойчиво работает в условиях неидеальной сети, быстро и без срывов выходит на новый режим работы, определяемый системой управления.

#### 4.5. Моделирование тепловых процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ на основе электротепловой аналогии

Достаточно точным методом моделирования сложного теплообмена выступают методы, основанные на использовании электрических схем замещения

тепловых процессов. Основанием для использования данных методов являются положения теории подобия и изоморфизм уравнений, описывающих тепловые процессы и процессы в электрической цепи [97].

Под изоморфизмом понимается одинаковая форма уравнений, описывающих различные по природе явления. Явления, описываемые изоморфными уравнениями, могут быть подобными. Это значит, что между ними может быть установлено взаимно однозначное соответствие, позволяющее распространять выводы, полученные при изучении одного явления, на другое.

Одним из методов, основанных на электротепловой аналогии, является метод теплового расчета на основе электрических схем замещения. Разновидностью данного метода является метод эквивалентных тепловых схем, который традиционно используется в тепловых расчетах электрических машин. Основное отличие метода электрических схем замещения (ЭСЗ) от метода эквивалентных тепловых схем (ЭТС) заключается в том, что для реализации метода ЭСЗ можно использовать формализованные методы построения и расчета электрических цепей. [98].

В основе метода электротепловой аналогии лежат следующие положения. Согласно основному закону теплопроводности поток тепла  $Q$  через произвольную изотермическую поверхность  $S$  прямо пропорционально градиенту температуры  $T$  в направлении теплового потока

$$\vec{Q} = -\vec{q}S = -\lambda S \vec{\nabla} T, \quad (4.7)$$

где  $q$  – поверхностная плотность теплового потока;

$\lambda$  – удельная теплопроводность материала.

При одномерном распространении тепла через стенку толщиной  $b_c$  уравнение (3.7) может быть преобразовано к виду:

$$\vec{Q} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \approx -\lambda S \frac{T_2 - T_1}{b_c} = \lambda S \frac{\Theta}{b_c} = \frac{\Theta}{R_m}, \quad (4.8)$$

где  $x$  – направление распространения тепла;

$T_1$  и  $T_2$  – температуры на границах стенки;

$\Theta = T_2 - T_1$  – перепад температур на границах стенки;

Тепловое сопротивление

$$R_m = \frac{1}{\lambda} \frac{b_c}{S}. \quad (4.9)$$

Аналогично конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и охлаждающей средой описывается законом Ньютона–Рихмана:

$$Q = qS = \alpha S(T_1 - T_2) = \alpha S\Theta = \frac{\Theta}{R_m}, \quad (4.10)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи поверхности;

$\Theta$  - превышение температуры охлаждаемой поверхности над температурой охлаждающей среды.

Тепловое сопротивление теплоотдачи:

$$R_m = \frac{1}{\alpha S}. \quad (4.11)$$

В обоих случаях получаем закон Ома для участка тепловой цепи

$$Q = \frac{\Theta}{R_m}. \quad (4.12)$$

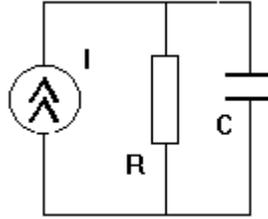


Рисунок 4.28. Электрическая схема замещения участка тепловой цепи

Дифференциальное уравнение нагрева однородного тела имеет вид

$$Qd\tau = C_m d\theta + \alpha S d\tau \quad (4.13)$$

Данное уравнение можно представить в виде

$$d\theta = \frac{1}{C_m} \left( Q - \frac{\theta}{R_m} \right) d\tau \quad (4.14)$$

Это уравнение изоморфно с уравнением электрической цепи, изображенной на рисунке 4.24:

$$dU_c = \frac{dq_c}{C} = \frac{1}{C} i_c dt = \frac{1}{C} \left( I - \frac{U_c}{R} \right) dt \quad (4.15)$$

где  $U_c$  – напряжение на конденсаторе;

$q_c$  – заряд конденсатора;

$C$  – емкость конденсатора;

$i_c$  – ток, протекающий через конденсатор;

$I$  – ток в ветви с источником тока;  $R$  – электрическое сопротивление.

Таким образом, имеем два процесса, описываемых изоморфными уравнениями. Следовательно, можно построить электрическую схему замещения тепловых процессов с масштабами подобия

$$m_p = \frac{I}{Q}, m_\theta = \frac{U_c}{\theta}, m_R = \frac{R}{R_m}, m_C = \frac{C}{C_m}, m_t = \frac{t}{\tau}. \quad (4.16)$$

При использовании современных средств численного моделирования электрических цепей все масштабы подобия могут быть принятыми равными единице.

Учитывая дополнительное положение к теоремам подобия, сформулированного В.А.Вениковым [99], можно разбить тепловую цепь на условно однородные элементы, обменивающиеся теплом, для каждого из которых записывается уравнение (4.11), построить электрическую схему замещения (рисунок 4.28.), получив, таким образом, разветвленную электрическую цепь, подобную исходной тепловой системе.

Инертность процессов теплопередачи определяется теплоемкостью элементов тепловой цепи. Для расчета тепловой цепи на рисунке 4.29 должны быть рассчитаны теплоемкость индуктора, статора, кожуха охлаждения (таблица 1.11.).

Электрическая схема замещения тепловой цепи синхронной ЭМВПД с ПМ, созданная в среде математического пакета *Simulink*, представлена на рисунке 4.29. Результаты расчета электрической цепи в среде *Simulink* представлены на рисунке 4.29.

Метод электрических схем замещения получил широкое распространение в тепловых расчетах электрических машин [100,101].

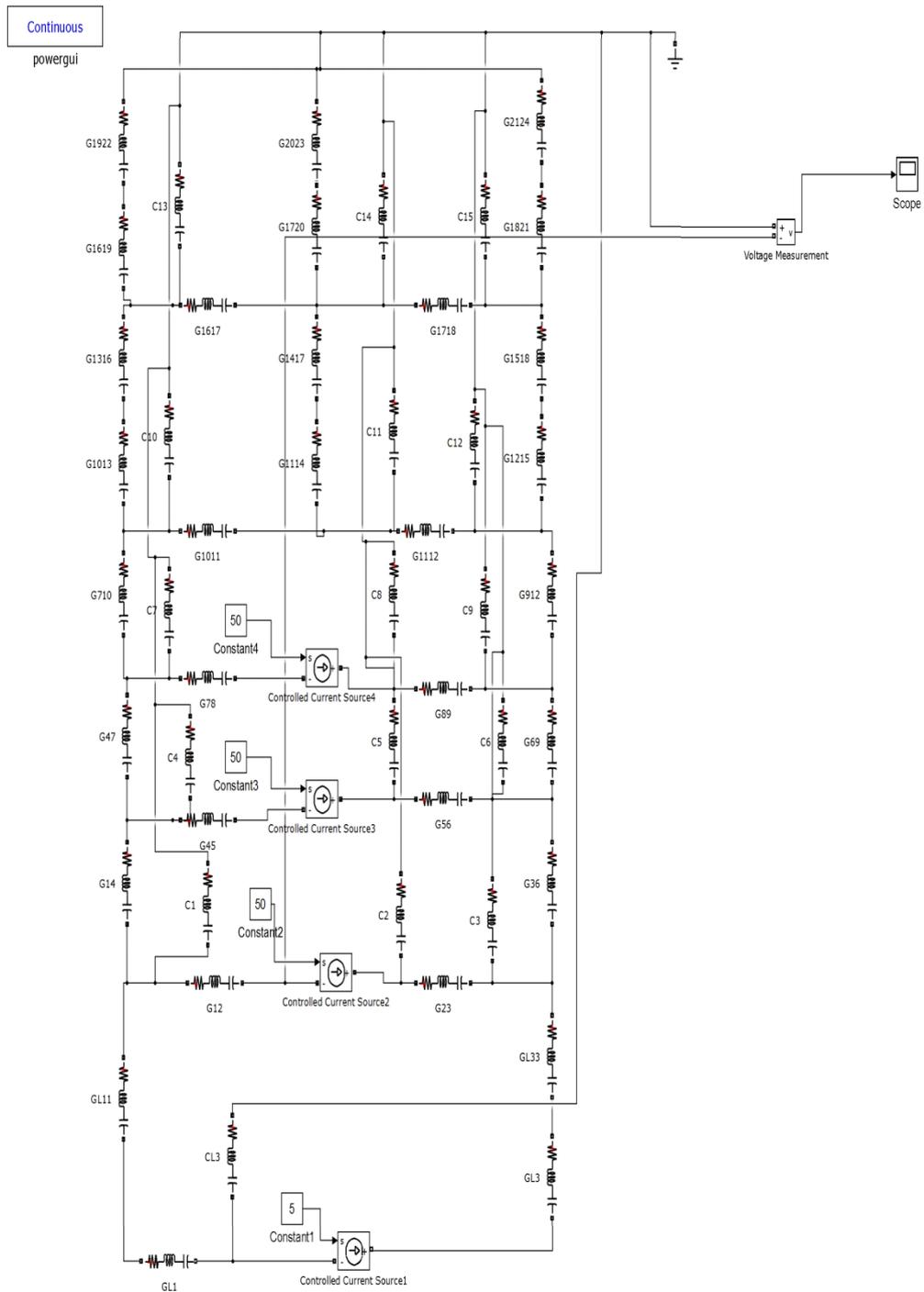


Рисунок 4.29. Электрическая схема замещения тепловой цепи синхронной ЭМВД с ПМ

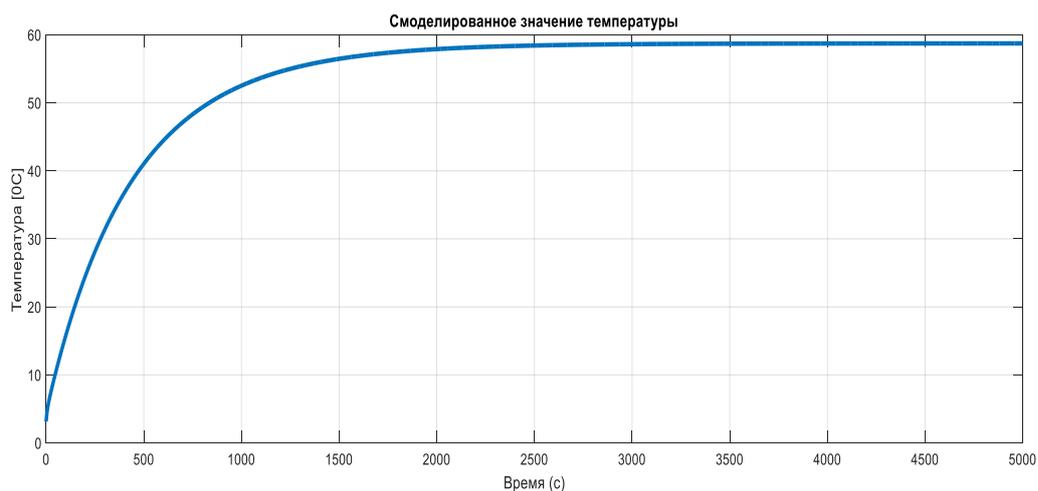


Рисунок 4.30. Смоделированное значение температуры

#### 4.6. Разработка численных моделей СЭДПМ и проведение численных исследований характеристик электропривода

В настоящее время при создании сложных технических объектов их энергетическая эффективность, экологичность и ресурсосбережение часто находятся на первом месте. Одним из способов сокращения потребления энергии является введение регулируемой электроприводной системы. Синхронный электрический двигатель с постоянными магнитами все чаще используется в таких управляемых электроприводах, поскольку он обладает высокой эффективностью, что связано с отсутствием потерь ротора, наилучшим соотношением максимальной полезной мощности к массе по сравнению с другими двигателями с аналогичной мощностью, а также высокие эксплуатационные характеристики из-за отсутствия скользящих контактов. Поэтому исследование энергоэффективного электропривода на основе СЭДПМ является актуальной задачей [143,144].

Необходимо сравнить асинхронные машины и синхронные в составе электропривода. Для этого будут использоваться модели в программе *Matlab (Simulink)*, а также будут рассчитаны потребляемая мощность и потери. Рассматривается режим с векторным управлением.

Блок для расчета потребляемой энергии и потерь в абсолютных единицах будет представлена в виде модели на основе следующих уравнений:

1) Механическая мощность на валу двигателя:

$$P_M = \omega \cdot M, \quad (4.17)$$

где  $M$  – момент на валу электродвигателя;

$\omega$  – угловая скорость электродвигателя.

2) Общая потребляемая мощность от сети:

$$P_s = \frac{3}{2}(U_x I_x + U_y I_y), \quad (4.18)$$

где  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $U_x$ ,  $U_y$  – проекции векторов напряжения тока и статора во вращающейся системе координат.

3) Общие потери от баланса мощности:

$$P_d = P_s - P_M. \quad (4.19)$$

4) Энергия, потребляемая из сети:

$$W_s = \int_0^T P_s dt, \quad (4.20)$$

где  $T$  – время производственного цикла.

5) Эффективность цикла (КПД) как отношение механической энергии к энергии, потребляемой из сети за цикл работы:

$$\eta = \left( \int_0^T P_M dt \right) / \left( \int_0^T P_s dt \right). \quad (4.21)$$

Данные уравнения представлены в виде модели *Simulink*, которая позволяет получить необходимые значения (рисунок 4.31).

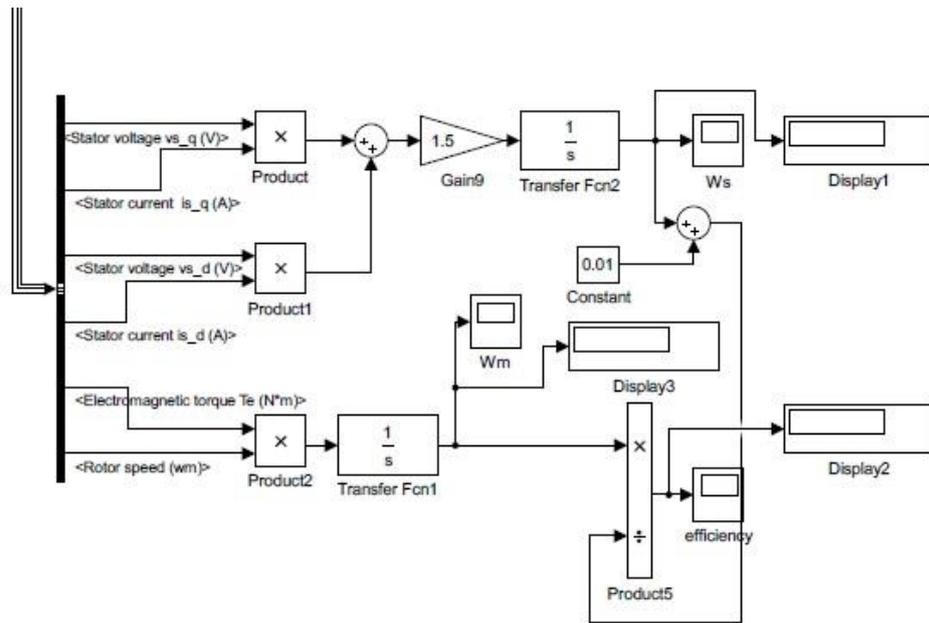


Рисунок 4.31. Блок для расчета мощности и потерь

На рисунке 4.32. показана модель векторного управления СЭДПМ, определяющая мощность, потребляемую из сети, и потери в двигателе. Для асинхронного двигателя будет использоваться аналогичная модель с определенными изменениями.

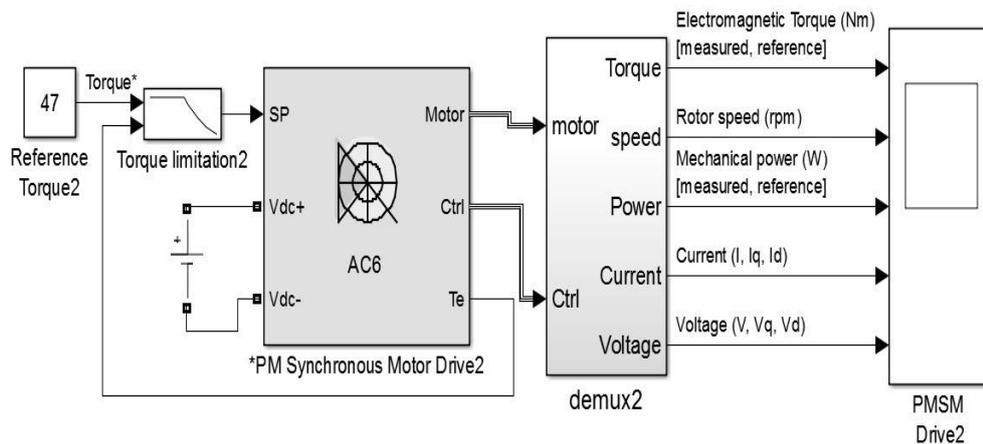


Рисунок 4.32. Модель векторного управления СЭДПМ

Используя приведенные выше модели, выполнены вычисления для асинхронных и синхронных двигателей (таблица 4.5). При той же мощности,

потребляемой из сети, мы получаем, что полезная мощность синхронного двигателя больше на 54%. Таким образом, потеря в асинхронном режиме больше на тот же процент.

Таблица 4.5. Сравнение электродвигателей при векторном управлении

Двигатель	Асинхронный	Синхронный
$W_s$	1440	1472
$W_m$	464,1	990,5
$P_d$	1008	481,5

Как видно из приведенного выше примера, использование расчетного блока энергопотребления позволяет получить достаточно полные данные для технико-экономического обоснования внедрения новой электроприводной системы. В то же время для оценки потребления электроэнергии необходимо построить модели сравниваемых электроприводов. Применение разработанного блока упрощает процедуру расчета потребления энергии, так как не требует дополнительных затрат.

В режиме векторное управление синхронной машиной оказалось более энергоэффективным, чем асинхронным. И с точки зрения оптимизации затрат в нефтяной промышленности использование синхронных машин является многообещающим. Однако стоит учитывать, что синхронные машины стоят дороже [145].

#### 4.7. Использование СЭДПМ в качестве компенсатора реактивной мощности

Решению проблемы энергосбережения способствует применение синхронных двигателей (СД), создающих в питающей сети реактивные токи, опережающие по фазе напряжение. В итоге сеть разгружается от реактивной (индуктивной) составляющей тока, повышается коэффициент мощности на данном участке сети, что ведет к уменьшению тока в этой сети и, как следствие, к энергосбережению [107].

Практически во всей литературе [108] говорится о том, что достаточно мощные СД (250 кВт и выше) выгодно использовать в качестве компенсирующего устройства, если на предприятии они уже установлены из технологических соображений. Доказывается целесообразность использования СД для КРМ и рассчитана экономическая выгода, которую получает потребитель.

Проанализируем систему электроснабжения куста из шести уравновешенных станков-качалок, с приводом от синхронных двигателей с постоянными магнитами.

Распределительная сеть с шестью уравновешенными приводами СДРВ станков-качалок.

Параметры СЭДПМ:  $P_{ад} = 22$  кВт;  $U_{л} = 380$  В;  $\eta_{АД} = 93,0$  %;  $\cos\varphi = 1$ .

По этой схеме коэффициент мощности СЭДПМ максимален ( $\cos\varphi = 1$ ), КПД СЭДПМ максимален  $\eta > 92$  %.

Характер нагрузки приводов станков-качалок переменный, двигатель периодически работает в номинальном режиме и, практически, на холостом ходе. Зададим переменную нагрузку станка-качалки в виде синусоиды, амплитудное значение которой равно 22 кВт.

Рассмотрим самый тяжелый с энергетической точки зрения случай, когда все шесть приводов работают синхронно и синфазно. В этом случае все нагрузки синхронно и синфазно суммируются, нагружая распределительную сеть по максимальным значениям.

Длина линии от нагрузки до трансформаторной подстанции  $L = 500$  м.

Активное сопротивление фазы линии  $R_{л} = 0,094$  Ом. Индуктивное сопротивление фазы линии  $X_{л} = 0,15$  Ом.

КПД синхронного двигателя зависит от величины нагрузки двигателя. Коэффициент мощности в СЭДПМ в зависимости от величины нагрузки и равен единице.

Временные зависимости потерь в двигателях СЭДПМ и в распределительных сетях имеют далеко не гармонический характер. Суммарные потери в функции времени рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{сис}(t) = \Delta P_{сет}(t) + \Delta P_{дв}(t) = (P_{дв} / \eta_{дв})^2 \cdot (R_{л} / U_{л}^2) + P_{дв} \times (1 - \eta_{дв}). \quad (4.22)$$

Среднее значение потерь активной мощности системы электроснабжения куста с шестью станками-качалками с приводом СЭДПМ составляет  $\Delta P_{ср} = 13,6$  кВт. Потери энергии в год  $\Delta W = \Delta P_{ср} \cdot 8760 = 119136$  кВт в час. Потери за год на один двигатель  $\Delta W_{дв} = 19856$  кВт·час. КПД системы  $\eta_{сис} = 90,65$  %.

Потери напряжения в воздушных линиях.

Потери напряжения в распределительной линии системы определяются только активной мощностью нагрузки, так как реактивная мощность в линии равна нулю.

$$U_{П}(t) = \frac{P_{дв}(t) \cdot R_{л}}{\sqrt{3}U_{л}}. \quad (4.23)$$

Распределительная сеть с синхронными приводами станков-качалок имеет отклонения напряжения в пределах допустимых значений. При этом нет необходимости применять компенсирующие устройства (КРМ), есть возможность уменьшить сечение проводов, снизить мощность понижающих трансформаторов. Вся энергосистема будет работать существенно устойчивее. В таблице 4.6 приведена экономическая оценка эффективности применения СЭДПМ по сравнению с применением асинхронных двигателей в уравновешенных станках-качалках в составе: шесть приводов качалок, мощность каждого двигателя  $P = 22$  кВт, длина распределительной линии  $L = 500$  м.

Таблица 4.6 – Экономическая оценка эффективности СЭДПМ

Тип двигателей в приводах	Потери энергии в год, час·кВт	Стоимость сум. потерь энергии / на один двигатель (руб.). Тариф (3 руб/кВт·час).	КПД системы в целом, %.
Асинхронный привод (6 АД)	197 976	593 928 / 98 988	85,38
3 АД и 3 СЭДПМ в режиме компенсации РМ	148 920	446 760 / 74 460	88,59
6 СЭДПМ	119 136	357 408 / 59 568	90,65

За счет регулирования коэффициента мощности СЭДПМ, высокого КПД СЭДПМ, снижения потерь в распределительной сети, растет КПД всей распределительной системы (на 5,27 %) по сравнению с применением асинхронных двигателей. Эффективность на один двигатель в год составляет 39 420 руб. (стоимость одного СЭДПМ, таблица 4.6). Срок окупаемости мероприятия по замене асинхронных двигателей на СЭДПМ равен одному году.

Таким образом, в результате анализа определено:

1. Использование СЭДПМ в качестве КРМ целесообразно, когда снижение активных потерь от перетока РМ превышает возникающие дополнительные активные потери в СЭДПМ при выработке РМ, что возможно только при низких коэффициентах мощности нагрузки.

2. Эффективность использования СЭДПМ в качестве ИРМ повышается при снижении коэффициента мощности нагрузки.

3. Выгодней использовать СЭДПМ в качестве КРМ на напряжении 0,4 кВ нежели на 10 кВ.

#### 4.8. Система управления базами данных и оптимизации параметров

Расчет параметров линейной электрической машины осуществляется различными программными средствами (глава 1). Для эффективной совместной работы, обмена данными между *Matlab/Simulink*, *CATIA V5* и *COMSOL Multiphysics* и оптимизации параметров машины разработана система управления базами данных на базе *Microsoft Excel*.

Система управления базами данных и оптимизации позволяет производить следующие действия:

- ввод параметров для численного расчета и имитационного моделирования систем автономной энергоустановки. Параметры могут вводиться как постоянные величины, так и варьируемые значения с заданным диапазоном изменения. При

этом значительно упрощается ввод параметров через единое рабочее пространство таблиц *Excel*.

- управление программными средствами через систему управления базами данных на основе специально написанной программы упрощает проведение численных расчетов и имитационное моделирование, так как дает возможность не вводить управляющие команды непосредственно в подключенные программные средства.

- все данные полученные при численных расчетах и имитационном моделировании сохраняются в базе данных, что дает возможность в случае ошибки сохранить данные и провести диагностику системы и повысить надежность системы.

- графическая визуализация результатов расчета позволяет значительно сократить время выбора оптимальных или рациональных параметров.

- возможность автоматического построения трехмерной модели исследуемого объекта по окончании расчетов.

- гибкость системы управления позволяет вводить дополнительные параметры для проведения более полных расчетов.

При разработке численного моделирования синхронной ЭМВПД с ПМ упор ставился на глубокой параметризации геометрии индуктора и статора для проработки большого количества возможных конфигурации геометрии электрической машины. Это позволяет оценить влияние отдельных геометрических параметров на энергоэффективность синхронной ЭМВПД с ПМ и модернизировать модель машины к новым требованиям.

В численной модели, контроль и анализ программного обеспечения осуществляется на основе единой базы данных, что позволяет совместить моделирование тепловых, электромеханических и электромагнитных процессов.

Данный метод позволяет удобно вводить заданные параметры в различные компоненты вычислительного комплекса без необходимости вводить численный код непосредственно в программу.

Программы зарегистрированы в Роспатенте [102-106].

## 4.9. Выводы по главе 4

1. Разработана система моделирования термодинамических процессов в свободнопоршневом двигателе внутреннего сгорания, позволяющая определить положение и скорость поршневой группы и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ.

2. Разработана численная модель синхронной ЭМВПД с ПМ в специализированном программном обеспечении, позволяющая рассчитать электромеханические процессы и электромагнитное поле в синхронной ЭМВПД с ПМ.

3. Предложена имитационная модель УВ с целью расчета рациональных параметров УВ с активной коррекцией коэффициента мощности синхронной ЭМВПД с ПМ для обеспечения максимально возможной энергетической эффективности с учетом заданных условий.

4. Предложена электрическая схема замещения тепловой цепи синхронной ЭМВПД с ПМ для проведения тепловых расчетов.

5. Обосновано использование СЭДПМ в качестве КРМ при снижении коэффициента мощности нагрузки на напряжении 0,4 кВ .

6. Для расчета и оптимизации параметров синхронной ЭМВПД с ПМ программными средствами *Matlab/Simulink*, *CATIA V5* и *COMSOL Multiphysics* разработана система управления базами данных на базе *Microsoft Excel* с целью повышения эффективности и точности моделирования.

## 5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЭМПМ В СОСТАВЕ ГЕНЕРИРУЮЩИХ И ПРИВОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ

### 5.1. Оптимизация конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ

#### 5.1.1. Оптимизация конструктивных параметров электрической машины по критерию максимума электромагнитной силы

КПД линейного генератора рассчитываются по формуле (5.1).

$$\eta = \frac{P_{\text{эл}}}{P_{\text{мех}}}, \quad (5.1)$$

где  $P_{\text{эл}}$  — выходная электрическая мощность синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме генератора, Вт;

$P_{\text{мех}}$  — механическая мощность, передаваемая от приводного механизма.

Представим выражение (5.1) в следующем виде

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}} - P_{\text{пот}}}{P_{\text{мех}}}, \quad (5.2)$$

где  $P_{\text{пот}}$  — мощность потерь синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме генератора, Вт.

После преобразования (5.2) получим

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{пот}}}{P_{\text{мех}}} \quad (5.3)$$

По аналогии с теорией вращающихся машин можно записать, что

$$F_{\text{мех}} = F_{\text{торм}} + F_{\text{элмагн}} + F_{\text{инерц}}, \quad (5.4)$$

где  $F_{\text{мех}}$  — сила, приложенная к штоку синхронной ЭМВПД с ПМ, Н;

$F_{\text{торм}}$  – тормозная сила, создаваемая потерями на трение, магнитными и добавочными потерями, Н;

$F_{\text{элмагн}}$  – электромагнитная сила, развиваемая индуктором, Н;

$F_{\text{инерц}}$  – сила инерции подвижных частей синхронной ЭМВПД с ПМ, Н.

Подставив в (5.3) уравнение (5.4) получим

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{пот}}}{v(F_{\text{торм}} + F_{\text{элмагн}} + F_{\text{инерц}})} \quad (5.5)$$

где  $v$  – скорость движения индуктора, м/с.

Проанализировав выражение (5.5), приходим к выводу, что для повышения КПД синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме генератора необходимо максимизировать величину электромагнитной силы  $F_{\text{элмагн}}$ , тормозную силу необходимо уменьшать, так как мощность потерь находится также в числителе второго слагаемого выражения (5.5), то же относится к силе инерции  $F_{\text{инерц}}$  – повышенная масса подвижных частей синхронной ЭМВПД с ПМ (в том числе и индуктора) приводит к высоким механическим нагрузкам и значительным вибрациям системы.

Следующие параметры используются для расчета максимальной намагничивающей силы в качестве постоянных величин (таблица 5.1).

Таблица 5.1. Постоянные параметры

Параметр	Значение
Полюсное деление	30 мм
Радиус воздушного зазора	100 мм
Количество полюсов статора	9
Количество полюсов индуктора	6
Плотность тока	7, 6 А/мм <sup>2</sup>

На первом этапе проводится вариация параметров синхронной ЭМВПД с ПМ с определенным шагом, представленных в таблице 5.2. При этом варьируется

один параметр, остальные фиксируются как постоянные величины. Цель оптимизации добиться максимальной электромагнитной силы в зависимости от варьируемых параметров, на основании теоретических выкладок полученных во второй главе.

Таблица 5.2. Варьируемые параметры

Параметр	Начальное значение (мм)	Шаг варьирования(мм)	Область варьирования (мм)	
			0.25	1.5
Воздушный зазор	0.75	0.25	0.25	1.5
Ширина зубца статора	5	1	3	9
Высота паза для обмотки	30	5	15	40
Ширина ярма статора	10	2	2	10
Ширина ярма индуктора	7	2	2	10
Высота магнита	5	1	1	5

При увеличении воздушного зазора наблюдается постоянное снижение намагничивающей силы. Увеличение воздушного зазора вызывает рост магнитного сопротивления, что ведет к снижению электромагнитной силы (рисунок 5.1).

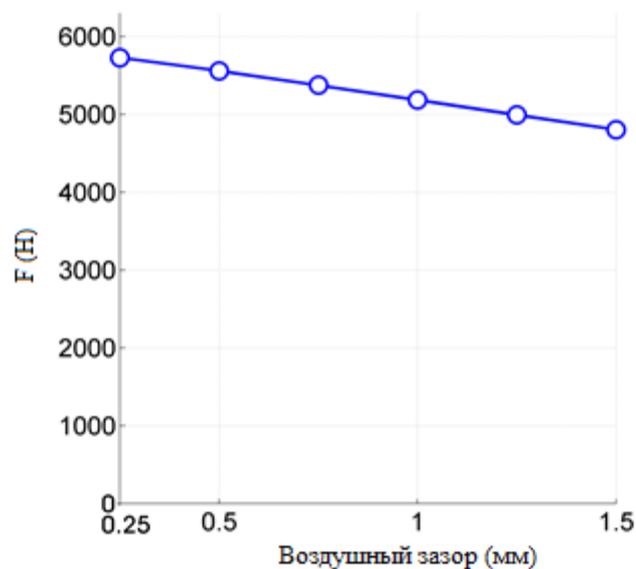


Рисунок 5.1. Зависимость силы от величины воздушного зазора

Варьирование ширины зубца статора дает максимальную силу при 4 мм (рисунок 5.2). При условии постоянной плотности тока при варьировании величины ширины зубца наблюдаются два эффекта:

1. Так как полюсное деление и длина машины являются постоянными величинами, увеличение ширины зубца приводит к увеличению площади контакта с магнитным потоком, что снижает насыщение материала зубца статора.

2. При постоянной плотности тока увеличение ширины зубца приводит к снижению линейной токовой нагрузки, так как уменьшается ширина и соответственно площадь обмоток.

При ширине 4 мм сумма этих двух эффектов дают максимальную электромагнитную силу.

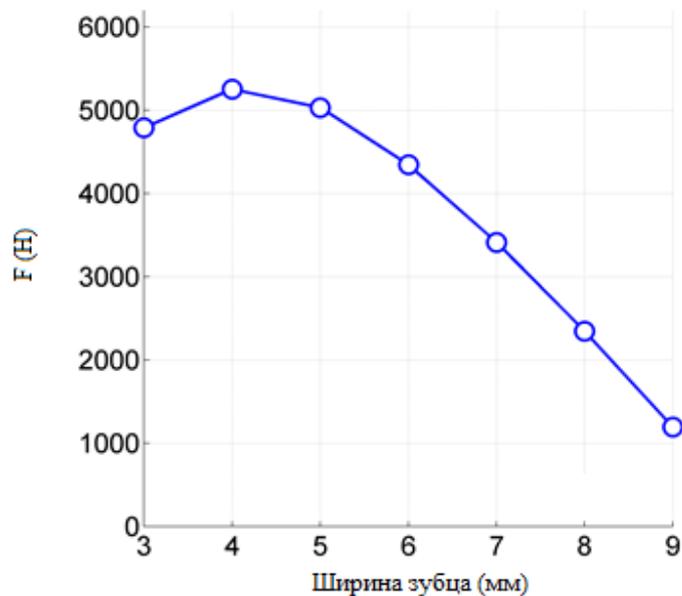


Рисунок 5.2. Зависимость силы от величины ширины зубца

При постоянной плотности тока увеличение высоты паза обмотки статора приводит к увеличению силы намагничивания. После высоты паза 32,5 мм начинается процесс насыщения материала статора, что ведет к уменьшению нарастания силы (рисунок 5.3).

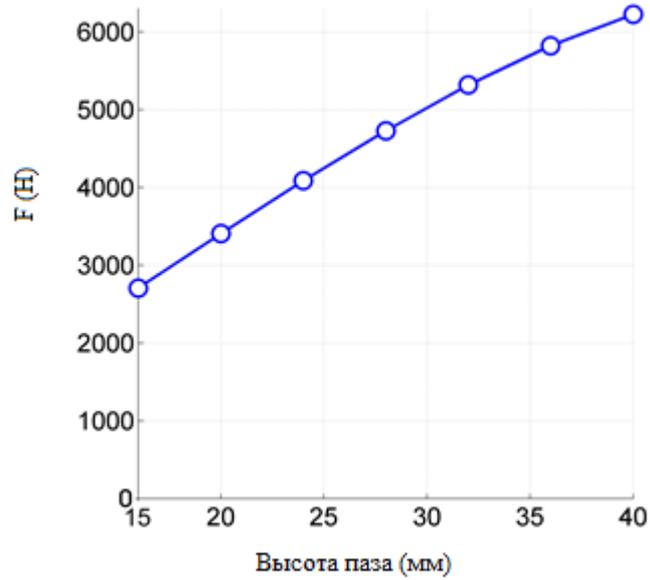


Рисунок 5.3. Зависимость силы от величины высоты паза обмотки статора  
Изменение размера ярма статора начиная со значения 7 мм не приводит дальнейшего увеличения силы тока (рисунок 5.4 ).

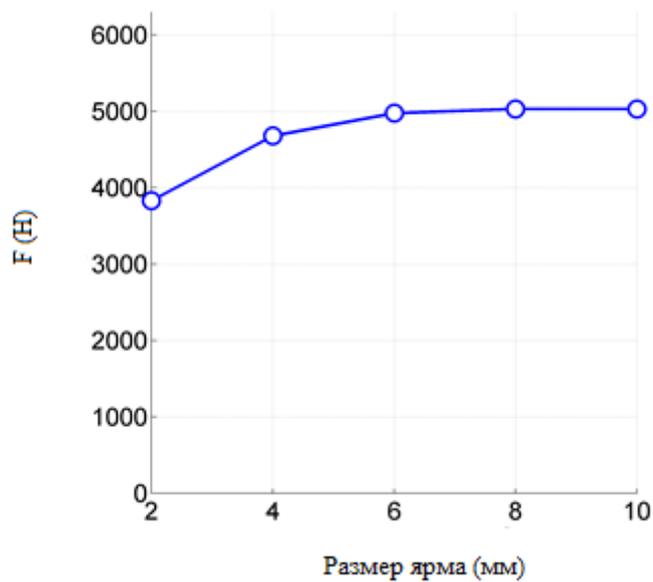


Рисунок 5.4. Зависимость силы от размера ярма

Увеличение размера ярма статора приводит к увеличению площади, через который проходит магнитный поток, что приводит к уменьшению магнитного сопротивления. Однако при этом силовые линии магнитного поля увеличивают

свою длину, что компенсируют в определенный момент снижение магнитного сопротивления.

Данный эффект приводит к прекращению возрастания силы при дальнейшем увеличении размера ярма статора.

Изменение высоты ярма индуктора, представленного на рисунке 5.5, показывает, что начиная с высоты 6 мм наблюдается незначительное повышение электромагнитной силы. Причина аналогична процессу, рассмотренного в случае с высотой ярма статора.

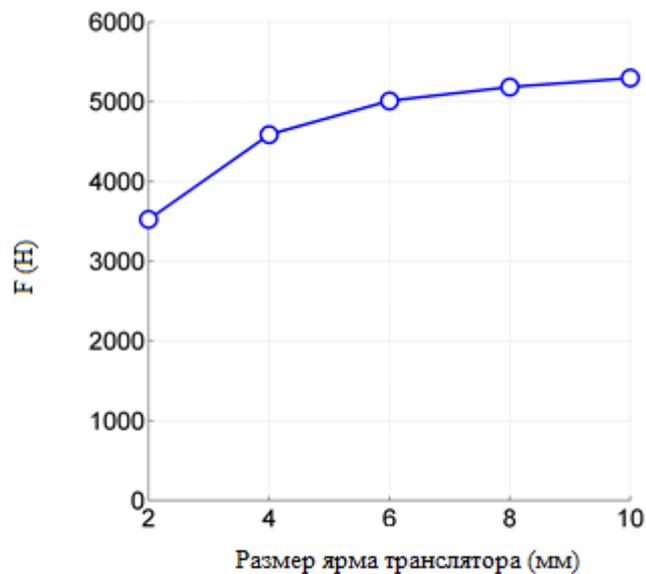


Рисунок 5.5 Зависимость силы от размера ярма индуктора

Увеличение высоты магнита как следствие приводит к увеличению силы намагничивания. Начиная с высоты магнита 2 мм снижение интенсивности нарастания электромагнитной силы (рисунок 5.6).

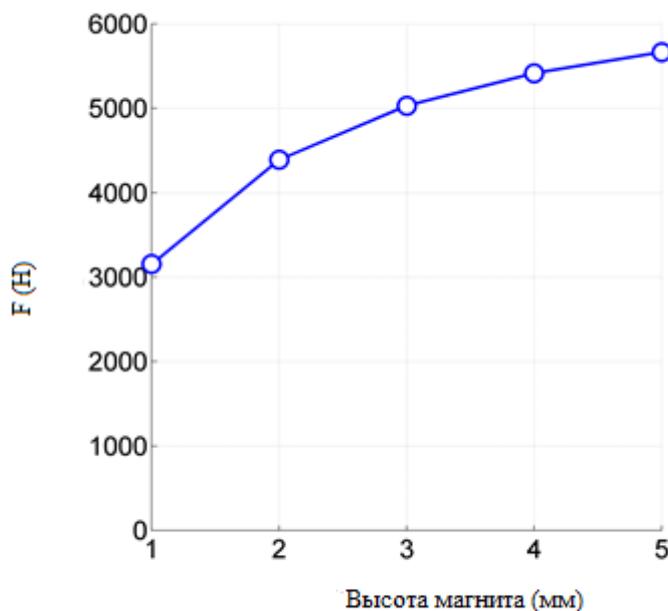


Рисунок 5.6. Зависимость силы от высоты магнита

Если площадь магнита остается постоянной, только высота магнита влияет на величину магнитного потока генерируемого постоянными магнитами. С увеличением высоты магнита наступает эффект насыщения магнитной цепи, что ослабевает дальнейшее увеличение намагничивающей силы.

Результаты оптимизации конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ занесены в таблицу 5.3. Эти значения дают максимальную намагничивающую силу в генераторном режиме [105].

Таблица 5.3. Результаты оптимизации конструктивных параметров

Параметр	Значение (мм)
Воздушный зазор	0,75
Ширина паза	5
Ширина зубца статора	5
Высота паза	30
Высота ярма статора	12
Высота ярма индуктора	7
Высота магнита	3

На основе рассчитанных конструктивных параметров получены значения электромагнитных сил  $F(x)$ , которые представлены на рисунке 5.7.

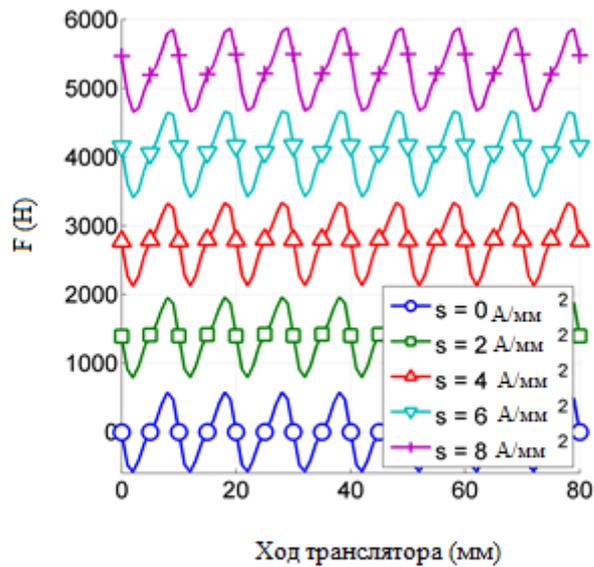


Рисунок 5.7. Зависимость силы от плотности тока в обмотках статора. Величина хода индуктора принята 80 мм. Величины плотности тока в обмотках приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4

Параметр	Значение $\text{А/мм}^2$	Среднее значение силы (Н)
Плотность тока	0	0
	2	1391
	4	2756
	6	4061
	8	5263

5.1.2. Методика оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимальной генерируемой мощности

Целью оптимизации конструкции синхронной ЭМВПД с ПМ является получение максимальной электрической мощности генератора  $P_e$ .

Движение магнитов на индукторе подчиняется закономерности

$$x = x_m \sin \omega t, \quad (5.6)$$

где  $x_m$  – амплитуда движения магнитов;

$\omega$  - круговая частота перемещения магнитов.

ЭДС движения  $E_v$  описывается выражением [8,125,131]

$$E_v = C_{MW} \frac{dx}{dt} = C_{mw} x_m \omega \cos \omega t, \quad (5.7)$$

где  $C_{MW}$  – коэффициент электромагнитной силы.

$$C_{MW} = k_{MW} \frac{2\mu_0 l F_M w}{\pi k_\mu a}, \quad (5.8)$$

где  $k_{MW}$  – коэффициент линеаризации электромагнитной силы;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума  $4\pi \cdot 10^{-7}$ ;

$l$  – длина окружности диаметра магнита  $D_M$ ;

$F_M$  – магнитодвижущая сила магнита;

$w$  - число витков обмотки;

$k_\mu$  - коэффициент насыщения 1,05;

$a$  – параметр, зависящий от длины магнита и воздушных зазоров.

Согласно [8] максимальная электромагнитная мощность, которая может быть получена от генератора равна:

$$P_e = \frac{1}{2} E_{vm} i_m \cos \varphi, \quad (5.9)$$

Учитывая выражение (5.7), получим:

$$P_e = \frac{1}{2} C_{MW} x_m \omega \cos \omega t i_m \cos \varphi, \quad (5.10)$$

Проанализируем данное выражение. Повышение амплитуды колебаний  $x_m$  и частоты перемещения индуктора  $\omega$  являются тривиальными решениями и

ограничиваются техническим заданием и прочностными характеристиками машины. Ток генератора  $i_m$  ограничивается сечением обмотки статора и условиями охлаждения электрической машины. При работе на активную нагрузку можно принять коэффициент мощности  $\cos\varphi \approx 0,9$ .

Коэффициент электромагнитной силы  $C_{MW}$  согласно выражению (5.8) включает в себя конструктивные размеры статора и индуктора электрической машины, а также магнитодвижущую силу магнитов. Данный коэффициент в выражении (5.10) принимается за целевую функцию, который необходимо максимизировать с учетом ограничений на параметры.

Расширим целевую функцию с учетом уравнений (5.11 – 5.16). Данная функция (5.17) рассчитывается в блоке оптимизации приложения *Optimization Toolbox*.

$$l = \pi D_M, \quad (5.11)$$

где  $l$  – длина окружности диаметра магнита.

$$F_M = H_c L_M, \quad (5.12)$$

где  $H_c$  – коэрцитивная сила магнита, Н/м;

$L_M$  – высота магнита.

$$w = \frac{k_{cu} \cdot h \cdot b}{S_M}, \quad (5.13)$$

где  $k_{cu}$  – коэффициент заполнения паза статора;

$h$  – высота паза статора;

$b$  – ширина паза статора;

$S_M$  – сечение проводника в статоре.

$$k_{MW} = 1 - \alpha \cdot \ln \left[ 1 + \frac{1}{2\alpha} \right], \quad (5.14)$$

$$\alpha = \frac{a}{b_m}, \quad (5.15)$$

где  $\alpha$  – относительный параметр;

$b_m$  – ширина магнита.

$$a = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\mu_0}{\mu_r} L_M + 2\delta \right], \quad (5.16)$$

где  $a$  – условная толщина магнитов и зазоров, разделенная на  $\pi$ ;

$\delta$  – воздушный зазор;

$\mu_r$  – магнитная проницаемость магнита.

$$C_{MW} = \left( 1 - \alpha * \ln \left[ 1 + \frac{1}{2\alpha} \right] \right) \frac{2\mu_0\pi D_M H_c L_{MW}}{\pi k_\mu \alpha b_m} \rightarrow \max \quad (5.17)$$

В таблице 5.5 обозначены параметры целевой функции и их пределы варьирования с учетом конструкции синхронной ЭМВПД с ПМ, а также представлены наименования переменных в программе оптимизации.

Таблица 5.5. Параметры, входящие в целевую функцию

Наименование переменной	Обозначение в приложении OptimizationToolbox	Пределы
$C_{MW}$	Максимизируемая величина	
$\mu_0$	$4\pi * 10^{-7}$	
$\mu_r$	$1,41 * 10^{-7}$	
$D_M$	$X(1)$	$(195-205) * 10^{-3}$ м
$L_M$	$X(2)$	$(3-6) * 10^{-3}$ м
$h_{окна}$	$X(3)$	$(25-45) * 10^{-3}$ м
$b_{окна}$	$X(4)$	$(5-10) * 10^{-3}$ м
$k_{MW}$	$X(5)$	0.6-0.9

Продолжение таблицы 5.5

Наименование переменной	Обозначение в приложении OptimizationToolbox	Пределы
$\alpha$	$X(6)$	0.045-0.05
a	$X(7)$	$(1.2-1.4)*10^{-3}$

Задача оптимизации целевой функции решена в приложении *Optimization Toolbox* программы *Matlab*. На языке *Matlab* написана программа рассчитывающая параметры целевой функции с помощью генетического алгоритма [102,103,133].

Выбор генетических алгоритмов основан на следующих доводах: простая и достаточно эффективная схема вычислений, возможность применения при непрерывном и дискретном характере переменных, учет ограничений, нет требований к непрерывности, достижение глобального экстремума целевой функции. Генетический алгоритм может быть использован в сочетании с классическими методами.

Пакет оптимизации позволяет задать ещё одну функцию минимизации, которая используется после окончания работы алгоритма. В качестве дополнительной функции, которая позволяет уточнить значение целевой функции, выбрана встроенная в *Matlab* функция *fmincon* – для осуществления алгоритма с заданными ограничениями, основанного на методе последовательного квадратичного программирования [94].

На рисунке 5.8 представлена график изменения целевой функции. Отрицательное значение целевой функции вызвано тем, что при максимизации целевой функции в программе *Matlab* ее необходимо взять со знаком минус. Как видно из графика, оптимум достигается уже на половине популяций (стандартное значение 100). Полученное значение  $C_{MW} = 17,79$  Н/А вводится в модель трехфазной синхронной ЭМВПД с ПМ .

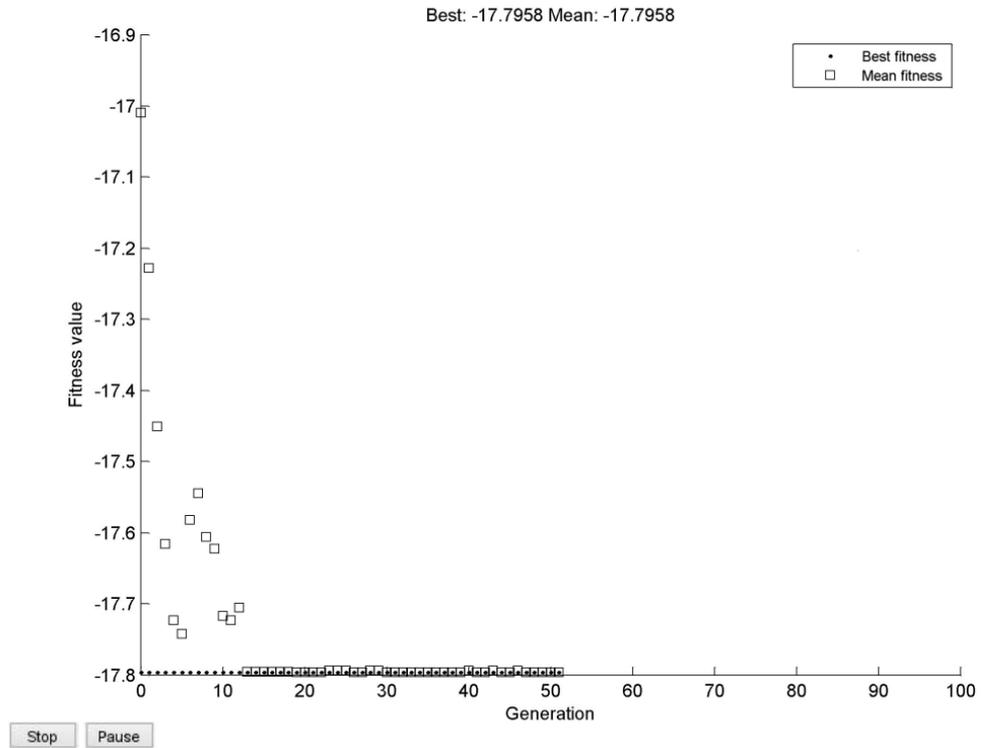


Рисунок 5.8. График изменения значение целевой функции (*fitness value*) в зависимости от количества популяций (*Generation*)

Рассчитанные параметры на основе представленного метода оптимизации сведены в таблицу 5.6. Данные значения закладываются в 3D модели линейной электрической машины в САПР *CATIAV5* для последующего кинематического и прочностного расчета.

Таблица 5.6. Рассчитанные параметры целевой функции

Наименование переменной	Обозначение в приложении Optimization Toolbox	Рассчитанные значения
$C_{MW}$	Максимизируемая величина	17,79
$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	
$\mu_r$	$1,41 \cdot 10^{-7}$	
$D_M$	$X(1)$	$197 \cdot 10^{-3}$ м
$L_M$	$X(2)$	$3 \cdot 10^{-3}$ м
$h$	$X(3)$	$30 \cdot 10^{-3}$ м

Продолжение таблицы 5.6.

Наименование переменной	Обозначение в приложении Optimization Toolbox	Рассчитанные значения
$b$	$X(4)$	$5 \cdot 10^{-3}$ м
$k_{MW}$	$X(5)$	0,88
$\alpha$	$X(6)$	0.045
a	$X(7)$	$1.2 \cdot 10^{-3}$

Как видно из результатов оптимизации по максимуму генерируемой мощности конструктивные параметры синхронной ЭМВПД с ПМ коррелируют с методикой оптимизации по критерию максимума электромагнитной силы.

Сформирована и подана заявка на Программу для ЭВМ: «Программа оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия» [102].

Программа позволяет определить оптимальные конструктивные размеры статора и индуктора ЭМВПД с целью получения максимальной электрической мощности.

Программа написана на языке *Matlab*, позволяющая рассчитать конструктивные размеры ЭМВПД на основе генетического алгоритма.

Разработан блок оптимизации в приложении *Optimization Toolbox* для определения конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ.

Разработанная методика позволяет на стадии проектирования определить рациональные параметры синхронной ЭМВПД с ПМ с последующей корректировкой при изготовлении экспериментального образца [139].

## 5.2. Оптимизация конструктивных параметров СЭДПМ

Проектирование СЭДПМ представляет собой сложную задачу. СЭДПМ обладает сложной структурой и большим количеством параметров.

При проектировании СЭДПМ требуется, как правило, минимизировать объем или массу и максимизировать вращающий момент. Поэтому требуется решать задачу многокритериальной оптимизации (МКО).

### **Постановка задачи оптимизации параметров и выбор метода оптимизации**

Конструкция машины может быть описана вектором параметров  $\vec{x}$  (размеры, безразмерные параметры, типы используемых материалов и т.д.). Конструкция учитывает множество  $m$  ограничений, которые могут включать в себя технические стандарты, электромагнитные, тепловые, механические или производственные ограничения.

Цель оптимизации заключается в максимизации выбранных целевых функций  $\vec{f}(\vec{x})$ , и обеспечении технических показателей в пределах допустимых областей.

Общая задача многокритериальной оптимизации формулируется следующим образом: найти вектор параметров

$$\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in S$$

с учетом  $m$  функций ограничения

$$g_j(\vec{x}) \leq 0, j = 1 \dots m,$$

чтобы максимизировать вектор критериев (целевых функций)

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_p(\vec{x})] \rightarrow \max.$$

В задачах многокритериальной оптимизации обычно критерии оптимизации обычно критерии оптимизации  $f_k$  противоречивы, и оптимизация по каждому из них отдельно может приводить к различным значениям оптимизируемых параметров. Решение задачи многокритериальной оптимизации в общем случае, не являясь оптимальным ни для одного из критериев оказывается компромиссным для вектора  $\vec{f}(\vec{x})$  в целом.

Решение задачи многокритериальной оптимизации (компромиссное решение)  $\vec{x}^* \in S$  называют оптимальным по Парето решением, если не существует  $\vec{x} \in S$  такого, что  $f_k(\vec{x}^*) \leq f_k(\vec{x})$  для  $k=1 \dots p$  и  $f_k(\vec{x}^*) < f_k(\vec{x})$  хотя бы

для одного  $k$  [113]. Множество всех оптимальных по Парето решений называется множеством Парето или Парето-фронт. Оптимальность по Парето векторного критерия  $\vec{f}(\vec{x})$  означает, что нельзя дальше уменьшать значение одного из критериев не увеличивая значения хотя бы одного из остальных.

В задаче МКО проектирования СЭДПМ некоторые параметры дискретны (число витков, число полюсов, и т.д), функции ограничения и целевые функции не всегда можно представить аналитически; значение целевых функций и функций ограничения не существует на всех точках пространства поиска. Поэтому невозможно определить производную целевой функции.

Как правило, функции ограничения нелинейные, что вызывает трудности при определении начальной точки расчета и последующих, которые удовлетворяли функциям ограничения.

Вследствие особенностей задачи оптимизации СЭДПМ эволюционные алгоритм представляет собой более привлекательный подход.

Генетический алгоритм (ГА) один из самых распространённых в группе эволюционных алгоритмов [109]. ГА позволяет использовать нелинейные, дискретные целевые функции.

Разработано программное обеспечение для автоматизации проектирования СЭДПМ, в котором оптимизация параметров СЭДПМ осуществляется с помощью генетического алгоритма. Для проектирования СЭДПМ выбраны два типа моделей двигателя: аналитическая модель, полученная в третьей главе, и модель с использованием МКЭ.

Аналитическая модель используется для предварительного анализа СЭДПМ, а модель МКЭ позволяет рассчитать точные параметры двигателя. Для повышения точности используется модель МКЭ с помощью программы *Elcut*.

В результате процесса оптимизации получается аппроксимация множества Парето, которая изображается в виде таблицы и графика.

Осуществлено проектирование СЭДПМ на основе существующей модели синхронного двигателя 11ДВМ160: число пазов статора и их форма считаются

известными, а параметры ротора и обмоток статора рассчитываются путем оптимизации параметров с помощью генетического алгоритма.

При постановке задачи оптимизации параметров СЭДПМ, необходимо решить следующие задачи:

1. Определение оптимизируемых параметров;
2. Выбор функций ограничения и методов их обработки;
3. Выбор целевых функций.

### Оптимизируемые параметры

Оптимизируемыми параметрами, которые составляют вектор  $\vec{x}$ , являются геометрические размеры и другие величины, описывающие модель двигателя, такие как число витков, виды материалов, и т. д. Геометрия СЭДПМ представляет собой реальные числа, а другие – целые числа (число витков, число полюсов).

Оптимизируемые параметры представлены на рисунке 5.9 и таблице 5.7.

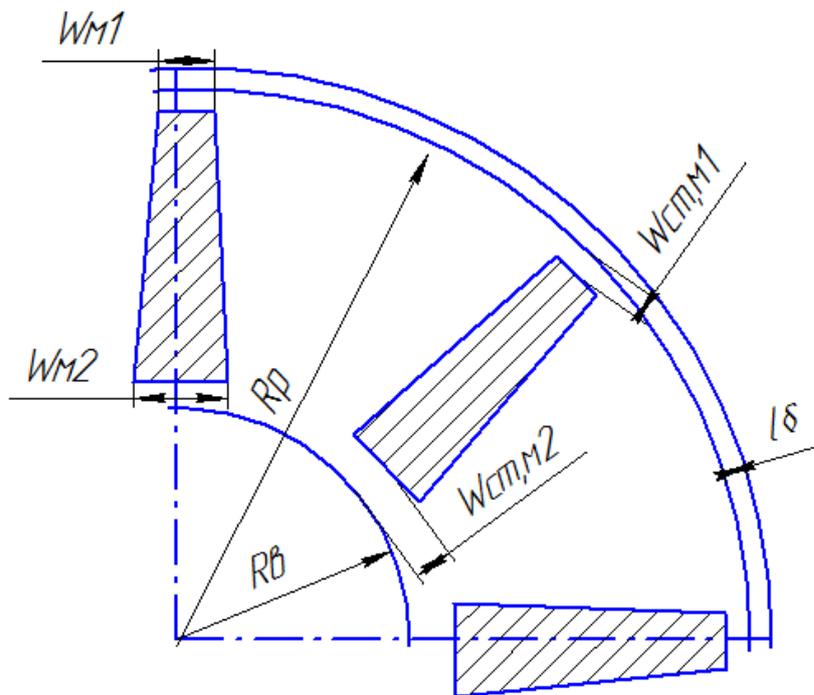


Рисунок 5.9. Оптимизируемые параметры ротора

Таблица 5.7. Оптимизируемые параметры

Обозначение	Описание
$R_p$	Радиус ротора
$w_{ст.м1}$	Ширина верхнего стального моста
$w_{ст.м2}$	Ширина нижнего стального моста
$w_{м1}$	Ширина магнита сверху
$w_{м2}$	Ширина магнита снизу
$R_B$	Радиус вала
$l_\delta$	Ширина воздушного зазора

### Целевые функции

Выбранные целевые функции:

— максимизация номинального момента  $M_H$

$$f_1 = M_H \rightarrow \max,$$

— минимизация массы магнита  $m_{ПМ}$  для уменьшения стоимости

$$f_2 = -m_{ПМ} \rightarrow \max.$$

### Функции ограничения

Функции ограничения, накладываемые технологическими требованиями и ограничениями на разработку двигателя. Один из методов учета ограничений типа неравенств (2) состоит в том, что составляется расширенный критерий вида

$$F_k(\vec{x}) = f_k(\vec{x}) - \sum_j^m \lambda_{jk} g_j(\vec{x})$$

Где  $\lambda_{jk}$  – коэффициент штрафа для целевой функции  $f_k(\vec{x})$ , если ограничение  $g_j(x) \leq 0$  нарушено  $j=1 \dots m; k=1 \dots p$ .

Этот метод позволяет преобразовать задачу с функциями ограничения в задачу без функции ограничения. Выбор коэффициентов штрафа определяется после нескольких итераций оптимизации.

Функции ограничения определяются следующими условиями:

- требуемый номинальный момент:  $M_m \geq M_{\text{треб}}$ , где  $M_m$  – максимальное возможное значение;  $M_{\text{треб}}$  – номинальный момент, необходимый для привода станка-качалки;

- условие обеспечения устойчивости к размагничиванию постоянных магнитов:  $I_m \leq I_{\text{м.р}}$ , где  $I_m$  – допустимое значение тока;  $I_{\text{м.р}}$  – предельное значение тока статора, при котором обеспечивается устойчивость к размагничиванию.

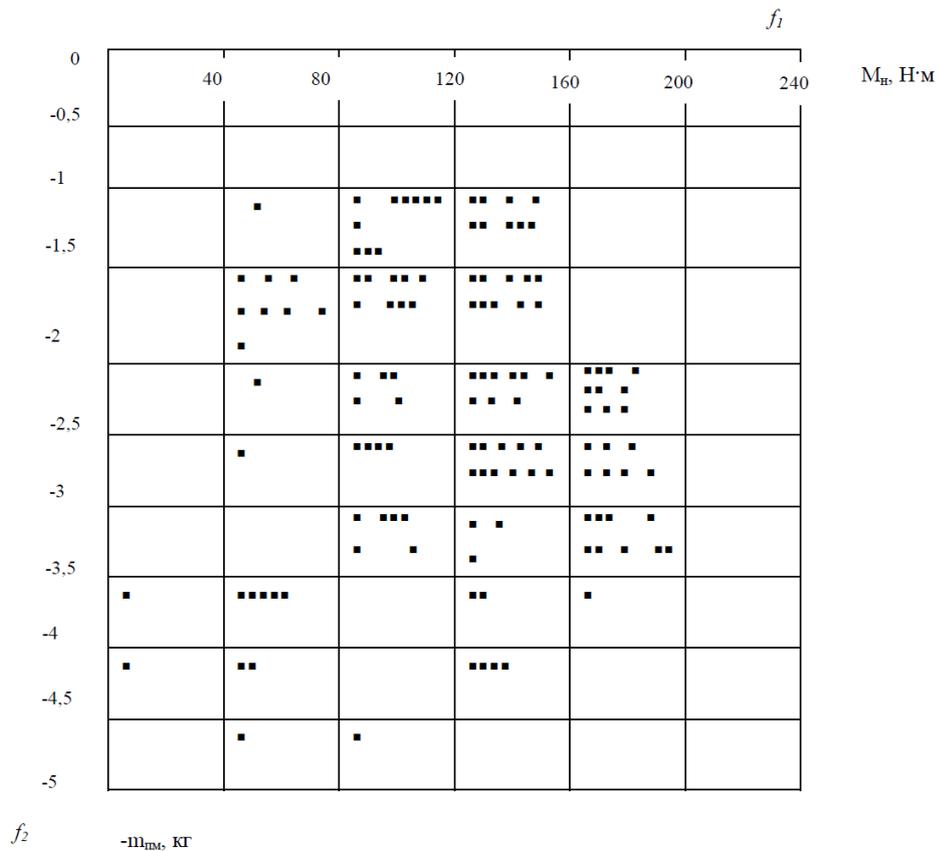


Рисунок 5.10. Визуализация возможных решений, оптимальных по Парето

В результате процесса оптимизации получены приблизительное множество оптимальных по Парето решений и выбранное решение, представленные на рисунке 5. 10. Полученные значения представлены в таблице 5.8

Таблица 5.8. Параметры ротора, полученные после оптимизации

Значение, мм	Описание
90	Радиус ротора
2	Ширина верхнего стального моста

Продолжение таблицы 5.8

Значение, мм	Описание
3	Ширина нижнего стального моста
8	Ширина магнита сверху
16	Ширина магнита снизу
32	Радиус вала
2	Ширина воздушного зазора



Рисунок 5.11. Опытный образец синхронного двигателя 11 ДВМ160

На рисунке 5.11 изображен опытный образец синхронного двигателя 11 ДВМ160 рассчитанный по предложенным методикам. Данный вариант рассматривался при проектировании станций управления для станков качалок нефти совместно с АО «ЧЭАЗ». Мощность двигателя составила 15 кВт в корпусе статора от асинхронного двигателя на 7,5 кВт. Полученный при испытаниях КПД синхронного двигателя составил 0,94, у асинхронного двигателя аналогичной мощности – 0,875.

### 5.3. Разработка метода топологической оптимизации электрической машины возвратно-поступательного действия

Проектирование электрической машины как эвристический процесс - не гарантирует нахождение лучшего решения. Необходимы методы дополняющие опыт и интуицию проектировщика для нахождения оптимального (рационального) решения. Предлагаемый метод позволяет перенести топологическую оптимизацию на электромагнитные процессы в синхронной ЭМВПД с ПМ для определения направления намагниченности и расположения постоянных магнитов с целью повышения КПД и надежности электрической машины при заданных массо-габаритных показателях.

В предлагаемой работе при проведении оптимизации на основе генетического алгоритма, стартовая конструкция узлов и деталей синхронной ЭМВПД с ПМ действия берется из результатов многокритериальной оптимизации, далее производится сегментация элементов автономной энергоустановки в вертикальном и горизонтальном направлениях (2D изображение). Учитывается симметрия конструкции для снижения объема вычислительных операций. Функциональный принцип генетических алгоритмов состоит в идентификации уникальным двоичным кодом каждого элемента автономной энергоустановки, в том числе и различных вариантов используемого материала (материалы постоянных магнитов, сорта стали и т.д.). Кластер из нескольких видов материала позволяет сформировать материал статора и обмотки, а также сформировать материал радиально или аксиально намагниченных магнитов с учетом влияния внешней среды (в том числе и агрессивной).

Предложен метод топологической оптимизации для оптимизации распределения материалов в линейной электрической машине с использованием генетического алгоритма (ГА). Кроме того, предложена концепция кластеризации материалов и процедура «очистки» материалов. Предыдущий метод был улучшен, чтобы рассмотреть использование более двух материалов, а именно: воздух, сталь, а также  $R, X$ -ориентированные магниты (радиальная и аксиальные

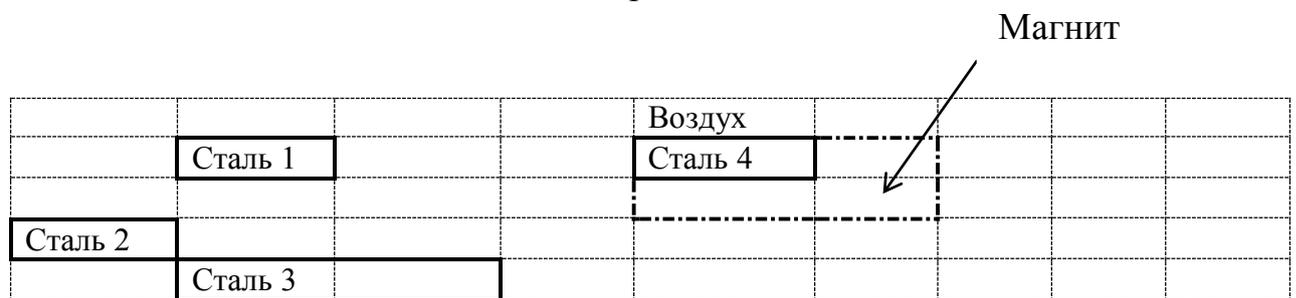
намагниченности). Кроме того, изначально предполагалось, что структура полученного индуктора будет из постоянных магнитов простой формы, чтобы снизить затраты на производство [110,111].

ГА - это алгоритм, который имитирует эволюцию живых существ и подходит для задач с большим объемом выборки. В предлагаемом способе область проектирования разделяется на сеть ячеек конечных элементов, а материалы разделяются на несколько элементов - например, как связаны гены в хромосоме. Например, если мы рассмотрим три типа материалов, воздух, сталь и магнит, которые обозначены 0, 1 и 2 соответственно, то по аналогии хромосома состоит из некоторых генов, как показано на рисунке 5.11. Два родителя выбираются случайным образом, и некоторые гены выбираются для обмена посредством однородного кроссовера (в биологии кроссинговер молекула, возникшая в результате обмена генами) в результате создаются два новых ребенка, как показано на рисунке 5.12. Дети наследуют лучшие характеристики родителей, затем процесс повторяется.

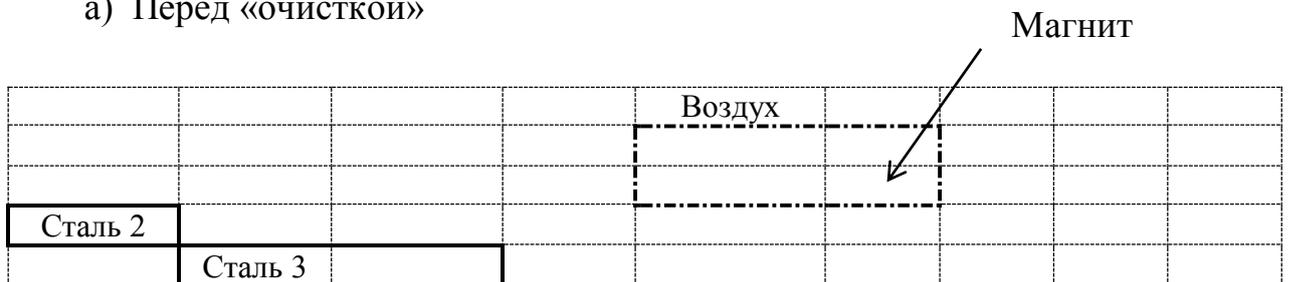


Рисунок 5.12. Пример построения хромосом и процесса кроссовера

Предложена концепция кластеров, зон с однородными свойствами, для различных типов материалов. Например, сталь 2 и 3, являются элементами одного кластера, так как соседствуют друг с другом, как показано на рисунке 5.13а, а сталь 4 является элементом другого кластера (рисунок 5.13а). Если область, занимаемая кластером узкая, т.е. количество ячеек в одном кластере меньше или равно целому числу  $N_{\min}$ , то запускается процедура «очистки». Например, когда  $N_{\min} = 2$ , то сталь 2 и 3 остаются, а сталь 1 заменяется на окружающий воздух, сталь 4 заменяется на магнит (рисунок 5.13б). В результате такого способа удаляются «плавающие» элементы материала.



а) Перед «очисткой»



б) После «очистки»

Рисунок 5.13. Концепция кластеров и процедуры «очистки»

На рисунке 5.13 показано поперечное сечение линейной электрической машины возвратно-поступательного действия с индуктором и статором. Исследование по топологической оптимизации повторяется с новой увеличенной длиной генов. Для первой итерации грубая топология разработана с использованием небольшого количества конструктивных переменных в массиве размеров  $5 \times 9$  (рисунок 5.13а, 5.13б).

На рисунке 5.14 показано обработка кластера материала на границе. Затем разрабатывается более точная топология с использованием большого количества

переменных проектирования для второй итерации в массиве ячеек  $20 \times 18$ . Для второй итерации набор исходных генов в ГА наследует особь, которая имеет лучшую приспособленность после завершения предыдущей итерации. Например, исходный материал в ячейке  $P_0$  генерируется с вероятностью  $1/5$  из материалов в ячейках  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$ , показанных на рисунке 5.14. Вся блок-схема предложенного метода показана на рисунке 5.15.

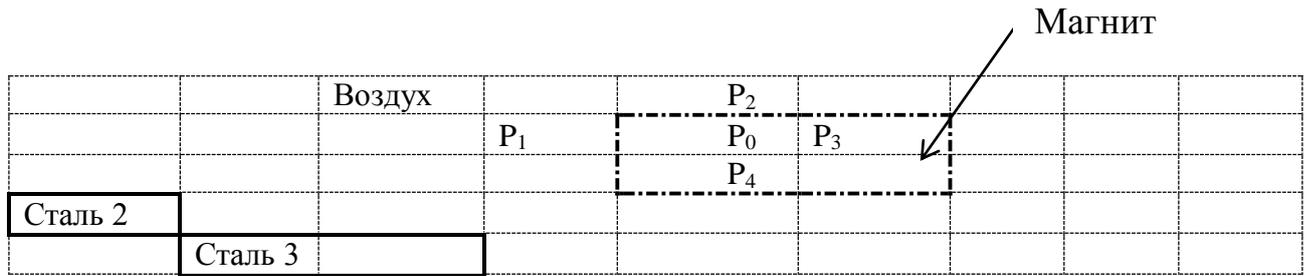


Рисунок 5.14. Кластер материалов на второй итерации



Рисунок 5.15. Блок-схема топологической оптимизации

Оптимизируется топология структуры индуктора, рассматривая два типа постоянных магнитов (ПМ);  $R$ -ориентированный и  $X$ -ориентированный магниты. Количество поколений (популяций) установлено равным 45. Есть возможность получить лучший результат, если выбрано число больше 45. Однако это приведет к более длительному времени вычисления. На рисунке 5.16 показана характеристика сходимости топологической оптимизации. Мы находим, что функции пригодности почти сходятся на каждой итерации, а именно на каждом 300-м поколении.

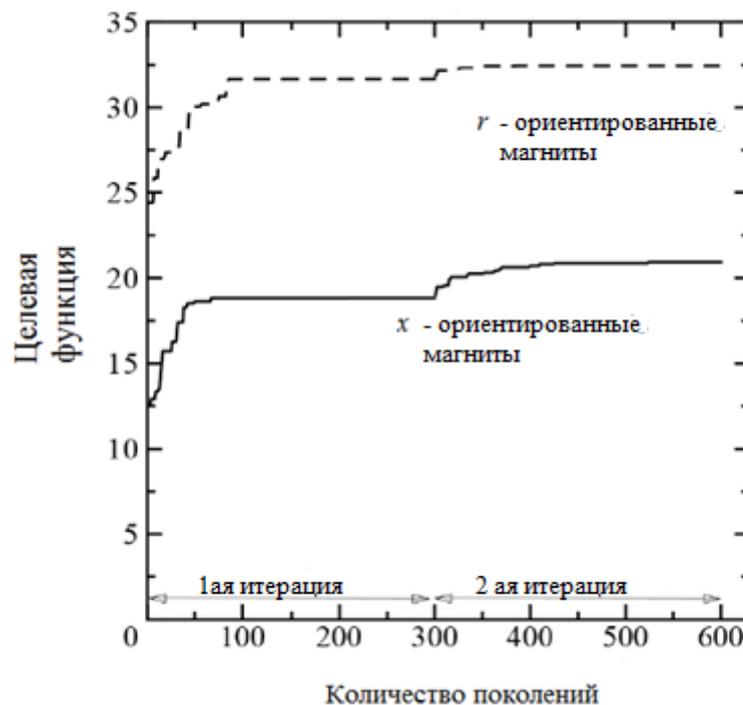


Рисунок 5.16. Сходимость топологической оптимизации

На рисунке 5.17а показана полученная структура индуктора, состоящая из трех материалов – воздуха, железа и  $R$ -ориентированного магнита. Число  $N_{min}$  на первой итерации равно 1. Это означает, что если в кластере количество ячеек меньше 2, то материал кластера меняется на материал окружающих клеток. На второй итерации  $N_{min}$  выбирается равным 4. Оптимизация, в которой учитывается только  $R$ -ориентированные магниты, создает ротор постоянного магнита. На рисунке 5.17б показан индуктор, учитывающий  $X$ -ориентированные магниты.

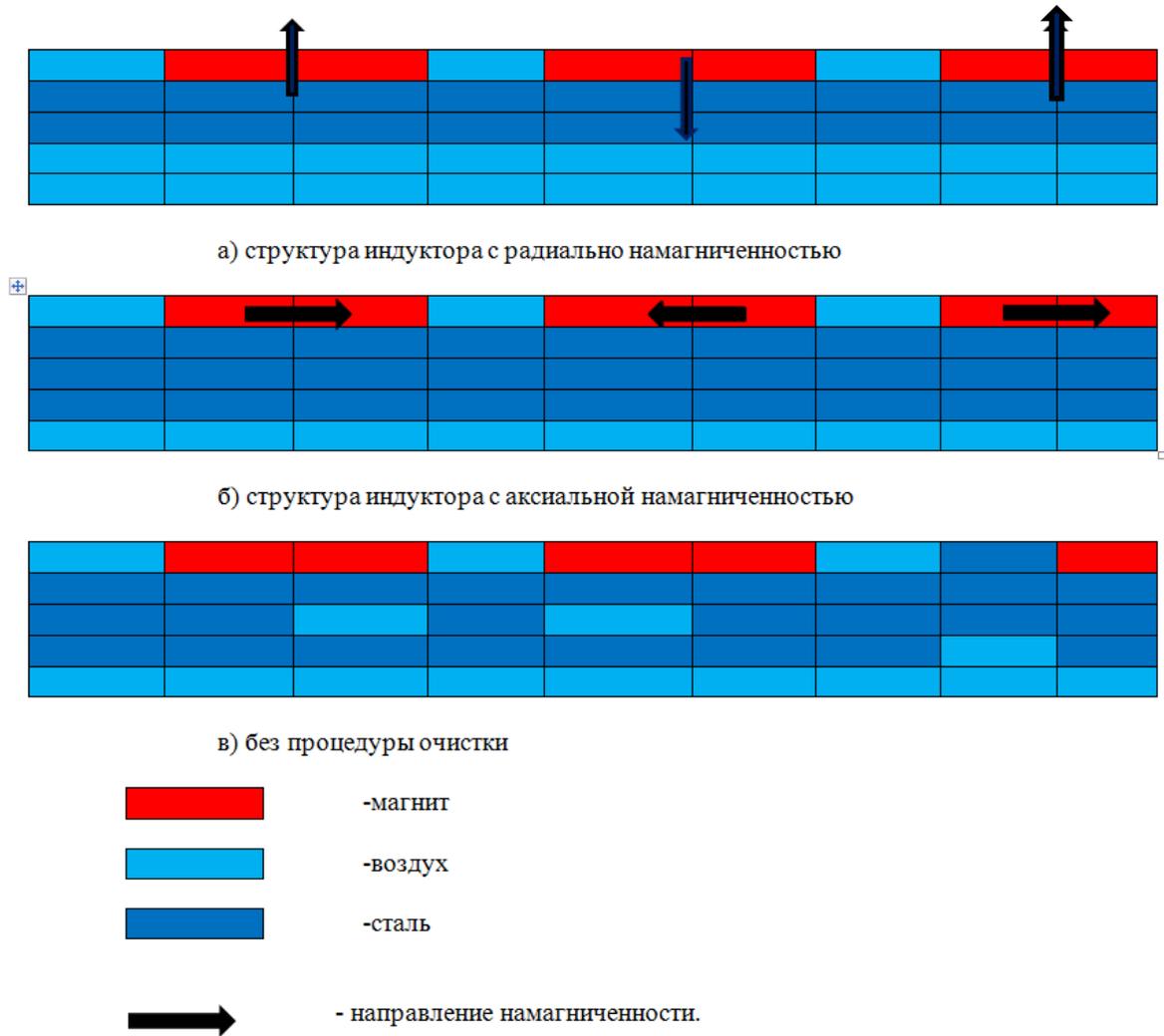


Рисунок 5.17. Структуры индуктора при топологической оптимизации

На рисунке 5.17в показана полученная структура ротора, когда кластеризация материала (группировка по сходным свойствам) и процедура очистки не выполнялись. Хотя полученная форма магнита похожа на форму, показанную на рисунках 5.17 а,б ротор имеет множество мелких частиц воздуха в  $R$ -ориентированном магните. Как упоминалось выше, процедура очистки может удалить небольшой кластер материалов. Поэтому структура, полученная без учета процедуры очистки, содержит множество мелких кусков железа в магните и многочисленные воздушные полости в железе, которые показаны на рисунке 5.17в. Такой индуктор имеет сложную слабую структуру и его трудно изготовить.

На основе рассчитанных конструктивных параметров получены значения намагничивающих сил  $F(x)$  для радиальной и аксиальной намагниченности в

зависимости от линейной токовой нагрузки, которые представлены на рисунке 5.18.

При токовой нагрузке  $1,5 \cdot 10^5$  А/м индуктор с радиальной намагниченностью обеспечивает 2490 Н, с аксиальной намагниченностью 1900 Н [56].

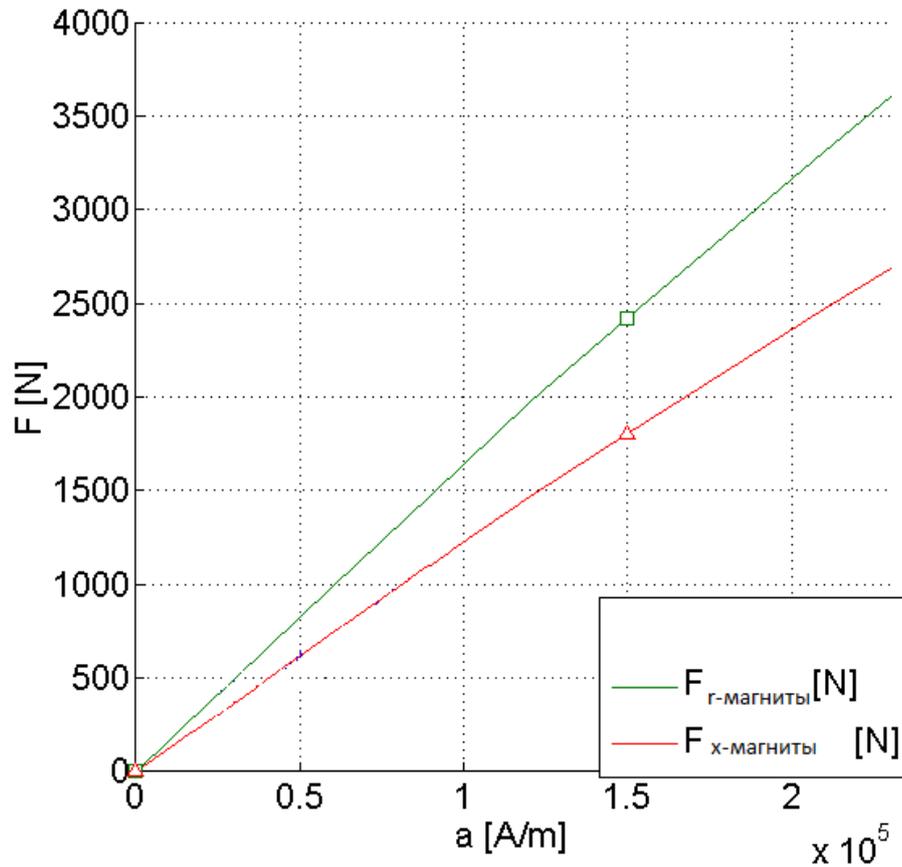


Рисунок 5.18. Характеристики индукторов с радиальной и аксиальной намагниченностью

Общий вид разработанной линейной электрической машины представлен на рисунке 5.19.

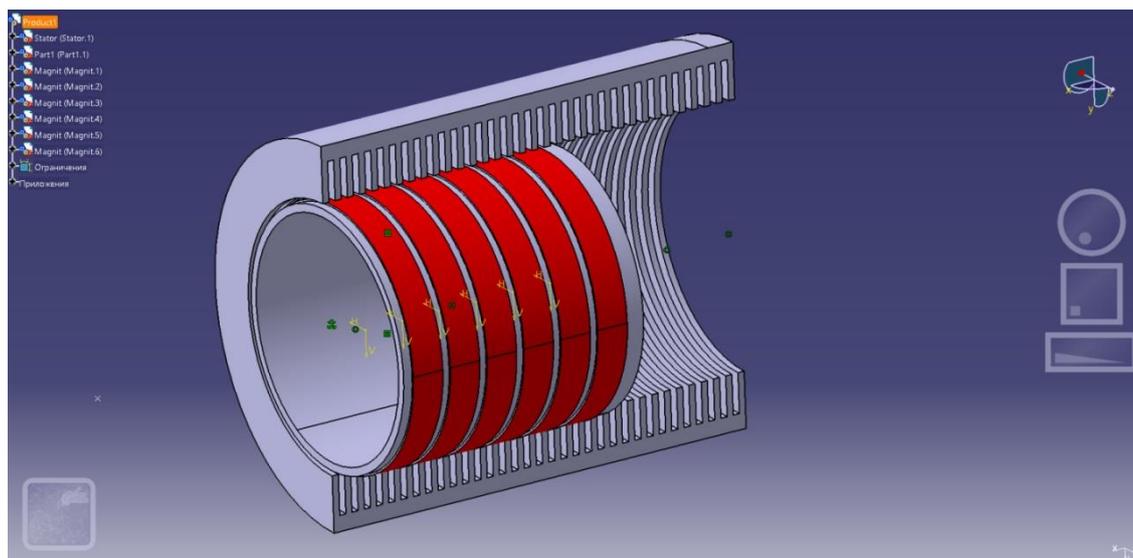


Рисунок 5.19. 3D модель линейной электрической машины

Учитывая вышеизложенное, приходим к выводу, что наиболее рационально формой реализации линейной электрической машины возвратно-поступательного действия является цилиндрическая конструкция с постоянными магнитами на подвижном якоре. Конструктивно выполнять якорь целесообразно полым, с поверхностно монтируемыми магнитами, формирующими радиальный магнитный поток. Выбранная форма реализации обеспечит наилучшие технико-экономические характеристики линейной электрической машины возвратно-поступательного действия.

В данном исследовании разработана структура индуктора линейной электрической машины с постоянными магнитами. Предлагаемый процесс оптимизации объединяет топологический метод оптимизации и метод, учитывающий экономичность изготовления. Полученный индуктор линейной электрической машины имеет на 24% больше электромагнитной силы, чем двигатель с тем же статором с аксиальной намагниченностью. Поэтому эффективность предлагаемого метода подтверждается.

В среде моделирования электромагнитных полей методов конечных элементов построена структура изучаемого типа линейной электрической машины.

Принцип работы предложенного алгоритма оптимизации:

#### 1. Создание новой популяции:

1.1. Если программа запущена впервые, то случайным образом генерируется новая популяция: 2 родителя (второй родитель генерируется так, чтобы ни один его ген не совпадал с геном первого родителя). Если программа запущена повторно, то для создания новой популяции используются 2 лучшие особи (все сохраняются на жестком диске), полученные при предыдущих расчетах.

В случае, если программа запущена впервые и новая популяция сгенерирована случайным образом, то производится процедура очистки родителя 1 и родителя 2. Процедура очистки производится следующим образом: для каждого гена, находящегося со 2 по 9 строку и со 2 по 14 столбец (т.е. за исключением генов, находящихся в крайних строках 1 и 10 и крайних столбцах 1 и 15) проверяется схожесть с геном, расположенным непосредственно слева, справа, сверху и снизу от него. Если для рассматриваемого гена 3 из 4 окружающих (слева, справа, сверху и снизу) его генов одинаковы, то рассматриваемый ген принимает их значение.

#### 2. Процедура скрещивания:

2.1. Для родителя 1 и родителя 2 производится случайный выбор двух отличающихся друг от друга порядковых номеров генов (от 1 до 150), причем порядковые номера генов выбираются таким образом, чтобы значение гена (с порядковым номером 1) родителя 1 не равнялось значению гена (с порядковым номером 1) родителя 2, а также значение гена (с порядковым номером 2) родителя 1 не равнялось значению гена (с порядковым номером 2) родителя 2.

2.2. Производится скрещивание родителя 1 и родителя 2 путем обмена 2-мя генами с порядковыми номерами, полученными на предыдущем этапе. В результате чего в популяции образуется ребенок 1 и ребенок 2.

### 3. Отбор особей по расчетному значению целевой функции:

3.1. Оценка особей производится по наибольшему значению целевой функции, представляющей собой результат расчета модуля интегральной электромагнитной силы, воздействующей на индуктор по горизонтальной оси X. Расчет выполняется в среде моделирования электромагнитных полей методов конечных элементов для задач магнитостатики.

3.2. В результате расчета значений целевой функции для каждой особи в популяции (родитель 1 и 2, ребенок 1 и 2) производится отбор двух лучших особей, которые в дальнейшем становятся родителем 1 и родителем 2, а две худшие особи исключаются из популяции.

3.3. Алгоритм повторяется с п. 2.

### 4. Мутация:

4.1. Мутация популяции применяется с целью избежания чрезмерно быстрой сходимости функции генетического алгоритма в её локальном минимуме. Мутация представляет собой создание набора новых случайным образом сгенерированных особей таким образом, чтобы их гены не повторялись с ранее рассмотренными особями (минимум 2 отличающихся значения генов).

4.2. Количество новых мутировавших особей изменяется в режиме реального времени и определяется количеством свободных вычислительных потоков, распределение которых представлено в п.6. Если результат расчёта целевой функции мутировавшей особи выгодно отличается от существующих лучших представителей, отобранных в п.3.2, то одна из особей текущей популяции заменяется на мутировавшую особь.

### 5. Защита от дублирования особей:

5.1. Одним из недостатков генетического алгоритма является случайная повторяемость новых сгенерированных особей в процессе эволюции с ранее существующими, что увеличивает время работы алгоритма.

5.2. С целью ускорения работы генетического алгоритма рассмотренные ранее особи сохраняются в архив. Если новая сгенерированная особь совпадает с

ранее существующей, то она исключается из текущей популяции, а процесс генерации новой особи повторяется.

#### 6. Распределение вычислительных потоков:

6.1. С целью ускорения процессорных вычислений применяется многопоточный (с независимыми друг от друга потоками) подход (программа резервирует от 1 до 16 потоков в зависимости от времени простоя процессора).

6.2. Вычислительные потоки распределяются следующим образом. В случае наличия свободных потоков приоритет для выполнения расчетов имеют особи из текущей популяции (родитель 1 и 2, ребенок 1 и 2). Однако для отбора лучших особей (согласно п.3.2) необходимо наличие рассчитанных значений целевой функции для всех особей текущей популяции (родитель 1 и 2, ребенок 1 и 2). Поэтому освободившиеся потоки заполняются вычислениями целевой функции для мутировавших особей. После выполнения расчетов целевой функции для всех особей текущей популяции (родитель 1 и 2, ребенок 1 и 2), а также выполнения процедуры отбора и их повторного скрещивания, освободившиеся потоки вновь заполняются вычислениями для особей текущей популяции, которые имеют приоритет перед вычислениями для мутировавших особей. Так, например, если программа в текущий момент использует 8 потоков для вычислений, то в потоках 1-4 запускаются вычисления для текущих особей популяции, а в оставшихся потоках 5-8 - вычисления для мутировавших особей. Расчет значения целевой функции для разных особей занимает разное количество времени, поэтому освободившиеся ранее других потоки из диапазона 1-4 заполняются вновь сгенерированными мутировавшими особями.

6.3. В случае если количество вычислительных потоков более 12, то происходит эволюция двух независимых популяций параллельно (по 4 потока на каждую популяцию, свободные потоки заполняются вычислениями целевой функции для мутировавших особей). После выполнения расчетов для всех текущих особей каждой популяции, происходит их слияние и отбор осуществляется по всем их особям.

На рисунке 5.20 в качестве примера графически представлен один из промежуточных результатов работы алгоритма [106,146,147,148,149].

В результате конечно-элементного моделирования получены карты электромагнитной индукции, возникающей в индукторе электрической машины.

После чего рассчитано усилие, действующее на индуктор в требуемом направлении.

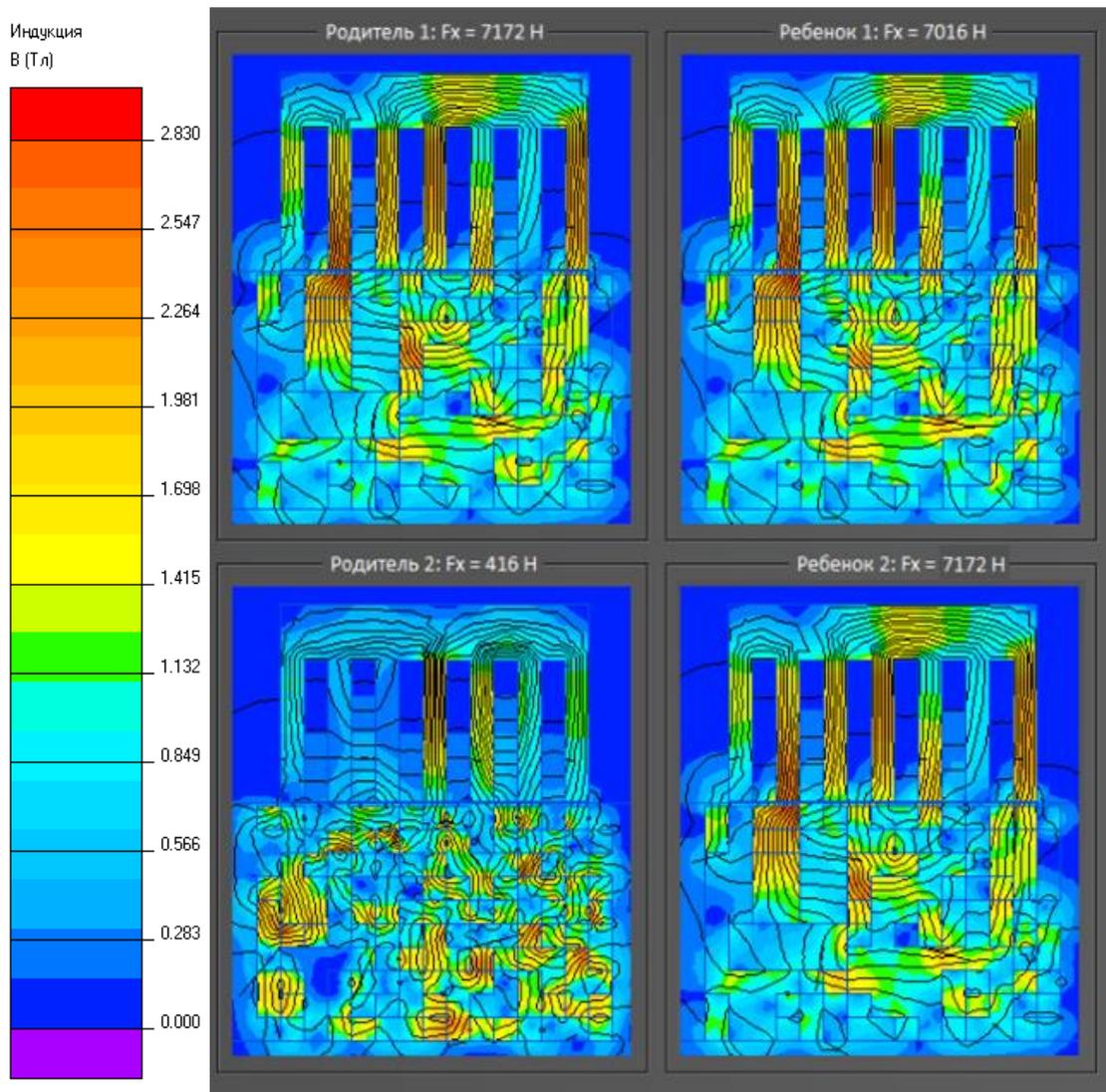


Рисунок 5.20. Промежуточный результат работы генетического алгоритма топологической оптимизации индуктора в виде карт электромагнитной индукции, полученных в результате конечно-элементного моделирования

В результате топологической оптимизации индуктора сделан вывод, что максимальная электромагнитная сила при заданных условиях достигается, когда магниты представляют собой полученную в результате моделирования модифицированную сборку Холбаха.

Масса индуктора существенно влияет на энергетические и скоростные показатели машины. Для перемещения индуктора большой массы требуется приложение большего усилия, кроме того, он обладает большей инерцией, и достижение высоких частот перемещения затрудняется.

Оптимальная толщина магнитных колец в модифицированной сборке Холбаха составляет 3 – 6 мм. При такой толщине достигается максимальная электромагнитная сила, действующая на интегральный контур индуктора в горизонтальном направлении.

При традиционной сборке Холбаха (рисунок 5.21) горизонтальная электромагнитная сила, действующая на интегральный контур индуктора составляет 849 Н.

При модифицированной сборке Холбаха (рисунки 5.22, 5.23) – 1015 Н.

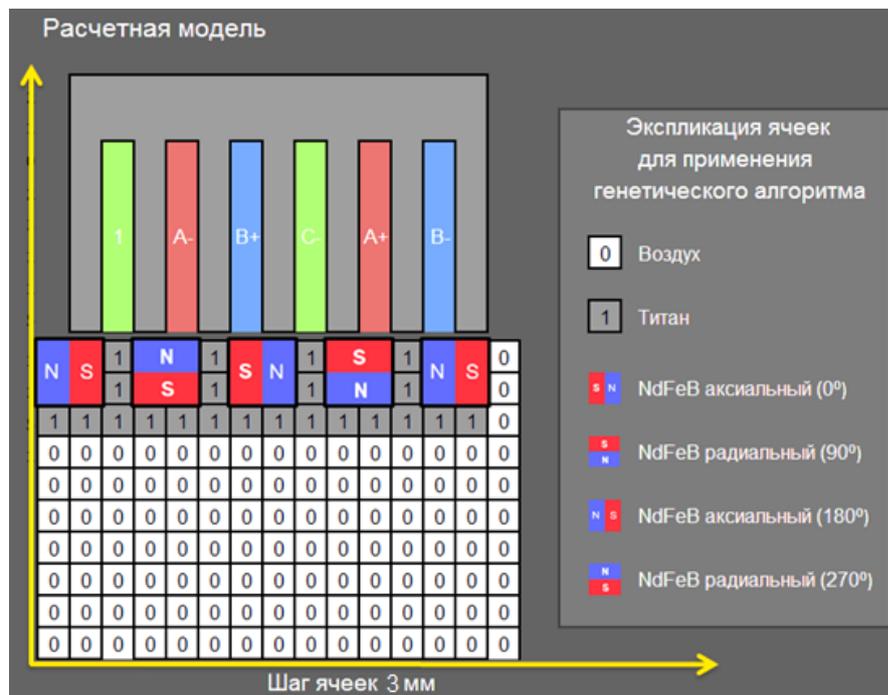


Рисунок 5.21. Традиционная магнитная сборка Холбаха

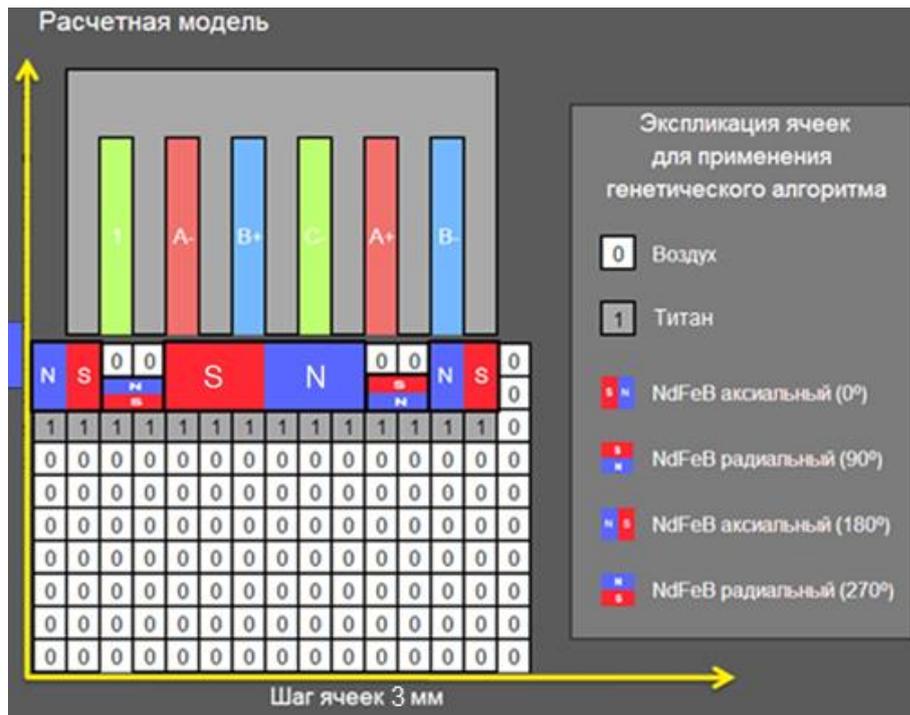


Рисунок 5.22. Модифицированная магнитная сборка Холбаха

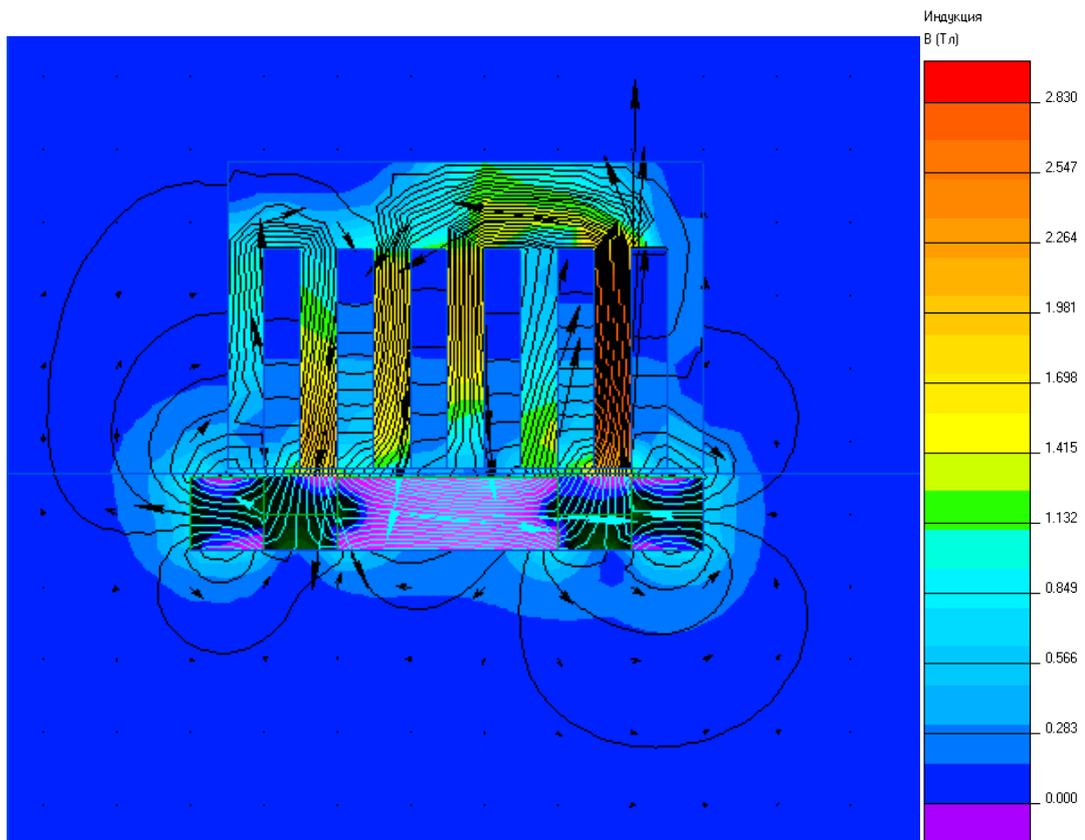


Рисунок 5.23. Распределение магнитной индукции в модифицированной сборке Холбаха

#### 5.4. Программная реализация концепции параллельного моделирования генерирующих комплексов

##### **Концепция параллельного моделирования элементов автономного источника электроснабжения**

Расчет параметров автономного источника электроснабжения осуществляется различными программными средствами (глава 1). Для эффективной совместной работы, обмена данными между *Matlab-Simulink*, *CATIA V5* и *COMSOL Multiphysics* и оптимизации параметров машины разработана система управления базами данных на базе *Microsoft Excel*.

Использование программного комплекса *Matlab-Simulink* позволяет реализовать концепцию параллельного моделирования (в иностранной литературе Co-Simulation). Данная концепция дает возможность производить обмен данными между различными программами с целью повышения эффективности, точности моделирования и оптимизации конструктивных размеров деталей.

Система управления базами данных и оптимизации позволяет производить следующие действия:

- ввод параметров для численного расчета и имитационного моделирования систем автономной энергоустановки. Параметры могут вводиться как постоянные величины, так и с варьируемыми значениями с заданным диапазоном изменения. При этом значительно упрощается ввод параметров через единое рабочее пространство таблиц *Excel*.

- управление программными средствами через систему управления базами данных на основе специально написанной программы упрощает проведение численных расчетов и имитационное моделирование, так как дает возможность не вводить управляющие команды непосредственно в подключенные программные средства.

- все данные полученные при численных расчетах и имитационном моделировании сохраняются в базе данных, что дает возможность в случае

ошибки сохранить данные и провести диагностику и повысить надежность системы.

- графическая визуализация результатов расчета позволяет значительно сократить время выбора оптимальных или рациональных параметров.

- возможность автоматического построения трехмерной модели исследуемого объекта по окончании расчетов.

- гибкость системы управления позволяет вводить дополнительные параметры для проведения более полных расчетов.

При разработке численного моделирования синхронной ЭМВПД с ПМ упор ставился на глубокой параметризации геометрии индуктора и статора для проработки большого количества возможных конфигурации геометрии электрической машины. Это позволяет оценить влияние отдельных геометрических параметров на энергоэффективность синхронной ЭМВПД с ПМ и модернизировать модель машины к новым требованиям.

В численной модели, контроль и анализ программного обеспечения осуществляется на основе единой базы данных, что позволяет совместить моделирование тепловых и электромеханических процессов.

Данный метод позволяет удобно вводить заданные параметры в различные компоненты вычислительного комплекса без необходимости вводить численный код непосредственно в программу.

Программа зарегистрирована в Роспатенте [30].

Расчеты параметров проводятся в шести блоках:

- СПДВС (свободно-поршневой двигатель внутреннего сгорания);
- синхронной ЭМВПД с ПМ – обратимая электрическая машина возвратно-поступательного действия;
- Прочность – прочностной расчет деталей и узлов синхронной ЭМВПД С ПМ ;
- Преобразователь – расчет энергетических характеристик преобразовательной установки.

- Тепловая модель – расчет максимальных превышений температуры в корпусе статора и индуктора;
- КПД – расчет КПД отдельных составных элементов автономной энергетической установки и всей установки в целом.

### Блок расчета СПДВС

	A	B	C	D	E	F	G
1	Входные параметры	Значения	Ед. измерения		Результаты расчета	Значение	Ед измерения
2	$x_m$ - максимальный ход транслятора		120 мм		$x$ - достигнутый максимальный ход транслятора		мм
3	$x_s$ - ход транслятора		60 мм		$v$ - достигнутая максимальная скорость транслятора		м/с
4	$D$ - диаметр цилиндра		100 мм		$P_{mex}$ - выходная механическая мощность средняя		Вт
5	$P_1$ - давление топлива на входе		250000 Па		$f$ - частота колебаний		Гц
6	$n$ - политропный коэффициент сжатия		1,5		$F$ - усилие на валу транслятора		Н
	<i>Из раздела прочность <math>m</math> – общая масса транслятора и поршневой группы</i>						
7			10 кг				
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							

Рисунок 5.21. Окно расчета СПДВС

Расчет начинается с определения параметров приводного двигателя.

Входные варьируемые параметры:

$x_m$  – максимальный ход индуктора;

$x_s$  - заданный ход индуктора;

$D$  – диаметр цилиндра;

$P_1$  – давление топлива на входе;

$n$  - политропный коэффициент сжатия;

$m$  – общая масса индуктора и поршневой группы.

Общая масса индуктора и поршневой группы –  $m$  рассчитывается на основе предварительных размеров синхронной ЭМВПД с ПМ, построенная 3D модель в САПР *Catia V5* позволяет определить массу подвижных частей при задании свойств материалов индуктора и поршневой группы.

Выходные параметры используются в блоках расчета синхронной ЭМВПД с ПМ и Прочность:

$x$  - достигнутый максимальный ход индуктора;

$v$ - достигнутая максимальная скорость индуктора;

$P_{\text{мех}}$  - выходная механическая мощность средняя, на валу индуктора;

$f$  – частота колебаний индуктора.

### Блок расчета синхронной ЭМВПД с ПМ

	A	B	C	D	E	F	G
1	Входные параметры	Значения	Ед.измерения		Результаты расчета	Значение	Ед измерения
2	bN - ширина катушки	0,005	м		Линейная токовая нагрузка - A		A/м
3	x - координата транслятора		м		Кэфф.распределения обмотки $\xi\eta$		
4	v - номера гармоник	1,3,7,13			Кэфф. укорочения шага $\xi\zeta$		
5	ts - полюсное деление статора	0,03	м		Bs_ Реакция якоря		Тл
6	ωп - количество витков в обмотке	6			Beg_Магнитная индукция пост.магнитов		Тл
7	f - частота колебаний	30	Гц		Blsr_Результ.значение магнитной		Тл
8	tN - обмоточное деление	0,03	м		Fx_Электромагнитная сила		Н
9	μ0 - магнитная постоянная				L_Главное индуктивное сопрот. статора		Гн
10	δ – величина воздушного зазора	0,00125	м		Lp_Индуктивное сопротивление пазового		Гн
11	B0 - остаточная намагниченность постоянных магнитов	1,42	Тл		Lz_Индуктивное сопротивление рассеяния по коронкам зубцов		Гн
12	tm - полюсное деление транслятора	0,003	м		Rst_Активное сопротивление обмотки одной фазы		Ом
13	bm - ширина магнита	0,024	м		Потери в стали		Вт
14	p - число пар полюсов	3			I s - ток в обмотке статора		A
15	l к - длина катушки		м		ЭДС в фазе		В
16	L тр - длина транслятора	0,3	м		Потери в меди		Вт
17	h паза - высота паза	0,03	м		Дополнительные потери		Вт
18	p меди - удельное сопротивление меди		Ом/мм2		w - круговая частота		рад/с
19	l об - длина обмотки		м		Потери на гистерезис		Вт
20	A об - поперечное сечение обмотки		м2		Потери от вихревых токов		Вт
21	hm - высота магнита		м				
22							
23							

Рисунок 5.22. Окно расчета синхронной ЭМВПД с ПМ

В окно расчета синхронной ЭМВПД с ПМ вносятся геометрические размеры индуктора и статора, параметры постоянного магнита и материала проводников. Ход и частота колебаний индуктора задаются из блока СПДВС.

Основные результаты расчета блока используются в блоках Прочность, Преобразователь и КПД. К ним относятся: линейная токовая нагрузка, развиваемая электромагнитная сила, ток в обмотке статора, потери в синхронной ЭМВПД с ПМ и ее выходная электрическая мощность.

## Блок расчета Тепловая модель

	A	B	C	D	E	F	G
1	Входные параметры	Значения	Ед.измерения		Результаты расчета	Значение	Ед измерения
2	GL1				Максимальное превышение температуры в корпусе статора		°C
3	GL3				Максимальное превышение температуры в корпусе транслятора		°C
4	GL11						
5	GL33						
6	G12						
7	G23						
8	G47						
9	G69						
10	G45						
11	G56						
12	G710						
13	G912						
14	G78						
15	G89						
16	G1013						

Рисунок 5.23. Окно расчета Тепловая модель

В окно расчета вводятся параметры тепловой модели синхронной ЭМВПД с ПМ – теплопроводности и теплоемкости, расчет которых представлен в главе 2. Также вносится температура охлаждающей жидкости.

Результаты расчета – максимальные превышения температур в статоре и индукторе синхронной ЭМВПД с ПМ позволяют определить максимально допустимые режимы работы АИЭ, разработать методы и средства снижения тепловой нагрузки на элементы синхронной ЭМВПД с ПМ .

## Блок расчета Прочность

	A	B	C	D	E	F	G
1	Входные параметры	Значения	Ед.измерения		Результаты расчета	Значение	Ед измерения
2	Dвн - внешний диаметр транслятора		м		m - общая масса транслятора и поршневой группы		кг
3	Dвнут - внутренний диаметр транслятора		м		F - максимальная нагрузка на транслятор		кПа
4	Lтр-длина транслятора		м				
5	Dвала - диаметр вала		м				
6	Lвал- длина вала		м				
7	Dвнм - внешний диаметр магнита		м				
8	Dвнутм- внутренний диаметр транслятора		м				
9	Wмаг - ширина магнита		м				
10	x- достигнутый максимальный ход транслятора		м				
11	F-усилие на валу транслятора		Н				
12	Плотность материала транслятора		кг/м3				
13	Плотность материала вала		кг/м3				
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							

Рисунок 5.24. Окно расчета Прочность

Для расчета максимальных механических нагрузок подвижных частей синхронной ЭМВПД с ПМ в процессе работы АИЭ в окно расчета Прочность вносятся конструктивные размеры индуктора, постоянных магнитов, свойства используемых материалов, ход и скорость индуктора, усилие на валу индуктора.

Общая масса индуктора и поршневой группы определяется автоматически в САПР *Catia V5*, там же производится прочностной анализ корпуса индуктора с закрепленными на них магнитами.

### Блок расчета Преобразователь

	A	B	C	D	E	F	G
1	Входные параметры	Значения	Ед.измерения		Результаты расчета	Значение	Ед измерения
2	Частота модуляции		10 кГц		Выходная мощность		кВт
3	Мгновенное значение тока в модуле IGBT		A		Потери в преобразователе		кВт
4	Зависимость $V_{ce}(I_c)$				КПД преобразователя		%
					Коэффициент мощности на выходе преобразователя		
5	Потери на переключения $E_{sw(on)}$		мДж				
6	Потери на переключения $E_{sw(off)}$		мДж				
7	Частота перемещения транслятора		Гц				
8	Входная мощность		Вт				
9	Частота генерируемого напряжения		Гц				
10	Линейное напряжение генерируемого напряжения		В				
11	Емкость сглаживающего фильтра		мкФ				
12	Индуктивность сглаживающего фильтра		мГн				
13							
14							
15							
16							
17							
18							

Рисунок 5.25. Окно расчета Преобразователь

Входные варьируемые параметры:

$f_{mod}$  - частота модуляции;

$I_{IGBT}$  - мгновенное значение тока в модуле IGBT;

$V_{ce}(I_c)$  – зависимость потери напряжения в IGBT модуле от тока;

$E_{sw(on)}$  - потери на переключения;

$E_{sw(off)}$  - потери на переключения;

$P_{вх}$  - входная мощность;

Частота генерируемого напряжения;

Линейное напряжение генерируемого напряжения;

Емкость сглаживающего фильтра;

Индуктивность сглаживающего фильтра.

Выходные параметры используются в блоке расчета КПД:

Выходная мощность;

Потери в преобразователе;

КПД преобразователя;

Коэффициент мощности на выходе преобразователя.

### Блок расчета КПД

	A	B	C	D	E	F	G
1	Входные параметры	Значения	Ед.измерения		Результаты расчета	Значение	Ед измерения
2	Потери в стали		Вт		КПД ОЭМВПД		%
3	Потери в обмотках		Вт		КПД Преобразователя		%
4	Потери на гистерезис		Вт		КПД СПДВС		%
5	Потери от вихревых токов		Вт		КПД Установки		%
6							
7							
8							
9							
10							

Рисунок 5.26. Окно расчета КПД

Блок расчета КПД необходим для расчета КПД отдельных элементов автономной энергоустановки и общего КПД установки.

Входными параметрами блока являются:

КПД СПДВС;

КПД синхронной ЭМВПД с ПМ ;

КПД Преобразователя.

Выходные характеристики:

КПД Установки.

### Проектирование автономного источника электроснабжения

Проектирование АИЭ начинается с задания исходных данных, к которым относятся:

- 1) Необходимая мощность синхронной ЭМВПД с ПМ в генераторном режиме;

- 2) Максимально допустимый ход поршневой группы, и соответственно индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ ;
- 3) Предварительные геометрические размеры, которые определяются из заданных массо-габаритных характеристик и предварительных расчетов.

К ним относятся:

$D_{\text{вн}}$  - внешний диаметр индуктора;

$D_{\text{внут}}$  - внутренний диаметр индуктора;

$L_{\text{тр}}$ -длина индуктора;

$D_{\text{вала}}$  - диаметр вала;

$L_{\text{вал}}$ - длина вала;

$D_{\text{цил}}$  – диаметр цилиндра;

$L_{\text{цил}}$  - длина цилиндра.

Задаются плотности материалов индуктора, вала, цилиндров и магнитов. Данные значения позволяют определить общую массу индуктора и поршневой группы в блоке Прочность.

- 4) Используемое топливо, для определения теплоты сгорания, массы топливной смеси.

При расчете в блоке СПДВС получаем следующие параметры:

$x$  - достигнутый максимальный ход индуктора;

$v$ - достигнутая максимальная скорость индуктора;

$P_{\text{мех}}$  - выходная механическая мощность средняя, на валу индуктора;

$f$  – частота колебаний индуктора;

$F$  – усилие на валу индуктора;

КПД СПДВС.

В блоке синхронной ЭМВПД с ПМ задаются геометрические размеры электрической машины, свойства постоянных магнитов, удельное сопротивление меди обмоток, удельные потери в стали на единицу массы.

При задании геометрических размеров определяются их начальные значения, шаг и область варьирования.

На основе алгоритмов представленных в главе 2 проводится оптимизация геометрических размеров синхронной ЭМВПД с ПМ, которые затем вносятся в блок синхронной ЭМВПД с ПМ в результатах расчета.

При расчете в блоке синхронной ЭМВПД с ПМ получаем следующие параметры:

Линейная токовая нагрузка;

Коэфф.распределения обмотки  $\zeta_n$ ;

Коэфф. укорочения шага  $\zeta_s$ ;

$B_s$  \_ Реакция якоря;

$B_{er}$  \_Магнитная индукция пост.магнитов;

$B_{lsp}$  \_Результ.значение магнитной индукции;

$F_x$  \_Электромагнитная сила;

$L$  \_Главное индуктивное сопроп. статора;

$L_n$  \_Индуктивное сопротивление пазового рассеяния;

$L_z$  \_Индуктивное сопротивление рассеяния по коронкам зубцов;

$R_{st}$  \_Активное сопротивление обмотки одной фазы;

$I_s$  - ток в обмотке статора;

ЭДС в фазе;

Потери в стали;

Потери в обмотках;

Дополнительные потери;

Потери на гистерезис;

Потери от вихревых токов;

Выходная мощность генератора;

КПД синхронной ЭМВПД С ПМ .

В блоке – Тепловая модель на основе данных значений теплопроводностей и теплоёмкостей из 2 главы и температуры охлаждающей жидкости определяются максимальные превышения температур в корпусе статора и индуктора.

Тепловой режим работы синхронной ЭМВПД с ПМ важен для нормальной эксплуатации АИЭ, так как на индукторе устанавливаются постоянные магниты, которые чувствительны к повышению температуры.

После теплового расчета в разделе Прочность проводится уточнение общей массы индуктора и поршневой группы –  $m$  на основе оптимизации массы индуктора в САПР *Catia V5* путем варьирования:

$D_{\text{внут}}$  - внутреннего диаметра индуктора;

$L_{\text{тр}}$  - длины индуктора;

$D_{\text{вала}}$  - диаметра вала;

$L_{\text{вал}}$  - длины вала.

САЕ-система *Catia* располагает модулем оптимизации *Product Engineering Optimizer*, который позволяет рассчитать оптимальные размеры деталей с целью снижения максимальных напряжений. Математический алгоритм оптимизации, применяемый в данном модуле, – алгоритм модельной закалки [112].

Оптимизация позволит снизить массу индуктора и поршневой группы при сохранении необходимых прочностных характеристик подвижных частей.

В блоке Преобразователь определяются рациональные параметры управляемого выпрямителя, с целью обеспечения максимально возможных коэффициента мощности и КПД преобразователя.

В блоке КПД производится подсчет общего КПД АИЭ

## 5.5. Выводы по главе 5

1. Разработана методика оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимума намагничивающей силы на основе разделения конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ на постоянные и варьируемые.

2. Разработана методика оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимальной генерируемой мощности. Результаты оптимизации по максимуму генерируемой

мощности показали, что конструктивные параметры синхронной ЭМВПД с ПМ коррелируют с методикой оптимизации по критерию максимума электромагнитной силы.

3. Предложена методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами позволяющее получить приблизительное множество оптимальных по Парето решений.

4. Разработан метод топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах СЭМПМ с использованием генетического алгоритма. Предложена концепция кластеризации материалов и процедура «очистки» материалов. Рассмотрено использование более двух материалов, а именно: воздух, сталь, а также постоянных магнитов с радиальной и аксиальной намагниченностью.

5. Разработан программный комплекс по оптимизации конструктивных параметров электрической машины. Реализована концепция параллельного моделирования для обмена данными между различными программами и повышения эффективности, точности моделирования и оптимизации конструктивных размеров деталей АИЭ.

## 6. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

### 6.1. Испытательный стенд для проведения исследований экспериментального образца электрической машины возвратно-поступательного действия

#### 6.1.1. Назначение и область применения испытательного стенда

Испытательный стенд предназначен для исследования работы модуля синхронной ЭМВПД с ПМ при механическом, температурном воздействии и при воздействии электрической нагрузки.

Испытательный стенд обеспечивает контроль и управление параметрами работы синхронной ЭМВПД с ПМ в качестве электрического генератора, электрического двигателя, а также управление нагрузкой электрической машины с целью получения характеристик ее работы [114-118].

Испытательный стенд предназначен для работы в защищенных помещениях при температуре от 10 до 40 °С, влажности до 75% (при температуре 15 °С).

#### 6.1.2. Технические характеристики

Испытательный стенд для исследования работы модуля синхронной ЭМВПД с ПМ обеспечивает следующие условия испытаний:

- температура: 0...150 °С;
- усилие на трансляторе электрической машины: 0...12 кН;
- электрический ток: 0...200 А;
- частота колебания индуктора: 0...100 Гц;
- напряжение: 0...400 В.

Габаритные размеры испытательный стенда (ДхШхВ), мм –  
2300x2150x1250.

Основные технические характеристики Испытательного стенда, представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Основные технические характеристики Испытательного стенда

Наименование характеристики	Значение
Напряжение питания, В	380
Уровень шума не более, дБл	73
Время непрерывной работы не более, мин	30
Масса испытательного стола с аппаратурой, кг	135
Наработка на отказ не менее, ч	1000

### 6.1.3. Описание и обоснование выбранной конструкции

Конструкция испытательного стенда максимально минимизирована по номенклатуре используемых деталей и сборочных единиц, упрощена конструкция, использованы готовые изделия в наиболее ответственных местах, упрощающие сборку испытательного стенда.

Особенностью испытательного стенда является энергетическая установка, которая снабжена гидравлическим двигателем при испытании электрической машины в режиме электрического генератора, а также сервоприводом для получения характеристик синхронной ЭМВПД с ПМ [117].

Испытательный стенд состоит из следующих составных частей (рисунок 6.1):

- рама;
- система контроля и управления,
- система привода и нагружения,
- система силового электропитания.

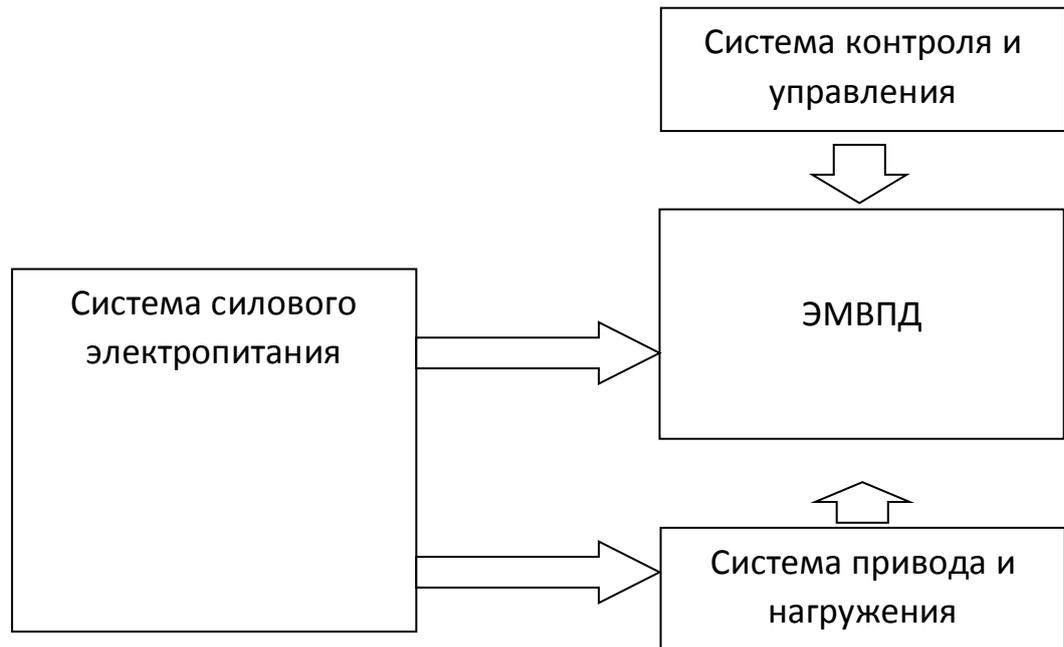


Рисунок 6.1. Блок-схема испытательного стенда

**Рама** с кривошипно-шатунным механизмом и системой направляющих предназначена для размещения и крепления синхронной ЭМВПД с ПМ и систем стенда, обеспечения преобразования вращательного движения гидромотора в поступательное движение индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ .

**Система контроля и управления** предназначена для управления процессом испытания синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме «генератор» и «двигатель». Система, на основе заложенного в нее алгоритма и данных, полученных от датчиков, интегрированных в стенд и синхронной ЭМВПД с ПМ , вырабатывает управляющие сигналы для исполнительных механизмов. Система осуществляет сбор и хранение информации о параметрах объекта испытания, а также вводит ограничения на воздействие с целью недопущения повреждения узлов и механизмов [137].

**Система контроля и управления** стендом включает:

- автоматизированное рабочее место оператора (пульт управления на базе ЭВМ);

- модуль системы контроля и управления (модули ввода и вывода сигналов, датчики);
- блок коммутации.

**Система привода и нагружения** предназначена для формирования механического воздействия на объект испытания в виде возвратно-поступательных движений в режиме испытания «генератор», и создания механического сопротивления в режиме испытания «двигатель».

Кроме этого система обеспечивает требуемый тепловой режим объекта испытания, работающего в тяжелых условиях.

**Система привода и нагружения** включает:

- гидромотор;
- гидроцилиндр;
- гидростанция;
- электроцилиндр (линейный двигатель);
- система охлаждения.

**Система силового электропитания** предназначена для подачи электроэнергии на основные узлы стенда и защиты электрической сети и элементов стенда от повреждения в результате возникновения аварийных ситуаций. Также система обеспечивает синхронной ЭМВПД с ПМ качественной электроэнергией, создает требуемую нагрузку и тепловое воздействие.

Система силового электропитания включает (рисунок 6.2):

- щит силовой;
- источник бесперебойного питания;
- блок питания;
- блок нагрева;
- блок нагрузки.

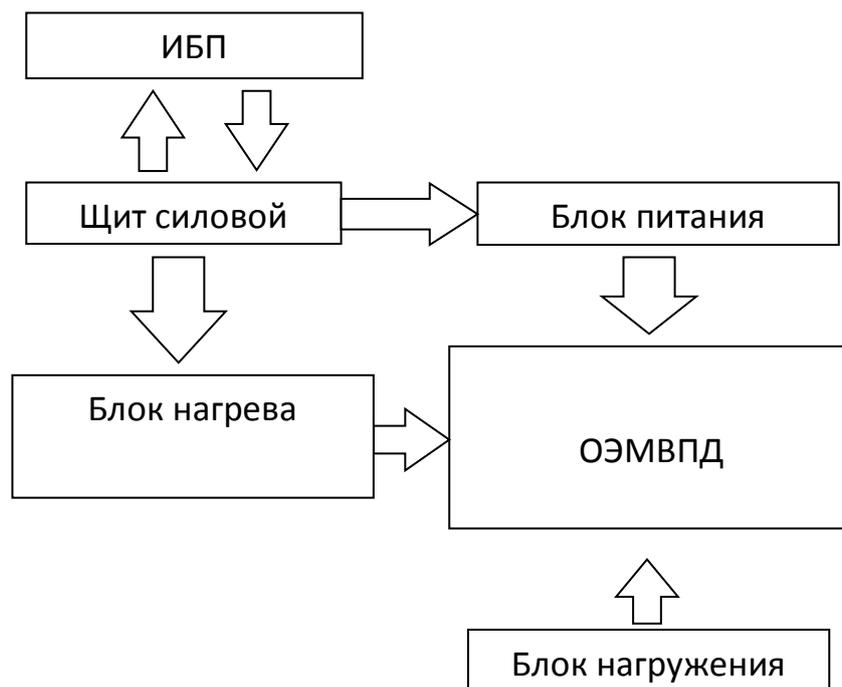


Рисунок 6.2. Блок-схема системы силового электропитания

**Щит силовой** предназначен для подключения испытательного стенда к электрической сети и защиты основных цепей стенда от повреждения ненормальными режимами работы. В щите силовом осуществляется разделение ответственных и неответственных потребителей и питание их через источник бесперебойного питания. Питание неответственных потребителей осуществляется напрямую от сети. Питание ответственных потребителей осуществляется через источник бесперебойного питания. В щите установлены автоматические выключатели, УЗО и контактор модульного исполнения. Присоединение отходящих линий осуществляется через клеммные колодки.

**Источник бесперебойного питания** марки ИБП «Синус» предназначен для питания электроэнергией ответственных потребителей стенда. Мощность блока составляет 20 кВт, что покрывает полную потребность в электроэнергии сложных электронных систем стенда.

**Блок питания** марки «Универсальный преобразователь переменного напряжения УППН-380-600-380», обеспечивает электроэнергией синхронной ЭМВПД с ПМ, работающую в режиме двигателя.

**Блок нагрева** осуществляет создание тяжелых условий работы синхронной ЭМВПД с ПМ. Благодаря применению нагревательных элементов и регулятора температуры создаются высокотемпературные условия до 150°C.

**Блок нагрузки** создает электрическую нагрузку для синхронной ЭМВПД с ПМ, работающей в генераторном режиме. Блок нагрузки представляет собой набор ТЭНов, управляемый от компактного электрического щитка, установленного на корпусе блока.

Для запуска стенда в работу, на него необходимо подать питание, включив вводной автоматический выключатель (автомат). После этого запускается в работу источник бесперебойного питания (ИБП), подачей на него питания.

Также включаются в работу блок нагрева и нагрузки. Величина нагрузки блока нагрузки регулируется переключателями, установленными на нем. Температура нагрева регулируется с помощью терморегулятора, смонтированного на рубашке синхронной ЭМВПД с ПМ.

Испытательный стенд при проведении испытаний обеспечивает параметры, представленные в таблице 6.2.

Таблица 6.2. Рабочие параметры испытательного стенда

Наименование параметра	Значение
Диапазон перемещения штока электрической машины, мм	50...120
Максимальная скорость перемещения индуктора, м/с	40
Частота перемещения индуктора до, Гц	100
Максимальное измеряемое усилие, кН	12
Мощность нагрузки до, кВт	10
Напряжение нагрузки до, В	400
Измерение электрического тока до, А	300
Точность определения положения индуктора до, мм	0,1
Измерение температуры элементов электрической машины до, °С	204
Частота оцифровки входных сигналов системы контроля и управления до, кГц	800

Аппаратный состав испытательного стенда представлен на рисунке 6.3.

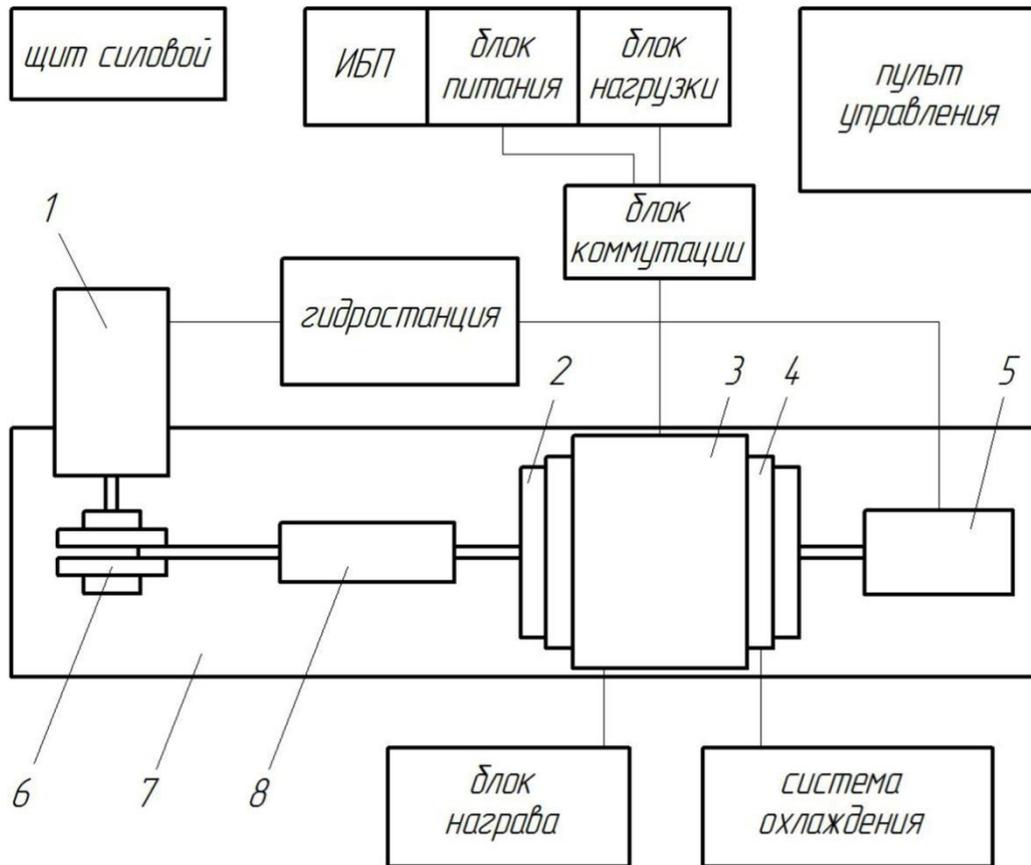


Рисунок 6.3. Аппаратный состав испытательного стенда

1 – гидромотор; 2 – синхронной ЭМВПД с ПМ ; 3 – нагревательный элемент; 4 – охлаждающий элемент; 5 – гидроцилиндр; 6 – кривошипно-шатунный механизм;

7 – рама;

8 – система направляющих

Составные части испытательного стенда располагаются в отдельном защищенном помещении. Рама 7 закрепляется на бетонном основании.

Синхронная ЭМВПД с ПМ 2 крепится на раме 7. С одной стороны синхронная ЭМВПД с ПМ через систему направляющих 8 и кривошипно-шатунный механизм 6 соединена с гидромотором 1, с другой стороны - с гидроцилиндром 5. Сверху синхронной ЭМВПД с ПМ расположены нагревательный элемент 3 и охлаждающий элемент 4. Работа охлаждающего

элемента 4 обеспечивается системой охлаждения, расположенной раме испытательного стола 7. Давление в гидросистемах привода гидромотора 1 и гидроцилиндра 5 нагнетается отдельно расположенной гидростанцией.

Отдельно располагаются электрические блоки испытательного стенда: щит электрический силовой; источник бесперебойного питания; блоки питания, нагрузки и коммутации; блок нагрева исследуемого объекта. Все электрические блоки соединяются друг с другом и с исполнительными элементами напольными защищенными коммутациями.

Функциональная схема испытательного стенда представлена на рисунке 6.4.

Перед проведением испытаний синхронной ЭМВПД с ПМ 5 закрепляется на раме и соединяется электрическими коммуникациями с блоком коммутации.

Стенд работает следующим образом:

В режиме генератора транслятор синхронной ЭМВПД с ПМ 5 через разъемную муфту 4 связан с кривошипно-шатунным механизмом 3, преобразующим вращательное движение гидромотора 2 в возвратно-поступательное движение индуктора. Вырабатываемая генератором синхронной ЭМВПД с ПМ 5 электрическая энергия поступает в блок коммутации 20, где выпрямляется и подается в блок нагрузки 21.

Излишки тепла, выделяемые в синхронной ЭМВПД с ПМ 5, отводятся системой охлаждения, состоящей из насоса 11, емкости охлаждающей жидкости 12, трубопроводов 13, вентилей 15, радиатора 16, вентилятора 17 и электроцилиндра. Система управления 19 на основе сигналов с температурных датчиков 6, смонтированных внутри синхронной ЭМВПД с ПМ 5 и на входном и выходном патрубках системы охлаждения, вырабатывает управляющий сигнал о расходе воды через рубашку охлаждения машины.

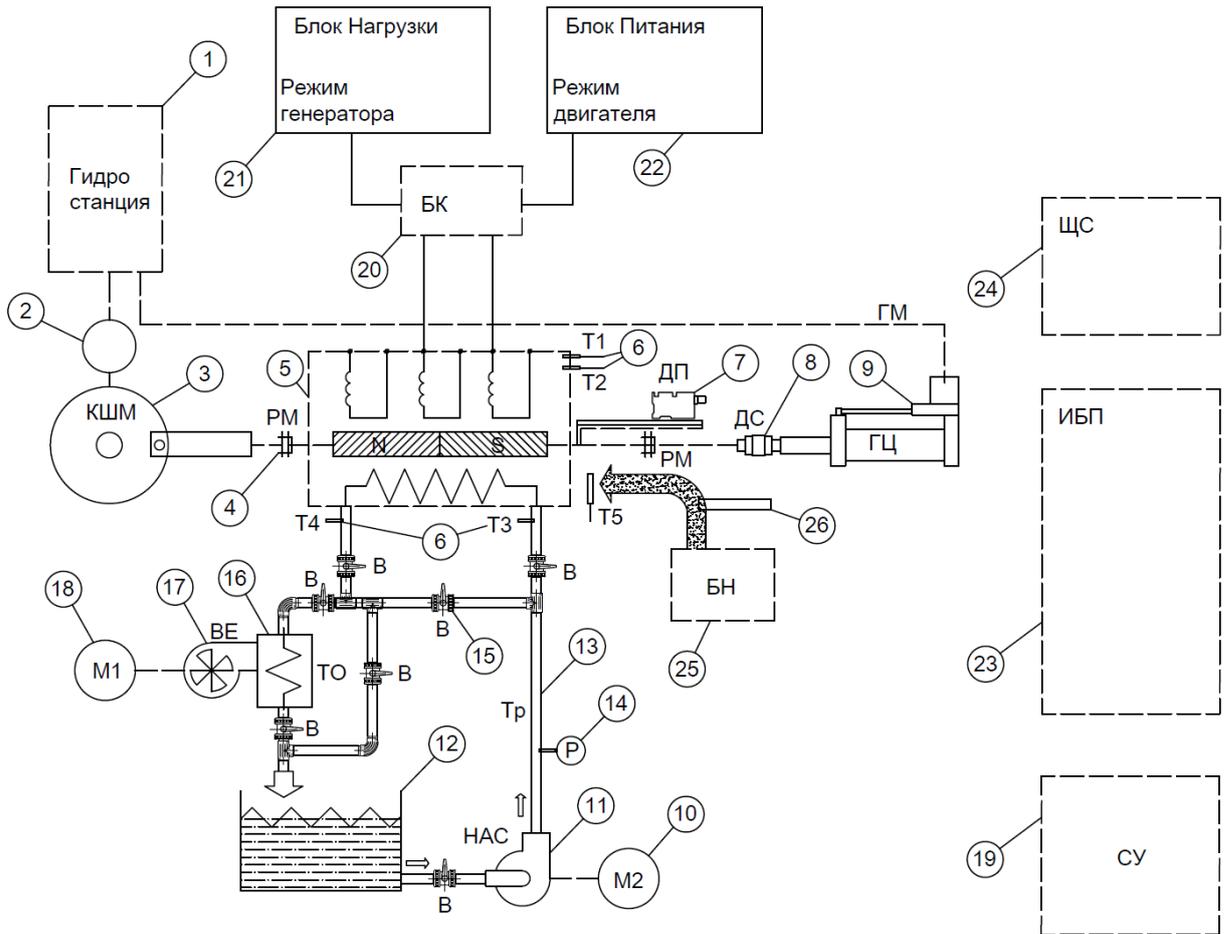


Рисунок 6.4. Функциональная схема испытательного стенда

1 – гидравлическая станция; 2 – гидромотор привода кривошипно-шатунного механизма; 3 – кривошипно-шатунный механизм; 4 – разъемная муфта; 5 – синхронной ЭМВПД с ПМ ; 6 – датчики температуры; 7 – датчик положения индуктора; 8 – датчик силы; 9 – гидравлический цилиндр; 10 – электродвигатель насоса системы охлаждения; 11 – насос системы охлаждения; 12 – накопительная емкость охлаждающей жидкости; 13 – трубопроводы системы охлаждения; 14 – манометр контроля давления; 15 – вентили; 16 – радиатор системы охлаждения; 17 – вентилятор радиатора; 18 – двигатель привода вентилятора; 19 – система управления стенда; 20 – блок коммутации для режимов генератора и двигателя; 21 – блок нагрузки; 22 – блок питания для режима двигателя; 23 – источник бесперебойного питания; 24 – щит силовой; 25 – блок нагрева исследуемого образца; 26 – терморегулятор блока нагрева;

Изменение потока жидкости позволяет поддерживать температурный режим обмоток генератора синхронной ЭМВПД с ПМ 5. Вентили служат для перенаправления потоков жидкости и регулирования давления в системе, контролируемого по показаниям манометра 14. Для охлаждения жидкости служит радиатор 16, обдуваемый вентилятором с электродвигателем (17,18).

Для создания тяжелых условий работы синхронной ЭМВПД с ПМ 5 служит блок нагрева 25, обеспечивающий тепловое воздействие температурой до 150°C.

В режиме двигателя транслятор синхронной ЭМВПД с ПМ с помощью разъемной муфты 4 отсоединяется от кривошипно-шатунного механизма 3 и присоединяется к гидравлическому цилиндру 9 с помощью разъемной муфты через датчик силы 8. Синхронный ЭМВПД с ПМ 5 переключается к клеммам двигателя блока коммутации 20.

Система управления формирует управляющие сигналы в соответствии с алгоритмом управления, поступающие на блок коммутации 20, который соединяет с блоком питания 22 различные обмотки двигателя в нужный момент времени на основе сигнала от датчика положения гидроцилиндра. Гидравлическим цилиндром 9 создается требуемый уровень тормозного момента. Создаваемое при этом усилие, измеряется с помощью датчика силы 8. Гидравлический цилиндр 9 питается по гидравлическим магистралям от гидравлической станции 1.

#### 6.1.4. Система контроля и управления испытательного стенда

Система системы контроля и управления стендом включает (рисунок 6.5):

- автоматизированное рабочее место оператора;
- модуль системы контроля и управления;
- блок коммутации.

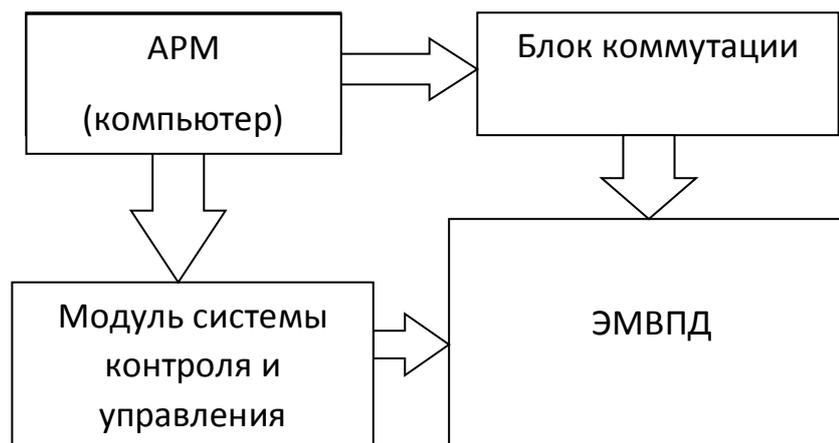


Рисунок 6.5. Блок-схема системы контроля и управления

**Автоматизированное рабочее место** оператора предназначено для подачи основных команд модулю системы контроля и управления, получения, обработки и архивации полученных данных. Основой рабочего места оператора является персональный компьютер.

**Модуль системы контроля и управления** основан на контроллере CompactRIO-9066, в состав которого входят модули ввода и вывода сигналов. Данные собираются от датчиков (датчиков положения, силы, температуры и др.), интегрированных в элементы стенда и синхронной ЭМВПД с ПМ .

В состав модуля входят:

- контроллер NI Compact RIO-9066 (8-слотовое шасси с интегрированным двух-ядерным процессором 667 МГц и ПЛИС Artix7 с предустановленным программным обеспечением);
- модуль ввода-вывода NI 9215, терминалы под винт, 4 кан., 16 бит,  $\pm 10$  В, 100 тыс. отсчетов в сек/канал, параллельные каналы аналогового ввода с дифференциальными входами;
- модуль аналогового ввода NI 9221 8-Channel  $\pm 60$  V, 800 kS/s, 12-bit Analog Input Module;
- модуль аналогового ввода NI 9203 8-Channel  $\pm 20$  mA, 200 kS/s, 16-Bit Analog Input Module;

- модуль аналогового вывода NI 9263, 4 канала, 16 бит, +/-10 В, 100 000 отсчетов/секунду на канал;
- модуль аналогового ввода NI 9217, 4 канала для терморезисторов 100 Ом, 24 разряда, 100 отсчетов в сек;
- модуль цифрового ввода-вывода, 8 каналов, 100 нс, уровни TTL;
- модуль аналогового вывода NI 9265, 4 канала, 20 мА, 100 000 отсчетов/секунду на канал, 16 бит, аналоговый вывод;
- система датчиков, внедренных в объект исследования и стенд.

**Блок коммутации** предназначен для сопряжения ЭМВПД с модулями нагрузки и источником питания. Основными элементами блока коммутации являются выпрямитель, датчик тока и модули IGBT транзисторов. Управление блоком коммутации осуществляется от модуля системы контроля и управления.

В состав модуля входят:

- датчик тока CSLA1DJ, предназначенный для измерения силы тока энергии, вырабатываемой объектом исследования в режиме генератора и контроля потребляемой энергии в режиме двигателя;
- диодный мост (3ф 110А 1200В) VS 110MT120KB, предназначенный для получения постоянного тока, вырабатываемого объектом исследования в режиме генератора;
- CM200DY 12H, 2 IGBT 600V 200A 3 gen (HSeries), модули IGBT транзисторов, предназначенные для управления объектом исследования в режиме двигателя;
- радиатор АВ0095 300x125x46, предназначенный для отвода излишков тепла от полупроводниковых приборов.

После подачи питания запускается персональный компьютер и модуль системы контроля и управления. В модуль системы контроля и управления загружается алгоритм управления и подаются команды начала испытания, остановки и архивации полученных данных. Системой контроля и управления вырабатываются сигналы управления и считываются данные с датчиков, смонтированных в стенд и синхронной ЭМВПД с ПМ . Блок коммутации по

командам системы управления формирует питающие напряжения на объект испытания и преобразует напряжение снимаемое с обмоток генератора в постоянное и соединяет их с блоком нагрузки.

#### 6.1.5. Система привода и нагружения испытательного стенда

Система привода и нагружения включает:

- гидромотор;
- гидроцилиндр;
- гидростанция;
- электроцилиндр (линейный двигатель);
- система охлаждения (рисунок 6.6).

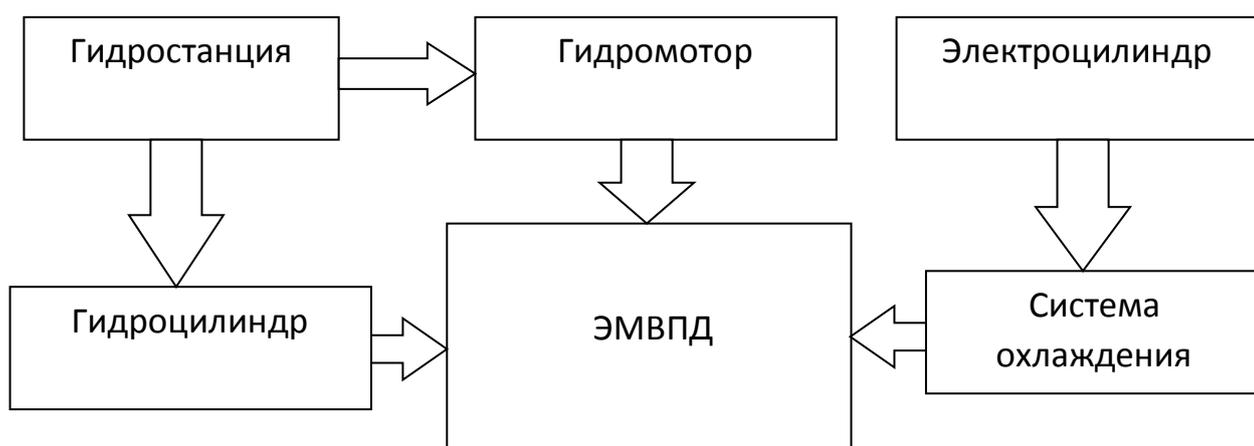


Рисунок 6.6. Блок-схема системы привода и нагружения

**Гидромотор** SCM-047 W-N-DL4-L35-S3G служит для привода кривошипно-шатунного механизма, преобразующего вращательное движение в возвратно-поступательное. В результате проведенных расчетов были получены такие данные, которые говорили о том, что в определенных положениях кривошипно-шатунного механизма (так называемые критические точки, соответствующие углу поворота вала 37 градусам) возникает необходимость

высоких уровней крутящего момента не только на высоких частотах вращения, но и на низких. Такие характеристики электропривод с частотным регулятором развить не может. Поэтому выбор был сделан в пользу гидромотора, имеющего лучшие скоростные характеристики. В системе применен гидромотор аксиально-поршневого типа (выходной вал - шлиц 8x32x36 ISO14 (DIN5462), длина 55мм). Для избежания нелинейного воздействия привода на ЭМВПД в системе применен подшипниковый узел линейного перемещения типа LUND.

**Гидроцилиндр** марки СНТ/40/28/150/FA00BUC00000Y1Q100R10/0 предназначен для создания нагрузок на синхронной ЭМВПД с ПМ . Применение гидроцилиндра с сервоприводом позволяет смоделировать нагрузки различных видов (статическая и динамическая). Традиционно применяемые системы нагружения с фрикционными трения имеют основной недостаток – постоянство нагрузки в любом положении. Применяемый на стенде гидроцилиндр дает возможность моделирования различных видов нагрузки с изменяемой силой сопротивления в любом положении штока толкателя по командам от системы контроля и управления.

**Гидростанция** обеспечивающая давление в гидромагистралях 200Бар (подача 22л/мин + 44 л/мин, мощность мотора 30,0кВт) осуществляет питание гидромотора и гидроцилиндра энергией в виде жидкости с параметрами строго соответствующими требуемым в определенный момент времени. Кроме этого гидростанция осуществляет подготовку, охлаждение, возврат жидкости, фильтрацию, поддержание давления. Применяемый в составе гидростанции пропорциональный клапан позволяет изменять характеристики гидромотора (скорость вращения, момент и др.) и изменять момент сопротивления на штоке гидроцилиндра. Пропорциональный клапан работает по командам системы контроля и управления.

В состав гидростанции входит пропорциональный клапан управления гидроцилиндром и гидромотором.

**Электроцилиндр** предназначен для управления трехходовым клапаном, входящим в состав системы охлаждения. На клапан осуществляется линейное

воздействие. Выбор в пользу электроцилиндра сделан по причине недостаточного быстродействия традиционных приводов предлагаемых промышленностью. Скорость происходящих процессов во время проведения испытаний требует соответствующей скорости реакции системы охлаждения.

В состав электроцилиндра входят статор PS10-70x400U-BL, слайдер PL10-28x690/640, PF10-70x430-FC, контроллер E1400-GP-QN-0S, кабель KSS05, кабель KPS15-04.

**Система охлаждения** защищает основные элементы синхронной ЭМВПД с ПМ и стенда от разрушения в результате воздействия тяжелых условий, создаваемых при проведении испытаний. В состав системы охлаждения входит трехходовой клапан, управляемый электроцилиндром, регулирующий количество отводимого тепла, что позволяет поддерживать требуемый температурный режим синхронной ЭМВПД с ПМ. Охлаждение жидкости в системе осуществляется в радиаторе, обдуваемом вентилятором для повышения эффективности системы.

Гидростанция после подачи питания создает давление в гидромагистралях. С помощью системы кранов, смонтированных на гидростанции, осуществляется переключение гидростанции в режим работы генератора на гидромотор или на гидроцилиндр в режиме работы двигателя. По команде от системы управления меняется производительность системы в зависимости от потребностей стенда. Регулирование скорости вращения гидромотора и положения гидроцилиндра осуществляется с помощью пропорционального клапана смонтированного на гидростанции по командам от системы управления.

После подачи питания на систему охлаждения, по трубопроводам начинается циркуляция жидкости, отводящей излишки тепла от синхронной ЭМВПД с ПМ. С помощью вентилей, входящих в состав системы, осуществляется регулировка давления жидкости, контролируемая по манометру. Рекомендуемое давление 1-1,5 Bar.

Количество жидкости, проходящее через синхронной ЭМВПД с ПМ, регулируется электроцилиндром, связанным с системой управления.

Для изменения режимов работы синхронной ЭМВПД с ПМ «двигатель-генератор», необходимо разобщить объект либо от гидроцилиндра либо от кривошипно-шатунного механизма с помощью разъемных муфт и переключить гидростанцию на гидроцилиндр либо на гидромотор.

На рисунке 6.7 изображен общий вид испытательного стенда для проведения углубленных исследований образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия.



Рисунок 6.7. Общий вид испытательного стенда

## 6.2. Система управления синхронной ЭМВПД с ПМ

Система управления макетом модуля электрической машины (СУММЭМ) предназначена для контроля и управления обратимой синхронной ЭМВПД с ПМ [115,116].

СУММЭМ поддерживает два режима работы обратимой синхронной ЭМВПД с ПМ : генератор и двигатель.

В режиме работы генератор осуществляется постоянный контроль температуры машины, положения индуктора и величины вырабатываемой энергии. В режиме двигатель – формирование напряжения питания обмоток машины в зависимости от положения индуктора, контроль уровня тока, напряжения, температуры обмоток и положения индуктора.

СУММЭМ осуществляет постоянный контроль основных параметров машины и корректирует алгоритмы управления при их выходе за допустимые пределы либо прекращает процесс работы при достижении критического уровня. Кроме этого система позволяет осуществлять хранение параметров работы машины и визуализировать их на мониторе персонального компьютера [138].

В состав системы входят модуль центрального процессора FPGA, модуль управления силовым блоком коммутации, модуль согласования сигналов АРМ и силовой модуль.

Основание для разработки:

- документ (документы), на основании которых ведется разработка;
- организация, утвердившая этот документ, и дата его утверждения;
- наименование и (или) условное обозначение темы разработки

Назначение разработки

СУММЭМ предназначена для работы в составе испытательного стенда для синхронной ЭМВПД с ПМ, синхронной ЭМВПД с ПМ и силовых модулей, состоящих из мостовых выпрямителей и мостов с IGBT транзисторами, имеющими систему охлаждения. Имеется возможность управлять, как одним, так и несколькими сочлененными модулями электрической машины за счет

применения встроенных интерфейсов связи, при этом каждому автономному модулю присваивается порядковый номер и обмен информации идет между процессорными блоками и главным персональным компьютером.

Программа управления выполнена в среде «Windows» серии XP и поддерживает платформу Microsoft .NET Framework 3.5.

Программа свободно обращается к внешним портам персонального компьютера для обмена данными с модулями СУММЭМ и имеет возможность хранения данных как в оперативной памяти, так и на жестком диске или на сменном внешнем носителе.

Программа имеет удобный и интуитивно понятный интерфейс.

### 6.2.1. Описание программы

Программа предназначена для работы в составе испытательного стенда для синхронной ЭМВПД с ПМ и совместима с модулями «Системы управления» [104,140].

Описание логической структуры

Алгоритм программы представлен в виде функциональных блоков на рисунке 6.7.

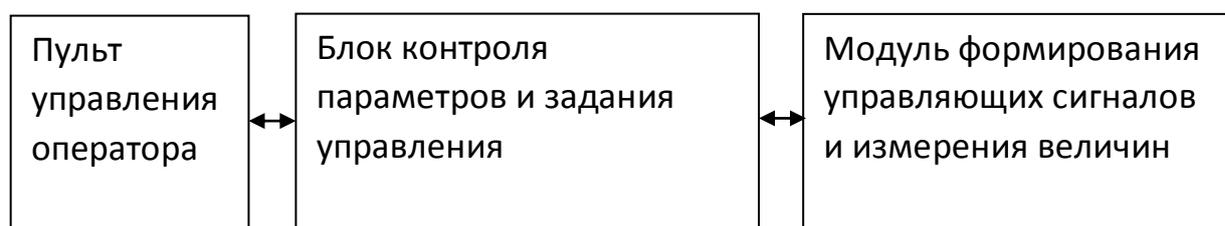


Рисунок 6.7. Алгоритм программы в виде функциональных блоков

Основой программы является часть, загружаемая в дополнительный быстродействующий процессор, расположенный в модуле формирования управляющих сигналов и измерения величин. Применение данного модуля вызвано требованиями быстродействия программы и ее независимость от

скорости обмена данными между блоками и заключается в прямом формировании сигналов управления и обмене данными с блоком контроля параметров и задания управления. После обработки полученных данных модуль передает их блоку контроля и на пульт управления оператора, а в обратном направлении получает сведения о корректировке алгоритмов управления.

Часть программы, загружаемой в процессор модуля формирования управляющих сигналов представляет собой систему управления электромагнитной силы синхронной ЭМВПД с ПМ по минимуму статорного тока. При этом ток статора необходимо направлять по оси  $q$  (система регулирования строится в координатах  $dq$ ). Регулирование скорости осуществляется с помощью управления электромагнитной силы двигателя.

Если ток статора ориентирован по оси  $q$ , то он выражается через электромагнитную силу, согласно (6.1).

$$|\vec{I}_s| = I_{sq} = \frac{2F}{3Z_p\psi_f}. \quad (6.1)$$

Векторный регулятор тока строится в линейной системе координат  $dq$  и состоит из регуляторов  $d$  и  $q$  проекций. С помощью  $q$ -составляющей тока обеспечивается необходимая электромагнитная сила, а  $d$ -составляющая поддерживается равной нулю, что обеспечивает нужную ориентацию вектора тока. В качестве обратной связи используется измеренный и преобразованный в систему  $dq$  реальный вектор статорного тока. Векторный регулятор тока формирует в системе  $dq$  вектор напряжения статора, призванный обеспечить соответствие между заданным и реальным векторами тока статора. Затем с помощью координатных преобразований вектор напряжения статора переводится в неподвижную систему координат, связанную со статором, где он и реализуется с помощью ШИМ.

Для обеспечения динамики работы привода желательно иметь некоторый запас по напряжению. Поэтому уровень ограничения момента надо делать несколько меньшим, по сравнению с его значением. Для формирования вектора

статорного напряжения обычно используют силовые преобразователи с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Структура и алгоритм работы ШИМ преобразователя представлен далее. Формула для максимальной амплитуды вектора статорного напряжения при включении обмоток синхронной ЭМВПД с ПМ в звезду, в зависимости от значения напряжения в звене постоянного тока ( $U_d$ ) силового ШИМ преобразователя имеет вид (6.2).

$$|\vec{U}_{Smax}| = \frac{U_d}{\sqrt{3}} \quad (6.2)$$

Силу при этом необходимо ограничить на уровне некоторого перегрузочной силы ( $F_{ПЕР}$ ), который выбирается исходя из требуемой динамики привода и допустимого тока ( $I_{SLIM}$ ) силового преобразователя и синхронной ЭМВПД с ПМ, согласно (6.3).

$$F_{ПЕР} = \frac{3Z_P}{2} I_{SLIM} \Psi_f \quad (6.3)$$

Если посчитать максимальный момент в зависимости от частоты, то получится график, изображенный на рисунке 6.8.

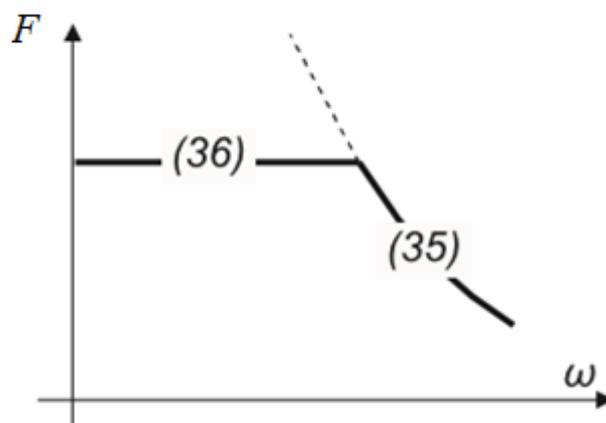


Рисунок 6.8. Зависимость силы от частоты колебания индуктора

Реализация ограничения силы в программе управления связана с довольно сложными вычислениями. В силу этого данную характеристику легче заранее посчитать и, аппроксимировав, например, кусочно-линейно, уже в этом виде использовать в программе управления.

На рисунке 6.9 приведена структурная схема системы регулирования скорости синхронной ЭМВПД с ПМ.

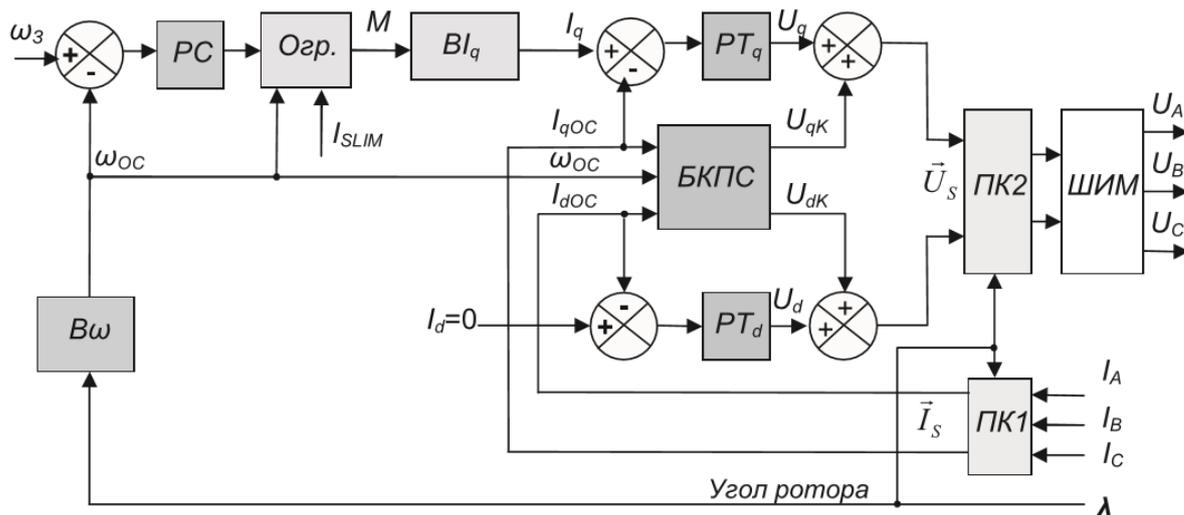


Рисунок 6.9. Структурная схема системы регулирования скорости синхронной ЭМВПД с ПМ

На рисунке 6.9 условно обозначены:

- $B_\omega$  – вычислитель скорости. Так как в системе регулирования используется датчик положения, данный узел осуществляет вычисление скорости по положению индуктора. Если система строится без датчика положения или скорости, то данный узел осуществляет оценку реальной скорости по модели косвенными методами;
- $PC$  – регулятор скорости. ПИ- или ПИД-регулятор, вырабатывающий из сигнала ошибки по скорости сигнал задания момента;
- $Oгр.$  – ограничитель момента. Ограничивает момент в зависимости от частоты и предельно допустимого значения статорного тока;
- $BI_q$  – вычислитель  $q$ -составляющей тока. Выполняет функцию вычисления  $q$ -составляющей тока статора;

- $PT_d$  – регулятор тока  $d$ -составляющей. П или ПИ-регулятор, вырабатывающий из сигнала ошибки по току сигнал задания напряжения по оси  $d$ ;
- $PT_q$  – регулятор тока  $q$ -составляющей. П или ПИ-регулятор, вырабатывающий из сигнала ошибки по току сигнал задания напряжения по оси  $q$ ;
- *БКПС* – блок компенсации перекрестных связей вычисляет напряжения компенсации перекрестных связей.

Токи координат регулируются с помощью вырабатываемых регуляторами токов напряжений координат.

Статорное напряжение координаты ( $d$  или  $q$ ) есть сумма двух составляющих, одна из которых зависит от тока данной координаты, а другая от составляющей тока ортогональной данной координате. Таким образом, регулирование  $I_q$  вызывает возмущающее воздействие в канале регулирования  $I_d$ . Соответственно регулирование  $I_d$  вызывает возмущение в канале регулирования  $I_q$ . Схема компенсации перекрестных связей, показанная на рисунке 6.9, позволяет избежать этих взаимных возмущений, что естественно, улучшает качество регулирования. Регулятор тока каждой координаты в такой схеме вырабатывает составляющую статорного напряжения, зависящую только от тока регулируемой координаты ( $U_q$  или  $U_d$ ), а составляющая, зависящая от другой (ортогональной) составляющей тока ( $U_{qк}$  или  $U_{dк}$ ), добавляется в напряжение координаты непосредственно.

*ПК1* – преобразователь координат осуществляет перевод тока статора из трехфазной неподвижной системы координат в двухфазную, а затем во вращающуюся систему  $dq$ .

*ПК2* – преобразователь координат осуществляет перевод вектора напряжения статора из вращающейся системы  $dq$  в неподвижную систему координат.

ШИМ – силовой ШИМ-преобразователь осуществляет реализацию вектора напряжения статора.

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) – это способ реализации вектора напряжения статора, применяемый в подавляющем большинстве систем векторного регулирования.

Аппаратно ШИМ реализуется с помощью трехфазного мостового инвертора, схема которого приведена на рисунке 6.10.

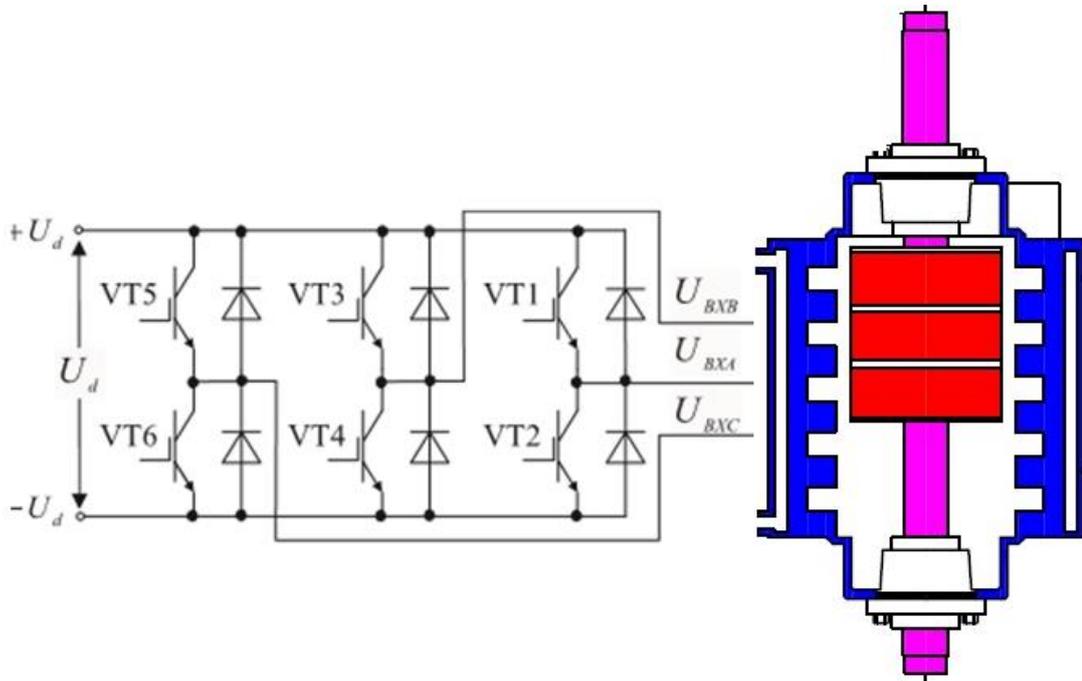


Рисунок 6.10. Трехфазный мостовой инвертор

С помощью этой схемы вход любой из статорных обмоток синхронной ЭМВПД с ПМ может быть подключен к отрицательному или положительному полюсу звена постоянного тока ( $U_d$ ). Напряжение звена постоянного тока получается после выпрямления и фильтрации силовой питающей сети ( $3 \times 380$  В, 50 Гц).

Пусть  $T_{ШИМ}$  – период модуляции, длительность которого намного меньше  $L/R$  постоянной времени статорной обмотки синхронной ЭМВПД с ПМ. Внутри периода ШИМ формируются две длительности:

$t_+$  – время подключения фазной статорной обмотки к  $+U_d$ ;

$t_-$  – время подключения фазной статорной обмотки к  $-U_d$ .

Меняя соотношение длительностей подключения внутри периода ШИМ, можно менять среднее напряжение, прикладываемое к обмотке. Статорные

обмотки имеют активно-индуктивный характер сопротивления и являются фильтрами, сглаживающими ток. Среднее значение тока будет зависеть от среднего значения приложенного напряжения, то есть от соотношения длительностей внутри периода ШИМ.

Меняя  $t^+$  и  $t^-$  в каждой фазе, можно менять среднее напряжение, прикладываемое к обмоткам, в частности, и по синусоидальному закону, с учетом фазовых сдвигов. То есть с помощью ШИМ возможно формирование трехфазной системы статорных токов и средних напряжений различной частоты и амплитуды. В дальнейшем под напряжением, формируемым ШИМ, понимается напряжение, усредненное на каждом периоде ШИМ.

Если формировать линейные напряжения трехфазной системы из напряжения звена постоянного тока с помощью ШИМ по синусоидальному закону, то их максимальная амплитуда получается меньше значения напряжения в звене постоянного тока, что иллюстрируется графиком на рисунке 6.11.

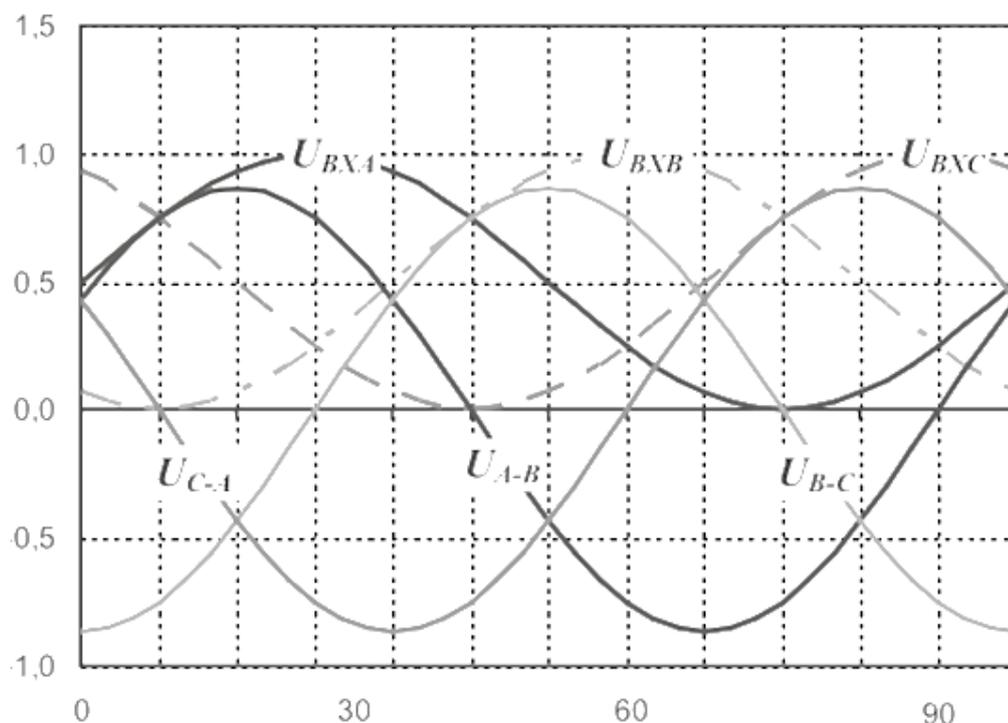


Рисунок 6.11. График зависимостей линейных напряжений полученных при помощи ШИМ и напряжений в звене постоянного тока от угловой характеристики синусоиды

На графике, согласно рисунку 6.11,  $U_{ВХА} = 0,5 + 0,5\sin\omega t$ ,  $U_{ВХВ} = 0,5 + 0,5\sin(\omega t - 120)$ ,  $U_{ВХС} = 0,5 + 0,5\sin(\omega t + 120)$  – это входные трехфазные напряжения синхронной ЭМВПД С ПМ, формируемые из единичного напряжения звена постоянного тока относительно нуля;  $U_{А-В} = U_{ВХА} - U_{ВХВ}$ ,  $U_{В-С} = U_{ВХВ} - U_{ВХС}$ ,  $U_{С-А} = U_{ВХС} - U_{ВХА}$  – линейные напряжения, получаемые как разность входных напряжений.

Максимальное значение линейного напряжения можно определить по (6.3), например, по напряжению  $U_{В-С}$  в точке 0 градусов.

$$U_{Лmax} = U_{В-С}(0^\circ) = \frac{1}{2} + \frac{\sin(-120^\circ)}{2} - \frac{1}{2} - \frac{\sin 120^\circ}{2} = -0,87. \quad (6.3)$$

При единичном напряжении звена постоянного тока максимальная амплитуда линейных напряжений составляет (0,87). То есть при преобразовании происходит недоиспользование напряжения звена постоянного тока примерно на 14 %.

Это вредное явление приводит к потере силы синхронной ЭМВПД с ПМ, обычно рассчитанного на полное напряжение сети, и неоптимальному использованию высоковольтных элементов силовой схемы (IGBT-ключей, высоковольтных конденсаторов).

Известны различные приемы, позволяющие полностью использовать напряжение звена постоянного тока и избежать потери амплитуды при ШИМ-преобразовании. Например, векторная ШИМ.

Суть метода – добавление к входным напряжениям некоего сигнала с периодом третьей гармоники формируемых линейных (фазных) напряжений.

При этом линейные напряжения:

- увеличивают свою амплитуду до 1;
- остаются синусоидальными и сдвинутыми на 120 градусов.

При векторной ШИМ реализация вектора напряжения осуществляется с помощью базовых векторов в трехфазной системе координат. Каждый базовый

вектор характеризуется определенным состоянием ключей инвертора, изображенного на рисунке 6.12.

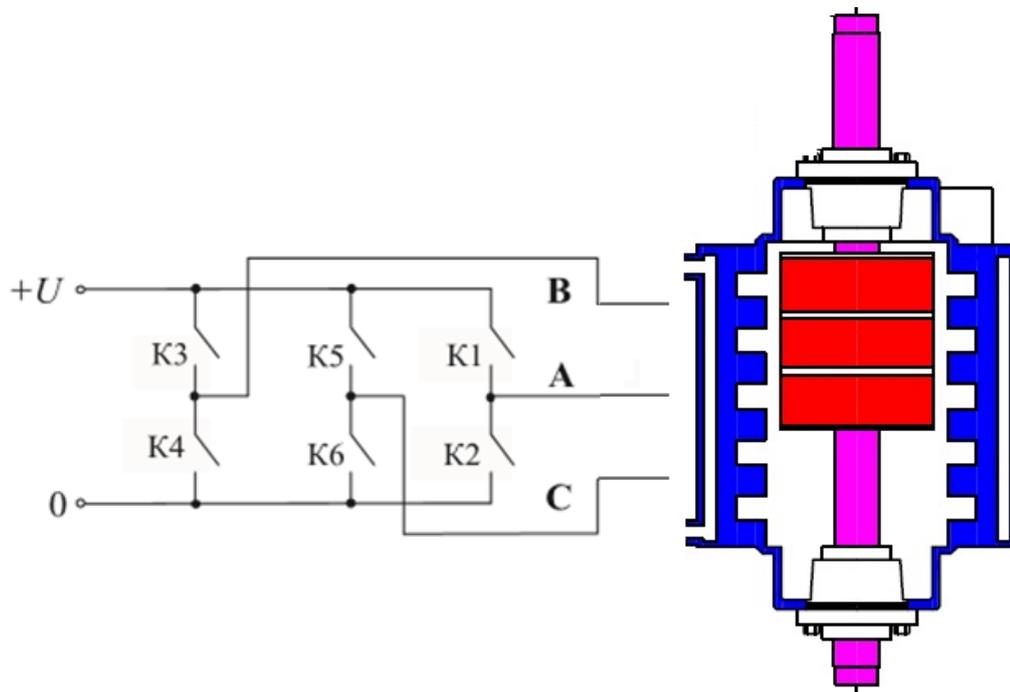
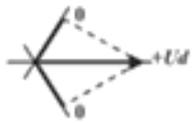
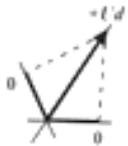
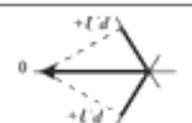
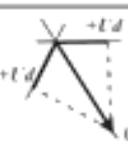


Рисунок 6.12. Трехфазный инвертор

В таблице 6.3 поясняется соответствие базовых векторов и состояния ключей K1...K6.

Для трехфазной симметричной системы, которой можно считать синхронной ЭМВПД с ПМ, фазные нагрузки равны, следовательно, амплитуда всех ненулевых базовых векторов составляет  $2U_d/3$ . Оба нулевых вектора  $V_7(0+)$  и  $V_8(0-)$ , несмотря на разное состояние ключей, обеспечивают одновременное приложение нулевых напряжений к обмоткам статора.

Таблица 6.3. Состояние силовых ключей в зависимости от положения полюсов индуктора относительно статора

Обозначение и положение базового вектора	Состояние ключей					
	фаза А		фаза В		фаза С	
	К1	К2	К3	К4	К5	К6
$V_1$ (А) 	Вкл.	Выкл.	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Вкл.
	1	0	0	1	0	1
$V_2$ (-С) 	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Выкл.	Вкл.
	1	0	1	0	0	1
$V_3$ (В) 	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Выкл.	Выкл.	Вкл.
	0	1	1	0	0	1
$V_4$ (-А) 	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Выкл.
	0	1	1	0	1	0
$V_5$ (С) 	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Выкл.
	0	1	0	1	1	0
$V_6$ (-В) 	Вкл.	Выкл.	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Выкл.
	1	0	0	1	1	0
$V_7$ (0+) На всех выходах инвертора $+U_d$	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Выкл.
	1	0	1	0	1	0
$V_8$ (0-) На всех выходах инвертора $0$	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Вкл.
	0	1	0	1	0	1

Вектор напряжения статора можно реализовать с помощью формирования расчетных длительностей базовых векторов внутри периода ШИМ. Набор используемых базовых векторов зависит от сектора угла, в котором лежит реализуемый вектор.

Заданный вектор напряжения в любом из секторов раскладывается на базовые векторы (рисунок 6.13).

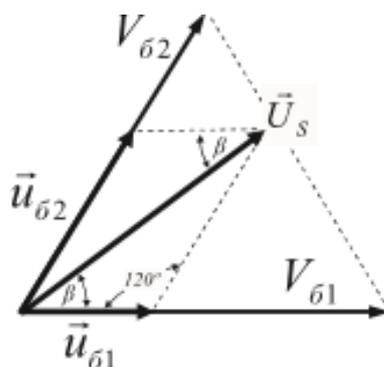


Рисунок 6.13. Составляющие вектора напряжения  $U_s$

При этом максимальная амплитуда вектора  $U_s$  имеет минимум, равный  $U_d/\sqrt{3}$ , в середине сектора (при  $\beta = 30^\circ$ ). В трехфазной системе при соединении нагрузки звездой фазное напряжение отличается от линейного именно на  $\sqrt{3}$ . Следовательно, можно утверждать, что напряжение звена постоянного тока будет использоваться полностью. Учитывая, что и амплитуда базовых векторов равна  $2U_d/3$ , можно перейти от модулей базовых составляющих к длительностям периода ШИМ, согласно (6.4).

$$\begin{aligned}
 t_{61} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{3t_{\text{ШИМ}}}{2U_d} |\vec{U}_s| \sin(60^\circ - \beta) = \frac{\sqrt{3}|\vec{U}_s|}{U_d} t_{\text{ШИМ}} \sin(60^\circ - \beta), \\
 t_{62} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{3t_{\text{ШИМ}}}{2U_d} |\vec{U}_s| \sin \beta = \frac{\sqrt{3}|\vec{U}_s|}{U_d} t_{\text{ШИМ}} \sin(\beta), \\
 t_0 &= t_{\text{ШИМ}} - t_{61} - t_{62},
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

где  $t_{\text{ШИМ}}$  – период ШИМ в секундах;

$t_{61}$ ,  $t_{62}$  и  $t_0$  – временные интервалы (в секундах) во время которых происходит включение первого, второго и нулевого базовых векторов.

Учитывая, что максимальное значение амплитуды вектора  $U_s$  равно  $U_d/\sqrt{3}$ , можно переписать выражения, показанные выше в относительных единицах в виде (6.5).

$$\begin{aligned}
 T_{61} &= U_S \sin(60^\circ - \beta), \\
 T_{62} &= U_S \sin \beta, \\
 T_0 &= 1 - T_{61} - T_{62},
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

где  $U_S = \frac{\sqrt{3}|\vec{U}_s|}{U_d}$  – амплитуда заданного вектора в относительных единицах;

$T_{61}$ ,  $T_{62}$  и  $T_0$  – части периода ШИМ, во время которых происходит включение первого, второго и нулевого базовых векторов.

Последовательность включения базовых векторов внутри периода ШИМ показана на рисунке 6.14.

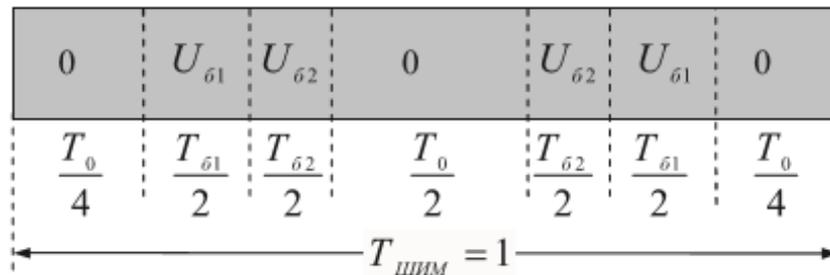


Рисунок 6.14. Последовательность включения базовых векторов внутри периода ШИМ

Векторная ШИМ с такой последовательностью включения базовых векторов внутри периода используется в подавляющем большинстве современных преобразователей частоты. В таблице 6.4 показан алгоритм включения базовых векторов в периоде ШИМ в зависимости от сектора угла.

Таблица 6.4. Алгоритм включения базовых векторов в периоде ШИМ в зависимости от сектора угла

Сектор, град		Период ШИМ								
1	0...60	Время	$T_0/4$	$T_{61}/2$	$T_{62}/2$	$T_0/2$	$T_{62}/2$	$T_{61}/2$	$T_0/4$	
		Вектор	$V_8$	$V_1$	$V_2$	$V_7$	$V_2$	$V_1$	$V_8$	
		Фазы	А	_____		_____		_____		_____
			В	_____	_____		_____	_____		_____
С	_____		_____	_____	_____	_____	_____	_____		
2	60...120	Время	$T_0/4$	$T_{62}/2$	$T_{61}/2$	$T_0/2$	$T_{61}/2$	$T_{62}/2$	$T_0/4$	
		Вектор	$V_8$	$V_3$	$V_2$	$V_7$	$V_2$	$V_3$	$V_8$	
		Фазы	А	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
			В	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
С	_____		_____	_____	_____	_____	_____	_____		
3	120...180	Время	$T_0/4$	$T_{61}/2$	$T_{62}/2$	$T_0/2$	$T_{62}/2$	$T_{61}/2$	$T_0/4$	
		Вектор	$V_8$	$V_3$	$V_4$	$V_7$	$V_4$	$V_3$	$V_8$	
		Фазы	А	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
			В	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
С	_____		_____	_____	_____	_____	_____	_____		
4	180...240	Время	$T_0/4$	$T_{62}/2$	$T_{61}/2$	$T_0/2$	$T_{61}/2$	$T_{62}/2$	$T_0/4$	
		Вектор	$V_8$	$V_5$	$V_4$	$V_7$	$V_4$	$V_5$	$V_8$	
		Фазы	А	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
			В	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
С	_____		_____	_____	_____	_____	_____	_____		
5	240...300	Время	$T_0/4$	$T_{61}/2$	$T_{62}/2$	$T_0/2$	$T_{62}/2$	$T_{61}/2$	$T_0/4$	
		Вектор	$V_8$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_6$	$V_5$	$V_8$	
		Фазы	А	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
			В	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
С	_____		_____	_____	_____	_____	_____	_____		
6	300...360	Время	$T_0/4$	$T_{62}/2$	$T_{61}/2$	$T_0/2$	$T_{61}/2$	$T_{62}/2$	$T_0/4$	
		Вектор	$V_8$	$V_1$	$V_6$	$V_7$	$V_6$	$V_1$	$V_8$	
		Фазы	А	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
			В	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
С	_____		_____	_____	_____	_____	_____	_____		

Отличие в порядке коммутации первого и второго базовых векторов ( $T_{61}$  и  $T_{62}$ ) в четных и нечетных секторах сделано для минимизации динамических потерь в ключах инвертора. При таком порядке коммутации переключение векторов внутри секторов и при переходе из сектора в сектор осуществляется с помощью переключения только в одном плече инвертора.

Для того чтобы установить вектор напряжения амплитудой  $U_S$  в положение  $\alpha$ , необходимо:

- определить сектор  $\alpha$ ;

- посчитать угол внутри сектора ( $\beta$ );
- вычислить длительности  $T_{\delta 1}$ ,  $T_{\delta 2}$  и  $T_0$  (в относительных единицах);
- для каждой фазы вычислить время ее подключения к  $+U_d$  в периоде ШИМ ( $T_{+A}$ ,  $T_{+B}$  и  $T_{+C}$ ).

Для этого вводятся три промежуточные переменные, которые записываются в виде (6.6).

$$\begin{aligned} t_1 &= T_{\delta 1} + T_{\delta 2} + T_0/2, \\ t_2 &= T_{\delta 2} + T_0/2, \\ t_3 &= T_{\delta 1} + T_0/2. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Значения  $T_{+A}$ ,  $T_{+B}$  и  $T_{+C}$  определяются значением переменных  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  и зависят от сектора угла так, как показано в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Значения временных промежутков  $T_{+A}$ ,  $T_{+B}$  и  $T_{+C}$

Сектор, град	$T_{+A}$	$T_{+B}$	$T_{+C}$
0...60	$t_1$	$t_2$	$T_0/2$
60...120	$t_3$	$t_1$	$T_0/2$
120...180	$T_0/2$	$t_1$	$t_2$
180...240	$T_0/2$	$t_3$	$t_1$
240...300	$t_2$	$T_0/2$	$t_1$
300...360	$t_1$	$T_0/2$	$t_3$

Зная  $T_{+A}$ ,  $T_{+B}$  и  $T_{+C}$ , можно реализовать данные временные промежутки в каждой фазе так, как показано на рисунке 6.15.

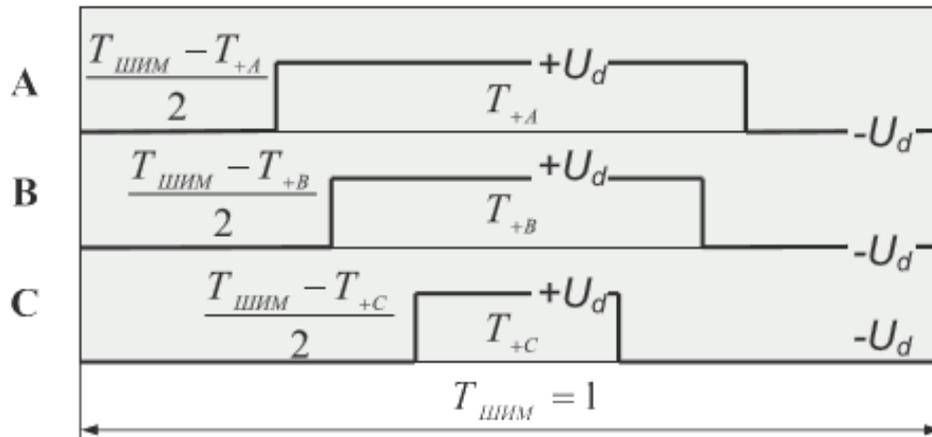


Рисунок 6.15. Временные промежутки при формировании ШИМ

На рисунке 6.16 показаны графики, построенные по описанному выше алгоритму при следующих условиях:

- напряжение в звене постоянного тока  $U_d = 1$ ;
- заданная амплитуда вектора  $U_s = U_d / \sqrt{3}$ ;
- фаза заданного вектора  $U_s$  изменяется от 0 до 100% смещения полюса.

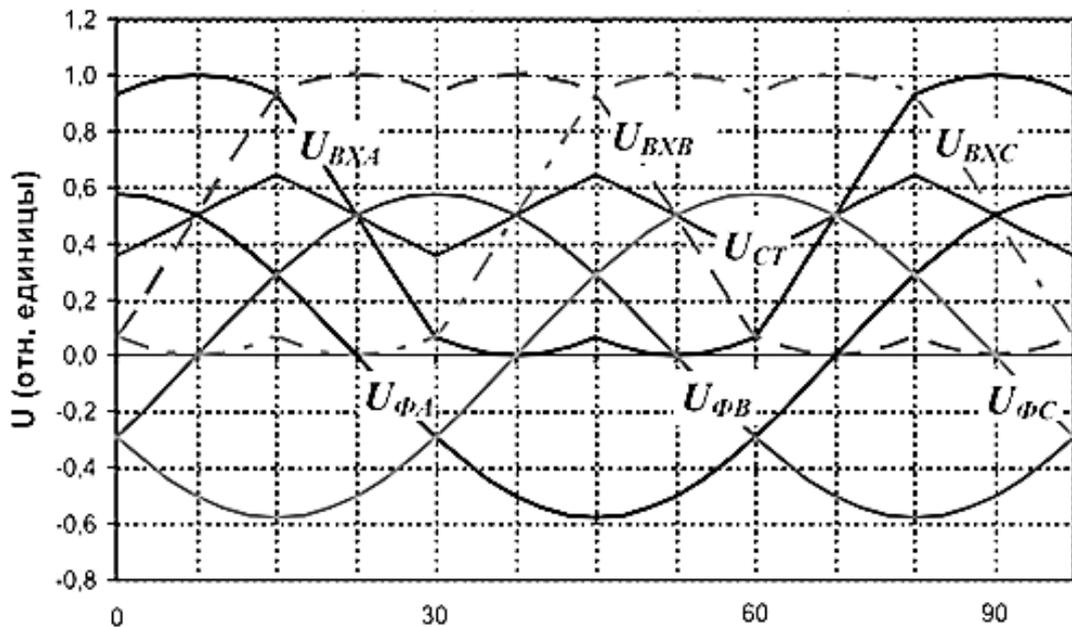


Рисунок 6.16. =Графики напряжений до и после инвертора

На рисунке 6.16. приведены графики следующих величин:

- $U_{BXA}$ ,  $U_{BXB}$ ,  $U_{BXC}$  – выходные напряжения фаз инвертора относительно нуля звена постоянного тока;
- $U_{CT}$  – напряжение средней точки трехфазной соединенной звездой симметричной нагрузки относительно нуля звена постоянного тока;
- $U_{\phi A}$ ,  $U_{\phi B}$ ,  $U_{\phi C}$  – фазные напряжения трехфазной соединенной звездой симметричной нагрузки. Видно, что выходные напряжения инвертора имеют достаточно причудливую форму, далекую от синусоидальной, а средняя точка нагрузки получила треугольное смещение с частотой третьей гармоники заданного статорного напряжения. Но фазные напряжения при этом синусоидальны, сдвинуты на 120 градусов и имеют амплитуду, равную  $1/\sqrt{3}$ , что свидетельствует о полном использовании напряжения звена постоянного тока.

Используемые технические средства

Для реализации алгоритма программы построена система управления синхронной ЭМВПД с ПМ, основанная на таких основных блоках как:

- Персональный компьютер;
- Модуль центрального процессора FPGA системы управления обратной электрической машины возвратно-поступательного действия 24В, ETX 3.0 с AMD Geode LX800, CS5536AD + ITE8888G, DDR RAM 2Гб, VGA, TTL, IDE, LPT, COM, PS/2, SATA, LAN, USB2ГГц;
- Модуль управления силовым блоком коммутации системы управления обратной электрической машины возвратно-поступательного действия AMD LX 800 500МГц, 1Гб SDRAM, 4Гб Flash, RS-232/485, Ethernet, WES 2009, 400В, 250А;
- Модуль согласования сигналов АРМ, стенда и системы управления обратной электрической машины возвратно-поступательного действия 10/100 BaseT Ethernet, 10/100/1000 BaseT Ethernet, Gigabit SFP, ModBus, CanOpen, 0-10В, 4-12мА;

- Силовой модуль в составе сборок силовых IGBT транзисторов CM200DY 12H, 2 IGBT 600V 200A 3 gen (H Series), диодного моста VS 110MT120KB (3ф 110A 1200B), датчика тока CSLA1DJ.

Вызов и загрузка

Программа вызывается путем запуска исполняемого файла, имеющего расширение «exe», при этом она загружается в отведенную ей область оперативной памяти и «прошивается» в модуль центрального процессора FPGA.

Входными точками в программу являются предлагаемые пользователю заранее заготовленные наборы параметров.

Входные данные

Входными данными программы являются:

- метод связи с модулем центрального процессора;
- режим работы синхронной ЭМВПД с ПМ ;
- табличная программа работы синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме двигателя, представляющая набор команд на изменение положения либо на занятие определенного положения.

### 6.2.2. Описание применения программы управления

Назначение программы

Программа «Управление линейной машиной» предназначена для обеспечения работоспособности электрической машины возвратно-поступательного действия (синхронной ЭМВПД с ПМ ), а также для реализации защит при аварийных режимах работы. Программа имеет максимальное быстродействие за счет применения центрального процессора FPGA.

При этом программа формируется на персональном компьютере и загружается в процессор системы при запуске синхронной ЭМВПД с ПМ .

Условия применения

Для работы программы требуется персональный компьютер, организующий человеко-машинный интерфейс, модуль центрального процессора FPGA, модуль

управления силовым блоком коммутации системы управления, модуль согласования сигналов АРМ, стенда и системы управления. Для обмена данными между модулями программа использует встроенные интерфейсы связи.

Полученная за счет комплексного применения блоков система управления должна имеет возможность управлять, как одним, так и несколькими сочлененными модулями электрической машины, при этом каждый модуль имеет в своем составе модули центрального процессора, модули согласования и модули управления силовыми блоками.

Все блоки системы соединены единой информационной шиной, работающей с протоколом CanOpen, ProfiBus и ModBus.

#### Описание задачи

Основная задача, возлагаемая на программу, заключается в формировании напряжения питания обмоток синхронной ЭМВПД с ПМ при постоянном контроле состояния машины.

Данная задача решена путем построения алгоритма управления, основанного на векторном широтно-импульсном управлении. Программа в каждый момент времени вычисляет положение индуктора и в зависимости от задания формирует напряжение и ток в обмотках машины, осуществляющий либо удержание индуктора в заданном положении, либо его перемещение с заданной скоростью в требуемую точку.

Одновременно ведется сбор данных о состоянии машины в основном по данным полученным от датчиков температуры. Применяемый алгоритм позволяет по скорости изменения температуры вычислить состояние обмоток статора, магнитов индуктора и нагрузку на двигатель-генератор. При этом формируется сигнал для испытательного стенда о изменении производительности системы охлаждения.

#### Входные и выходные данные

Входными данными программы являются режим работы синхронной ЭМВПД с ПМ, скорость и величина перемещения индуктора, предельные данные температуры обмоток статора и магнитов индуктора.

Выходными данными программы являются сигналы, сформированные для управления ключами силовых IGBT транзисторов.

Программа «Управление линейной машиной» осуществляет взаимодействие оператора и модулей управления и связи, входящих в состав СУММЭМ. Программа выполняется в среде «Windows» серии XP, 7, 8 или 10 и поддерживает платформу Microsoft .NET Framework 3.5 или выше.

Программа написана в среде программирования Microsoft VisualStudio на языках C++ и VisualBasic.

Программа предназначена для обеспечения работоспособности электрической машины возвратно-поступательного действия (синхронной ЭМВПД с ПМ ), а также для реализации защит при аварийных режимах работы. Программа имеет максимальное быстродействие за счет применения центрального процессора FPGA.

При этом программа формируется на персональном компьютере и загружается в процессор системы при запуске синхронной ЭМВПД с ПМ .

#### Структура программы

Программа состоит из блоков формирования начальных данных, загрузки данных в центральный процессор системы, блоков контроля состояния и блоков хранения информации.

Программа состоит из исполняемого файла и вспомогательных библиотек, осуществляющих взаимодействие с модулями по различным протоколам обмена данными такими как Net.dll, ModBus.dll, ProfiBus.dll, CanOpen.dll.

При работе программы на жестком диске формируется файл протокола, имеющий имя, соответствующее дате и времени начала работы программы, например программа, запущенная 23 мая 2016 года в 12:05 формирует файл протокола 23\_05\_16\_12\_06\_arhiv.txt. дальнейшее использование сохраненных данных возможно в программе Microsoft Excel, при открытии в которой появляется таблица с исходными данными, заданными оператором, временем измерения, наименованием величины и непосредственно измеренными величинами.

## Настройка программы

Настройка программы заключается в установлении связи с микропроцессорным модулем и заключается в выборе протокола связи и задании его параметров (скорость обмена, четность, число бит и др.). данные настройки заданы по умолчанию и как правило не требуют изменений. Остается только убедиться в установлении связи по появившемуся сообщению «Связь установлена» (рисунок 6.17).

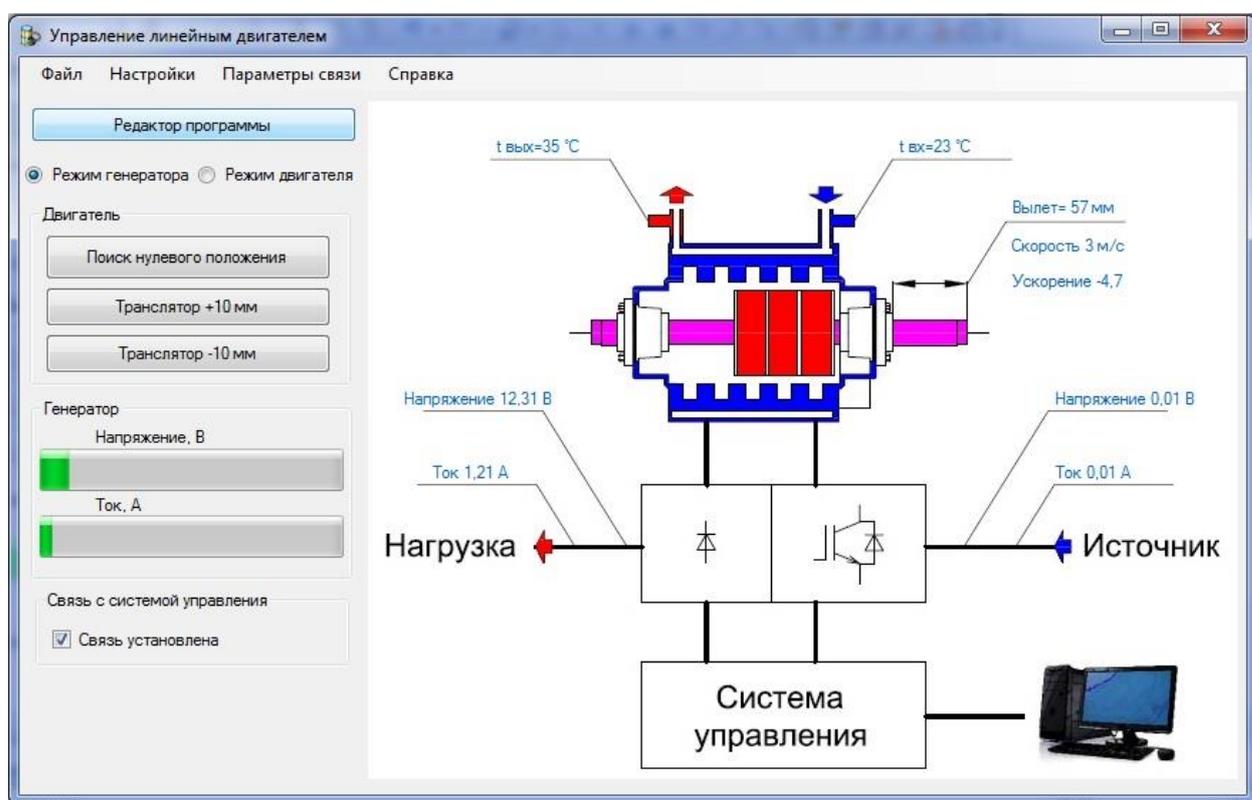


Рисунок 6.17. Внешний вид программы, находящейся в режиме управления – генератор

После этого выбирается режим работы объекта испытаний и загружается таблица последовательных команд.

В программе имеется возможность задания предельно допустимых параметров машины. Внимание необходимо быть осторожным с их изменением, так как необдуманные действия могут привести к поломке объекта испытания.

Все действия по изменению настроек программы доступны в меню (рисунок 6.18-6.21).

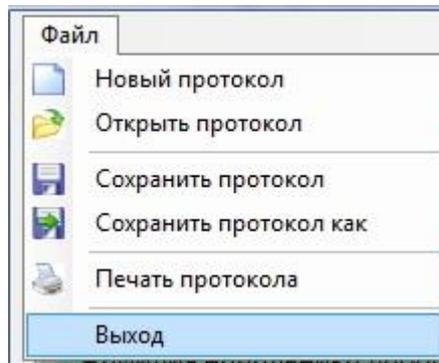


Рисунок 6.18. Меню программы «Файл»

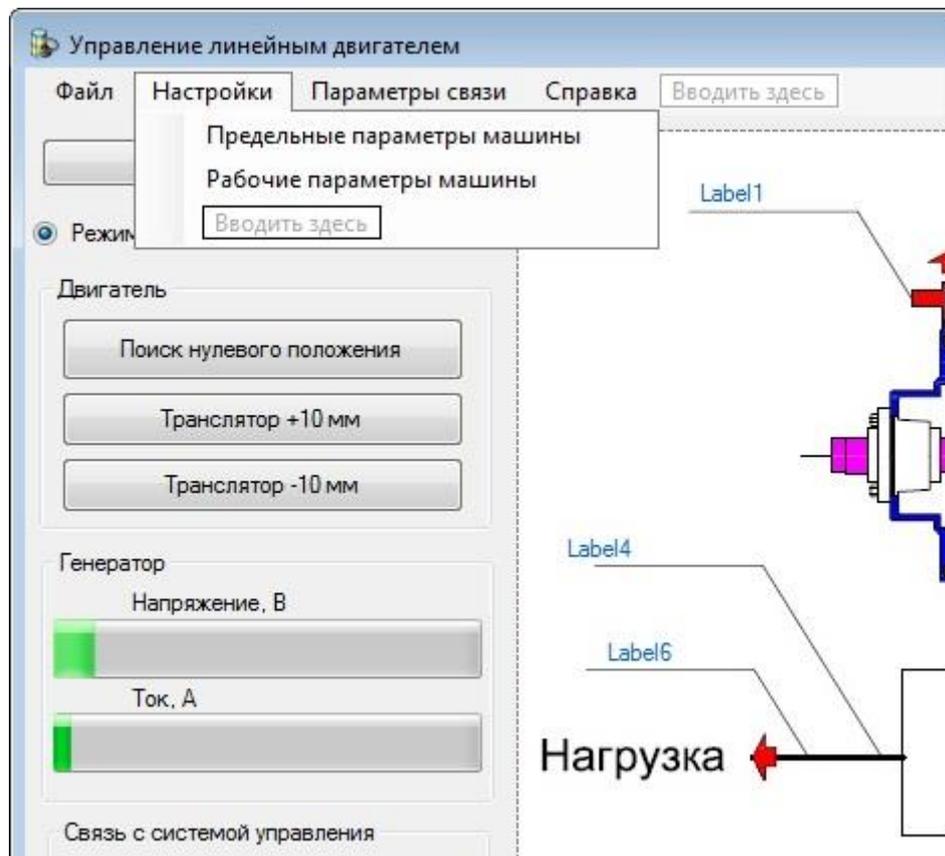


Рисунок 6.19. Меню программы «Настройки»

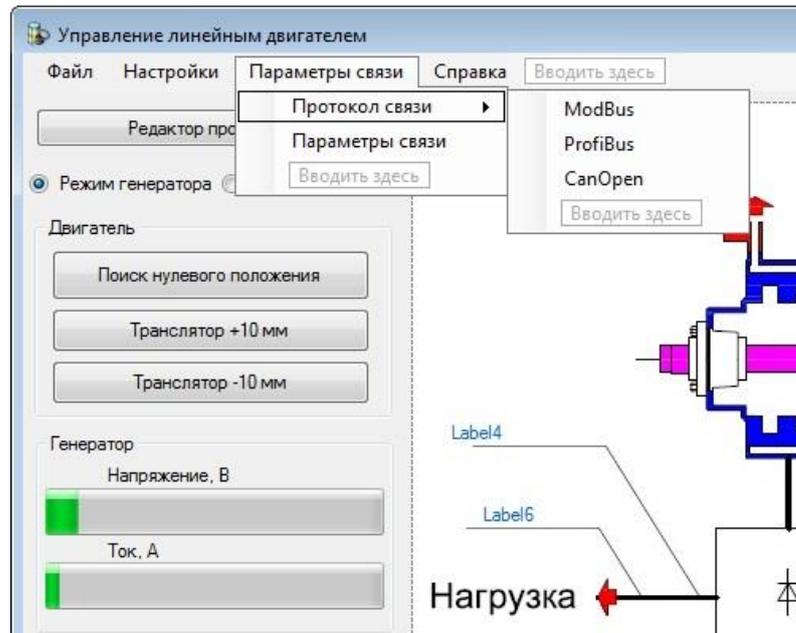


Рисунок 6.20. Меню программы «Параметры связи»

### Проверка программы

Проверка программы заключается в ее работоспособности и отсутствии сообщений об ошибках при попытке установления связи с микропроцессорным модулем (рисунок 6.21).

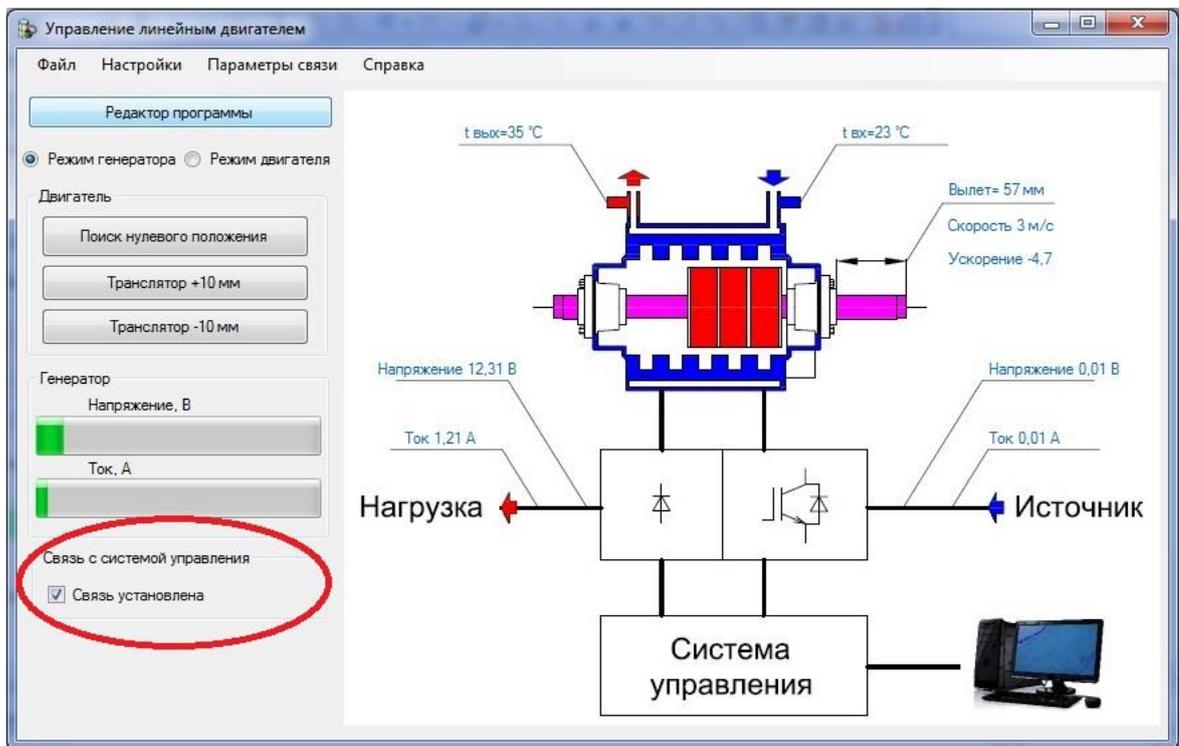


Рисунок 6.21. Сообщение об установлении связи с микропроцессорным модулем

## Дополнительные возможности

Дополнительные возможности программы заключаются в доступе к корректировке алгоритмов формирования напряжения питания синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме двигателя. Доступ к данным параметрам осуществляется только разработчиком.

### Сообщения системному программисту

В ходе выполнения настройки, проверки программы, а также в ходе выполнения программы могут возникнуть ненормальные ситуации, связанные с выходом из строя какого-либо модуля системы. При этом на экран компьютера выводится системное сообщение пример, которого показан на рисунках 6.22 и 6.23.

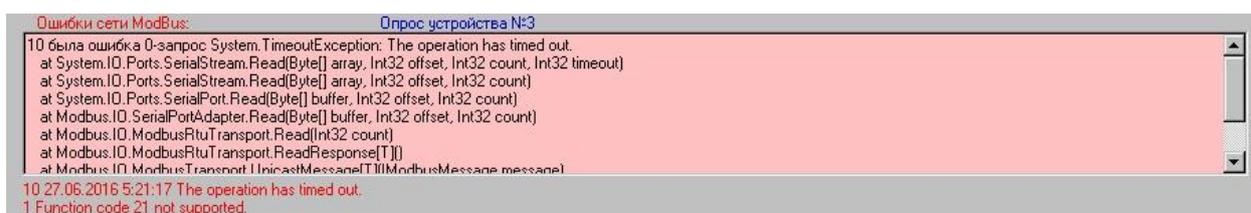


Рисунок 6.22. Сообщение о пропадании связи с микропроцессорным модулем

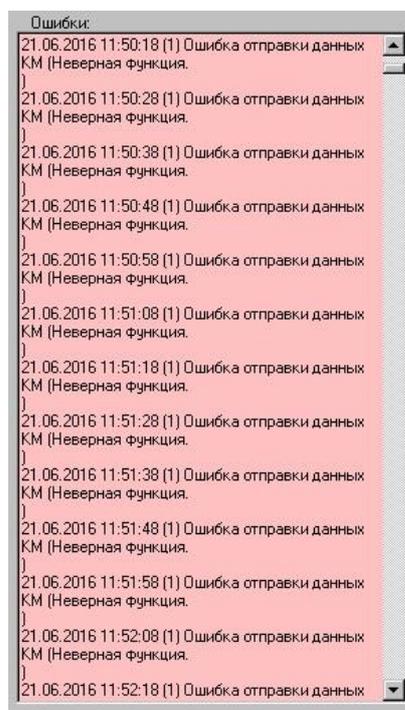


Рисунок 6.23. Сообщение о пропадании связи с указанием причины

При этом на жестком диске создается файл ошибок и аварийных ситуаций и всем устройствам системы посылается широковещательная команда «СТОП!». В этом случае необходимо прекратить проведение эксперимента.

При этом программа формируется на персональном компьютере и загружается в процессор системы при запуске синхронной ЭМВПД с ПМ .

#### Условия выполнения программы

Условием, необходимым для выполнения программы является наличие свободного пространства на жестком диске компьютера (не менее 100 Мбайт) и в оперативной памяти (не менее 1000 Гбайт), а также подключение по шине связи всех модулей системы и подача на них соответствующих напряжений питания.

#### Выполнение программы

Для начала выполнения программы необходимо на жестком диске компьютера найти исполняемый файл («ASUD.EXE»), находящийся в директории, в которую программа была установлена (как правило это директория «C:\ASUD»). После этого дождаться появления основного экрана программы (рисунок 6.24).

Возможно до начала работы с программой потребуется ее настройка, которая заключается в установлении связи с микропроцессорным модулем, выборе протокола связи и задании его параметров (скорость обмена, четность, число бит и др.). Данные настройки заданы по умолчанию и как правило не требуют изменений. Остается только убедиться в установлении связи по появившемуся сообщению «Связь установлена» (рисунок 6.24).

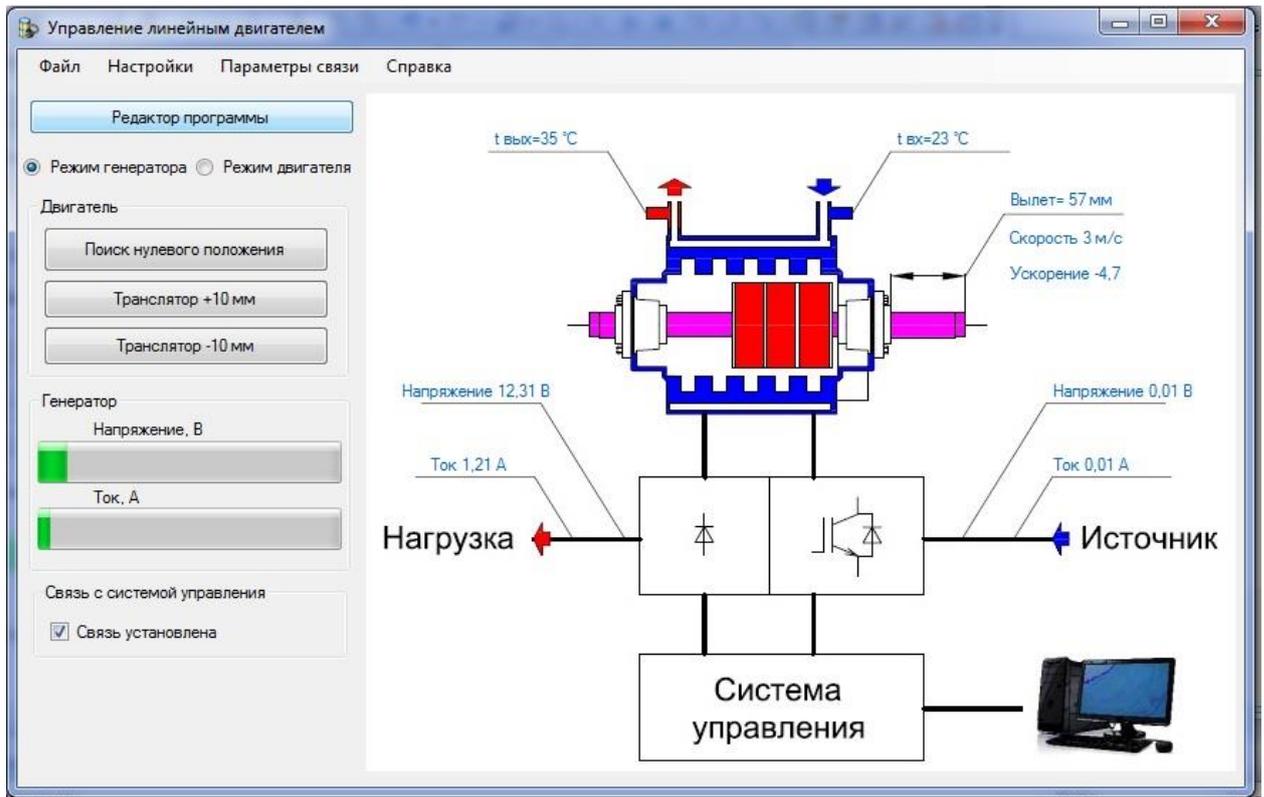


Рисунок 6.24. Внешний вид программы, находящейся в режиме управления – генератор

После этого выбирается режим работы объекта испытаний и загружается таблица последовательных команд. В программе имеется возможность задания предельно допустимых параметров машины. Внимание необходимо быть осторожным с их изменением, так как необдуманные действия могут привести к поломке объекта испытания. Все действия по изменению настроек программы доступны в меню (рисунок 6.25 – 6.27).

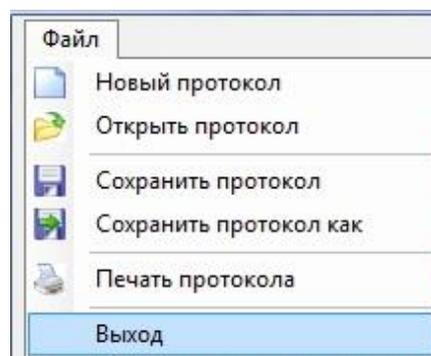


Рисунок 6.25. Меню программы «Файл»

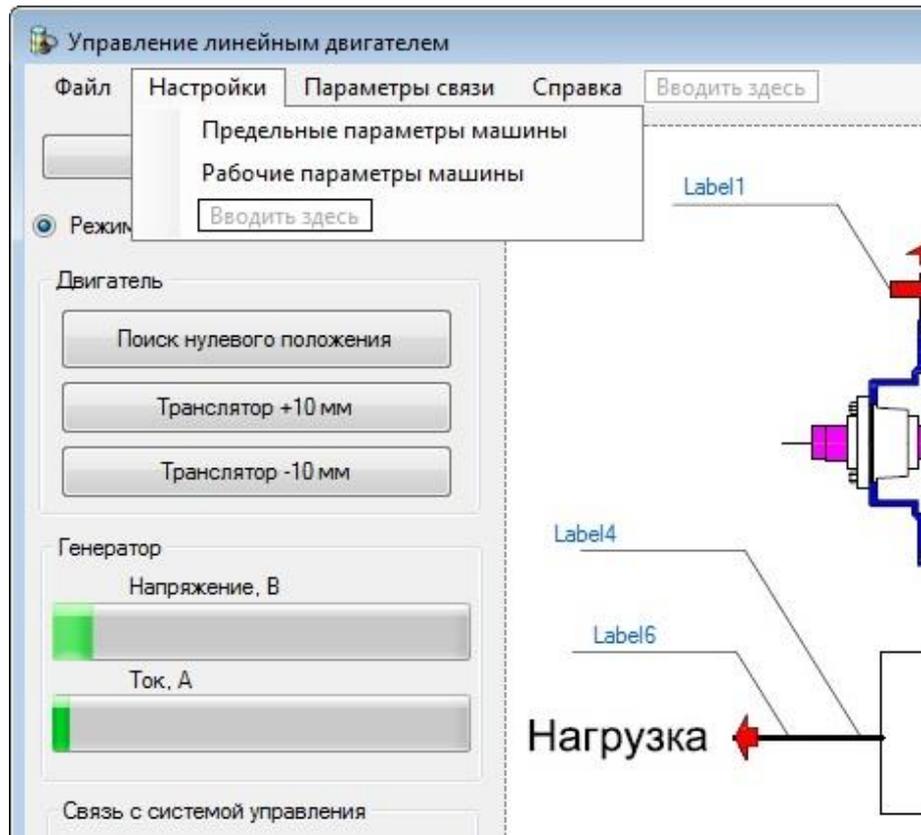


Рисунок 6.26. Меню программы «Настройки»

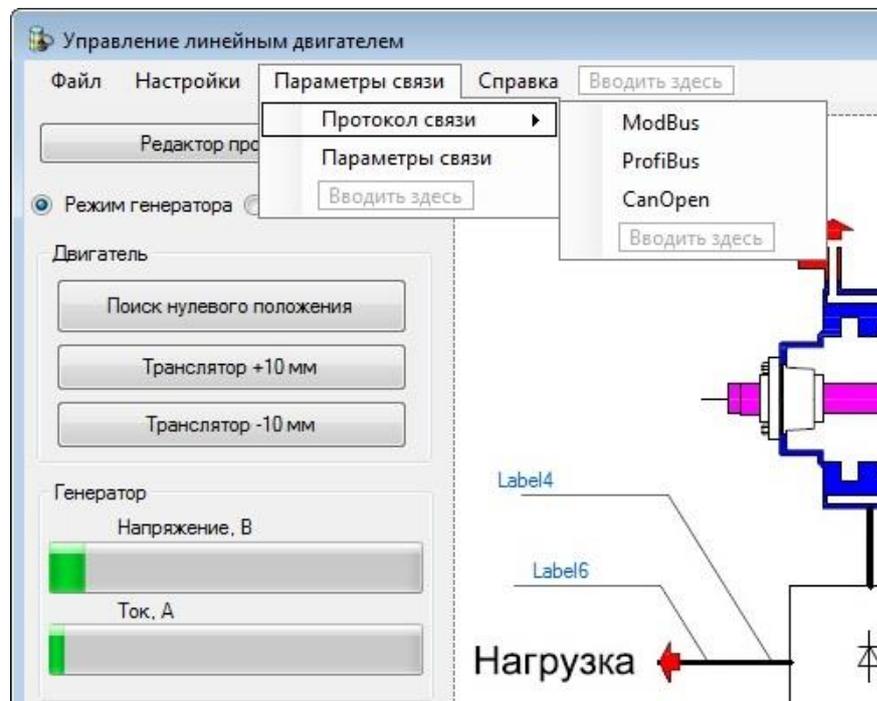


Рисунок 6.27. Меню программы «Параметры связи»

Для упрощения визуального контроля состояния машины. В программу введены индикаторы, которые имеют зеленый цвет, когда отображаемые ими параметры находятся в заданных пределах и не имеют тенденций к выходу на критические состояния (рисунок 6.27).

После начала проведения эксперимента, все данные, получаемые от системы, отображаются на графическом поле с привязкой их к месту получения (рисунок 6.28).

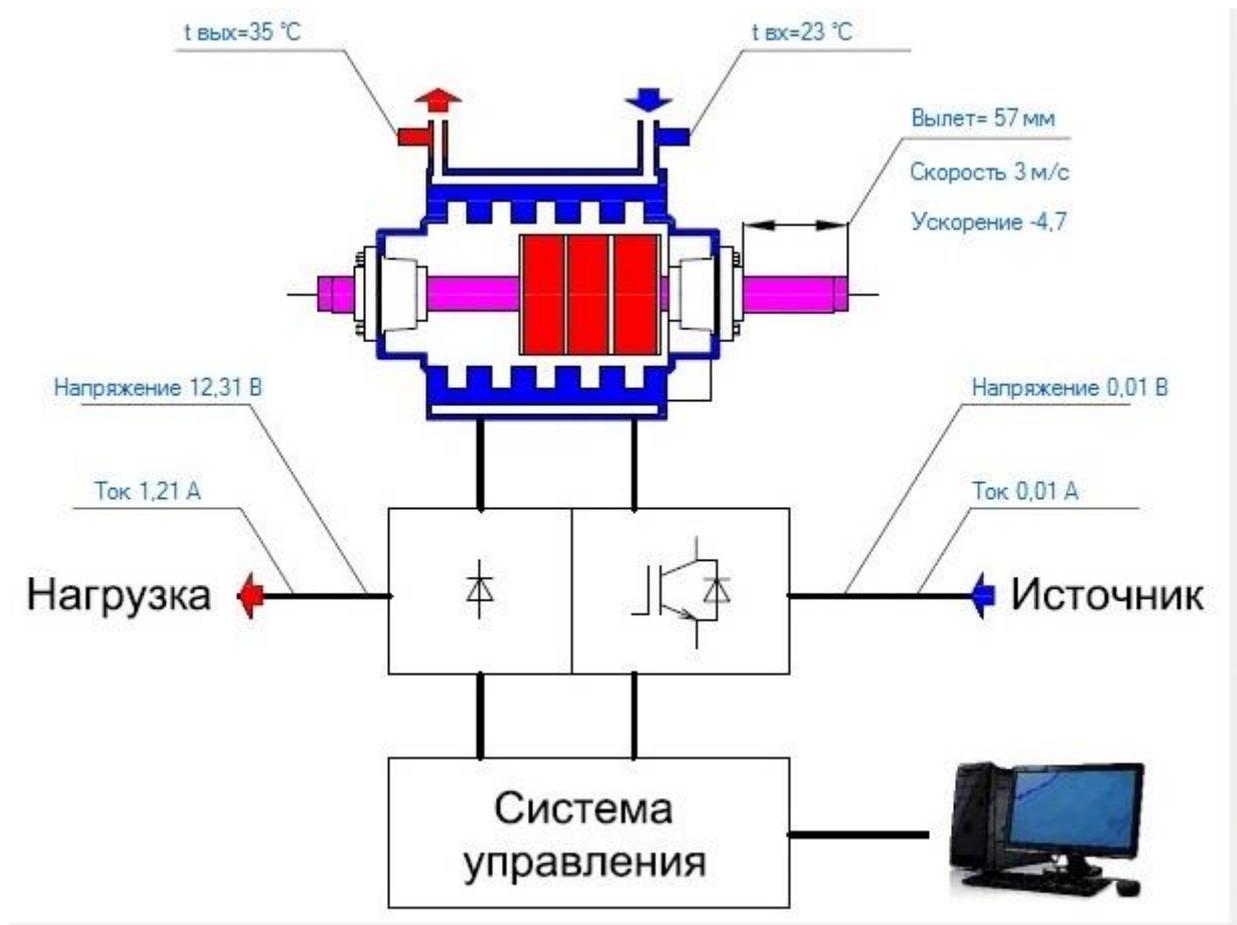


Рисунок 6.28. Меню программы «Параметры связи»

### Сообщения оператору

В ходе выполнения настройки, проверки программы, а также в ходе выполнения программы могут возникнуть ненормальные ситуации, связанные с выходом из строя какого-либо модуля системы. При этом на экран компьютера

выводится системное сообщение пример, которого показан на рисунках 6.29 и 6.30.

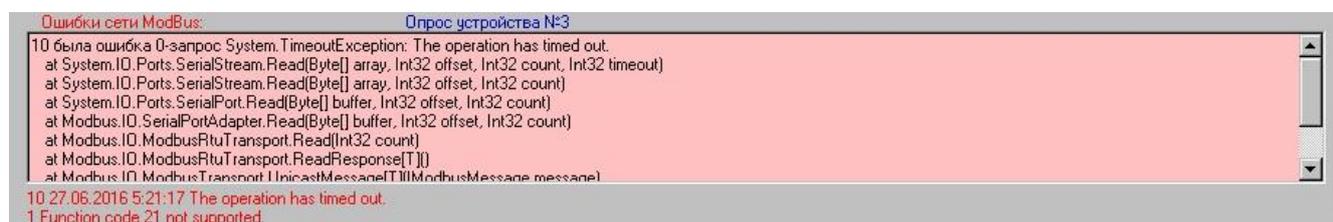


Рисунок 6.29. Сообщение о пропадании связи с микропроцессорным модулем

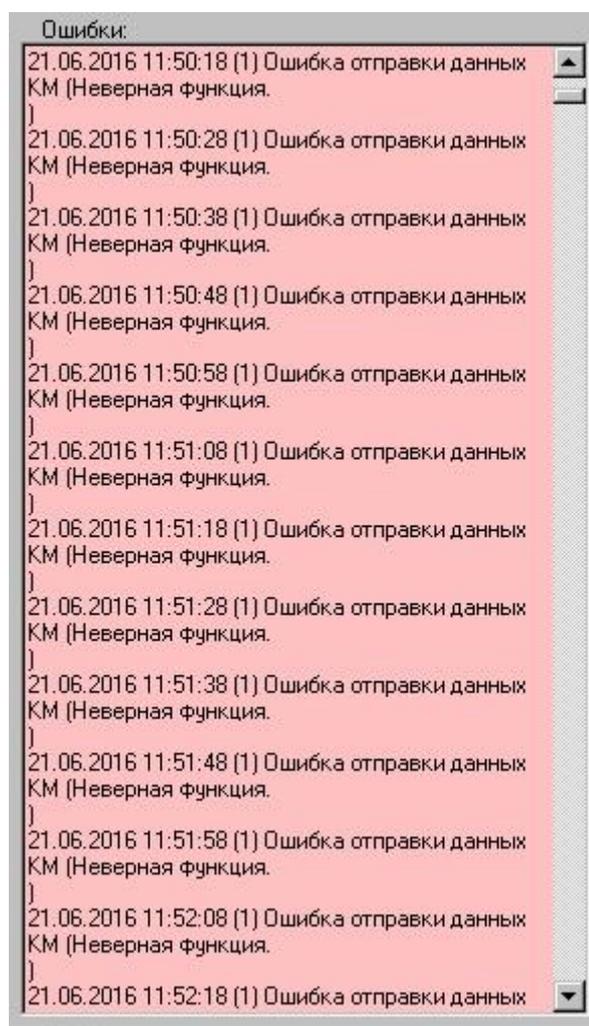


Рисунок 6.30. Сообщение о пропадании связи с указанием причины

При этом на жестком диске создается файл ошибок и аварийных ситуаций и всем устройствам системы посылается широковещательная команда «СТОП!». В этом случае необходимо прекратить проведение эксперимента. Для этого

необходимо отключить источник напряжения, питающий силовой модуль в режиме работы «двигатель», либо отключить нагрузочный модуль при режиме работы «генератор» и остановить испытательный стенд.

### 6.3. Изготовление экспериментального образца электрической машины возвратно-поступательного действия возвратно-поступательного действия

Катушки синхронной ЭМВПД с ПМ изготавливаются из изолированной медной обмотки в виде ленты с количеством обмоток 5,75. Все катушки наматываются вручную с помощью специально разработанного намоточного устройства. Соединение катушек выполнено последовательно в трехфазную систему «звезда». Соединение катушек осуществляется в свободном от листов электротехнической стали промежутке наверху статора (рисунок 6.31) [119 ].

Каждая катушка проходит три теста для надежной работы:

- 1) У каждой катушки проверяются геометрические размеры;
- 2) Каждая катушка проходит проверку изоляции;
- 3) В температурном тесте каждая катушка нагревается током в 100 А в течении 10 с. После теста проверяется сопротивление катушки.

При изготовлении синхронной ЭМВПД с ПМ используются только катушки, прошедшие все 3 теста.



Рисунок 6.31. Укладка статора и соединение катушек



Рисунок 6.32. Кожух охлаждения

При изготовлении синхронной ЭМВПД с ПМ используется высокотемпературная пайка концов обмоток. Она позволяет создать стабильное соединение и термостойкость до 300 °С.

Статор заливается компаундом, так как в процессе работы обратной синхронной ЭМВПД с ПМ возникают колебания зубцов листов, из которого набран статор. Этот эффект может привести к появлению шума и к разрушению изоляции катушек, находящихся на статоре. Спаянные катушки, как показано на рисунке 6.31, закладываются шихтованными листами и проходят многократные проверки изоляции.

Перед заливкой статора в него закладываются температурные датчики и сам статор помещается в кожух с каналами для охлаждающей жидкости (рисунок 6.32). Заливка производится вакуумным способом.

Транслятор состоит из вала, к которому на стойках приварен цилиндр. С одного торца к внутренней поверхности цилиндра приварен фланец. На цилиндре поочередно располагаются шесть магнитов и пять диэлектрических колец. С одной стороны, они удерживаются буртиком цилиндра, с другой стороны поджимаются упором. Упор крепится к фланцу болтовым соединением (шесть болтов М8 с пружинными шайбами).

#### 6.4. Сравнительный анализ результатов имитационного и физического моделирования, верификация

##### 6.4.1. КПД синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме генератора

КПД линейного генератора рассчитываются по формуле (6.7).

$$\eta = \frac{P_{\text{эл}}}{P_{\text{мех}}} \quad (6.7)$$

где  $P_{\text{эл}}$  — выходная мощность синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме генератора, Вт,

$P_{\text{мех}}$  — механическая мощность, передаваемая от приводного механизма.

Так как механическая мощность от приводного механизма не всегда можно точно измерить, ввиду линейного перемещения индуктора между двумя крайними положениями, формулу (2.1) рациональнее представить в виде (6.).

$$\eta = \frac{P_{\text{эл}}}{P_{\text{эл}} + P_{\text{стали}} + P_{\text{меди}} + P_{\text{доб}}}, \quad (6.8)$$

где  $P_{\text{ст}}$  – потери мощности в стали статора, Вт;

$P_{\text{меди}}$  – потери мощности в обмотке статора, Вт;

$P_{\text{доб}}$  – добавочные потери, Вт.

КПД синхронной ЭМВПД С ПМ в режиме генератора зависит от частоты перемещения индуктора  $f$ , хода индуктора ( $x_m$  - амплитуда колебаний) и тока статора. В связи с этим характеристика КПД представлена в зависимости от выдаваемой электрической мощности. На рисунках 6.33 и 6.34 представлены КПД генератора при различных значениях хода индуктора [120].

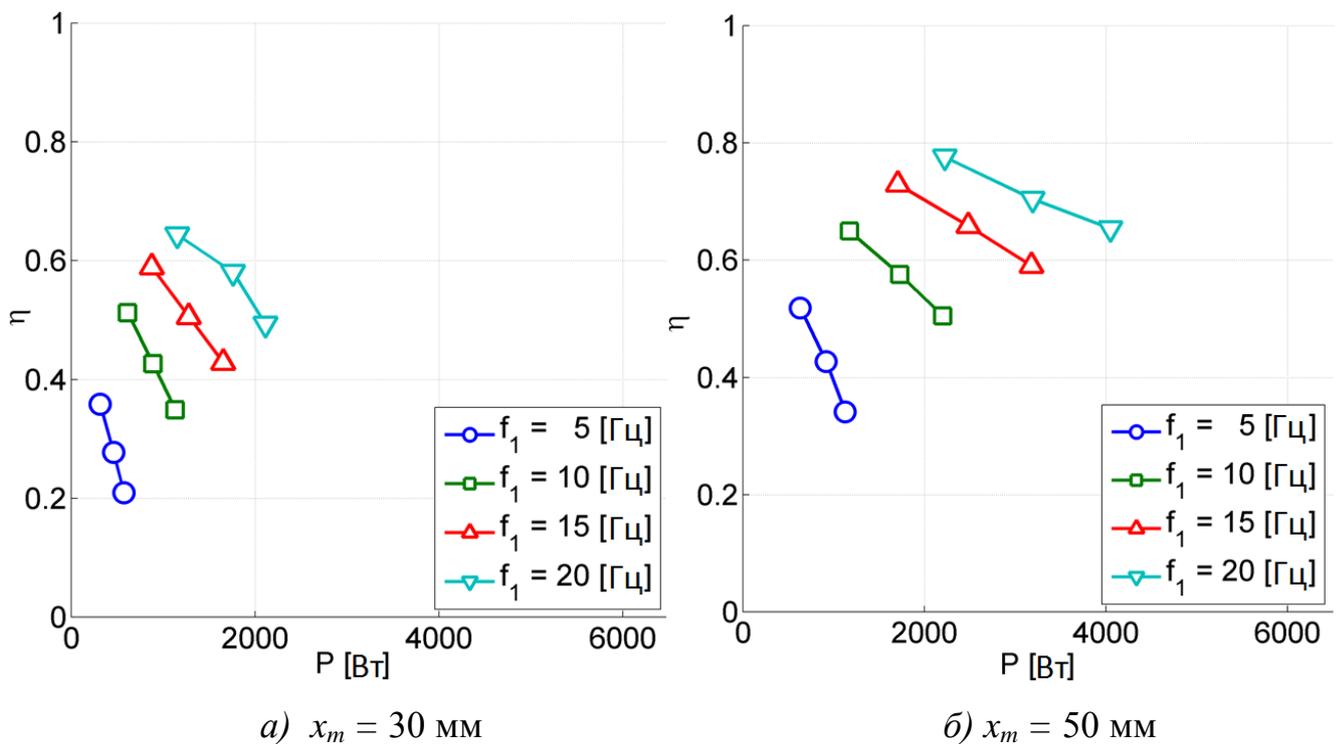


Рисунок 6.32. КПД при ходе индуктора 30 мм и 50 мм

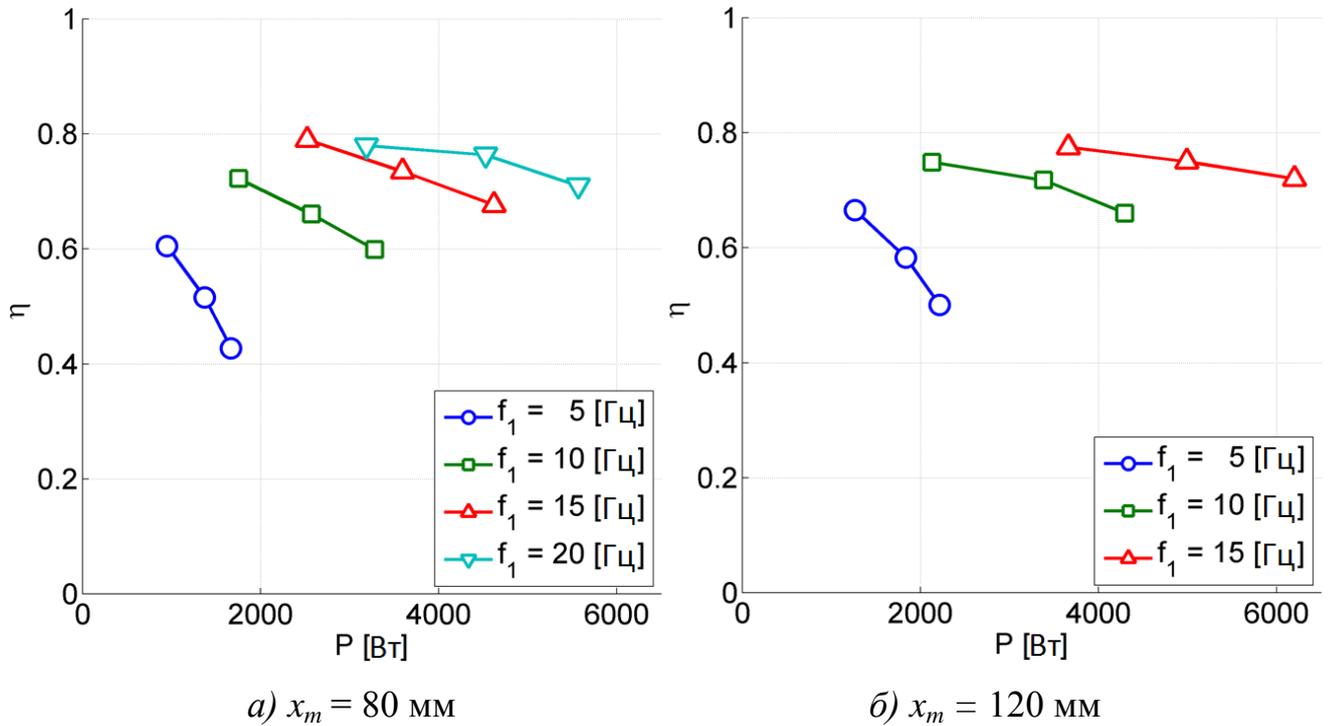


Рисунок 6.34. КПД при ходе индуктора 80 мм и 120 мм

На рисунке 6.35 представлено сравнение КПД синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме генератора аналитически полученного на основе предложенной имитационной модели и измеренного на частотах перемещения индуктора 5 и 20 Гц.

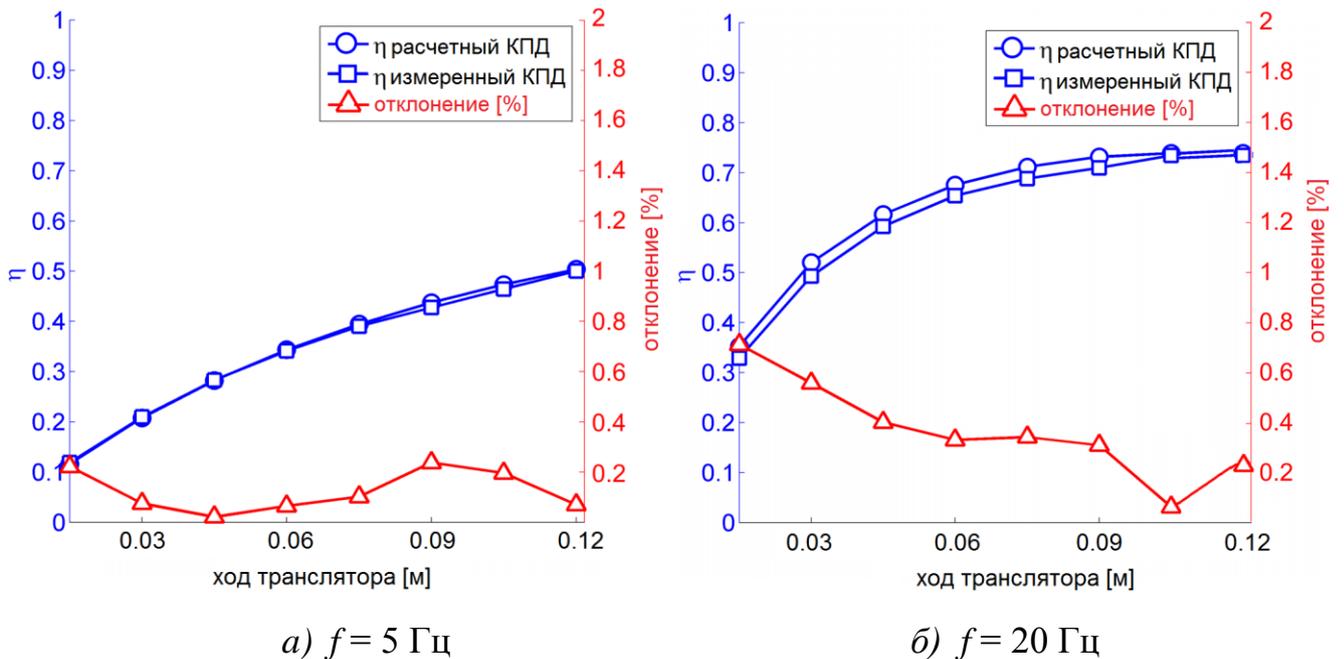


Рисунок 6.35. Сравнение измеренного и рассчитанного КПД

Расхождение данных величин связано с неточностью аналитических зависимостей для расчета потерь в стали, в обмотках и добавочных потерь, а также отклонениями характеристик материалов (электротехнической стали и медных обмоток) от реальных значений.

Согласно протоколу протоколов углубленных исследований характеристик экспериментального образца обратной электрической машины возвратно-поступательного действия испытания проведены на частотах перемещения индуктора до 20 Гц, ввиду нарушения крепления магнитов, что привело к прекращению режима генерации электроэнергии синхронной ЭМВПД с ПМ.

С целью определения потенциальных возможностей синхронной ЭМВПД с ПМ проведены расчеты КПД в режиме генератора на частотах перемещения индуктора до 50 Гц.

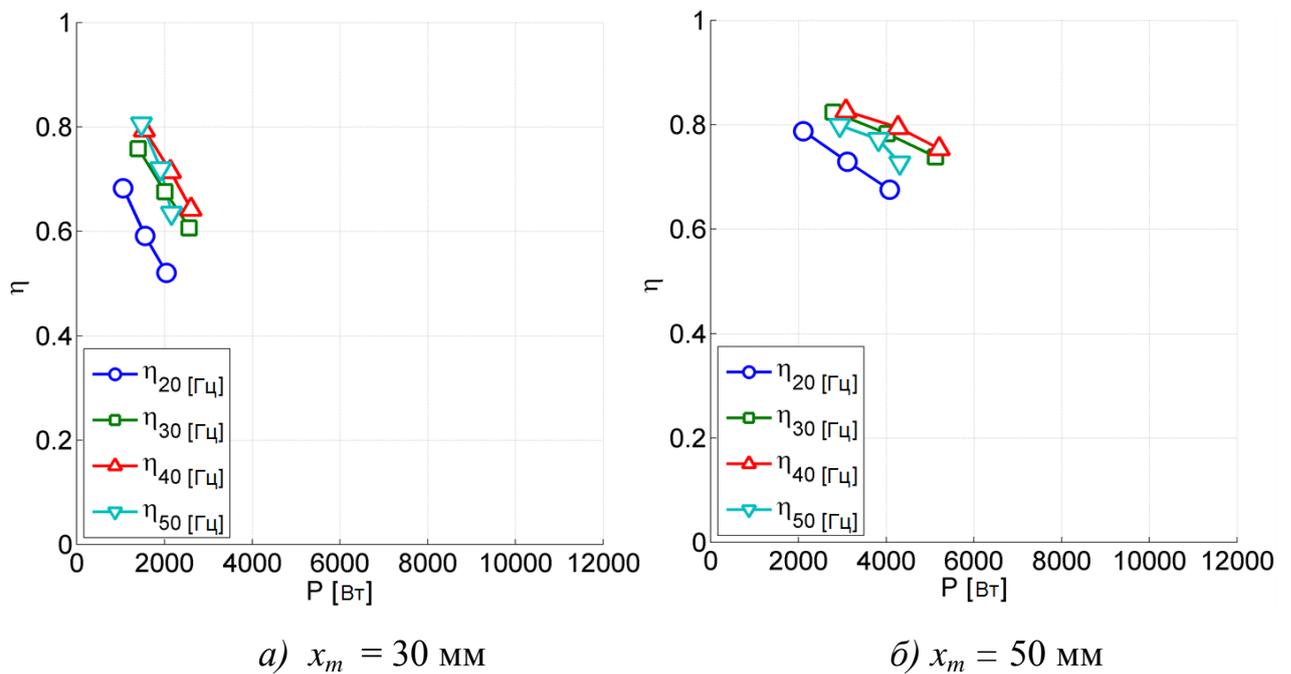


Рисунок 6.36. КПД при ходе индуктора 30 мм и 50 мм

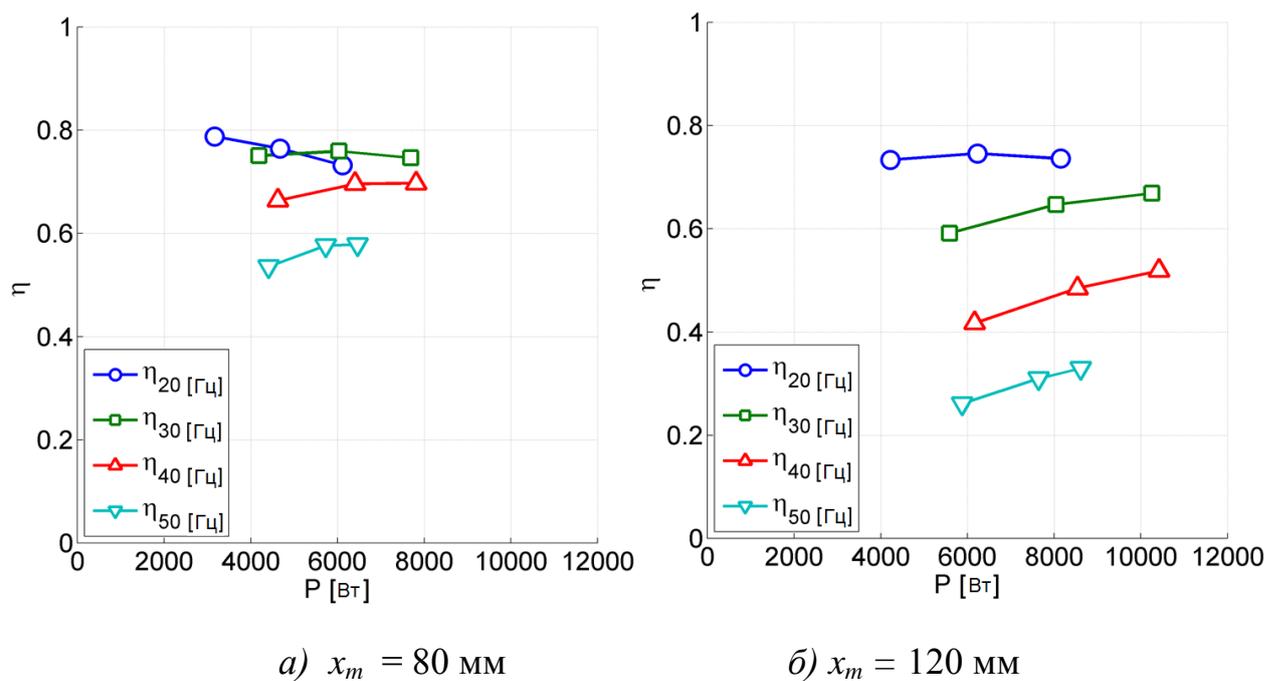


Рисунок 6.37. КПД при ходе индуктора 80 мм и 120 мм

Как видно из рисунков 6.36 и 6.37, с увеличением частоты перемещения индуктора наблюдается снижение КПД в режиме генератора, что связано с увеличением потерь в стали от частоты перемагничивания. Доля потерь в стали согласно формуле (6.9) увеличивается, если ход индуктора больше полюсного деления индуктора и наоборот, уменьшается, если ход индуктора меньше полюсного деления.

$$f_{fe} \approx \frac{2 \cdot x_m}{2 \cdot \text{полюсное деление}} \cdot f_{\text{мех}}, \quad (6.9)$$

где  $f_{fe}$  – частота перемагничивания в стали;

$f_{\text{мех}}$  – частота перемещения индуктора.

Для увеличения КПД в режиме генератора необходимо учесть влияния каждого компонента потерь энергии.

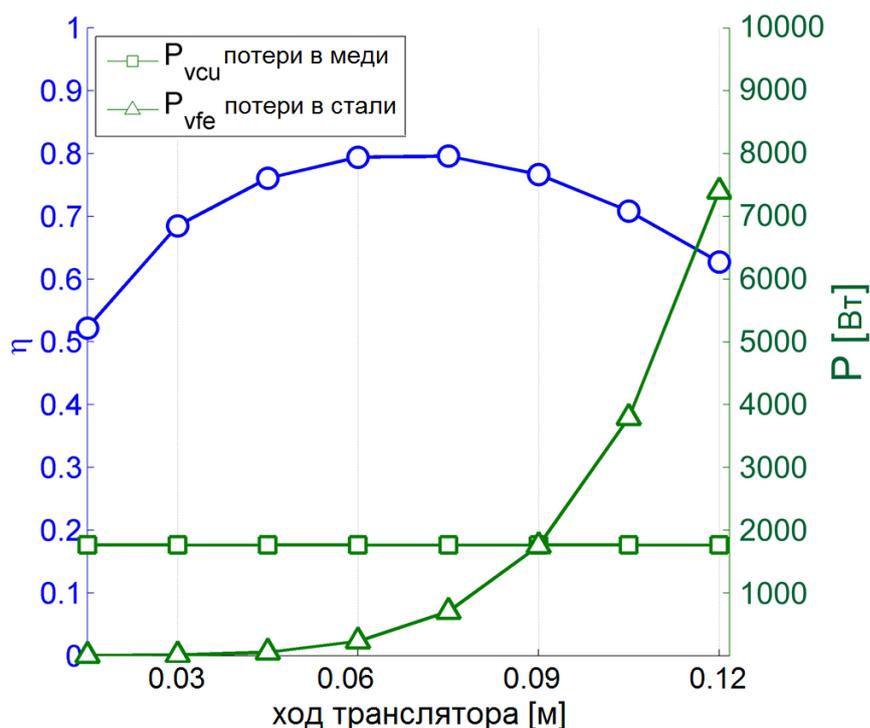


Рисунок 6.38. Потери при частоте перемещения индуктора 40 Гц

Из рисунка 6.38 видно, что при ходе индуктора до 60 мм преобладают потери в обмотках статора (меди), при превышении хода индуктора значения 60 мм потери в стали резко увеличиваются. Для снижения доли потерь в стали необходимо провести следующие мероприятия по оптимизации:

1) Потери в стали, согласно описанным выше формулам, зависят от частоты перемещения индуктора, следовательно, уменьшение данного параметра приведет к снижению потерь в стали. Однако это противоречит техническому заданию на проект, который предполагает достижения высоких частот перемещения индуктора (до 100 Гц). В то же время согласно формуле (6.3) альтернативным решением снижения механической частоты может служить увеличение полюсного деления при заданной длине индуктора (другими словами уменьшение количества пар полюсов), что приведет к значительному снижению частоты перемагничивания в стали.

2) Так как потери в стали зависят не только от частоты перемещения, но и от хода индуктора возможно снижение потерь в стали путем уменьшения хода

индуктора. В то же время снижение хода индуктора, согласно формуле (6.10), приведет к снижению подаваемой механической энергии  $W_{\text{мех}}$ .

$$W_{\text{мех}} = F \cdot x_m, \quad (6.10)$$

где  $F$  – полезная сила на валу индуктора.

Чтобы оставить механическую энергию постоянной, необходимо увеличить значение полезной силы на валу индуктора. Увеличение силы на валу индуктора в свою очередь приведет к увеличению тока в статорной обмотке, и соответственно возрастут потери в меди. Для увеличения КПД генератора необходимо найти баланс между уменьшением потерь в стали и увеличением потерь в меди, что требует разработки методики оптимизации для данного случая.

Снизить потери в меди возможно уменьшив сопротивление обмотки статора, соответственно увеличив поперечное сечение проводника. При постоянной ширине паза это приведет к увеличению высоты (глубины) паза, при этом надо учесть, чтобы снижение сопротивления обмотки не было скомпенсировано эффектом вытеснения тока.

В результате проведенных измерений можно сделать вывод, что принципиальным недостатком линейных генераторов по сравнению с ротационными генераторами является более низкий КПД.

Дополнительным фактором снижающим КПД является наличие крайних положений, в которых происходит смена направления движения, как видно из рисунка 6.39. Для снижения данного эффекта в поворотных точках необходимо, чтобы в обмотках статора не протекал ток. Это возможно, если своевременно размыкать цепь. Размыкание же цепи с упреждением до поворотной точки не приведет к повышению КПД. Поэтому стоит задача дальнейших исследований с целью оптимизации токовой характеристики и приближения её к идеальной.

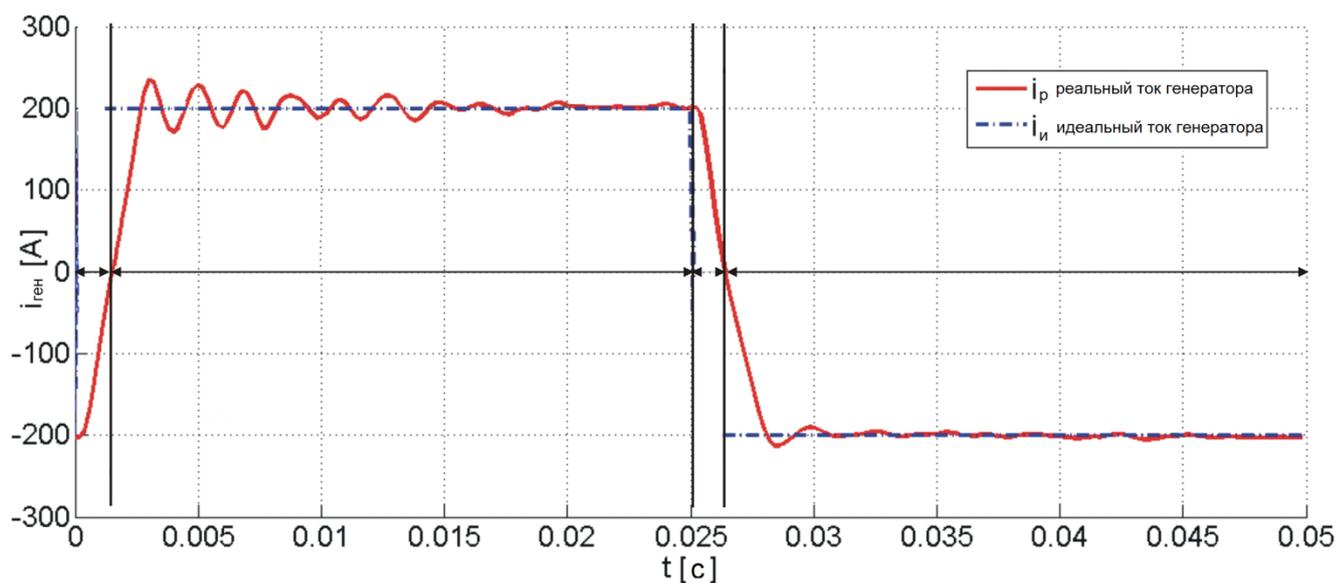


Рисунок 6.39. Снижение КПД в режиме генератора

#### 6.4.2. Расчет потерь в стали

Расчет потерь в статоре синхронной ЭМВПД с ПМ производился в режиме генератора на холостом ходу.

На рисунке 6.40 показаны измеренные значения потерь в стали синхронной ЭМВПД с ПМ.

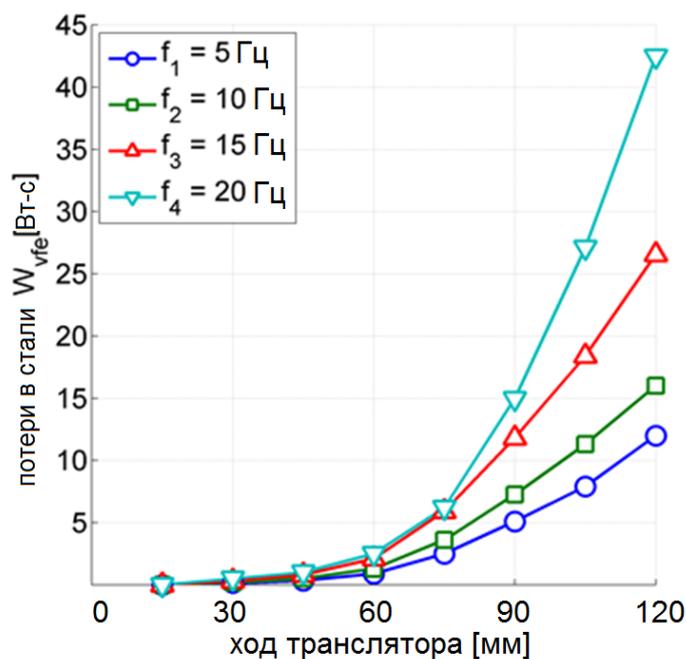


Рисунок 6.40. Измеренные значения потерь в стали

На рисунке 6.41 представлены измеренные и аналитически рассчитанные потери в стали ЭМВПД при частоте перемещения индуктора в 15 Гц.

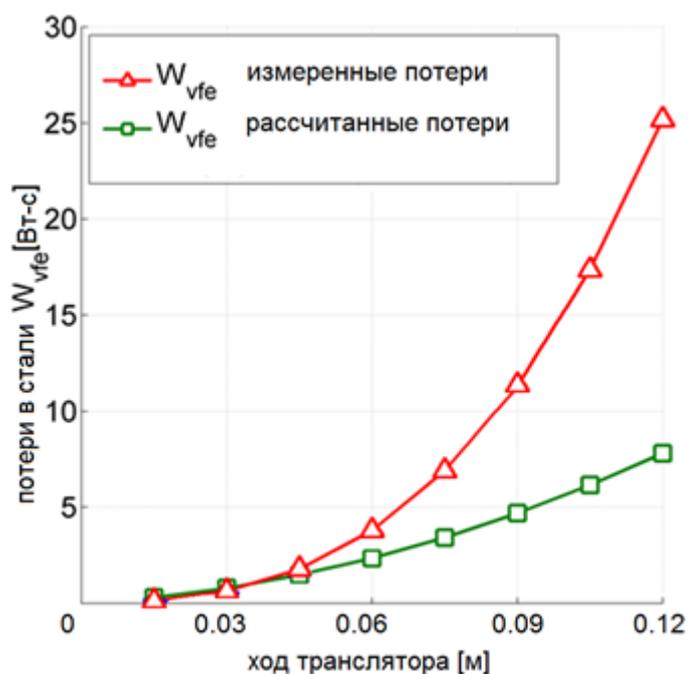


Рисунок 6.41. Измеренные и аналитически рассчитанные значения потерь в стали

Расхождение между расчетными и измеренными значениями можно объяснить двумя причинами:

- В аналитическом расчете принимается, что магнитный поток изменяется по синусоидальному закону в пакете статора, однако на самом деле имеются значительные искажения магнитного поля в отдельных элементах статора.
- В аналитическом расчете принимается, что магнитный поток, вызывающий потери в статоре, проходит полный период. Однако в синхронной ЭМВПД с ПМ такое возможно только при ходе индуктора 60 мм, в остальных случаях магнитное поле не проходит полный период.

## 6.4.3. Индуцируемое напряжение в обмотках статора

В процессе испытаний измерялось фазное напряжение в обмотках статора. Схема измерения показана на рисунке 6.42.

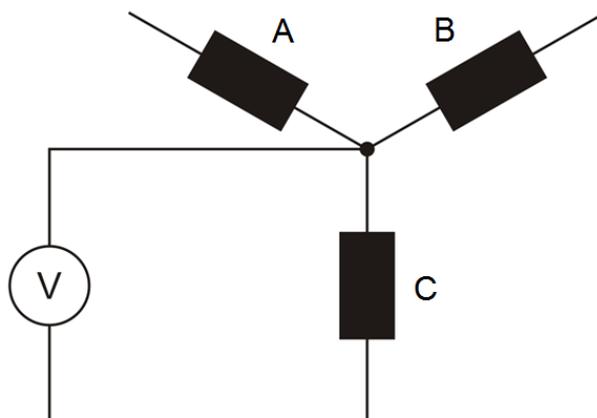


Рисунок 6.42. Схема измерения индуцируемого напряжения

Во время измерений транслятор перемещался с постоянной частотой перемещения и наводил ЭДС на разомкнутую обмотку статора.

На рисунке 6.43 представлен график изменения напряжения от положения индуктора

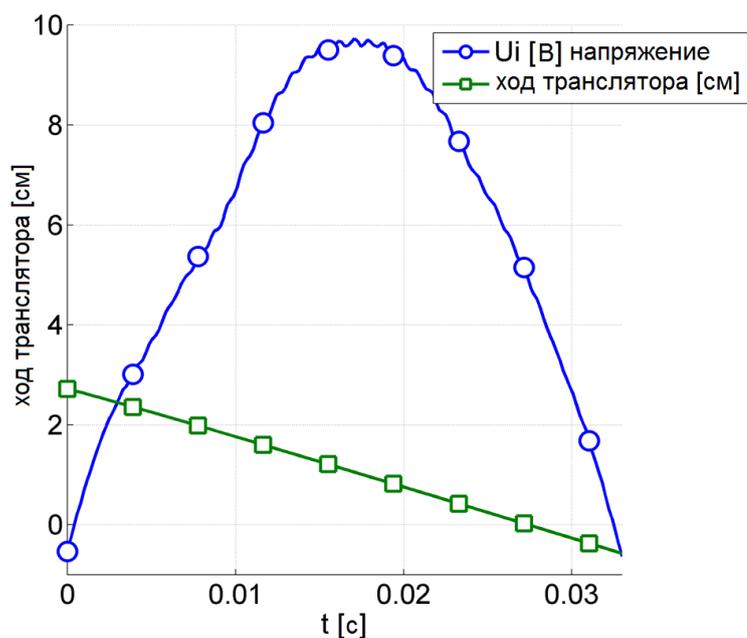


Рисунок 6.43. Индуцируемое напряжение

По сравнению с рассчитанным на 2 этапе в специализированном программном обеспечении измеренное значение ЭДС меньше на 5 % , что связано с заниженным значением остаточной магнитной индукции  $B_r$  , чем заявлено производителями постоянных магнитов.

#### 6.4.4. Моделирование и измерение тепловых режимов синхронной ЭМВПД с ПМ

В корпус синхронной ЭМВПД с ПМ были интегрированы 15 температурных датчиков, как показано на рисунке 6.44. Температурные датчики расположены таким образом, чтобы при измерении определить процесс изменения температуры внутри линейного генератора, а также определить значения теплопроводности и теплопередачи для построения тепловой модели синхронной ЭМВПД с ПМ .

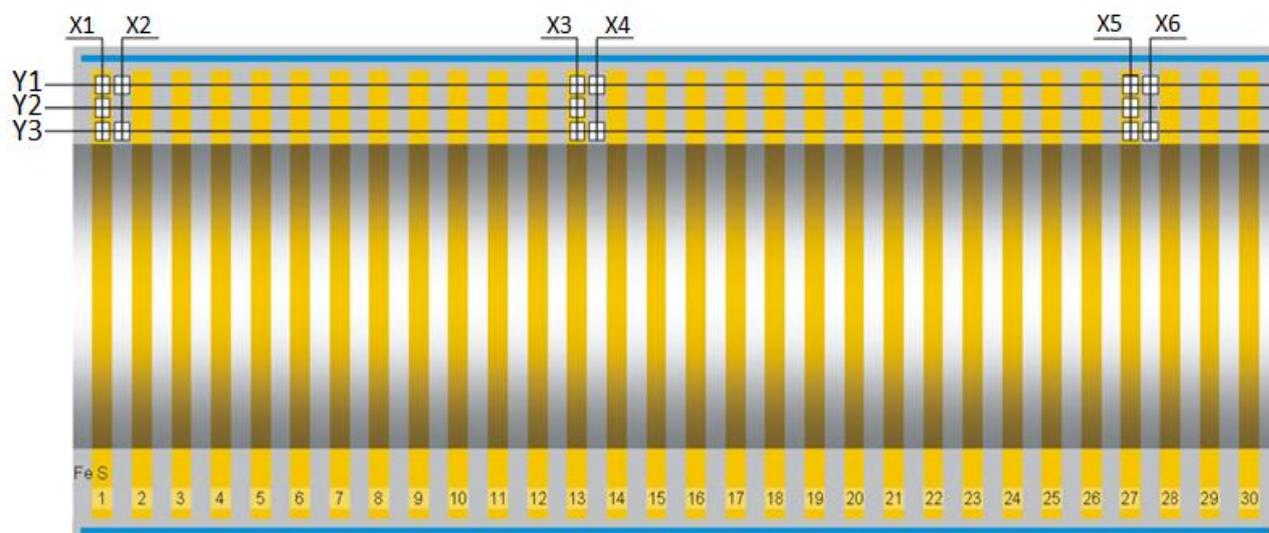


Рисунок 6.44. Расположение температурных датчиков

Наиболее напряженной в тепловом отношении является плоскость в направлении Y3. На рисунке 6.45 представлен график изменения температуры датчиками X1/Y3, X3/Y3 и X5/Y3 при частоте перемещения индуктора 20 Гц. На

рисунке 6.46 представлен график изменения температуры датчиками в плоскости ХЗ.

Наибольшая температура наблюдается в средней части линейного генератора. Это связано с тем, что в данной точке складываются тепловые потоки катушек статора. Для данной точки необходимо разработать дополнительные меры защиты от термического разрушения.

В линейном генераторе при выдаваемом мощности 7133 кВт и температуре воды в канале охлаждения 25 °С максимальная температура в корпусе достигает 61 °С.

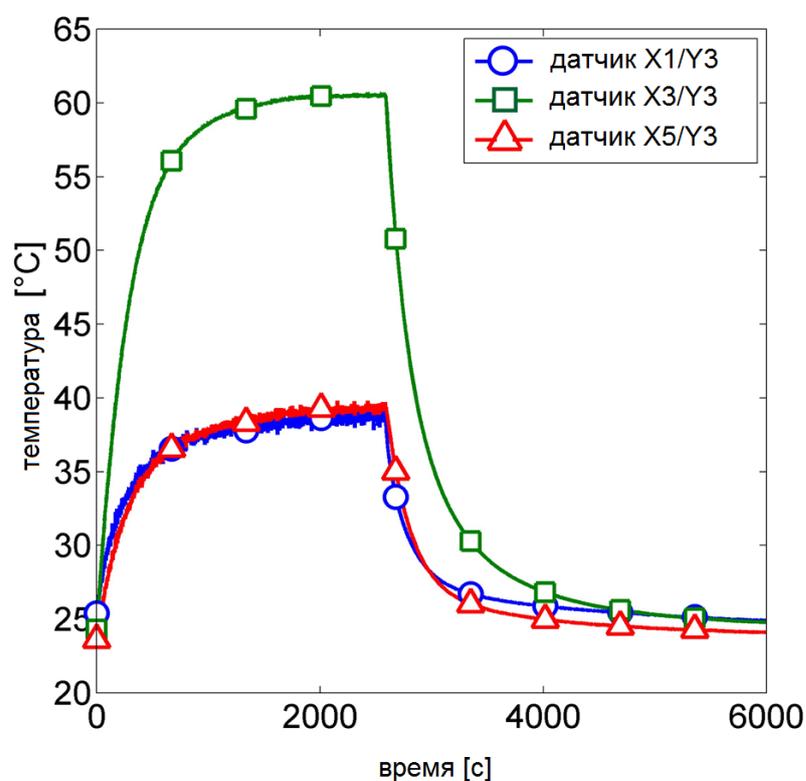


Рисунок 6.45. Изменение температуры в плоскости Y3

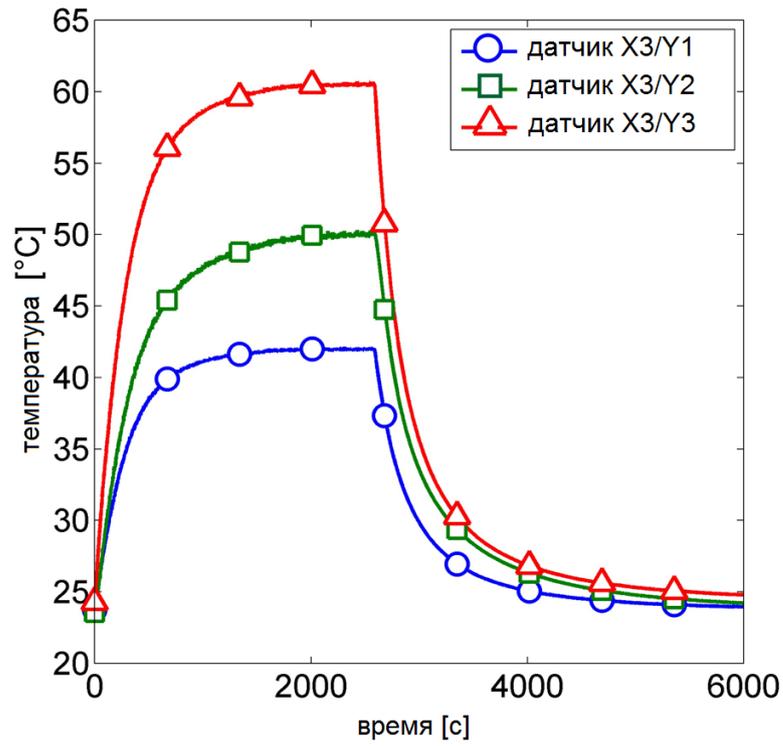


Рисунок 6.46. Изменение температуры в плоскости X3

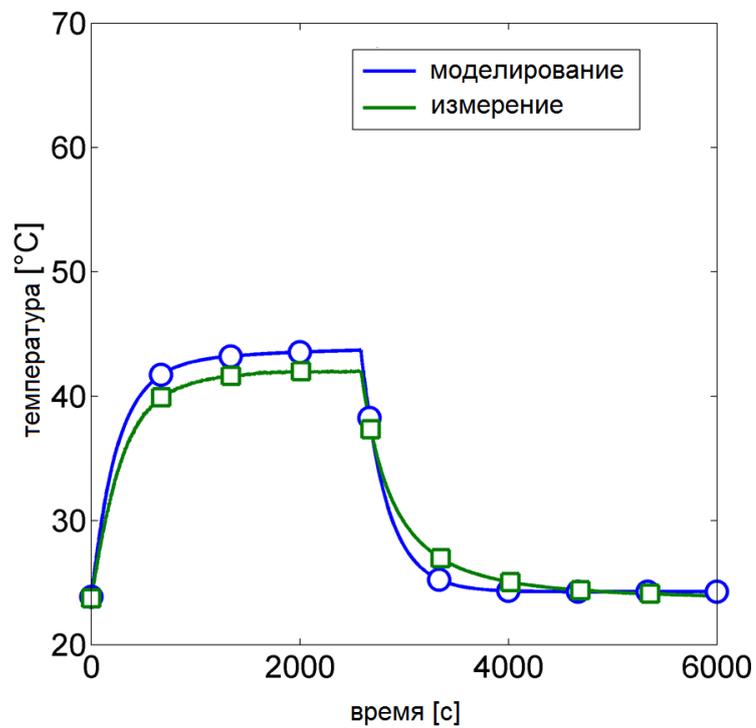


Рисунок 6.47. Смоделированное и измеренное значение температур

На рисунке 6.47 показаны измеренные и смоделированные значения датчика температуры X3/Y1 при генерируемой мощности 6150 Вт и потерях мощности (в стали и в обмотках) 1710 Вт. Среднее отклонение в процентах значений моделирования от измеренных составляет 6,5 %. Это составляет 2,5 °С.

На рисунке 6.48 представлены измеренные и смоделированные значения температур в средней части линейного генератора. Показания расположены геометрически так же, как и реальные датчики в корпусе генератора.

Распределение температуры в аксиальном направлении представлено на рисунке 6.48 при средней температуре охлаждающей жидкости (вода) 25 °С, генерируемой мощности 6150 Вт (потери 1710 Вт), частоте индуктора 20 Гц и ходе индуктора 120 мм. Наиболее горячими точками в синхронной ЭМВПД с ПМ являются средние области: в радиальном направлении воздушный зазор и в аксиальном направлении средняя часть синхронной ЭМВПД с ПМ. Именно в этих областях необходимо предусмотреть повышенную термозащиту.

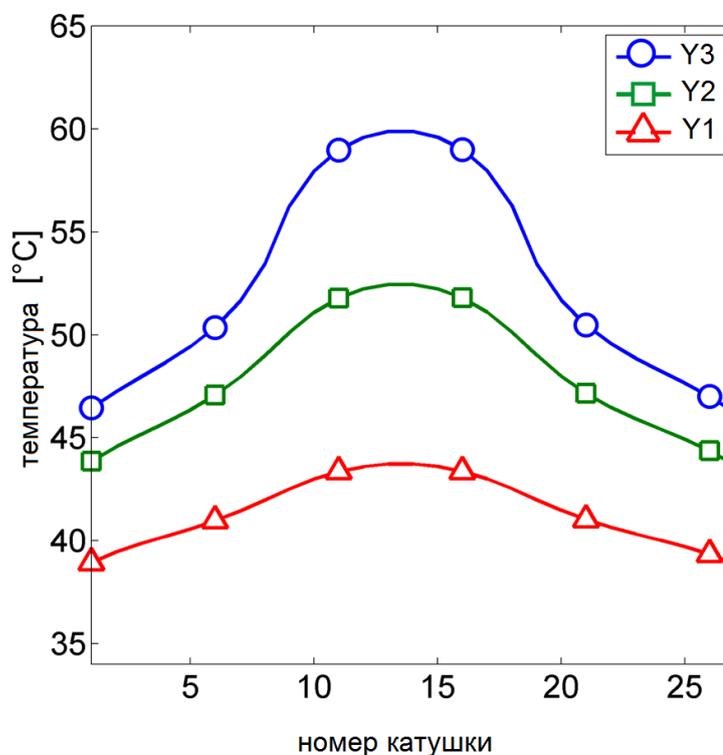


Рисунок 6.48. Распределение температуры в аксиальном направлении в ЭМВПД

Максимально допустимая рабочая температура обратимой синхронной ЭМВПД с ПМ определяется по наименьшей максимально допустимой температуре из используемых материалов синхронной ЭМВПД с ПМ. Данной температурой выбрана максимально допустимая рабочая температура постоянных магнитов, которая ограничена 120 °С. При постоянной средней температуре охлаждающей жидкости 25 °С изменение температуры внутри синхронной ЭМВПД с ПМ представлено на рисунке 6.49, что соответствует мощности синхронной ЭМВПД с ПМ 11500 Вт. Если принять среднюю температуру охлаждающей жидкости 80 °С, то максимально допустимая мощность составит 6100 Вт (потери 1700 Вт).

Перегрузочная способность синхронной ЭМВПД с ПМ хорошо предсказуема, так как тепловая модель с достаточной точностью описывает реальные тепловые процессы, происходящие в машине.

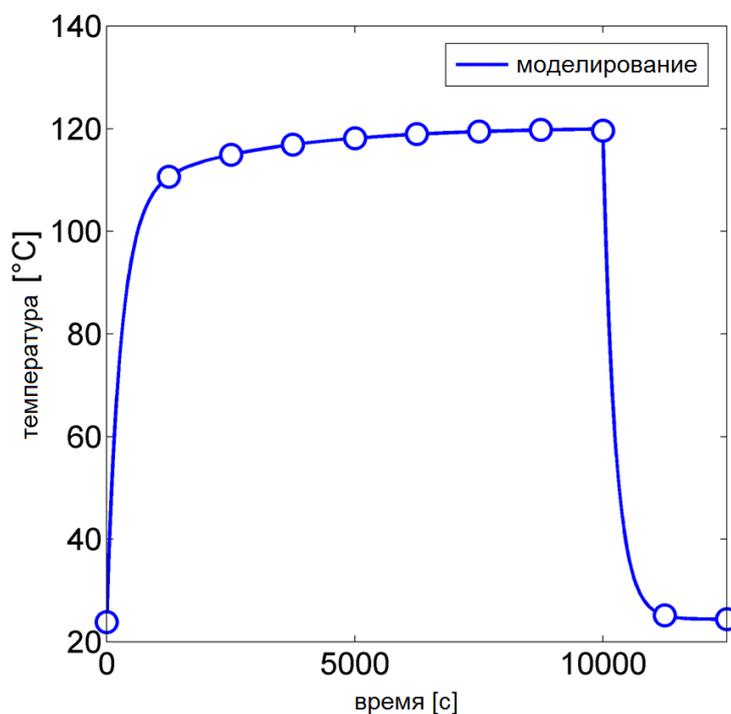


Рисунок 6.49. Температура внутри синхронной ЭМВПД с ПМ при мощности 11500 Вт

Измеренные и смоделированные значения температур позволяют сделать следующие выводы, что для лучшего охлаждения синхронной ЭМВПД с ПМ необходимо улучшать значение теплопроводности от кожуха охлаждения к охлаждающей жидкости (вода) для отвода тепла из средней части корпуса синхронной ЭМВПД с ПМ .

### Сравнение технических характеристик генераторов с ДВС на базе КШМ и с СПДВС

Ниже представлены результаты сравнительного анализа основных показателей генераторов на базе традиционных ДВС, использующих в своей конструкции КШМ, с аналогичными СПДВС, обладающими эквивалентными мощностными показателями в диапазоне от 10 до 50 кВт.

Оценка основных технических характеристик проводилась с использованием данных лабораторных и серийных образцов двигателей и опубликованных результатов экспериментальных исследований этих двигателей. Для получения объективной картины при сравнении технических характеристик рассматривались эффективный КПД, удельная масса, значения которых приведены в таблице 6.6.

Таблица 6.6. Технические характеристики генераторов на базе кривошипно-шатунных и свободнопоршневых образцов ДВС

Тип двигателя	Тип генератора	Модель	Параметры			
			КПД генератора	КПД двигателя	Удельная масса, кг/кВт	Общий эффективный КПД, %
ДВС с КШМ	Генератор вращения	Серийные образцы	≈ 90%	≈ 26%	13,5	≈ 23%
СПДВС	Линейный генератор	Innas BV, Chiron [6]	≈ 80%	≈ 62,5%	5,3	≈ 50%
		Toyota Central R&D Labs Inc. FPEG [197]	≈ 79%	≈ 52,7%	-	≈ 42%

Продолжение таблицы 6.6

Тип двигателя	Тип генератора	Модель	Параметры			
			КПД генератора	КПД двигателя	Удельная масса, кг/кВт	Общий эффективный КПД, %
		FPEC, Free Piston Energy Converter, Volvo Technology Corporation	≈ 80%	≈ 57,5%	5,4	≈ 46%
		Экспериментальный образец	≈ 80%	С учетом минимального КПД	5,5	≈ 42%

Общий КПД генераторных комплексов на базе СПДВС в 2 раза выше, а удельная масса более чем в 2 раза меньше, чем у генераторов на базе ДВС с КШМ.

Таким образом, результаты проекта показывают перспективность дальнейшей разработки генераторных комплексов на базе СПДВС и полученные характеристики экспериментального образца сопоставимы с аналогичными работами, определяющими мировой уровень.

#### 6.6. Выводы по главе 6

1. Разработан испытательный стенд для проведения углубленных исследований характеристик синхронной ЭМВПД с ПМ, обладающий следующими характеристиками: максимальная скорость перемещения индуктора до 20 м/с, максимально измеряемое усилие до 100 кН, частота перемещения индуктора до 100 Гц, мощность электрической нагрузки до 25 кВт, напряжение нагрузки до 400 В, измерение электрического тока до 300 А, точность определения положения индуктора до 0,1 мм, измерение температуры элементов машины до 200 °С, частота оцифровки входных сигналов системы контроля и управления до 800 кГц.

2. Разработан экспериментальный образец синхронной электрической

машины возвратно-поступательного действия мощностью 3-11 кВт, с температурным рабочим диапазоном от 0°C до 150 °C и усилием на трансляторе электрической машины до 11 кН с использованием новых методических и конструктивных решений, имеющего модульную конструкцию и предназначенного для генерации электрической энергии и привода механизмов в агрессивной среде в составе автономных объектов.

3. Разработанная математическая модель синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами обеспечивает точность полученных результатов, обеспечивающую степень совпадения результатов математического моделирования и исследовательских испытаний погрешностью не более 3 %. Адекватность математического моделирования позволяет воспроизводить заданные свойства, состояние и поведение исследуемого объекта с достаточной для поставленных целей точностью и в условиях достаточно широкого диапазона изменения входных параметров.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили сформулировать и обосновать научные положения, совокупность которых может быть классифицирована как развитие теоретических основ и совершенствование методических и конструктивных решений, обеспечивающих создание энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами, предназначенных для генерации электрической энергии в составе автономных энергоустановок и приводах различных механизмов.

В качестве наиболее существенных результатов работы можно назвать следующие:

1. На основе анализа различных типов линейных электрических машин возвратно-поступательного действия в автономных источниках электроснабжения установлено, что наиболее рациональной формой реализации синхронной ЭМВПД является цилиндрическая конструкция с постоянными магнитами на подвижном якоре. Конструктивно выполнять якорь целесообразно полым, с поверхностно монтируемыми магнитами, формирующими радиальный магнитный поток. Выбранная форма реализации позволяет обеспечить наилучшие технико-экономические характеристики синхронной ЭМВПД.

2. Проектирование и оптимизация параметров СЭДПМ является актуальной задачей, так как данный тип двигателей всё больше распространяется на области, где традиционно применялись двигатели постоянного тока (ДПТ) или АД, таких, как привод циркуляционных насосов, привод компрессоров в холодильной технике, системах вентиляции, буровые установки, добычи нефти. Одним из перспективных направлений внедрения СЭДПМ является нефтедобывающая отрасль. Электропривод ШСНУ является одним из важнейших компонентов данных установок. Повышение его работоспособности является ключевой задачей для снижения себестоимости добываемой нефти.

3. Разработана математическая модель работы свободнопоршневого двигателя (СПДВС) стандартного цикла Отто с учетом диаметра цилиндров,

массы поршневой группы и индуктора, степени сжатия, хода поршня, теплоты сгорания топлива и сил трения. Решение уравнение баланса сил позволяет определить положение и скорость поршневой группы и, соответственно, индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ, работающей в стационарных условиях.

4. Разработана методика расчета электромагнитной силы синхронной ЭМВПД с ПМ через отображение уравнения линейной токовой нагрузки и индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, в виде ряда Фурье, что позволяет провести расчет и оптимизацию конструктивных параметров индуктора и статора электрической машины возвратно-поступательного действия.

5. Разработана тепловая модель синхронной ЭМВПД с ПМ, которая дает возможность определить максимально допустимую выдаваемую мощность синхронной ЭМВПД с ПМ, определить параметры, влияющие на теплоотдачу, определить меры по тепловой защите синхронной ЭМВПД с ПМ.

6. Предложена эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с встроенными магнитами в составе станка-качалки нефти. На основе эквивалентной схемы составлена система уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для магнитных цепей. Полученная система уравнений позволяет аналитически определять требуемые размеры магнитов по заданному значению магнитного потока и заданным размерам ротора и статора двигателя и магнитный поток, рабочую точку магнита при известной конструкции ротора и статора.

7. Разработан программный комплекс, реализующий алгоритмы расчета термодинамических процессов в СПДВС, электромеханических процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ, тепловых процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ, а также позволяющий производить прочностные расчеты конструкции синхронной ЭМВПД с ПМ и оптимизацию конструктивных параметров генерирующего комплекса с СПДВС на базе синхронной ЭМВПД с ПМ.

8. Разработана методика оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимума намагничивающей

силы на основе разделения конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ на постоянные и варьируемые.

9. Разработана методика оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимальной генерируемой мощности. Результаты оптимизации по максимуму генерируемой мощности показали, что конструктивные параметры синхронной ЭМВПД с ПМ коррелируют с методикой оптимизации по критерию максимума электромагнитной силы.

10. Предложена методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, позволяющая получить приблизительное множество оптимальных по Парето решений.

11. Разработан метод топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах СЭМПМ с использованием генетического алгоритма. Предложена концепция кластеризации материалов и процедура «очистки» материалов. Рассмотрено использование более двух материалов, а именно: воздух, сталь, а также постоянных магнитов с радиальной и аксиальной намагниченностью.

12. Разработан испытательный стенд для проведения углубленных исследований характеристик синхронной ЭМВПД с ПМ, обладающий следующими характеристиками: максимальная скорость перемещения индуктора до 20 м/с, максимально измеряемое усилие до 100 кН, частота перемещения индуктора до 100 Гц, мощность электрической нагрузки до 25 кВт, напряжение нагрузки до 400 В, измерение электрического тока до 300 А, точность определения положения индуктора до 0,1 мм, измерение температуры элементов машины до 200 °С, частота оцифровки входных сигналов системы контроля и управления до 800 кГц.

13. Разработан экспериментальный образец синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 3-11 кВт, с температурным рабочим диапазоном от 0°С до 150 °С и усилием на индукторе

электрической машины до 11 кН с использованием новых методических и конструктивных решений, имеющего модульную конструкцию и предназначенного для генерации электрической энергии и привода механизмов в агрессивной среде в составе автономных объектов.

Таким образом, цель и задачи работы можно считать выполненными полностью.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для проектирования и создания энергоэффективных синхронных электрических машин для привода и генерации электрической энергии различными НИИ и проектными организациями.

Практическая реализация методов и алгоритмов расчета находит и может найти дальнейшее применение при создании и построении следующих решений: производство высокоэффективных СЭДПМ для привода станков-качалок нефти, разработка погружных линейных электрических для привода плунжерных насосов в малодебитных скважинах; производство энергоэффективных электроприводов с улучшенными массо-габаритными характеристиками; производство синхронных генераторов с постоянными магнитами для альтернативных источников электроэнергии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характер результатов выполненных исследований позволяет сделать заключение о том, что на основе разработанных новых и совершенствования известных методов расчета и оптимизации параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов получено решение научной проблемы, имеющей важное научное значение – создание и проектирование СЭМПМ с перспективными экономическими и энергетическим показателями.

Практическая ценность работы состоит в разработке программного комплекса в котором реализованы представленные методы расчета и оптимизации. Программа основана на глубокой параметризации геометрии статора, ротора и индуктора СЭМПМ для проработки большого количества возможных конфигурации геометрии электрической машины. В численной модели, контроль и анализ программного обеспечения осуществляется на основе единой базы данных, что позволяет совместить моделирование тепловых и электромеханических процессов.

Программа позволяет решать оптимизационные задачи и представляет собой инструмент для решения широкого круга практических задач прошедший апробацию в промышленности, в учебном процессе в ФГБОУ ВО «КГЭУ».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григораш, О.В., Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы: монография / О.В. Григораш, С.В. Божко, А.Ю. Попов, В.В. Алмазов, А.В.Квитко – Краснодар, 2012. – 174 с.
2. Григораш, О.В., Модульные системы гарантированного электроснабжения: монография / О.В. Григораш, С.В. Божко, Д.А. Нормов, С.М. Безуглый, А.В. Ракло – Краснодар: КВВАУЛ, 2005. - 306 с.
3. Баль, В. Б. Линейные электрические машины возвратно-поступательного действия – типы и конструкции электрических машин / В. Б. Баль, В. Я. Геча, В. И. Гончаров, Е. В. Ежов, В. Г. Чиркин, С. В. Ширинский, Д. А. Петриченко // Вопросы электромеханики. – 2015. – Т. 148. – С. 3.
4. Сокол, Л.Б. Линейные электродвигатели. Общий обзор // Технологии инженерных и информационных систем. – 2016. – № 4. – С. 49.
5. Ferrari, C. Development of a Free-Piston Linear Generator for use in an Extended-Range Electric Vehicle / C. Ferrari, E. Friedrich //: EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Los Angeles, California. – 2012. – P. 787.
6. Шустров, Ф.А. Оценка эффективности использования свободнопоршневых тепловых двигателей в составе транспортных и стационарных энергоустановок / Ф.А. Шустров, Д.А. Иванов, А.П. Татарников // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 10. – С. 449.
7. Nassar, S. Linear electric actuators and generators / S. Nassar, I. Boldea // PhD Thesis, Cambridge University, Cambridge. – 1997.
8. Кецарис, А. А. Линейный генератор с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем. Структура и перспективы применения / А. А. Кецарис, В. И. Духанин // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. – № 30. – С. 7.
9. Кецарис, А. А. Вопросы рабочего процесса линейного генератора с возвратно-поступательным движением / А. А. Кецарис, В. И. Духанин // Материалы

77-й международной научно-технической конференции ААИ. МГТУ «МАМИ». – 2012. – С. 36.

10. Xiao, J. Motion characteristic of a free piston linear engine / J. Xiao, L. Qingfeng, Z. Huang // *Applied Energy*. – 2010. – № 87. – P. 1288.

11. Ruddy, B. P. High Force Density Linear Permanent Magnet Motors: «Electromagnetic Muscle Actuators» / B. P. Ruddy // PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology. – 2012.

12. Karabulut, H. Dynamic analysis of a free piston Stirling engine working with closed and open thermodynamic cycles / H. Karabulut // *Renewable Energy*. – 2011. – № 36. – P. 1704.

13. Polinder, H. Design, modelling and test results of the AWS PM linear generator / H. Polinder, F. Gardner, M. Damen // *Forschungsbericht*, John Wiley and Sons LTD, Hoboken. – 2005.

14. Gargov, N. P. Separated magnet yoke for permanent magnet linear generator for marine wave energy converters / N. P. Gargov, A. F. Zobaa, I. Pisica // *Electric Power Systems Research*. – 2014. – № 109. – P. 63.

15. Halbach, K. Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings / K. Halbach // *Journal of Applied Physics*. – 2008. – № 57. – P. 3605.

16. Bianchi, N. Tubular linear permanent magnet motors: an overall comparison / N. Bianchi, S. Bolognani, D. D. Corte, F. Tonel // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2012. – № 39. – P. 466.

17. Антипов, В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Линейный синхронный генератор мощностью 30 кВт для волновой энергетики/ В.Н. Антипов, А.Д. Грозов, А.В. Иванова // *Электротехника*. –2017. – № 2. –С. 8.

18. Рахимов, А.В. Примеры использования линейных электродвигателей/ А.В. Рахимов // *Современная техника и технологии*. –2015. – № 11. –С. 120.

19. Song, Y. Comparison Research on Different Injection Control Strategy of CI Free Piston Linear Generator in One-time Starting Process / Y. Song, H. Feng, Z. Zuo, M. Wang, C. Guo // *Energy Procedia*. – 2014. – № 61. – P. 1597.

20. Boucher, J. Optimization of a dual free piston Stirling engine / J. Boucher, F. Lanzetta, P. Nika // *Applied Thermal Engineering*. – 2007. – № 27. – P. 802.
21. Корельский, Д.В. В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами / Д.В. Корельский, Е.М. Потапенко, Е.В. Васильева// *Радиоэлектроника, Информатика, Управление*. – 2011. – №2. – С.155.
22. Бернштейн, А.Я. Вентильные двигатели на основе синхронных машин с постоянными магнитами/ А.Я. Бернштейн, В.К. Константинов, В.С. Крылов, П.А. Суйский // *Труды ВНИИ электромеханики*. – 1980. – Т. 65. – С. 5.
23. Волокитина, Е.В. Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов: дис. канд. техн. наук: 05.09.01/ Волокитина Елена Владимировна – Чебоксары, 2006. – 196 с.
24. Овчинников, И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе: курс лекций. / И.Е. Овчинников И. Е – СПб.: КОРОНА-Век, 2006. – 336 с.
25. Власов, А.И. Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения: дис. канд. техн. наук: 05.09.01/ Власов Андрей Иванович – Чебоксары, 2010. – 260 с.
26. Аракелян, А.К. Вентильные электрические машины и регулируемый электропривод/ А.К. Аракелян, А.А. Афанасьев – М.: Энергоатомиздат, 1997. – Ч.1. – 507 с.
27. Аветисян, Д.А., Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ/ Д.А. Аветисян, В.С. Соколов, В.Х. Хан – М.: Энергия, 1976 – 208 с.
28. Меньшов, Б.Г. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности / Б.Г. Меньшов, М.С. Ершов, А.Д. Яризов – М.: Недра, 2000 – 437 с.
29. . Сигова, О.Б. Система оптимального управления электроприводом станка-качалки/ О.Б. Сигова // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2010. – № 4– С. 614.

30. Lei, G. Multidisciplinary Design Optimization Methods for Electrical Machines and Drive Systems / G Lei, J.G. Zhu, Y.G. Guo – Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg, Germany. – 2016.
31. Lei, G. Multidisciplinary Design Analysis for PM Motors with Soft Magnetic Composite Cores / G. Lei, C.C. Liu, Y.G. Guo, J.G. Zhu // IEEE Transactions on Magnetics. – 2015. - №51 – P.321.
32. Lei, G. Robust multidisciplinary design optimization of PM machines with soft magnetic composite cores for batch production / G. Lei, C.C. Liu, Y.G. Guo, J.G. Zhu // IEEE Transactions on Magnetics. – 2016. - №52 – P.635.
33. Huang, Z. Multiphysics Design and Optimization of High-Speed Permanent-Magnet Electrical Machines for Air Blower Applications / Z. Huang, J. Fang // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016. - №63. – P.2766.
34. Kreuawan, S. Optimal design of permanent magnet motor using multidisciplinary design optimization /S. Kreuawan, F. Gillon, P. Brochet // In Proceedings of the 18th International Conference on Electrical Machines. – 2015. – P. 1.
35. Sun, X. Internal model control for a bearingless permanent magnet synchronous motor based on inverse system method/ X. Sun, Z. Shi, L. Chen, Z. Yang // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2016. – № 31. – P.1539.
36. Ravanji, M.H. Design Optimization of a Ladder Secondary Single-Sided Linear Induction Motor for Improved Performance/M.H.Ravanji, Z. Nasiri-Gheidari // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2015. – № 30. – P.1595.
37. Noguchi, S. Rational Design Optimization Method for Reducing Cost and Improving Performance of Commonalized IPM Motors/ S. Noguchi, S. Matsutomo // IEEE Transactions on Magnetics. – 2015. - №51 – P.735.
38. Yang, Y. Optimal Design of an Axial-Flux Permanent-Magnet Motor for an Electric Vehicle Based on Driving Scenarios/ Y. Yang, G. Shih // Energies. –2016. – № 9. – P. 285.
39. Song, J. A New Design Optimization Method for Permanent Magnet Synchronous Linear Motors / J. Song, F. Dong, J. Zhao, S. Lu, L. Li, Z. Pan // Energies. – 2016. – № 9. – P. 992.

40. Chai, F. Magnet Shape Optimization of Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors to Reduce Harmonic Iron Losses/ F. Chai, P. Liang, Y. Pei, S. Cheng // IEEE Transactions on Magnetics. – 2016. - №52 – P.935.
41. Kong, W. Air-Gap and Yoke Flux Density Optimization for Multiphase Induction Motor Based on Novel Harmonic Current Injection Method/ W. Kong, R. Qu, M. Kang, J. Huang, L. Jing // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2017. – №53. – P.2140.
42. Wang, Y. Geometry Analysis and Optimization of PM-Assisted Reluctance Motors / Y. Wang, G. Bacco, N. Bianchi // IEEE Transactions on Industry Applications – 2017. - №53. – P.4338.
43. Dubas, F. A comparison between CG and PSO algorithms for the design of a PM motor for fuel cell ancillaries/ F. Dubas, A. Sari, D. Hissel, C. Espanet // 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference.– 2008.
44. Stipetic, S. Optimization in design of electric machines: Methodology and workflow / S. Stipetic, W. Miebach, D. Zarko, // In Proceedings of the 2015 International Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 International Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION). – Antalya, Turkey, 2015.
45. Krasopoulos, C.T. A.G. Hybrid Multiobjective Optimization Algorithm for PM Motor Design / C.T. Krasopoulos, I.P. Armouti, A.G. Kladasn // IEEE Transactions on Magnetics. – 2017. - №53. – P.745.
46. Bramerdorfer, G. Surrogate-Based Multi-Objective Optimization of Electrical Machine Designs Facilitating Tolerance Analysis/G. Bramerdorfer, A.C. Zavoianu //IEEE Transactions on Magnetics. – 2017. - №53. – P.1045.
47. Башин, К.А. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли/ К.А. Башин, Р.А. Торсунов, С.В. Семенов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. - №4. – С.51.
48. Васильев, Б.Е. Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании неохлаждаемых рабочих лопаток турбин/ Б.Е.

Васильев, Л.А. Магеррамова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – №3. – С.139.

49. Мягков, Л.Л. Топологическая оптимизация поршня высокофорсированного дизеля/ Л.Л. Мягков, С.М. Сивачев, Е.Е. Стрижов, С.П. Чирский // Двигателестроение. — 2018. — № 2. — С. 3.

50. Li, C. Multi-material topology optimization for automotive design problems/ C. Li, I.Y. Kim // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. — 2018. — № 232. — P. 1950.

51. Shenoy, K.L. Design topology and electromagnetic field analysis of Permanent Magnet Brushless DC motor for electric scooter application/ K.L. Shenoy, M.S. Kumar // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT. — 2016. — P. 1541.

52. Zhu, Z. Q. Prediction of open-circuit air gap field distribution in brushless machines having an inset permanent magnet rotor topology / Z. Q. Zhu, D. Howe, Z. P. Xia //IEEE Transactions on Magnetics. – 1994. - №30 – P.98.

53. Dyck, D. N. Automated design of magnetic devices by optimizing material distribution/ D.N. Dyck, D.A. Lowther// IEEE Transactions on Magnetics. – 1996. - №32 – P.1188.

54. C. H. Im, H. K. Jun, Y. J. Kim Hybrid genetic algorithm for electromagnetic topology optimization / C.H. Im, H.K. Jun, Y.J. Kim //IEEE Transactions on Magnetics. – 2003. - №39 – P.2163.

55. Wang, S. Topology optimization of electromagnetic systems considering magnetization direction/ S. Wang, D. Youn, H. Moon, J. Kang // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. - №41 – P.1808.

56. Shim, H. Topology optimization of magneto thermal systems considering eddy current as Joule heat/ H. Shim, S. Wang, K. Hameyer // IEEE Transactions on Magnetics. – 2007. - №43 – P.1617.

57. Kim, D.H. The implications of the use of composite material in electromagnetic device topology and shape optimization/ D. H. Kim, J. K. Sykulski, D. A. Lowther // IEEE Transactions on Magnetics. – 2009. - №45 – P.1154.

58. Choi J. S. Structural topology optimization of magnetic actuators using Genetic algorithms and ON/OFF sensitivity/ J. S. Choi , J. Yoo // IEEE Transactions on Magnetics. – 2009. - №45 – P.2276.
59. Labbe, T. Convexity-oriented mapping method for the topology optimization of electromagnetic devices composed of iron and coils/ T. Labbe, B. Dehez// IEEE Transactions on Magnetics. – 2010. - №46 – P.1177.
60. Lee, J. Structural topology optimization of electrical machinery to maximize stiffness with body force distribution / J. Lee, N. Kikuchi// IEEE Transactions on Magnetics. – 2010. - №46 – P.3790.
61. N. Takahashi, N. Examination of optimal design of IPM motor using ON/OFF method/ N. Takahashi, T. Yamada, D. Miyagi // IEEE Transactions on Magnetics. – 2010. - №46. – P.3152.
62. Ishikawa, T. Optimization of rotor topology in PM synchronous motors by Genetic algorithm considering cluster of materials and cleaning procedure/T. Ishikawa, K. Nakayama, N. Kurita, F. P. Dawson // IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. - №50. – P.2152.
63. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения: учебное пособие / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. – СПб.: КОРОНА принт, 2008. – 358 с.
64. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для студентов высших технических учебных заведений/ А.И. Вольдек. – Л.:Энергия,1978. – 832 с.
65. Тамоян, Г.С., Сергеенкова Е.В. Исследование магнитного поля синхронного линейного генератора с постоянными магнитами для преобразования энергии колебаний в электрическую / Г.С. Тамоян, Е.В. Сергеенкова // Приводная техника. – 2011. – №3. – С.34.
66. Сеницин, А. П. Совершенствование линейных генераторов с постоянными магнитами для автономных объектов: дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Сеницин Алексей Петрович. – Самара, 2013. – 133 с.
67. Сафин, А. Р. Разработка экспериментального образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия для тяжелых условий

эксплуатации / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, А. М. Копылов, Н. В. Денисова // Материалы научно-технической конференции и выставки инновационных проектов, выполненных вузами и научными организациями Приволжского федерального округа. – Нижний Новгород, 2014. – С. 37.

68. Васильев, А.С. Высокочастотная силовая электроника/ А.С. Васильев, С.В. Дзलिएв, Д.А.Патанов // – СПб.: Технолит, 2010. – 188с.

69. Аливердизаде, К.С. Балансирные индивидуальные приводы глубиннонасосной установки (станки-качалки)/ К.С. Аливердизаде. – Баку, Гостопиздат, 1951. –216 с.

70. Аливердизаде, К.С. Приводы штангового глубинного насоса/ К.С. Аливердизаде . – М.: Недра, 1973. – 192 с.

71. Дроготеску, Н.Д. Глубинонасосная добыча нефти/ Н.Д. Дроготеску. – М.: Недра, 1966 – 417 с.

72. Щуров, И.В. Повышение эффективности эксплуатации скважин за счет оптимизации кинематических характеристик штанговых насосов: дис. канд. техн. наук:25.00.17/ Щуров Игорь Вячеславович.– Самара, 2002. – 123 с.

73. Зубков, А.А. Исследование и разработка тиристорного двухскоростного асинхронного электропривода станков-качалок: дис.канд. техн. наук: 05.09.03/ Зубков Андрей Анатольевич. – М., 2003. – 153 с.

74. Зюзев, А.М. Развитие теории и обобщение разработки автоматизированных электроприводов агрегатов нефтегазового комплекса: дис. д-ра техн. наук: 05.09.03 / Зюзев Анатолий Михайлович. – Екатеринбург, 2004. – 334 с.

75. Кузнецов, А.А. Исследование и разработка массового асинхронного электропривода станков-качалок: дис. канд. техн. наук: 05.09.03/ Кузнецов Алексей Сергеевич. – М., 2002. – 182 с.

76. Вагапов, С.Ю. Устойчивость колонн насосно-компрессорных труб и штанг глубиннонасосной установки/ С.Ю. Вагапов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – 133 с.

77. Вирповский, А.С, Теория и практика глубиннонасосной добычи нефти / А.С. Вирновский. – М.Недра, 1971. – 185 с.

78. Касьянов, В.М. Аналитический метод контроля работы глубинных штанговых насосов / В.М. Касьянов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1973. – 96с.
79. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев Б.М. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
80. Карабасов, Ю. С. Новые материалы / Ю.С. Карабасов. – М.: МИСИС, 2002. — 736 с.
81. Пятин Ю. М. Справочник по постоянным магнитам/ Ю.М. Пятин. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
82. Кудреватых, Н.В. Исследование деградации магнитных свойств постоянных магнитов из сплава Nd-Fe-B в солевых растворах и водородных средах при наличие покрытий/ Н.В. Кудреватых, А.А. Остоушко, Е.Н.Тарасов // Электротехника. – 1999. – №10. –С.20.
83. Ледовский, А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами/ А.Н. Ледовский. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.
84. Опалев, Ю. Г. Вентильные электродвигатели для прецизионных быстродействующих приводов мехатронных технологических модулей: дис. канд. техн. наук: 05.09.01. /Опалев Юрий Геннадьевич.– Чебоксары, 2011. – 194 с.
85. Осин, И.Л. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами. / И.Л. Осин, В.П. Колесников, Ф.М. Юферов. – М.: Энергия, 1976. – 232 с.
86. Bernard, T. M. Halbach Array Motor/Generators – A Novel Generalized Electric Machine / T. M. Bernard, F. P. Robert, R. D Gary, A. B. Donald // Halbach Festschrift Symposium, Berkeley. – 1995.
87. Ганджа, С. А. Вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком. Анализ, синтез, внедрение в производство: дис. д-ра. техн. наук: 05.09.01./ – Челябинск, 2011. – 271 с.
88. Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины / Д.А. Бут. – М.: Высшая школа. 1985. – 265 с.

89. Опалев, Ю.Г. Новая серия отечественных вентильных электродвигателей для универсальных технологических роботов. / Ю.Г. Опалев, В.А. Нестерин, Е.В. Волокитина, Н.А. Данилов // Электротехника. – 2011. – №7. – С.13.
90. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink/ И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
91. Сергееenkova, Е. В. Синхронная электрическая машина возвратно-поступательного движения (генератор): дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Сергееenkova Елизавета Васильевна. – М., 2011. – 118 с.
92. Бабикова, Н. Л. Генератор возвратно-поступательного движения в автономной системе электроснабжения маломощных потребителей: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Бабикова Наталья Львовна. – Уфа, 2009. – 122 с.
93. Свидетельство № 2015663605 Рос. Федерация. Программный комплекс для моделирования электрической машины возвратно-поступательного движения / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, Р. Ш. Мисбахов, А. Н. Цветков, А. М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин. – № 2015619478; заявл. 07.10.2015; опубл. 20.02.2016.
94. Дьяконов, В. П. MATLAB. Полный самоучитель: учебное пособие / В. П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
95. Потапов, Л.А. Comsol multiphysics: Моделирование электромеханических устройств : учебное пособие / Л.А. Потапов, И.Ю. Бутарев — Брянск: Издательство Брянского государственного технического университета, 2011.— 113 с.
96. Сафин, А.Р. Выбор рациональных схем управления тяговым электроприводом трамвая на основе разработки имитационной модели/ А.Р. Сафин// Электротехника. – 2013. – № 1. – С. 57.
97. Тихонов, А.И. Основы теории подобия и моделирования (электрические машины): учебное пособие / А.И. Тихонов. – Федеральное агентство образования РФ ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 96 с.

98. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники / К.С. Демирчян. – СПб.: Питер, 2003. – Т.1. – 424 с.
99. Веников, В.А. Физическое моделирование электрических систем / В.А. Веников, А.В. Иванов-Смоленский. – М., Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1956. – 359 с.
100. Филиппов, И.Ф. Теплообмен в электрических машинах: учебное пособие для вузов / И.Ф. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986 – 256 с.
101. Сипайлов, Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учебник для вузов / Г.А. Сипайлов. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.
102. Свидетельство № 2015615063 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия/ А.Р. Сафин, И.В. Ившин, Н.В. Денисова, А.Н. Цветков, А.М. Копылов. - № 2015615063; заявл. 17.03.2015; опубл. 20.02.2016.
103. Свидетельство № 2016611030 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров паза и количества витков обмоток статора электрической машины возвратно-поступательного движения/ А.М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин, И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Р.Ш. Мисбахов, А.Н. Цветков, А.К. Мезиков, Л.В. Долманюк, В.В. Макисмов. - № 2016611030; заявл.08.12.2015; опубл. 25.01.2016.
104. Свидетельство № 2016663776 Рос. Федерация. Программа управления стендом для испытания обратимых электрических машин возвратно-поступательного действия / Р.Р. Гибадуллин, А.Н. Цветков, И.В. Ившин, А.М. Копылов, А.Р. Сафин. - № 2016663776; заявл.08.12.2015; опубл. 25.01.2016.
105. Свидетельство № 2016663776 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров индуктора электрической машины возвратно-поступательного движения / А.М. Копылов, А.Р. Сафин, И.В. Ившин, Р.Р. Гибадуллин. - № 2016663776; заявл.08.12.2015; опубл. 25.01.2016.
106. Свидетельство № 2018613530 Рос. Федерация. Программа топологической оптимизации электрических машин на основе генетического

алгоритма / А.М. Копылов, А.Р. Сафин, Р.Р. Хуснутдинов, В.В. Максимов, А.Н. Цветков, Р.Р. Гибадуллин. - № 2018613530; заявл.13.11.2017; опубл. 16.03.2018.

107. Safin, A. R. Adaptive Control System of the Pumping Unit / A.N. Tsvetkov, I.V. Ivshin, T.I. Petrov, R.Sh. Misbakhov, V.Yu. Kornilov// International Journal of Engineering and Advanced Technology. –2019. – №.8– P. 289.

108. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников. – М. :Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

109. Andersen, S.B. Evolution strategies and multi-objective optimization of permanent magnet motor / S. B. Andersen, I.F. Santos // Applied Soft Computing. – 2012. – №. 12. – P. 778.

110. Сафин, А. Р. Разработка метода проектирования линейных электрических машин возвратно-поступательного действия на основе топологической оптимизации / А. Р. Сафин, Р. Р. Хуснутдинов, А. М. Копылов, В. В. Максимов, А. Н. Цветков, Р. Р. Гибадуллин // Материалы научно-технической конференции по итогам совместного конкурса фундаментальных исследований РФФИ – РТ. – Казань, 2017. – С. 287.

111. Сафин, А. Р. Разработка метода проектирования линейных электрических машин возвратно-поступательного действия на основе топологической оптимизации / А. Р. Сафин, Р. Р. Хуснутдинов, А. М. Копылов, В. В. Максимов, А. Н. Цветков, Р. Р. Гибадуллин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 5. – С. 34.

112. Сафин, А.Р., Обоснование рациональной модели тележки трамвая на основе параллельного моделирования в среде Matlab/Simulink и CAD, CAE - системе Catia V5 / А.Р. Сафин, Р.Ш. Мисбахов, В.М. Гуреев // Электроника и электрооборудование транспорта. –2017. – № 5-6. – С. 28.

113. Сафин, А.Р. Анализ развития электроприводов для станков-качалок нефти по результатам патентного поиска/ И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Т.И. Петров, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов, А.И. Мухаметшин // Проблемы энергетики. –2019.– № 5. – С. 3.

114. Гибадуллин, Р. Р. Испытательный стенд с программно-аппаратным комплексом для исследования электрической машины возвратно-поступательного действия / Р. Р. Гибадуллин, А. Н. Цветков, А. Р. Сафин, А. М. Копылов, И. В. Ившин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 3. – С. 105.

115. Гибадуллин, Р. Р. Особенности разработки испытательного стенда для электрических машин возвратно-поступательного действия, работающих в генераторном режиме / Р. Р. Гибадуллин, А. Н. Цветков, А. М. Копылов // Материалы X международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу - творчество молодых». Часть 2. – Йошкар-Ола, 2015. – С. 236.

116. Гибадуллин, Р. Р. Разработка программно-аппаратного комплекса испытательного стенда для электрических машин возвратно-поступательного действия, работающих в тяжелых условиях / Р. Р. Гибадуллин, А. Н. Цветков, А. М. Копылов, Л. В. Долманюк // Материалы I поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». – Казань, 2015. – С. 553.

117. Гибадуллин, Р. Р. Система привода и нагружения испытательного стенда для электрических машин возвратно-поступательного действия / Р. Р. Гибадуллин, А. М. Копылов, И. В. Ившин, А. Н. Цветков, Л. В. Долманюк // Энергетика Татарстана. Развитие энергетики. – 2016. – № 1. – С. 22.

118. Гибадуллин, Р. Р. Стенд для испытания обратимых электрических машин для возвратно-поступательного действия / Р. Р. Гибадуллин, А. Н. Цветков, А. М. Копылов, Л. В. Долманюк // Материалы I поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». – Казань, 2015. – С. 109.

119. Сафин, А. Р. Разработка обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия для тяжелых условий эксплуатации / А. Р. Сафин, И. В.

Ившин, А. Н. Цветков, А. М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин // Материалы международной научно-практической конференции: «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли». – Альметьевск, 2016. – С. 225.

120. Ившин, И.Р. Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике: монография. Цифровые технологии, возобновляемые источники и малая энергетика: монография / И.В. Ившин, А.Р. Сафин, А.Н. Цветков, Н.В. Денисова, А.Н. Копылов, Р.Р. Гибадуллин; под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова, Э.В. Шамсутдинова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – В 3 т. Т. I. – 424 с.

121. Ившин, И. В. Численное моделирование динамических процессов обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия / И. В. Ившин, А. Р. Сафин, А. М. Копылов // VII Международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика – ЭЭЭ-2015». Часть 1. – Новосибирск, 2015. – С. 40.

122. Ившин, И. В. Перспективы применения рекуперации энергии в подвеске муниципальных транспортных средств республики Татарстан на основе линейного генератора возвратно-поступательного действия/ И.В. Ившин, А. Р. Сафин, Л.В. Долманюк Л.В // Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеллектуальные транспортные системы. Материалы IV международной научно-практической конференции. – Казань, 2016. – С. 223.

123. Копылов, А. М. Обзор и анализ существующих математических моделей обратимых электрических машин возвратно-поступательного действия / А. М. Копылов, А. Р. Сафин, Р. Р. Гибадуллин // Материалы X международной молодежной научной конференция по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу - творчество молодых». Часть 2. – Йошкар-Ола, 2015. – С. 254.

124. Сафин, А.Р. Разработка рациональной структуры тягового электропривода трамвая в среде моделирования электроэнергетических объектов программы Matlab/ А.Р. Сафин, Р.Ш. Мисбахов, В.М. Гуреев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – № 2. –С. 111.

125. Копылов, А. М. Определение предельных эффективных конструктивных параметров и технических характеристик обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия / А. М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин, И. В. Ившин, А. Р. Сафин, Р. Ш. Мисбахов // Энергетика Татарстана. Развитие энергетики. – 2015. – № 4(40). – С. 75.

126. Грачёва, Е.И., Ившин И.В., Сафин А.Р. Разработка рациональной схемы управления тягового электропривода трамвая в среде моделирования программы *Matlab* /Е.И. Грачёва, И.В. Ившин, А.Р. Сафин // Электрика. – 2015. – № 6. – С. 28.

127. Logacheva, A.G. Justification for reversible reciprocating electrical machine design choice/ A.G. Logacheva, Sh.I. Vafin, I.V. Ivshin, A.R.Safin // The Third International Conference on Eurasian scientific development. – Vienna, 2014. – С. 157.

128. Копылов, А. М. Перспективы применения линейного двигателя-генератора для повышения энергоэффективности гибридного транспорта [Электронный ресурс]. / А. М. Копылов, И. В. Ившин, Н. В. Денисова, А. Р. Сафин // Материалы I Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». – Кемерово, 2014. – 1 электрон. опт. Диск (CD-ROM).

129. Сафин, А.Р. Обоснование рациональной схемы управления тяговым электроприводом трамвая на основе разработки имитационной модели / А.Р. Сафин, Р.Ш. Мисбахов, В.М. Гуреев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 3. – С. 19.

130. Сафин, А. Р. Математическая модель двигателя-генератора возвратно-поступательного движения / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, А. Н. Цветков, А. М. Копылов // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2014. – Т. 1. – № 8. – С. 21.

131. Kopylov, A. M. Assessment, calculation and choice of design data for reversible reciprocating electric machine / A. M. Kopylov, I. V. Ivshin, A. R. Safin, R. Sh. Misbakhov, R. R. Gibadullin // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 10. – P. 31449.

132. Reshetnikov, A. P. Optimization of reciprocating linear generator parameters / A. P. Reshetnikov, I. V. Ivshin, N. V. Denisova, A. R. Safin, R. Sh. Misbakhov, A. M. Kopylov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 10. – P. 31403.

133. Safin, A. R. Selection and justification of design parameters for reversible reciprocating electric machine / A. R. Safin, I. V. Ivshin, A. M. Kopylov, R. Sh. Misbakhov, A. N. Tsvetkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 10. P. 31427.

134. Kopylov, A. M. Numerical Modeling of Dynamic Processes of the reciprocating reversible Electrical Machine / I. V. Ivshin, A. M. Kopylov, A. R. Safin // Applied Mechanics and Materials: Trans Tech Publications, Switzerland. – 2015. – №. 792. – P. 134 .

135. Safin, A.R Controlled rectifier simulation model development for reversible reciprocating electrical machine/ A.R.Safin , I.V. Ivshin, R.Sh. Misbakhov, A.N. Tsvetkov, N.V. Denisova // International Journal Of Pharmacy & Technology. –2016. – №.8–P. 14059.

136. Sirotkin, O.R. Titanium chemical nature features which determine its most important performance properties in linear engine-generator/ R. O. Sirotkin, O. S. Sirotkin I. V. Ivshin, A. R. Safin, A. N. Tsvetkov , L. V. Dolomanyuk // Journal of Engineering and Applied Sciences. –2016. – №.11–P. 9664.

137. Пат. 159449 Рос. Федерация: МПК H02P25/06, H02P6/16. Устройство управления обратимой электрической машиной возвратно-поступательного действия. / А. М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин, И. В. Ившин, Ш. И. Вафин, А. Р. Сафин, В. В., Максимов, Л. В. Доломанюк, А. Н. Цветков, М. Ф. Низамиев. // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2016. – № 4. – 2 с.

138. Пат. 161647 Рос. Федерация: МПК H02P25/066, H02P9/06, H02K29/06.

Устройство управления обратимой электрической машиной возвратно-поступательного действия. / А. М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин, И. В. Ившин, Ш. И. Вафин, А. Р. Сафин, В. В., Максимов, Л. В. Доломанюк, А. Н. Цветков, М. Ф. Низамиев. // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2016. – № 12. – 2 с.

139. Сафин, А. Р. Выбор и оптимизация конструктивных параметров обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, А. М. Копылов, Е. И. Грачева, А. Н. Цветков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 3. – С. 10.

140. Tsvetkov, A.N Hardware-software system test bench for studies of a reciprocating electrical machine/ Tsvetkov A.N., Safin A.R., Gibadullin R.R.// 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM . – 2016. – P. 7911493.

141. Копылов, А. М. Разработка электрической машины возвратно-поступательного действия модульного типа / А. М. Копылов, А. Р. Сафин, Р. Р. Гибадуллин, А. Н. Цветков // Проблемы энергетики. – 2016. – № 9. – С. 102.

142. Сафин, А.Р. Разработка экспериментального образца линейного электродвигателя бесштангового погружного насосного устройства для тяжелых условий нефтедобычи/ А.Р. Сафин, И.В. Ившин, А.Н. Цветков, А.М. Копылов, Р.Р. Гибадуллин, Л.В. Долманюк // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли материалы Международной научно-практической конференции. Альметьевский государственный нефтяной институт. – 2018. – С. 34.

143. Petrov, T.I., The Prospects of Using a Synchronous Machine with Permanent Magnets in the Oil Industry/ T.I. Petrov, A.R. Safin, I.V. Ivshin, A.N. Tsvetkov, V.Yu Kornilov // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – 2018. – P. 336.

144. Петров, Т.И. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом/ Т.И. Петров, А.Р. Сафин, И.В. Ившин, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов // Проблемы энергетики. –2018.–№ 7–8. – С. 107.

145. Ившин, И.В. Разработка и реализация испытательного стенда для исследования характеристик синхронного электродвигателя / И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Т.И. Петров, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов, А.И. Мухаметшин //Вестник КГЭУ. –2018.–№ 3(39). – С. 45.

146. Свидетельство № 2019610240 Рос. Федерация. Программа для топологической оптимизации ротора синхронной машины / А.Р. Сафин, А.М. Копылов, А.Н. Цветков, Р.Р. Гибадуллин, Р.Р. Хуснутдинов, В.В., Максимов, Т.И. Петров. – № 2019610240; заявл. 18.12.2018; опубл. 09.01.2019.

147. Сафин, А. Р. Разработка метода проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами для привода станков-качалок / А. Р. Сафин, Р. Р. Хуснутдинов, А. М. Копылов, В. В. Максимов, А. Н. Цветков, Р. Р. Гибадуллин, Т.И. Петров // Материалы научно-технической конференции по итогам совместного конкурса фундаментальных исследований РФФИ – РТ. – Казань, 2018. – С. 487.

148. Сафин, А.Р. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма/ А.Р.Сафин, Р.Р. Хуснутдинов, А.М. Копылов, В.В. Максимов, А.Н. Цветков, Р.Р. Гибадуллин, Т.И. Петров // Вестник КГЭУ. –2018. –№4 (40). –С. 77.

149. Safin, A.R. The Method Topological Optimization for Design Linear Electric Machines / A. R. Safin, R. Khusnutdinov, A. M. Kopylov // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", Vladivostok, Russia. – 2019. – P.46.

150. Сафин, А.Р. Синхронные двигатели в нефтяной промышленности/ А.Р. Сафин, А.Н. Цветков, И.В. Ившин, Т.И. Петров, Л.В. Долومانюк // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. Материалы Международной научно-практической конференции. –2018. –С. 469.

151. Petrov, T.I. Control station based on synchronous motors/ T.I. Petrov, A.R. Safin, I.V. Ivshin, L.V. Dolomanyuk, M.F. Nizamiev// Russia International Scientific and Practical Conference: Water Power Energy Forum 2018. – 2018. –С. 1561.

152. Афанасьев, А. Ю. Адаптивная система идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя / А. Ю. Афанасьев, В. Г. Макаров, Ю. А. Яковлев, В. Н. Ханнанова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 1-2. – С. 90.

153. Бабилова, Н. Л. К вопросу о классификации линейных электрических генераторов / Н. Л. Бабилова, Р. Р. Саттаров, Е. А. Полихач // Энергетика. Электротехнические комплексы и системы. – Уфа, 2009. – Т. 12. – № 30. – С. 144.
154. Бабилова, Н. Л. Электрогенератор для зарядного устройства / Н. Л. Бабилова, А. Р. Валеев // Сборник трудов IV Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. – Уфа, 2009. – Т. 2. – С. 49.
155. Высоцкий, В. Е. Линейный генератор с постоянными магнитами для систем электропитания автономных объектов / В. Е. Высоцкий // Известия вузов. Электромеханика. – 2010. – № 1. – С. 80.
156. ГОСТ 16264.2-85 Двигатели синхронные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
157. ГОСТ 9630-80 Двигатели трехфазные асинхронные напряжением свыше 1000 В. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
158. ГОСТ Р 8.736–2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 2013.
159. Духанин, В. И. Автомобильный генератор возвратно-поступательного движения. Анализ конструкции. / В. И. Духанин // Международная научно-техническая конференция ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященная 145-летию МГТУ «МАМИ». – 2010.
160. Духанин, В. И. Анализ конструкции автомобильного генератора возвратно-поступательного движения / В. И. Духанин, А. А. Кецарис // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ». – 2012. – № 2. – С. 74.
161. Духанин, В. И. Анализ рабочего процесса линейного генератора с возвратно-поступательным движением / В. И. Духанин, А. А. Кецарис // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – № 14. – С. 17.
162. Духанин, В. И. Выбор конструкции и математическая модель линейного электрического генератора с двигателем со свободным поршнем / В. И. Духанин, А.

А. Кецарис // Сборник материалов 75-й Международной научно-технической конференции. МГТУ «МАМИ». – 2011. – С. 74.

163. Ившин, И. В. Обратимая электрическая машина возвратно-поступательного действия в модульном исполнении / И. В. Ившин, Р. Р. Гибадуллин, А. М. Копылов, В. В. Максимов // Электрика. – 2015. – № 8. – С. 2.

164. Сафин, А.Р. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами / И.В. Ившин, Т.И. Петров, Грачева Е.И. // Проблемы энергетики. – 2019.–№ 6. – С. 4.

165. Копылов, А. М. Разработка обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия / А. М. Копылов, И. В. Ившин, Р. Р. Гибадуллин // Материалы XV Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». – Казань, 2015. – С. 102.

166. Логачева, А. Г. Влияние количества фаз обмотки статора на тяговое усилие линейного синхронного двигателя / А. Г. Логачева, Ш. И. Вафин, Р. Р. Гибадуллин, А. М. Копылов // Национальная ассоциация ученых (НАУ). Ежемесячный научный журнал. Часть 3. – 2015. – № 2(7). – С. 138.

167. Макаров, В. Г. Анализ точности математической модели трехфазного асинхронного двигателя с учетом нелинейности магнитопровода и потерь в стали / В. Г. Макаров, А. Ю. Афанасьев, В. А. Матюшин // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 6. – С. 1 00.

168. Новый линейный генератор позволит существенно увеличить дальность движения гибридных автомобилей [Электронный ресурс]. – Dailytechinfo, 2017. – Режим доступа: <http://www.dailytechinfo.org/auto/4876-novyuy-lineynyy-generator-pozvolit-suschestvenno-uelichit-dalnost-dvizheniya-gibridnyh-avtomobiley.html>.

169. Нурбосынов, Д. Н. Разработка имитационной модели группового пуска электроприводов электротехнического комплекса добывающей скважины / Д. Н.

Нурбосынов, Т. В. Табачникова, Ф. А. Иванов, А. В. Махт // Промышленная энергетика. – 2018. – № 2. – С. 2.

170. Рыжков, А. В. Анализ и выбор рациональных конструкций цилиндрического линейного двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением: дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Рыжков Александр Викторович. – Воронеж, 2008. – 154 с.

171. Сарапулов, Ф. Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: учебное пособие / Ф. Н. Сарапулов, С. Ф. Сарапулов, П. Шымчак. – Красноярск: Изд-во ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», 2013. – 237 с.

172. Сергеенкова, Е. В. Исследование линейного синхронного генератора с постоянными магнитами, преобразующего энергию колебаний в электрическую / Е. В. Сергеенкова, М. А. Федин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 13.

173. Сергеенкова, Е. В. Магнитоэлектрический линейный генератор с постоянными магнитами для преобразования энергии волн / Е. В. Сергеенкова, Г. С. Тамоян // V Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения». – Казань, 2010. – С. 8.

174. Тарашев, С. А. Вентильный линейный генератор для систем электропитания автономных объектов: дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Тарашев Сергей Александрович. – Самара, 2011. – 128 с.

175. Темнов, Э. С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования малоразмерных двигатель-генераторных установок как единой динамической системы: дис. канд. техн. наук: 05.04.02 / Темнов Эдуард Сергеевич. – Тула, 2005. – 134 с.

176. Хайруллин, И. Х. Трехкоординатный колебательный электромеханический преобразователь энергии [Электронный ресурс] / И. Х. Хайруллин, Л. Н. Риянов, В. Е. Вавилов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – Режим доступа: [www.science-education.ru/105-7245](http://www.science-education.ru/105-7245)

177. Мощинский, Ю. А. Разработка имитационной модели электродинамического амортизатора/ Ю.А. Мощинский, Е.М. Соколова // *Электричество*. - 2017. - № 4. - С. 56.
178. Штаргот, Д. Рекомендации по применению высокопроизводительных многоканальных АЦП с одновременной выборкой в системах сбора данных / Д. Штаргот // *Компоненты и технологии*. – 2009. – № 95. – С. 44.
179. Andriollo, M. Performance comparison of saturated tubular linear permanent magnet generators by simplified FEAs / M. Andriollo, L. Dall'Ora, G. Martinelli, A. Tortella // *ICRERA*. – 2012.
180. Babic, S. I. Improvement in the analytical calculation of the magnetic field produced by permanent magnet rings / S. I. Babic, C. Akyel // *Progress in Electromagnetic Research*. – 2008. – № 5. – P. 71.
181. Filippo, M. Design optimization and control strategies for PM Multiphase Tubular Linear Actuators / M. Filippo // PhD Thesis, University of Bologna. – 2009.
182. Frank, R. The linear generator as integral component of an energy converter for electric vehicles / R. Frank // *European All-Wheel Drive Congress Graz*. – 2011.
183. Gräf, M. Investigation of a high efficient Free Piston Linear Generator with variable Stroke and variable Compression Ratio / M. Gräf, P. Treffinger, E. Pohl, F. Rinderknecht // *WEVA Journal*. – 2007. – № 1.
184. Hansson, J. Operational strategies for a free piston energy converter / J. Hansson, Carlsson F., Sadarangani C., Leksell M. // *Forschungsbericht, Royal Institute of Technology, Stockholm*. – 2005.
185. Hugon, C. Design of arbitrarily homogeneous permanent magnet systems for NMR and MRI: Theory and experimental developments of a simple portable magnet / C. Hugon, F. D'Amico, G. Aubert, D. Sakellariou // *Journal of Magnetic Resonance*. – 2010. – № 205. – P. 75.
186. Jung, S. Performance evaluation of permanent magnet linear generator for charging the battery of mobile apparatus / S. Jung, H. Choi // *Forschungsbericht, School of Electrical Engineering Seoul, National University Seoul*. – 2001.

187. LEM brushless linear motor Rockwell Automation [Online]. – NY: Rockwell Automation. Data Sheet, 2012. – Available: [www.rockwellautomation.com/anorad/downloads/pdf/AnoradLEM.pdf](http://www.rockwellautomation.com/anorad/downloads/pdf/AnoradLEM.pdf).
188. Misbakhov, R. Sh. Influence of fuel hydrogen additives on the characteristics of a gaz-piston engine under changes of an ignition advance angle / R. Sh. Misbakhov, Yu. F. Gortyshov, V. M. Gureev, I. F. Gumerov, A. P. Shaikin // Russian Aeronautics. – 2009. – Vol. 52. – № 4. – P. 488.
189. Mizuno, T. An examination for increasing the motor constant of a cylindrical moving magnet-type linear actuator / T. Mizuno, M. Kawai, F. Tsuchiya, M. Kosugi, H. Yamada // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – № 41. – P. 3976.
190. Models STA1104-1116 servotube actuator [Online]. – UK.: Dunker- motoren Linear Systems Limited. Data Sheet, Basildon, Essex, 2011. – Available: [http://www.dunkermotor.com/data/linearsysteme/downloads/DS01097\\_EN.pdf](http://www.dunkermotor.com/data/linearsysteme/downloads/DS01097_EN.pdf).
191. Oprea, C. A. Renewable Energy Applications: Tubular vs. Four-Sided Structures / C. A. Oprea, C. S. Martis, F. N. Jurca, D. Fodorean, L. Szaby // Technical University of Cluj-Napoca: Europass CV. – 2011. – P. 588.
192. Pirisi, A. Novel modeling design of three phase tubular permanent magnet linear generator for marine applications, in Power Engineering, Energy and Electrical Drives / A. Pirisi, G. Grusso, R. E. Zich // International Conference «POWERENG 2009». – 2009. – P. 78.
193. Polinder, H. Linear generator systems for wave energy conversion / H. Polinder, M. A. Mueller, M. Scutto, M. Goden // Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference. – Porto, Portugal, 2007.
194. Ribeiro, J. Development of a Low Speed Linear Generator for use in a Wave Energy Converter / J. Ribeiro, I. Martins // International Conference on Renewable Energies and Power Quality Granada. – 2010.
195. Santana, A. G. Output Power of Linear Generator under Reactive Control in Regular Waves / A. G. Santana, D. M. Andrade, A. V. Jaen // ICREPQ. – 2011.

196. Sarwar, A. Optimal Halbach permanent magnet designs for maximally pulling and pushing nanoparticles / A. Sarwar, A. Nemirovski, B. Shapiro // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2012. – № 324. – P. 742.
197. Shuaiqing, X. Numerical analysis of two-stroke free piston engine operating on HCCI combustion / X. Shuaiqing, W. Yang, Z. Tao, X. Tao, T. Chengjun // *Applied Energy*. – 2011. – № 88. – P. 3712.
198. Sintered isotropic Nd-Fe-B magnet specification [Online]. – *Applied Magnetic Materials (AMM)*, 2017. – Available: <http://www.appliedmagnet.com/catalog.0.html4.0.html>.
199. Sintered neodymium iron boron (sintered Nd-Fe-B) [Online]. – *MMG MagDev*. – 2008. – Available: <http://www.magdev.co.uk/permanent-magnets>.
200. Walther, M. Micro-patterning of Nd-Fe-B and SmCo magnet films for integration into micro-electro-mechanical-systems / M. Walther, C. Marcoux, B. Desloges, R. Grechishkin, D. Givord, N. M. Dempsey // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2009. – № 321. – P. 590.
201. Yanliang, X. Development of Tubular Linear Permanent Magnet Synchronous Motor Used in Oil-well Field / X. Yanliang, L. Xiquan // *Telkomnika*. – Vol. 9. – № 3. – 2011. – P. 515.
202. Zhou, P. Temperature dependent demagnetization model of permanent magnets for finite element analysis / P. Zhou, D. Lin, Y. Xiao, N. Lambert, M. Rahman // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2012. – Vol. 48. – № 2. – P. 1031.
203. Byun, J. K. Topology optimization of electrical devices using mutual energy and sensitivity/ J. K. Byun, S. Y. Hahn, I. H. Park // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1999. – Vol. 35. – № 5. – P. 3718.
204. Lee, J. Structural topology optimization of electrical machinery to maximize stiffness with body force distribution/ J. Lee, N. Kikuchi // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2010. – Vol. 46. – № 10. – P. 3790.
205. Park, S. Design of magnetic actuator with nonlinear ferromagnetic materials using level-set based topology optimization/ S. Park, S. Min// *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2010. – Vol. 46. – № 2. – P. 618.

206. Watanabe, K. Optimization of inductors using Evolutionary algorithms and its experimental validation/ K. Watanabe, F. Campelo, Y. Iijima, K. Kawano, T. Matsuo, T. Mifune, T. H. Igarashi // IEEE Transactions on Magnetics. – 2010. – Vol. 46. – № 8. – P. 3393.

207. Кули-заде, К.Н. Электроэнергетика насосной нефтедобычи/ К.Н. Кули-заде, И.Е. Хайкин. –М.: Недра, 1971. –208 с.

208. Осин, И.Л. Электрические машины: синхронные машины: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика»/ И.Л. Осин, Ю.Г. Шакарян; под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 1993. – 304 с.

209. Miller, T.J.E. Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives / T.J.E. Miller. –Oxford: Clarendon Press, 1989. – 207 p.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Описание программ для оптимизации конструктивных параметров электрической машины возвратно-поступательного движения

## 1. Программы для оптимизации конструктивных параметров ЭМВПД

– Программа 1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611030 от 25 января 2016 г. «Программа оптимизации конструктивных размеров пазов и количества витков обмоток статора электрической машины возвратно-поступательного движения»;

– Программа 2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615063 от 20 февраля 2016 г. «Программа оптимизации конструктивных размеров статора и транслятора электрической машины возвратно-поступательного действия»;

– Программа 3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663776 от 20 ноября 2016 г. «Программа оптимизации конструктивных размеров транслятора электрической машины возвратно-поступательного движения»;

– Программа 4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613530 от 16 марта 2018 г. «Программа топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма».

2. Аппаратное и программное обеспечение, необходимое для функционирования программ для оптимизации конструктивных параметров электрической машины возвратно-поступательного движения.

Тип ЭВМ: x86, x64 – совместимые платформы.

Для выполнения программ для оптимизации конструктивных параметров электрической машины возвратно-поступательного движения требуется следующий состав системного программного обеспечения:

1) операционная система *Windows 7* или выше;

2) среда программирования *Matlab 6.0, Visual Basic for Application (Microsoft Excel)*.

### 3. Функциональное назначение

а) Программа 1 «Программа оптимизации конструктивных размеров пазов и количества витков обмоток статора электрической машины возвратно-поступательного движения» позволяет определять число витков обмотки, а также глубину для каждого паза статора электрической машины возвратно-поступательного действия с целью достижения минимального коэффициента несинусоидальности выходной ЭДС в обмотках статора при генераторном режиме.

б) Программа 2 «Программа оптимизации конструктивных размеров статора и транслятора электрической машины возвратно-поступательного действия» позволяет определить оптимальные конструктивные размеры статора и индуктора электрической машины возвратно-поступательного движения с целью получения максимальной электрической мощности.

в) Программа 3 «Программа оптимизации конструктивных размеров транслятора электрической машины возвратно-поступательного движения» позволяет определять наиболее оптимальные конструктивные размеры постоянных магнитов индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия путем сопоставления массогабаритных параметров постоянных магнитов индуктора и медных обмоток статора машины, в результате чего определяется вариант с минимальными (условными) издержками сырья при производстве.

г) Программа 4 «Программа топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма» предназначена для топологической оптимизации распределения материалов в электрических машинах с использованием генетического алгоритма в сочетании с группировкой по материалу и процедурой очистки. Предлагаемый процесс компьютерной

оптимизации объединяет топологический метод оптимизации и метод, учитывающий легкость изготовления. Для ускорения процесса оптимизации топологии электрической машины на основе генетического алгоритма реализована концепция параллельных (многопоточных) вычислений.

4. Этапы функционирования программ для оптимизации конструктивных параметров электрической машины возвратно-поступательного движения:

- 1) ввод исходных данных;
- 2) вычисление параметров;
- 3) вывод полученных в п. 2 результатов в заготовленные ячейки Microsoft Excel.

5. Вызов и загрузка модулей программ для оптимизации конструктивных параметров электрической машины возвратно-поступательного движения.

Для управления запуском прикладных программ для оптимизации конструктивных параметров электрической машины возвратно-поступательного движения служит среда программирования Microsoft Excel.

Доступ к этой программе обеспечивается следующим образом:

Чтобы запустить программу дважды щелкните на иконку Microsoft Excel. Откроется рабочая среда.

При нажатии сочетания клавиш «Alt+F8» откроется окно доступа к операциям с макросами. Далее необходимо выбрать макрос «LEMRRM» и нажать кнопку «Выполнить».

Появится окно системы программирования VBA на котором представлен листинг программы.

## 6. Представление входных данных.

Программы для оптимизации конструктивных параметров электрической машины возвратно-поступательного движения в ходе своей работы в качестве входных данных используют конструктивные параметры электрической машины возвратно-поступательного движения (Таблица П.А.1).

Таблица П.А.1 – Входные данные для вычислений

Наименование переменной	Обозначение в <i>Visual Basic for Applications</i>	Значение по умолчанию
$U_{mN}$ – напряжение питания, В	Umn	400
$\omega$ – частота, 1/с	w	100
$(P_{pr})_N$ – полезная мощность электрической машины (с учетом трения), кВт	Ppr	10
$Q_{max}$ – максимальное усилие при пуске, Н	Qmax	1200
$x_m$ – амплитуда колебаний, м	xm	$120 \cdot 10^{-3}$
$B_r$ – остаточная индукция, Тл	Br	1,2
$H_c$ – коэрцетивная сила, А/м	Hc	$850 \cdot 10^{-3}$
$L_M$ – толщина магнита, м	Lm	$6 \cdot 10^{-3}$
$h_{ar}$ – максимальная относительная размагничиваемая реакция якоря	har	0,3

$B_{rt}$ – индукция в рабочем режиме, Тл	Brt	1,14
$H_{ct}$ – коэрцитивная сила в рабочем режиме, А/м	Hct	$700 \cdot 10^{-3}$
$\mu_r$ – реверсивная проницаемость, Гн/м	ur	$16,3 \cdot 10^{-7}$

Продолжение Табл. П.А.1

$k_p$ – коэффициент, учитывающий влияние потерь в стали и механических потерь	kp	1,2
$k_\mu$ – коэффициент насыщения магнитной цепи	ku	1,05
$d$ – воздушный зазор между магнитом и магнитопроводом, м	d	$0,6 \cdot 10^{-3}$
$h_0$ – глубина одного паза с обмоткой, м	h0	$30 \cdot 10^{-3}$
$l_0$ – ширина одного паза с обмоткой, м	l0	$5 \cdot 10^{-3}$
$n_0$ – количество пазов с обмоткой	n0	18
ph – количество фаз	ph	3

Исходные параметры вводятся посредством среды программирования *Visual Basic for Applications* (Рисунок А.1).

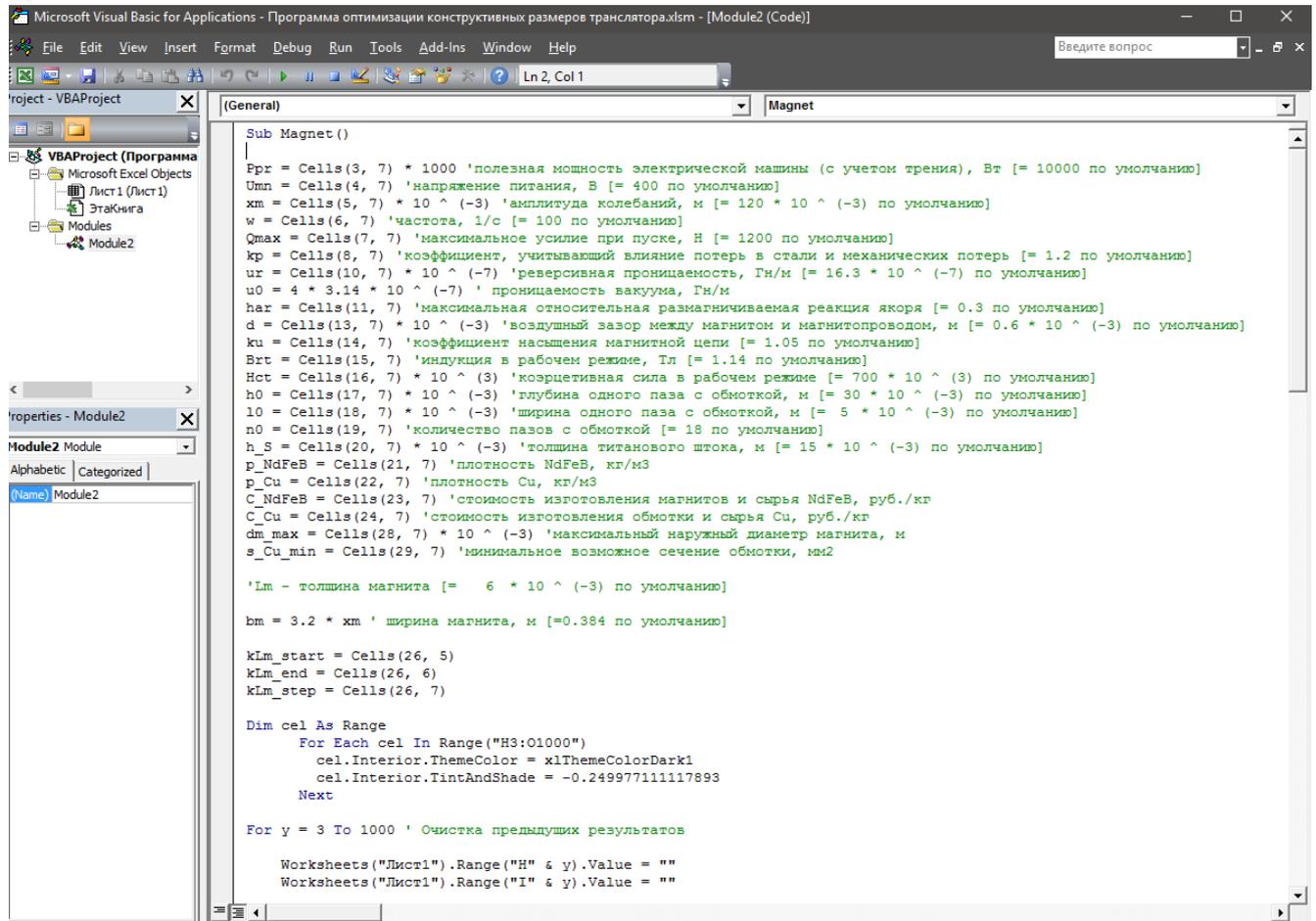


Рисунок А.1 – Окно ввода данных Visual Basic for Applications

## 7. Представление выходных данных и результатов вычислений.

Программы для оптимизации конструктивных параметров электрической машины возвратно-поступательного движения в ходе своей работы, в качестве выходных данных, используют конструктивные параметры электрической машины возвратно-поступательного движения.

а) Программа 1 «Программа оптимизации конструктивных размеров пазов и количества витков обмоток статора электрической машины возвратно-поступательного движения» выполнена в приложении *Microsoft Excel* и

представлена в виде исходного кода для встроенной среды программирования VBA.

Исходные параметры вводятся посредством таблицы *Microsoft Excel*.

Выходные данные выводятся в таблицу *Microsoft Excel* в виде данных расчетов, а также графика ЭДС, возникающей в обмотках статора при перемещении индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия (Рисунок А.2).

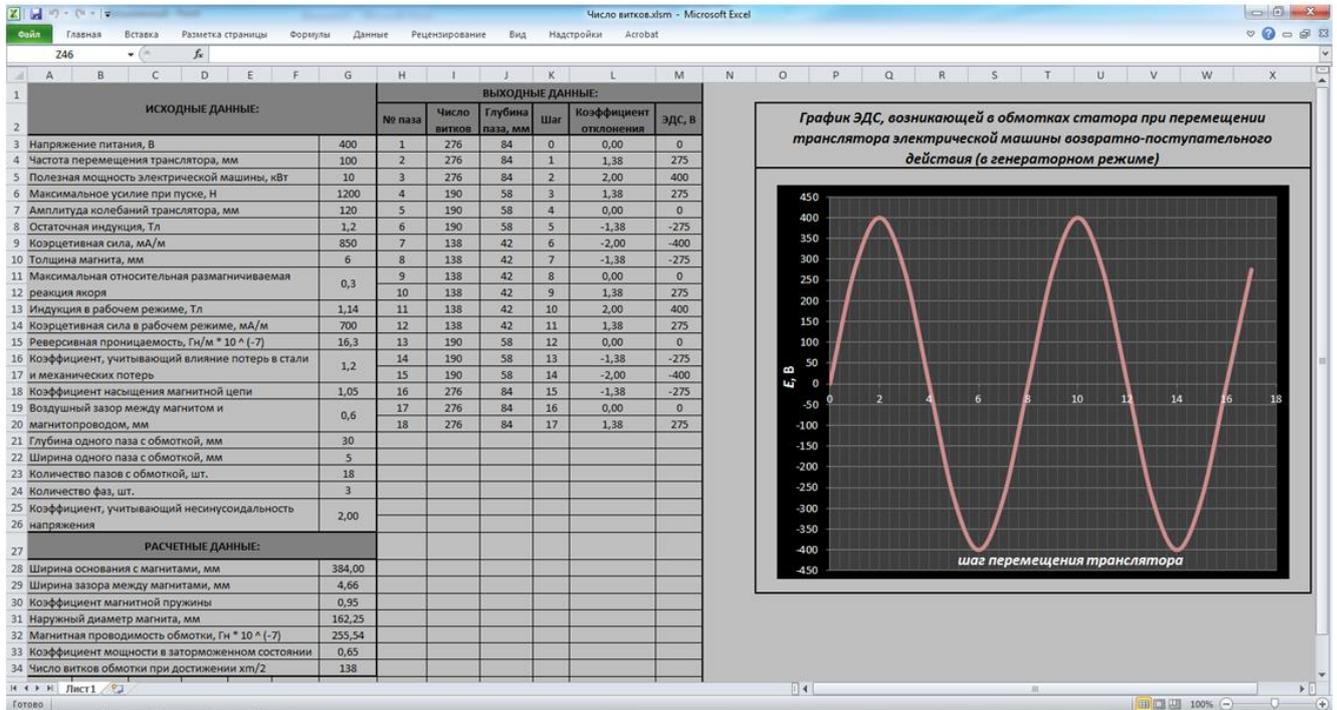


Рисунок А.2 – Окно визуализации вычислений Программы 1

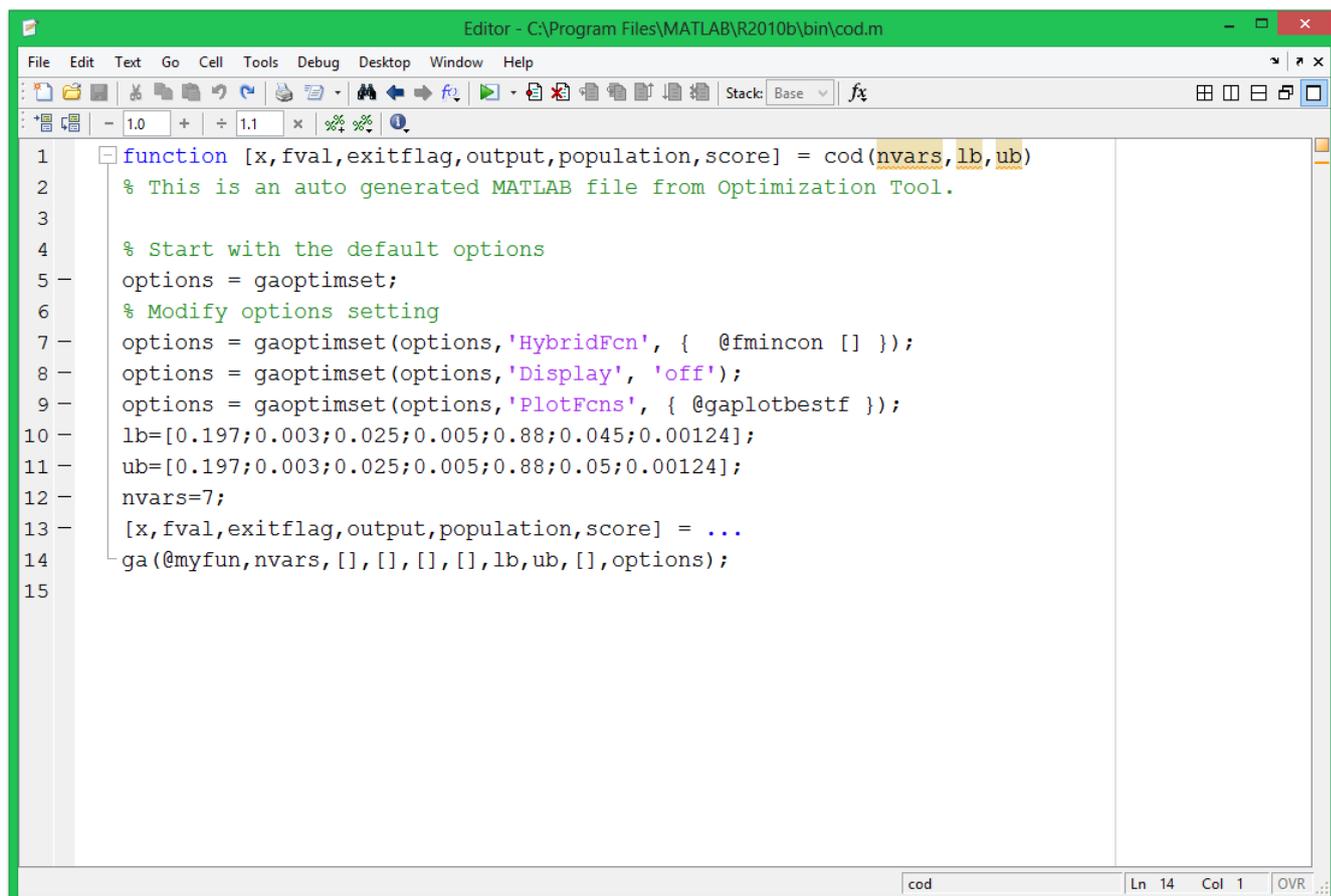
б) Программа 2 «Программа оптимизации конструктивных размеров статора и транслятора электрической машины возвратно-поступательного движения» написана на языке *Matlab*.

Исходные параметры вводятся посредством среды программирования *Matlab*.

С помощью стандартных функций языка *Matlab* определена целевая функция, алгоритм оптимизации, пределы изменений конструктивных размеров. Процедура оптимизации происходит следующим образом: в 10 и 11 строках

программы вводятся необходимые пределы изменений конструктивных размеров, входящих в целевую функцию. В результате в командном окне выводится полученные значения целевой функции и конструктивных размеров.

Выходные данные выводятся в окно выводы результатов вычислений Matlab в виде данных расчетов (Рисунок А.3).



```

1 function [x,fval,exitflag,output,population,score] = cod(nvars,lb,ub)
2 % This is an auto generated MATLAB file from Optimization Tool.
3
4 % Start with the default options
5 options = gaoptimset;
6 % Modify options setting
7 options = gaoptimset(options,'HybridFcn',{@fmincon []});
8 options = gaoptimset(options,'Display','off');
9 options = gaoptimset(options,'PlotFcns',{@gaplotbestf});
10 lb=[0.197;0.003;0.025;0.005;0.88;0.045;0.00124];
11 ub=[0.197;0.003;0.025;0.005;0.88;0.05;0.00124];
12 nvars=7;
13 [x,fval,exitflag,output,population,score] = ...
14 ga(@myfun,nvars,[],[],[],[],lb,ub,[],options);
15

```

Рисунок А.3 – Окно выводы расчетных данных Программы 2

в) Программа 3 «Программа оптимизации конструктивных размеров транслятора электрической машины возвратно-поступательного движения» выполнена в приложении Microsoft Excel и представлена в виде исходного кода для встроенной среды программирования VBA.

Исходные параметры вводятся посредством таблицы Microsoft Excel.

Выходные данные выводятся в таблицу Microsoft Excel в виде данных расчетов (Рисунок А.4).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:				ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ:						
3	Полезная мощность электрической машины, кВт	10	1	8,2	0,93	209,93	237 x 1,9 мм2	25,14	12,68	103325,28
4	Напряжение питания, В	400	2	8,57	0,93	205,97	247 x 1,9 мм2	24,75	12,26	101223,04
5	Амплитуда колебаний транслятора, мм	120	3	8,95	0,93	202,35	257 x 1,8 мм2	23,36	11,83	96102,19
6	Частота перемещения транслятора, мм	100	4	9,32	0,93	199,04	267 x 1,7 мм2	23,09	11,39	94323,81
7	Максимальное усилие при пуске, Н	1200	5	9,69	0,92	198	277 x 1,7 мм2	21,90	10,94	89753,32
8	Коэффициент, учитывающий влияние потерь в стали и механических потерь	1,2	6	10,07	0,92	197,19	287 x 1,6 мм2	21,72	10,47	88195,18
9	Реверсивная проницаемость, Гн/м * 10 <sup>-7</sup> (-7)	16,3								
10	Максимальная относительная размагничиваемая реакция якоря	0,3								
11	Воздушный зазор между магнитом и	0,6								
12	Коэффициент насыщения магнитной цепи	1,05								
13	Индукция в рабочем режиме, Тл	1,14								
14	Косриетивная сила в рабочем режиме, мА/м	700								
15	Глубина одного паза с обмоткой, мм	30								
16	Ширина одного паза с обмоткой, мм	5								
17	Количество пазов с обмоткой	18								
18	Толщина титанового штока, мм	15								
19	Плотность NdFeB, кг/м3	7350								
20	Плотность Cu, кг/м3	8920								
21	Стоимость изготовления магнитов и сырья NdFeB,	2200								
22	Стоимость изготовления обмотки и сырья Cu, руб./кг	3000								
23	Диапазон анализируемых толщин магнитов, мм	ОТ	ДО	ШАГ						
24		1	50	1						
25	ОГРАНИЧЕНИЯ									
26	Максимальный наружный диаметр магнита, мм	205								
27	Минимальное возможное сечение обмотки, мм2	0,50								

Рисунок А.4 – Окно визуализации вычислений Программы 3

г) Программа 4 «Программа топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма» выполнена в интегрированной среде разработки Microsoft Visual Basic for Application, в которой доступны широкие возможности для работы с объектной моделью Microsoft Active Field для подключения и автоматизации среды моделирования магнитных полей методом конечных элементов.

Исходные параметры вводятся в текстовый файл формата «.txt»

Выходные данные выводятся в отдельное графическое окно (Рисунок А.4).

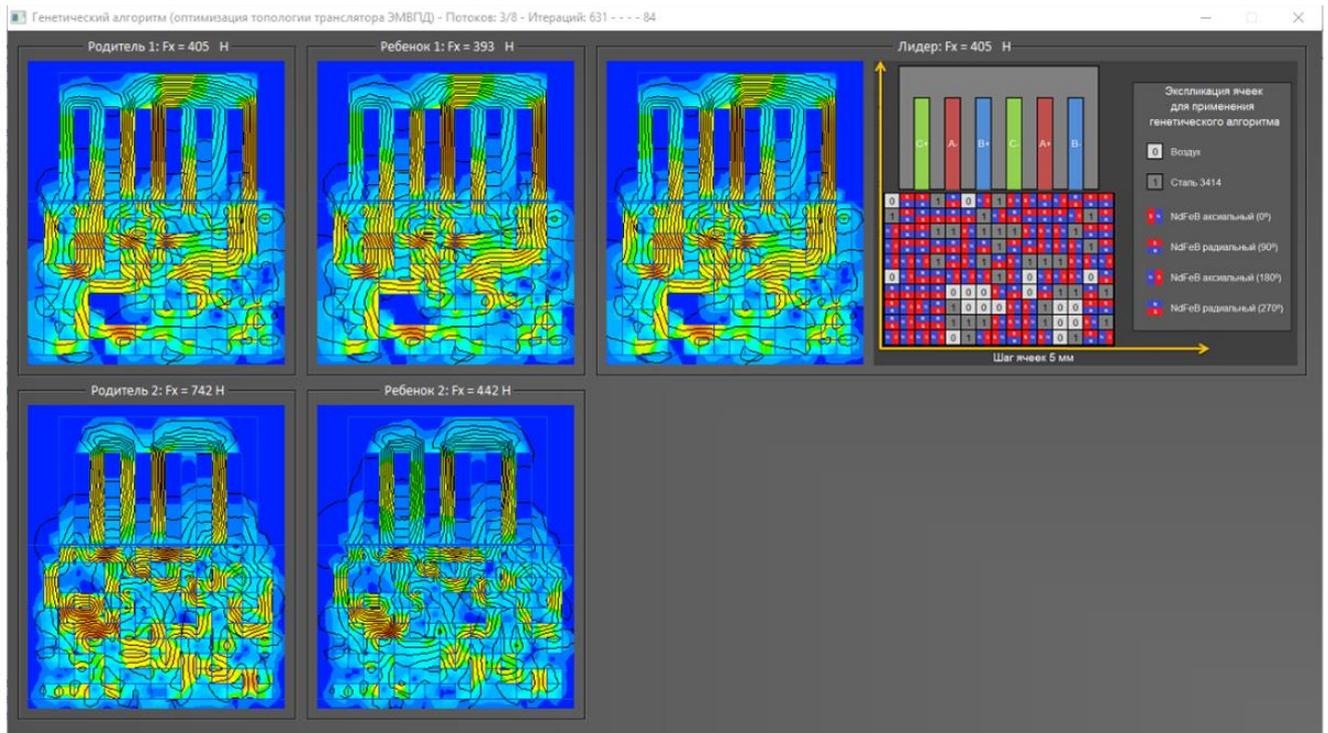


Рисунок А.5 – Окно визуализации вычислений Программы 4

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016611030

**Программа оптимизации конструктивных размеров пазов  
и количества витков обмоток статора электрической  
машины возвратно-поступательного движения**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального  
образования «Казанский государственный энергетический  
университет» (ФГБОУ ВПО «КГЭУ»)* (RU)

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2015661976

Дата поступления 08 декабря 2015 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 25 января 2016 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Излиев



Авторы: *Копылов Андрей Михайлович (RU), Гибадуллин Рамил Рифатович (RU), Ившин Игорь Владимирович (RU), Сафин Альфред Робертович (RU), Мисбахов Ринат Шаукатович (RU), Цветков Алексей Николаевич (RU), Мезиков Аркадий Константинович (RU), Долманюк Леонид Владимирович (RU), Максимов Виктор Владимирович (RU)*

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015615063

**Программа оптимизации конструктивных размеров статора  
и транслятора электрической машины  
возвратно-поступательного движения**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВПО «КГЭУ»)* (RU)

Авторы: *Сафин Альфред Робертович (RU), Ившин Игорь Владимирович (RU), Денисова Наталья Вячеславовна (RU), Цветков Алексей Николаевич (RU), Копылов Андрей Михайлович (RU)*

Заявка № 2015611824

Дата поступления 17 марта 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 мая 2015 г.



Врио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016663776

«Программа оптимизации конструктивных размеров  
транслятора электрической машины  
возвратно-поступательного движения»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Казанский  
государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО  
«КГЭУ») (RU)*

Авторы: *Копылов Андрей Михайлович (RU), Сафин Альфред  
Робертович (RU), Ившин Игорь Владимирович (RU), Гибадуллин  
Рамил Рифатович (RU)*

Заявка № 2016661146

Дата поступления 24 октября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 декабря 2016 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Излиев



## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018613530

«Программа топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)* (RU)

Авторы: *Копылов Андрей Михайлович (RU), Сафин Альфред Робертович (RU), Хуснутдинов Рустем Рауфович (RU), Максимов Виктор Владимирович (RU), Цветков Алексей Николаевич (RU), Гибадуллин Рамил Рифатович (RU)*

Заявка № 2017661582

Дата поступления 13 ноября 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 марта 2018 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Извлев



## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015663605

**Программный комплекс для моделирования электрической  
машины возвратно-поступательного движения**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального  
образования «Казанский государственный энергетический  
университет» (ФГБОУ ВПО «КГЭУ»)* (RU)

Авторы: *Сафин Альфред Робертович (RU), Ившин Игорь Владимирович  
(RU), Мисбахов Ринат Шаукатович (RU), Цветков Алексей  
Николаевич (RU), Копылов Андрей Михайлович (RU), Гибадуллин  
Рамил Рифатович (RU)*

Заявка № 2015619478

Дата поступления 07 октября 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 декабря 2015 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акт изготовления экспериментального образца обратимой электрической машины  
возвратно-поступательного действия

СОГЛАСОВАНО

Ректор

ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Ю. Ю. Кобулязов

«22» апреля



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «МПОТК

«ТЕХНОКОМПЛЕКТ»

Н.В. Тингаев

«22» апреля 2016 г.

«22» апреля 2016 г.

АКТ № 3



изготовления экспериментального образца  
обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия  
Соглашение с Минобрнауки России  
от «20» октября 2014 г. № 14.577.21.0121

«22» апреля

2016 г.

Комиссия в составе:

Председатель	Генеральный директор	Тингаев Николай Владимирович
члены комиссии	Коммерческий директор	Иванов Валерий Викторович
	Руководитель проекта	Ившин Игорь Владимирович
	от ФГБОУ ВО «КГЭУ»	
	Заместитель генерального	Калинин Ю.В.
	директора по правовым	
	вопросам и экономике	
	Главный бухгалтер	Уварова С.В.
	Начальник Научно-	
	исследовательского отдела	Цепилов Г.В.

назначенная приказом по ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» от «5» апреля 2016 г. № 43/1, в период с «20» октября 2016 г. по «22» апреля 2016 г. проверила факт изготовления экспериментального образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия.

**1. Комиссии предъявлены:**

- 1.1. Экспериментальный образец обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия в количестве 1 шт.
- 1.2. Комплект КД на экспериментальный образец обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия.
- 1.3. Техническое задание на выполнение прикладных научных исследований (Приложение 1а Соглашения № 14.577.21.0121 от 20 октября 2014 г.)
- 1.4. Частное техническое задание на программное обеспечение (Приложение 1в Соглашения № 14.577.21.0121 от 20 октября 2014 г.)

**2. В результате проверки установлено:**

2.1. Экспериментальный образец обратной электрической машины возвратно-поступательного действия в количестве 1 шт. изготовлен ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» в период с «18» *января* 20 *16* г. по «20» *апреля* 20 *16* г. в соответствии с комплектом КД на экспериментальный образец обратной электрической машины возвратно-поступательного действия в комплектности, установленной Техническими требованиями на их изготовление.

**3. Вывод**

Экспериментальный образец обратной электрической машины возвратно-поступательного действия пригоден для проведения углубленных исследований его характеристик в составе испытательного стенда.

Председатель комиссии

Члены комиссии



Н.В. Тингаев

В.В. Иванов

И.В. Ившин

Ю.В. Калинин

С.В. Уварова



Г.В. Цепилов

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

Акт изготовления испытательного стенда для проведения углубленных исследований экспериментального образца обратной электрической машины возвратно-поступательного действия

СОГЛАСОВАНО

Ректор

ФГБОУ ВПО «КГЭУ»

Э.Ю. Абдуллазянов

«30» ноября 2015 г.



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ЗАО «МПОТК

«ТЕХНОКОМПЛЕКТ»

Н.В. Тингаев

«30» ноября 2015 г.



АКТ

изготовления испытательного стенда для проведения углубленных исследований

Соглашение с Минобрнауки России

от «20» октября 2014 г. № 14.577.21.0121

«30» ноября 2015 г.

Комиссия в составе:

Председатель  
члены комиссииГенеральный директор  
Коммерческий директор  
Руководитель проекта  
от ФГБОУ ВПО «КГЭУ»Тингаев Николай Владимирович  
Иванов Валерий Викторович  
Ившин Игорь ВладимировичЗаместитель генерального  
директора по правовым  
вопросам и экономике

Калинин Юрий Владимирович

Главный бухгалтер

Уварова Светлана Викторовна

Начальник Научно-  
исследовательского отдела

Цепилов Григорий Викторович

назначенная приказом по ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» от «10» ноября 2015 г. № 4, в период с «10» ноября 2015 г. по «30» ноября 2015 г. проверила факт изготовления испытательного стенда для проведения углубленных исследований.

**1. Комиссии предъявлены:**

1.1. Испытательный стенд для проведения углубленных исследований в количестве 1 шт.

1.2. Комплект КД на испытательный стенд для проведения углубленных исследований характеристик обратной электрической машины возвратно-поступательного действия.

**2. В результате проверки установлено:**

2.1. Испытательный стенд для проведения углубленных исследований в количестве 1 шт. изготовлен ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» в период с «01» июля 2015 г. по «10» ноября 2015 г. в соответствии с комплектом КД на испытательный стенд для проведения углубленных исследований характеристик обратной электрической машины возвратно-поступательного действия в комплектности, установленной Техническими требованиями на их изготовление.

**3. Вывод**

Испытательный стенд пригоден для проведения углубленных исследований характеристик обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия.

Председатель комиссии

Н.В. Тингаев

Члены комиссии

В.В. Иванов

И.В. Ившин

Ю.В. Калинин

С.В. Уварова

Г.В. Цепилов

## ПРИЛОЖЕНИЕ К

## Акт о практическом использовании результатов диссертации

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
АО «ЧЭАЗ»

Р.А. Никулин



24 октября 2019 г.

АКТ

о практическом использовании результатов докторской диссертации  
доцента, к.т.н. кафедры ЭПП ФГБОУ ВО «КГЭУ» Сафина А.Р.

Настоящий акт составлен в том, что результаты исследований, представленных в диссертационной работе Сафина А.Р., использованы в ходе выполнения комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений» в рамках договора № ДР-936/17 от 26 октября 2017 года с участием ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и АО «Чебоксарский электроаппаратный завод».

При создании опытных образцов синхронных электрических двигателей с постоянными магнитами использована методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами.

В ходе выполнения указанного проекта А.Р. Сафин участвовал в проведении научно-исследовательских работ, а также руководил разработкой программного обеспечения и испытаниями опытных образцов.

Разработанные опытные образцы находятся на стадии предварительных испытаний.

Руководитель проекта – заместитель директора  
ИПК «Приводная техника» по НИОКР

  
\_\_\_\_\_ М.И. Денисов

Главный конструктор проекта - заместитель начальника  
ОИР ИПК «Приводная техника»

  
\_\_\_\_\_ А.В. Матвеев

## ПРИЛОЖЕНИЕ Л

## Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор –

проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО «Казанский

государственный

энергетический университет»

А.В. Леонтьев

« 28 » декабря 2019 г.



## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Сафина А.Р.

« Методы проектирования и создание

синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе

генерирующих и приводных комплексов»

в учебный процесс

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы доцента Сафина А.Р. «Методы проектирования и создание синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов» внедрены в учебный процесс кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» используются при проведении лабораторных работ в рамках дисциплины «Инженерное проектирование с применением САПР» подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и при проведении практических занятий в рамках дисциплины «Теория и практика научных исследований в электроэнергетике» подготовки магистров по направлению 13.03.04 «Электроэнергетика и электротехника».

Использование указанных результатов позволило повысить качество образовательного процесса.

Заведующий кафедрой  
«Электроснабжение  
промышленных предприятий»  
профессор, д. т. н.

И.В. Ившин

Директор Института  
электроэнергетики и электроники  
профессор, д. т. н.

И.В. Ившин