

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи



Копылов Андрей Михайлович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИНХРОННОЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО  
ДЕЙСТВИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент  
Сафин Альфред Робертович

Казань – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ОБЗОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ .....	12
1.1 Современный научно-технический уровень разработки электрических машин возвратно-поступательного действия.....	12
1.2 Классификация электрических машин возвратно-поступательного действия .....	15
1.3 Обзор существующих математических моделей электрической машины возвратно-поступательного действия .....	21
1.4 Обзор существующих разработок и прототипов .....	23
1.5 Выводы .....	28
2 ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ, МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЕ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....	30
2.1 Особенности системы создания электрического поля машины.....	30
2.2 Особенности конструкции индуктора .....	34
2.3 Форма индуктора в поперечном сечении .....	37
2.4 Форма индуктора в продольном сечении .....	38
2.5 Соотношение длин статора и индуктора .....	39
2.6 Особенности выполнения обмотки статора .....	40
2.7 Выводы .....	43
3 РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ, МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....	45
3.1 Математическая модель электрической машины возвратно-поступательного действия.....	45

3.2 Разработка имитационной численной модели электрической машины возвратно-поступательного действия .....	52
3.3 Прочностной анализ элементов электрической машины возвратно- поступательного действия .....	57
3.4 Оптимизация конструктивных размеров статора и индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия .....	60
3.5 Оптимизация топологии индуктора электрической машины возвратно- поступательного действия на основе генетического алгоритма .....	65
3.6 Моделирование и исследование работы трехфазной электрической машины возвратно-поступательного действия на выпрямительную нагрузку .....	77
3.6.1 Результаты имитационного моделирования .....	80
3.7 Выводы .....	83
<b>4 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМВПД И ВЕРИФИКАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ .....</b>	<b>85</b>
4.1 Изготовление экспериментального образца электрической машины возвратно-поступательного действия .....	85
4.2 КПД электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами .....	90
4.3 Расчет потерь в стали .....	97
4.4 Индуцируемое напряжение в обмотках статора .....	99
4.5 Оценка погрешности результатов измерений .....	100
4.6 Возможные области применения результатов .....	106
4.7 Выводы .....	107
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>108</b>
<b>ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ.....</b>	<b>110</b>
<b>СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОТРАЖАЮЩИЙ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ .....</b>	<b>111</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>114</b>
Приложение А .....	127
Приложение Б.....	137

Приложение В .....	139
Приложение Г .....	140
Приложение Д .....	141
Приложение Е.....	142
Приложение Ж .....	143
Приложение И .....	145
Приложение К .....	147
Приложение Л .....	148

## ВВЕДЕНИЕ

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

В настоящее время 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 и микро- энергетики.

Традиционно измеренные потери при передаче электроэнергии составляют 12 – 18% на одну линию электропередачи и трансформаторную подстанцию. Энергетическая эффективность использования первичного топлива (природного газа) в централизованных схемах составляет 10 – 20%, а ремонты и техническое обслуживание требуют трудозатрат 6,7 человека на одни мегаватт суммарной энергии (электрическая и тепловая энергия) в электрогенерирующих и электросетевых компаниях, а также 60 – 90 человек на один мегаватт в коммунальном секторе.

При этом прокладка линий электропередачи при подключении новых потребителей к электросетям сегодня является одним из главных сдерживающих факторов к появлению новых независимых производств.

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 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 Министерства энергетики Российской Федерации).

В настоящее время широкое распространение получают энергоустановки малой и микро- энергетики с энергетическими модулями мощностью до 100 кВт на основе двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

В этих установках для генерации электроэнергии за счет преобразования механической энергии движения поршней ДВС оптимально использовать линейные электрические машины возвратно-поступательного действия (ЭМВПД).

Задачи конструирования, испытания и исследования ЭМВПД рассмотрены в работах М.Я. Хитерера, И.Е. Овчинникова, А.И. Москвитина, М.М. Соколова, Л.К. Сорокина, Е.В. Козаченко, И.В. Черных, Ф.Н. Сарапулова, Р.Т. Шрейнера, Л.В. Клименко, Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева, Е.В. Сергеевской, *F. Milanesi, N. Bianchi, S. Bolognani, H. Polinder* и других. Однако большинство методов, рассмотренных в работах вышеперечисленных авторов, ограничено оптимизацией нескольких параметров, определяющих форму отдельных элементов конструкции ЭМВПД.

Таким образом, исследование и поиск перспективных конструкций, проработка и выбор оптимальных конструктивных решений для ЭМВПД, топологическое совершенствование конструкции электрической машины в заданном пространстве являются актуальной научной задачей.

**Объект исследования:** синхронная электрическая машина возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами (ПМ).

**Предмет исследования:** параметры основных конструктивных частей: статора и индуктора синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.

**Целью работы** является повышение КПД синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами за счёт увеличения электромагнитной мощности путем совершенствования конструкции статора и индуктора.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи:**

1) проанализировать основные направления создания электромеханических линейных преобразователей на основе ЭМВПД;

- 2) разработать имитационную модель для анализа электромагнитных процессов с учетом конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ;
- 3) разработать алгоритмы и программы для совершенствования конструкции статора, индуктора, элементов магнитной цепи синхронной ЭМВПД с ПМ с целью повышения её КПД;
- 4) создать конструкцию синхронной ЭМВПД с ПМ с повышенным КПД при заданных условиях на основе разработанных алгоритмов и программ;
- 5) провести экспериментальные исследования выходных характеристик синхронной ЭМВПД с ПМ.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

1. Разработана имитационная модель синхронной ЭМВПД с ПМ, учитывающая конструктивные параметры электрической машины, а также усилия на вал индуктора и длину его хода.
2. Разработаны алгоритмы и программы для оптимизации конструктивных параметров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ. Критерием оптимизации является КПД при заданных условиях.
3. Разработан генетический алгоритм для топологической оптимизации индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ.

**Теоретическая значимость** результатов работы состоит в развитии методов повышения энергетической эффективности электромеханических линейных преобразователей при заданных условиях с применением генетического алгоритма.

**Практическая значимость** результатов работы состоит в повышении качества проектирования электромеханических линейных преобразователей. Разработана конструкторская документация и изготовлен экспериментальный образец электрической машины возвратно-поступательного действия в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии от 20

октября 2014 г. № 14.577.21.0121, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0121.

**Методология и методы диссертационного исследования** опирались на положения теории электромеханических линейных преобразователей, теории электрических цепей. Исследования и расчеты выполнялись на ПЭВМ с использованием разработанных алгоритмов и программ. Применялись среды *Matlab*, *Visual Basic*, *AnsysMaxwell* и *CatiaV5*.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Имитационная модель синхронной ЭМВПД с ПМ, учитывающая конструктивные параметры электрической машины, а также усилия на вал индуктора и длину его хода.

2. Алгоритмы и программы для повышения КПД синхронной ЭМВПД с ПМ путем оптимизации конструктивных параметров статора и индуктора.

3. Генетический алгоритм для топологической оптимизации индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ, позволяющий получить максимальную электромагнитную силу при заданных условиях.

**Обоснованность и достоверность выводов и результатов** работы достигается корректным использованием при решении поставленных задач математических методов, экспериментальной обоснованностью принятых допущений, сопоставлением результатов с общеизвестными, опубликованными в научно-технической литературе исследованиями.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции инновационных проектов, выполненных вузами и научными организациями Приволжского федерального округа (г. Нижний Новгород, 2014), Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (г. Кемерово, 2014), Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» (г. Казань, 2015), международной научной



конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика – ЭЭЭ-2015» (г. Новосибирск, 2015), международной молодежной научной конференции «Научному прогрессу – творчество молодых» (г. Йошкар-Ола, 2015), международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2015), международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (г. Альметьевск, 2016), научно-технической конференции по итогам совместного конкурса фундаментальных исследований РФФИ-РТ (г. Казань, 2017).

### **Внедрение**

Полученные теоретические и практические результаты работы использованы:

- в экспериментальном образце ЭМВПД и стенде для его испытаний, разработанных в рамках соглашения с Минобрнауки РФ от «20» октября 2014 г. № 14.577.21.0121. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) *RFMEFI57714X0121*. Имеется Акт изготовления экспериментального образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия (Приложение Ж), а также Акт изготовления испытательного стенда для проведения углубленных исследований электрической машины возвратно-поступательного действия (Приложение И);

- при разработке нового метода проектирования и программно-аппаратного комплекса для повышения энергоэффективности и надежности линейных электрических машин возвратно-поступательного действия по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) совместно с Правительством Республики Татарстан, в рамках соглашения № 216/647-С, проект № 17-48-160438, 2017 г.

- в процессе проектирования ООО «СреднеВолжскСельЭлектроСетьСтрой». Имеется Акт внедрения результатов научных исследований (Приложение К);

- в учебном процессе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ» при подготовке магистров по направлению

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника». Имеется Акт о внедрении результатов диссертационной работы (Приложение Л).

### **Публикации**

Основное содержание диссертации изложено в 14 печатных работах, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS/Web Of Science, 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК (в том числе 2 статьи в журнале, входящем в перечень ВАК по специальности диссертации), 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ и 3 публикации в материалах всероссийских и международных научных конференций.

### **Личный вклад автора**

Результаты, представленные в диссертации и отраженные в публикациях, получены при непосредственном участии соискателя. Автор принимал участие в разработке математической модели синхронной ЭМВПД с ПМ, разработке методики выбора конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ, создании генетического алгоритма для топологической оптимизации индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ, обработке расчетных и экспериментальных данных.

### **Соответствие диссертации научной 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», 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.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 103 наименования, и 10 приложений. Содержит 148 страниц машинописного текста, 64 рисунка и 12 таблиц.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Сафину Альфреду Робертовичу за полезные консультации в ходе выполнения работы, а также заведующему кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета Ившину Игорю Владимировичу за помощь и поддержку.

# 1 ОБЗОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

## 1.1 Современный научно-технический уровень разработки электрических машин возвратно-поступательного действия

Анализ литературных источников показал, что исторически силовые установки возвратно-поступательного действия на базе двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем известны достаточно давно и применялись ограничено, например, в воздушных компрессорах или как генератор газов для последующей работы в турбоустановке [17].

В настоящее время широко распространены энергоустановки малой и микроэнергетики с модулями мощностью до 100 кВт на основе двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В этих установках для генерации электроэнергии за счет преобразования механической энергии движения поршней ДВС оптимально использовать ЭМВПД [5, 52, 57].

При возвратно-поступательном движении индуктора с магнитной системой наводится электродвижущая сила (ЭДС) в обмотках статора [17, 25].

Для контроля движения поршня необходима электронная система управления. Управление ходом индуктора электрической машины и контроль положения индуктора необходимо для упрощения конструкции свободно-поршневого двигателя, а также для минимизации массогабаритных показателей установки в целом [94].

Основные компоненты – камеры сгорания и линейный синхронный электрогенератор.

Камеры сгорания выступают в качестве пружин, обеспечивающих возвратно-поступательное движение.

Работа электрической машины совместно в одном корпусе с двигателем внутреннего сгорания накладывает особые ограничения по температуре, которая может достигать 150 °С.

Схематический вид электрогенератора возвратно-поступательного действия на основе свободнопоршневого двигателя показан на рисунке 1.1 [17].

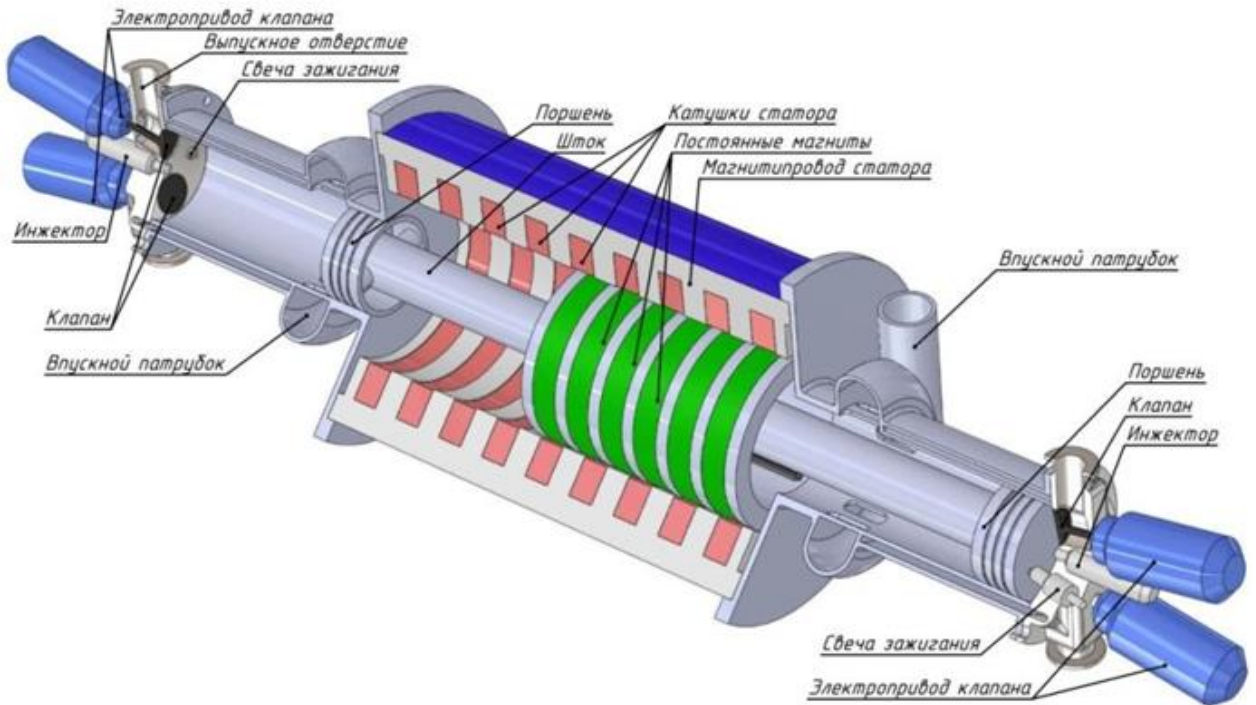


Рисунок 1.1 – Конструкция свободнопоршневого электрогенератора возвратно-поступательного действия

В части камер внутреннего сгорания и линейных электрогенераторов основные технологии в высокой степени отработаны. Новые разработки касаются в основном новых практических применений и повышения эффективности существующих прототипов [92].

Анализ литературных источников показал, что основным препятствием для практического применения рассматриваемых двигателей является необходимость компенсации пульсаций, возникающих при сгорании топлива, за счет конструкции электрогенератора и системы управления, а соответственно существует необходимость в разработке системы управления горением, обеспечивающей линейность хода [70].

В области возвратно-поступательных электрических машин широкое внимание уделяется сервоприводам малой мощности (до 1 кВт), используемым в качестве позиционирующих устройств [84], а также генератора большой мощности (свыше 100 кВт).

Рекуперация энергии движения подвески транспортного средства также может стать одним из возможных перспективных применений линейного генератора. Колебания кузова передаются на шток генератора, что приводит к возникновению ЭДС в обмотках статора [34, 56, 59, 86].

Также линейный генератор может применяться для генерации электроэнергии от волнения поверхности воды (волн), а так же в качестве привода насоса в двигательном режиме работы электрической машины [53, 83, 87, 91, 102].

Использование линейных генераторов в качестве дополнительного бортового источника энергии космических аппаратов позволит улучшить характеристики системы электроснабжения. Интеграция линейных генераторов в систему электроснабжения позволит также сократить количество аккумуляторных батарей, установленных на борту космических аппаратов [4, 5].

При современном уровне электротехнических и двигателестроительных технологий решение задачи создания «электрического вертолета» может быть получено при использовании в составе гибридной силовой установки – линейного электроагрегата, основными составными частями которого являются линейный генератор, якоря которого совершают возвратно-поступательное движение, и свободно-поршневой двигатель, служащий для их привода [64, 102].

Из изложенного выше следует, что создание электрической машины возвратно-поступательного действия необходимо для нужд малой энергетики, что позволит существенно повысить эффективность и экологичность получения электрической энергии.

## 1.2 Классификация электрических машин возвратно-поступательного действия

Несмотря на сравнительно ограниченное распространение по сравнению с вращательными, разновидностей возвратно-поступательных машин не меньше, а, скорее, даже больше. Все виды вращательных машин имеют свои аналоги в линейном исполнении: асинхронные, синхронные, постоянного тока и шаговые [3, 13, 14, 19].

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 [38].

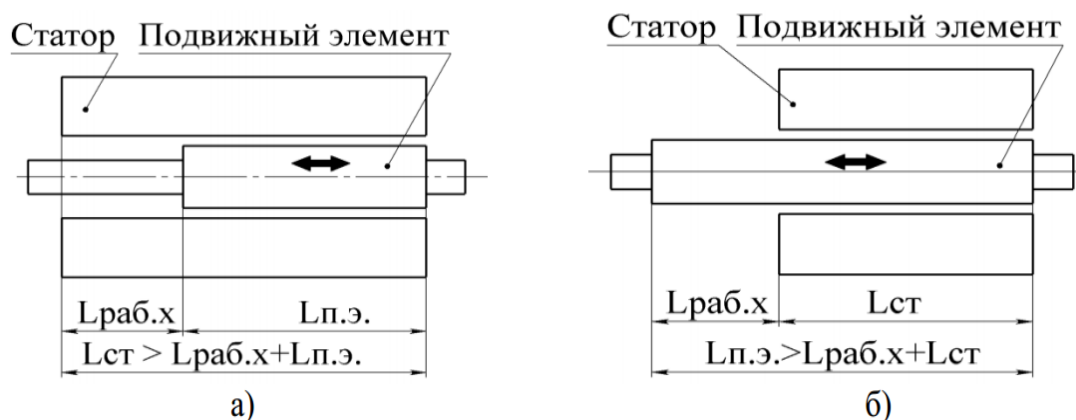


Рисунок 1.2 – Варианты соотношения размеров линейной электрической машины  
а) короткий ПЭ – длинный статор; б) длинный ПЭ – короткий статор

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 [6].

Классификация на основе варианта исполнения подвижного элемента (рисунок 1.3) [7, 27]:

- 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.

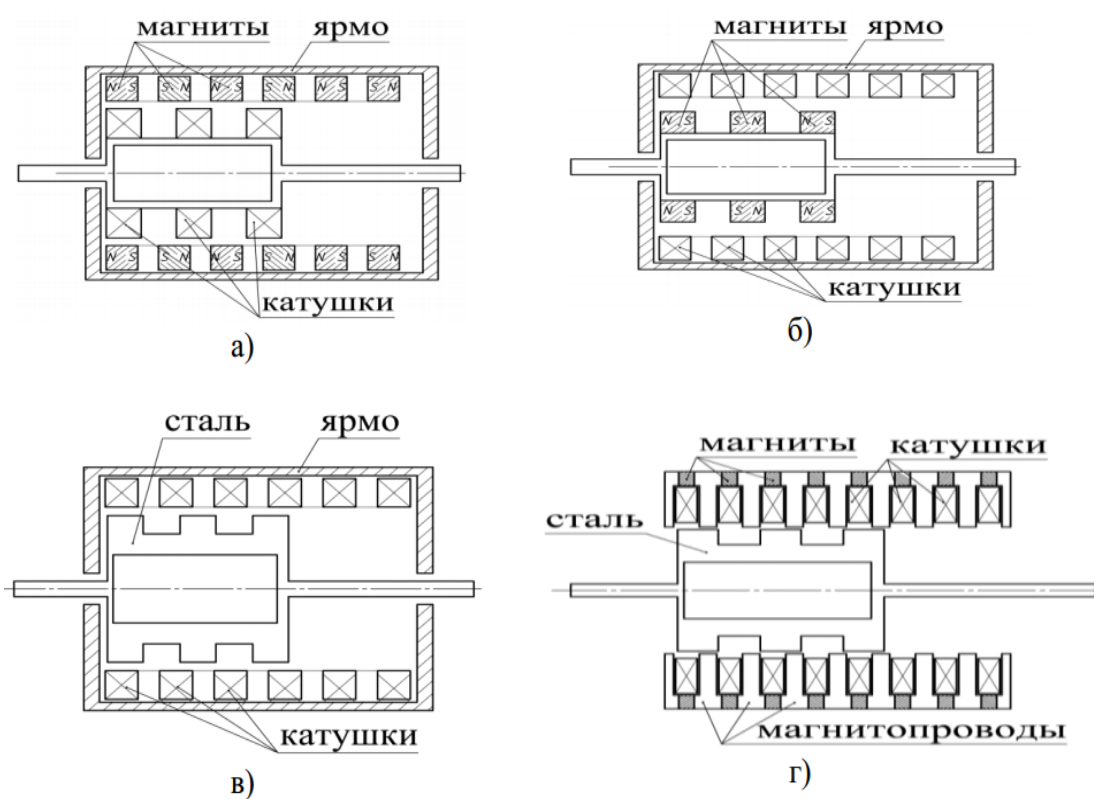


Рисунок 1.3 – Классификация линейных электрических машин по типу конструкции

Выбор той или иной машины для конкретного механизма определяется его свойствами, а также режимами работы, позволяющими наиболее эффективно его использовать [4, 16, 32].



Использование для создания поля постоянных магнитов из редкоземельных металлов приводит к существенному росту стоимости электрической машины, но они позволяют получать высокие удельные электромагнитные усилия.

Условия эксплуатации и требования к ЭМВПД обуславливают многообразие и специфику конструкций и характеристик.

На рисунке 1.4 предложена классификация ЭМВПД по следующим признакам: назначению, характеру движения, принципу действия, конструктивному исполнению, способу возбуждения.

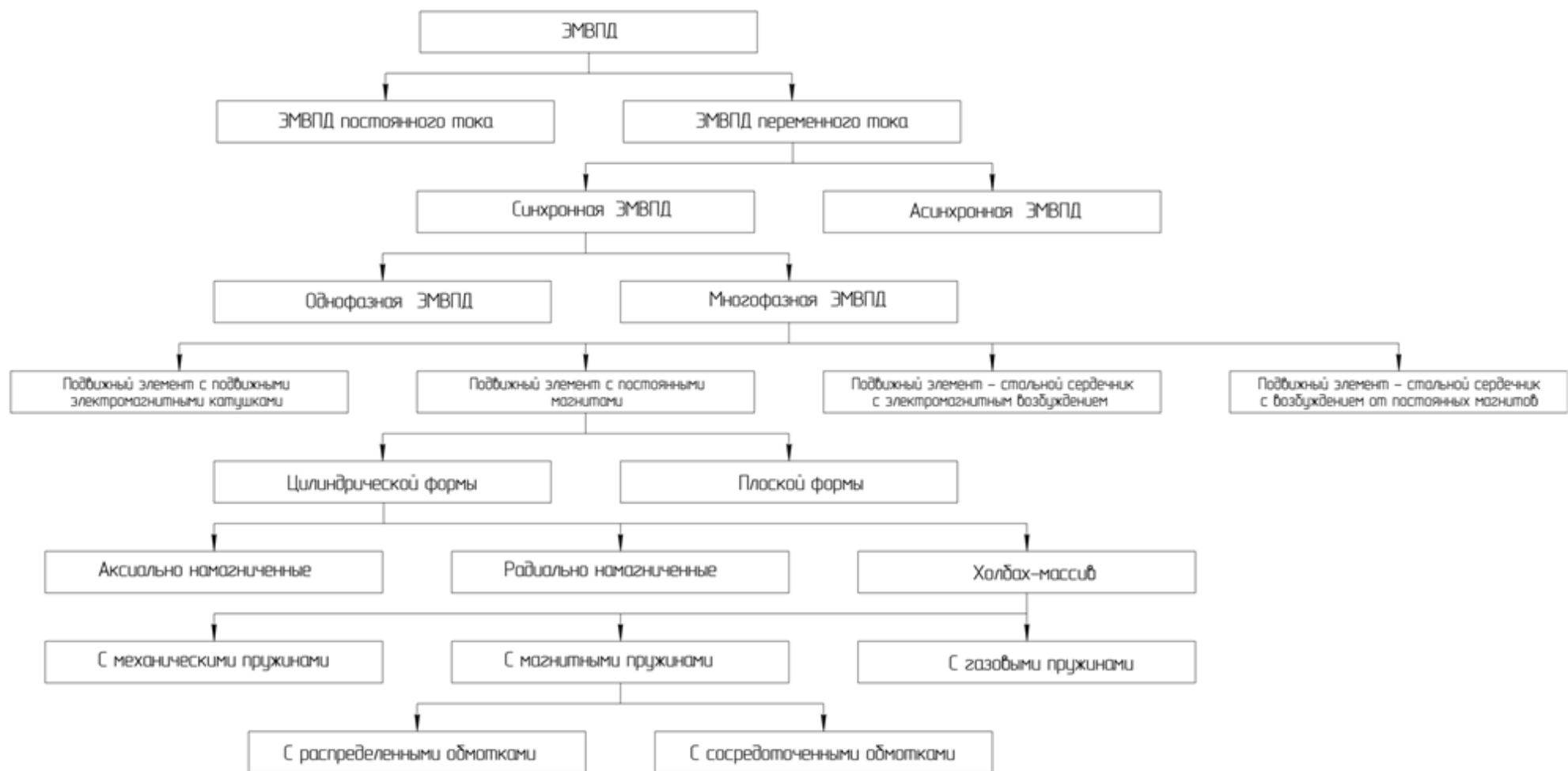


Рисунок 1.4 – Классификация электрических машин возвратно-поступательного действия

Электрические машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами являются наиболее эффективными за счёт высокой плотности энергии и высокого КПД.

Классификация на основе расположения постоянных магнитов [4, 54]:

- а) с подвижной обмоткой и статором на ПМ;
- б) с подвижным ПМ;
- в) с подвижным магнитопроводом и статором на ПМ.

На рисунке 1.5 изображена цилиндрическая трехфазная машина с постоянными магнитами, имеющая 9 пазов и 10 полюсов, оборудована модульными статорными обмотками, которые расположены рядом друг с другом [7, 17, 71].

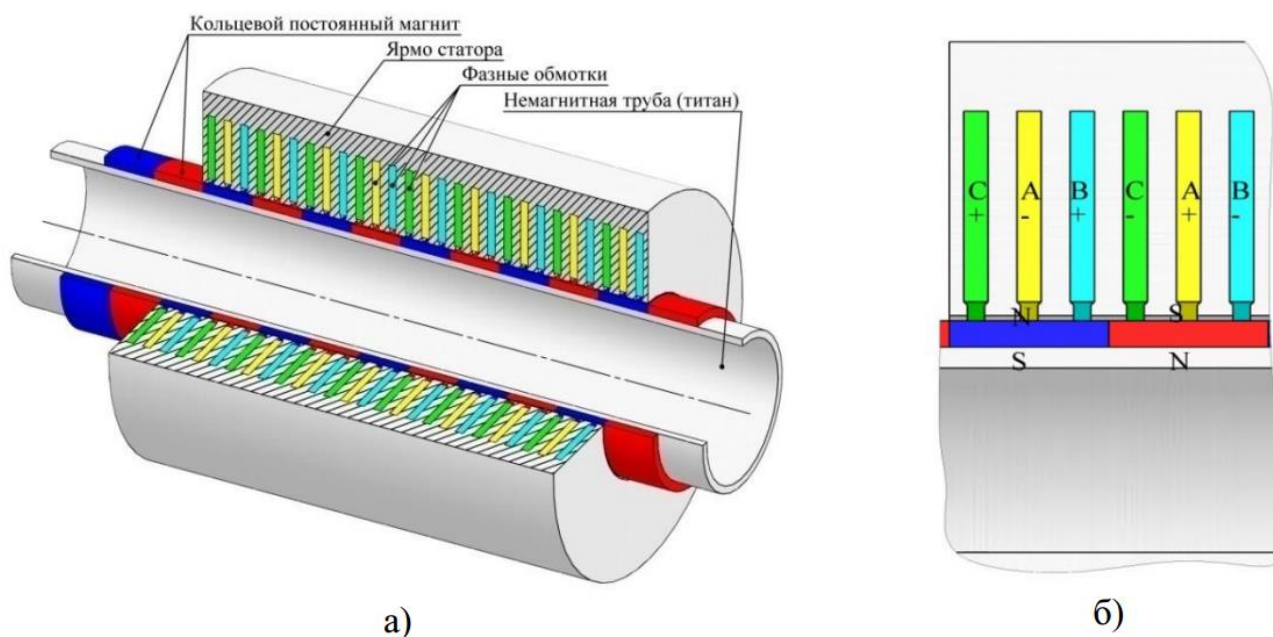


Рисунок 1.5 – Структура электрической машины возвратно-поступательного действия с радиально-намагниченными магнитами на подвижном элементе: а) общий вид; б) схема фаз и полярности постоянных магнитов

Особенностью конструкции является подвижная магнитная система, использующая намагниченные магниты в виде квази-Холбах-структуры [17, 74].

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 [7, 71].

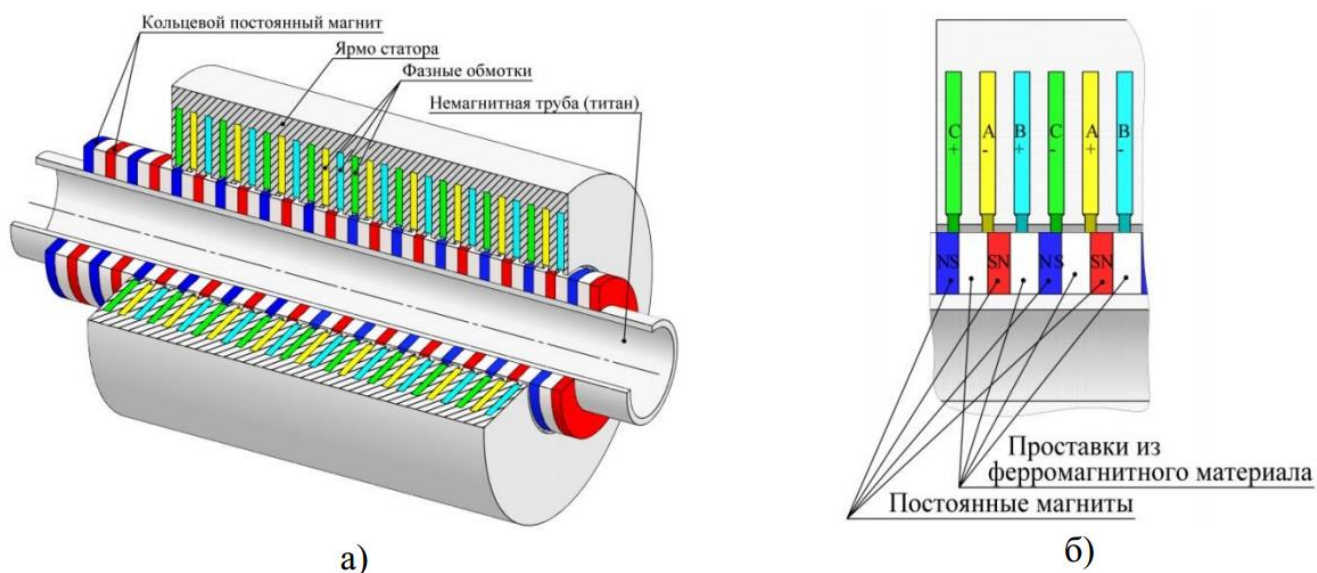


Рисунок 1.6 – Структура электрической машины возвратно-поступательного действия с осевой намагниченностью на подвижном элементе: а) общий вид; б) схема фаз и полярности постоянных магнитов

Индукторные машины (ИМ) [7, 81], 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 существенный недостаток ИМ: увеличенный объем и масса магнитопровода по сравнению с другими типами синхронных ЭМВПД.

Конструкция ИМ с возбуждением от постоянных магнитов приведена на рисунке 1.7 [7].

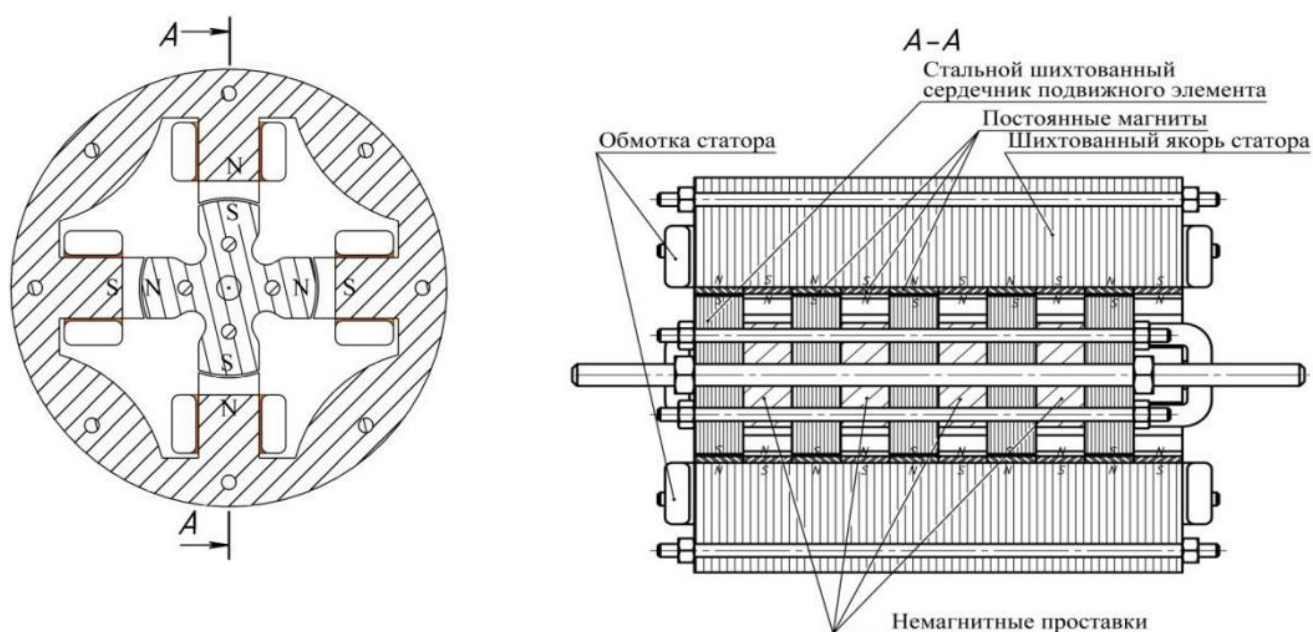


Рисунок 1.7 – Конструкция индукторной машины с подвижным сердечником

Одноименнополюсные индукторные 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 [7].

### 1.3 Обзор существующих математических моделей электрической машины возвратно-поступательного действия

Для исследования электромеханических преобразователей, в том числе линейных двигателей и генераторов, применяются различные математические модели, отличающиеся разным уровнем допущений и сложностью вычислений [3, 42, 54, 55].

Обозначим два типа моделей:

- 1) математические модели на основе теории поля;
- 2) математические модели на основе теории цепей.

Математические модели на основе теории поля, использующие численные методы (метод конечных разностей и метод конечных элементов) позволяют учитывать специфику геометрии рабочего объема линейной машины, насыщение участков магнитопровода, различие магнитных свойств среды рабочей зоны и торцевой зоны, неравномерность воздушного зазора. Ограниченность моделей, основанных на теории поля, проявляется в том, что они описывают статические режимы работы линейных машин [26].

Модели, основанные на магнитных схемах замещения, сводят задачу к расчету цепи, параметры которой интегрально представляют собой участки конструкции при моделировании всего устройства.

При использовании схем замещения электрическая машина представляется совокупностью магнитных и электрических цепей. Преимуществом цепного подхода является также большая гибкость в отношении подробности представления элементов конструкции машин. При использовании данных методов достаточно просто учитываются особенности конструкции.

К достоинствам методов, базирующихся на теории цепей, следует отнести и то, что они, как правило, распространяются на динамические режимы работы линейных машин.

Использование известных математических моделей вращающихся машин необходимо дополнять поправочными коэффициентами, полученными с помощью более сложных математических моделей. Такой подход является нерациональным.

Взаимное влияние механических и электромагнитных подсистем характеризуется следующими факторами:

- создание электромагнитной силы, которая, в зависимости от конструктивных особенностей, обусловлена взаимодействием подвижной вторичной части с ферромагнитным якорем или/и с токами в обмотках якоря;
- положение подвижной вторичной части существенно влияет на распределение потоков в магнитной цепи;

- скорость изменения положения подвижной части влияет на электрическую цепь через индуцирование в последней ЭДС [54].

Математические модели, которые учитывают взаимное влияние механической и электромагнитной подсистем, могут быть названы полными. В таких моделях, как правило, нелинейности (магнитные характеристики) приводят к качественно новым влияниям и должны быть учтены. На практике это взаимовлияние можно упростить за счет пренебрежения вихревыми токами и гистерезисом [58].

Целесообразно отдавать предпочтение методам расчета на основе теории поля, так как такие математические модели учитывают специфику геометрии линейного генератора и насыщение участков магнитопровода [25, 26].

#### **1.4 Обзор существующих разработок и прототипов**

В центре электромеханики университета Техаса г. Остин (США) были разработаны схема, конструкция и проведены испытания генератора со свободным поршнем, использующим преобразователь индукторного типа. В конструкции индукторного генератора продолжение юбки поршня использовалось в качестве каркаса для крепления постоянных магнитов, вместо обычно применяемого отдельного индуктора с постоянными магнитами. Однако устройство имело низкую удельную мощность, хотя и компенсируемую достаточным набором отдельных модулей [91].

Линейный бензогенератор *Ondřej Vysoký, Josef Božek* и др. из Чешского политехнического университета, изображенный на рисунках 1.8, 1.9, был разработан в 2007 году [54].

Модель оснащена двумя  $50 \text{ см}^3$  цилиндрами и системой прямого впрыска топлива. Мощность агрегата 1 кВт.

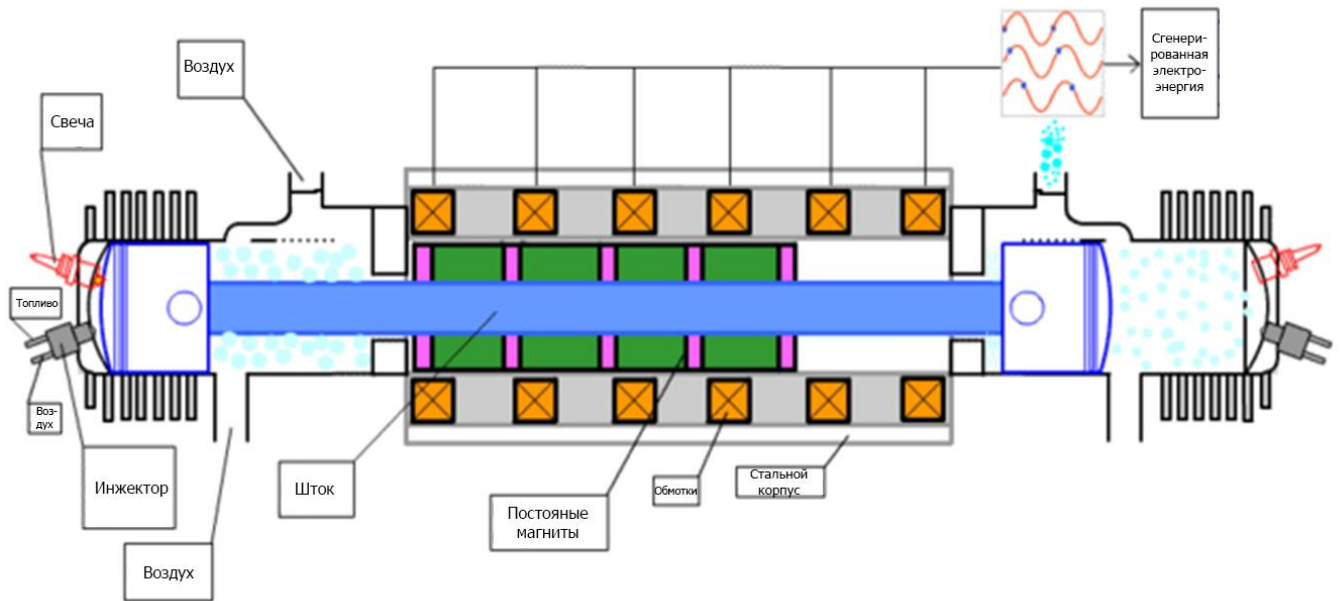


Рисунок 1.8 – Конструкция линейного бензогенератора, разработанного в Чешском политехническом университете в 2007 г.

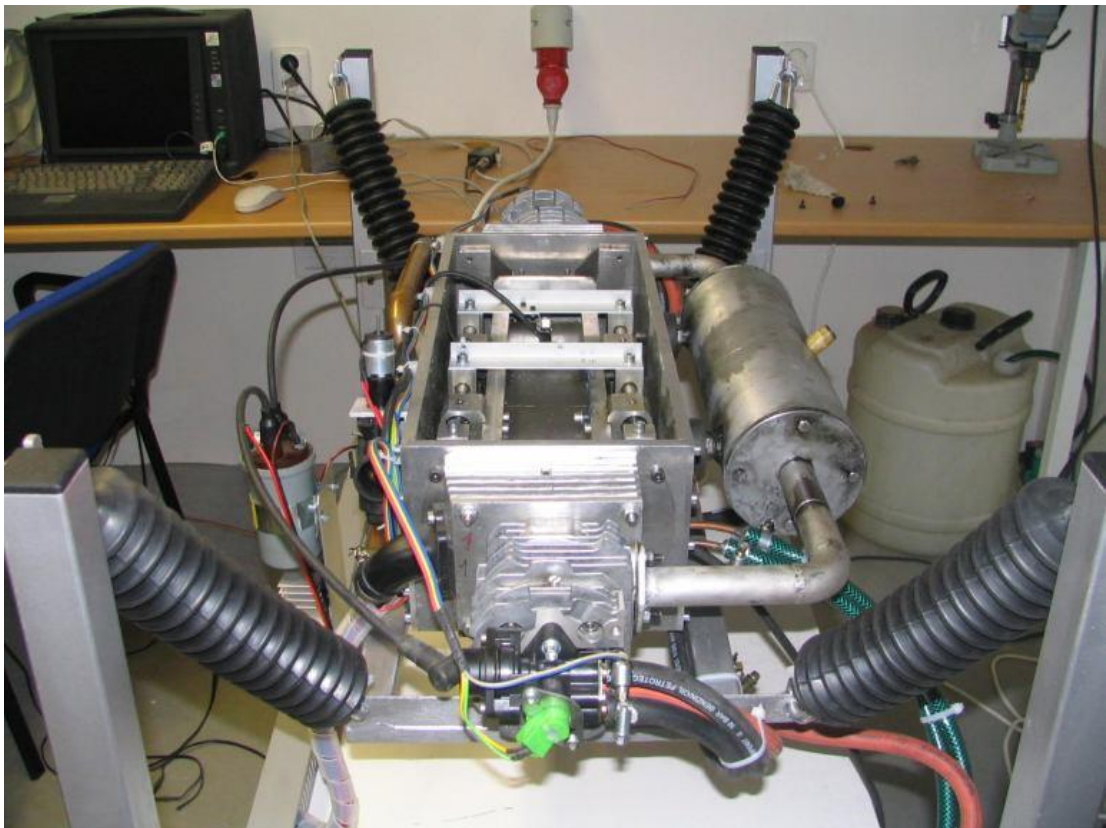


Рисунок 1.9 – Экспериментальная модель линейного бензогенератора, разработанного в Чешском политехническом университете в 2007 г.



*Toyota Central R&D Labs Inc.* разрабатывает 10 кВт прототип свободно-поршневого линейного генератора (СПЛГ), изображенного на рисунках 1.10, 1.11, который обещает быть высоко эффективным и компактным. Были представлены документы о состоянии работ на международном форуме-конгрессе *SAE 2014 World Congress* в Детройте [4].

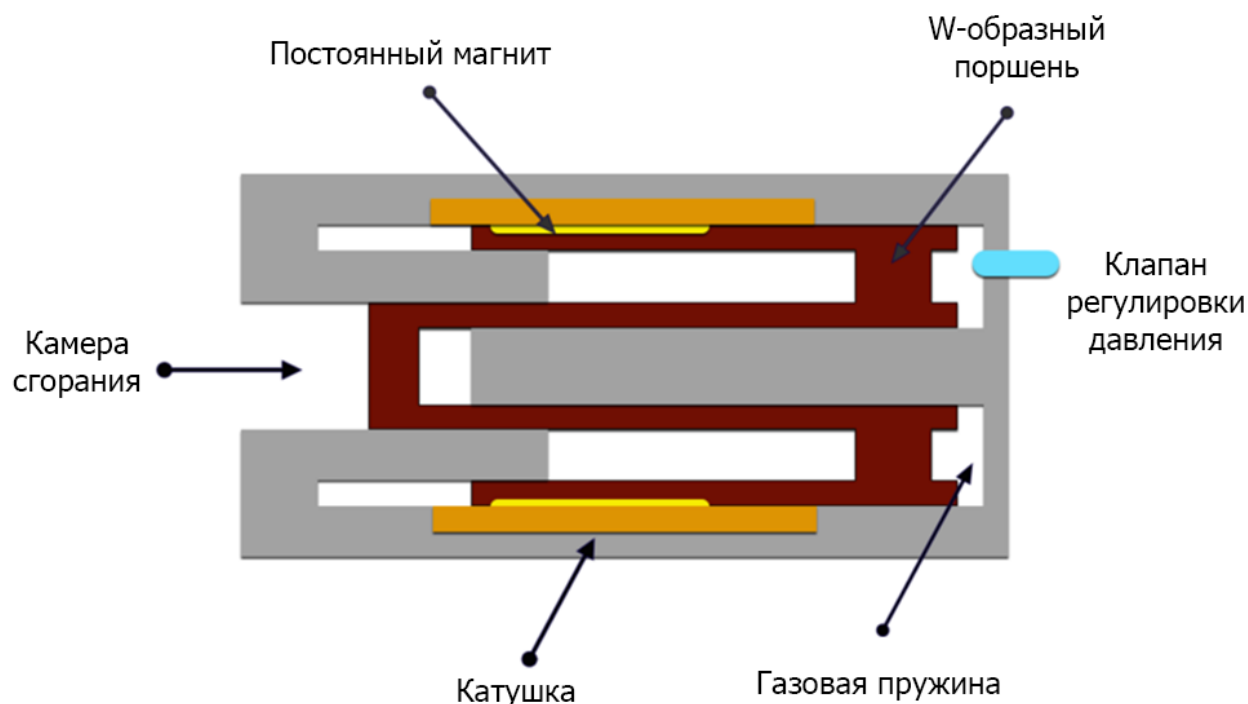


Рисунок 1.10 – Схема свободно-поршневого линейного генератора *Toyota*

Генератор состоит из камеры сгорания, линейного генератора и газовой пружины. Камера сгорания с керамическим покрытием обеспечивает наивысший термический КПД генератора. На W-образном поршне расположены постоянные неодим-железо-бор магниты, производитель считает, что они расположены на достаточном расстоянии для защиты от перегрева.

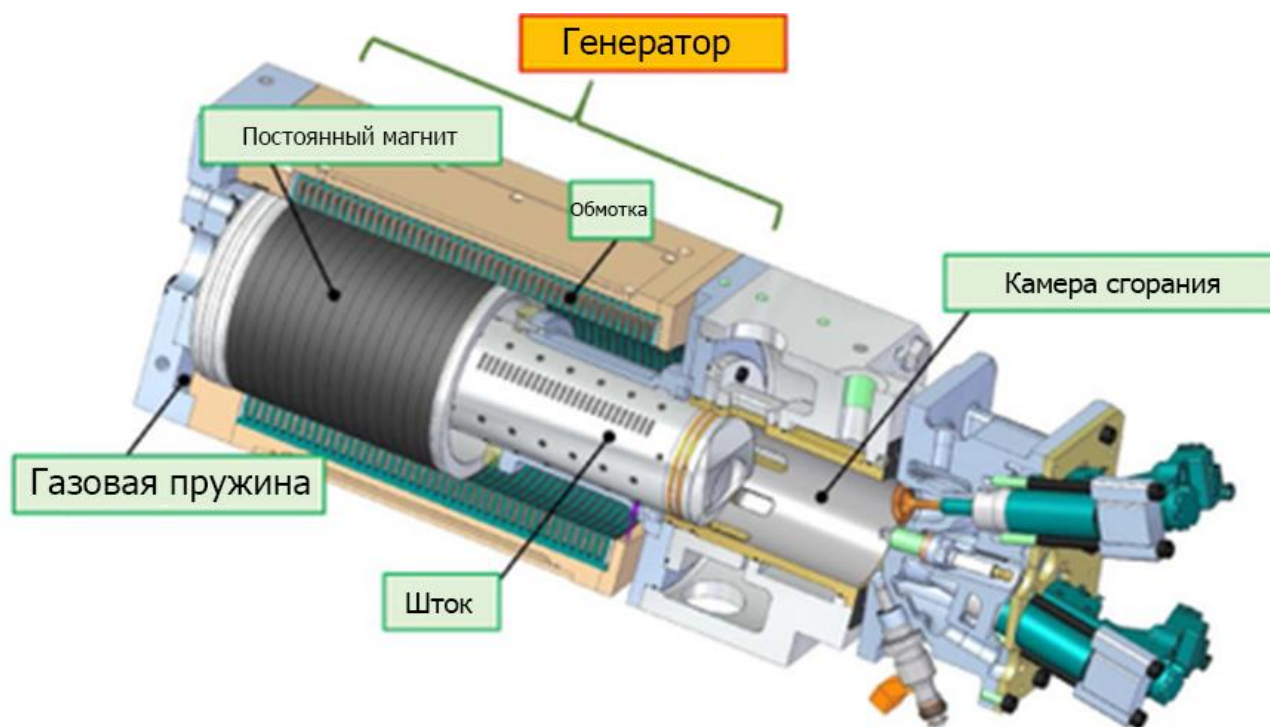


Рисунок 1.11 – Модель свободно-поршневого линейного генератора *Toyota*

Европейским сообществом в 2002 г. был выделен грант стоимостью 3,8 млн. евро на три года для исследования электрической машины возвратно-поступательного действия со свободным поршнем *FPEC (Free Piston Energy Converter)*, в котором приняли участие европейские компании и исследовательские институты: *AB Volvo Corporation* (Швеция), *Noax V.V.* (Нидерланды), *Innas V.V.* (Нидерланды), Университет технологии Чалмерса (Швеция), Королевская высшая техническая школа (Швеция), Университет Шеффилда (Великобритания) [69].

Задачи вышеуказанного проекта:

- разработка чистой и энергетически эффективной технологии для транспортных силовых установок, основанной на принципе электрического генератора с двигателем внутреннего сгорания со свободным поршнем;
- реализация дизельного цикла;
- разработка испытательной установки мощностью 25 кВт для

демонстрации технологии *FPEC*, с удельной мощностью не менее 0,6 кВт/кг, удовлетворяющей требованиям на выбросы двигателей *Euro V*.

*Volvo Technology* совместно с магистрами в области инженерных технологий и машиностроения *Markus Söderfjäll* и *Joachim Lövgren* из Технологического машиностроительного университета г. Лулео разработали прототип линейного генератора мощностью 23 кВт, представленный на рисунке 1.12 [4, 73].

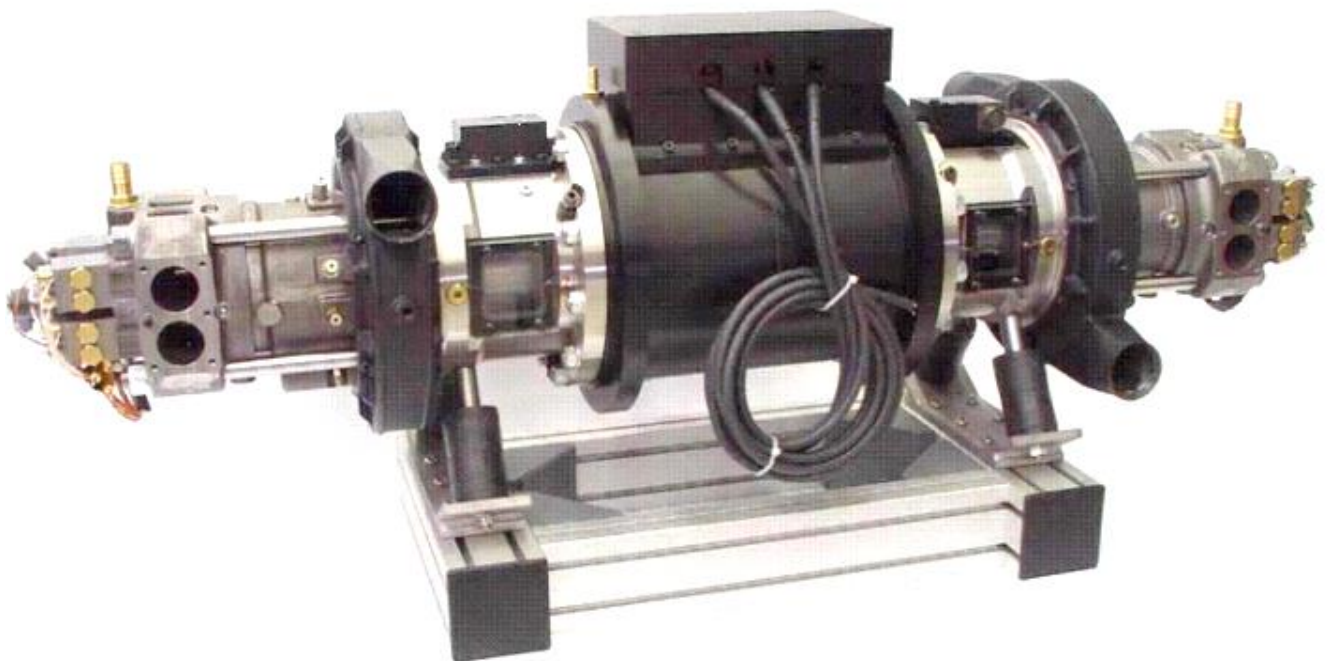


Рисунок 1.12 – Прототип свободно-поршневого линейного генератора *Volvo*

Индуктор машины полый и выплавлен из титана. Ширина статора меньше на длину рабочего хода индуктора. На индукторе расположены постоянные магниты защищенные от перегрева углеродным волокном на который тонким слоем нанесена керамика. Диаметр индуктора около 50 мм.

Проведенный анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы, по тематике разработки и создания электрических машин возвратно-поступательного действия показал, что в настоящий момент

различными научными группами разработаны прототипы, недошедшие до коммерческой реализации, но позволяющие отлаживать технологии.

Современный уровень микроэлектроники, материаловедения и инженерной техники позволяет реализовывать такие системы. В то же время на рынке отсутствуют образцы, обладающие всей необходимой совокупностью потребительских свойств.

Имеется ряд инженерных проблем, решение которых необходимо для массового применения двигателей для нужд малой энергетики. Основным препятствием для практического применения рассматриваемых машин является необходимость компенсации пульсаций, возникающих при сгорании топлива, за счет создания особой конструкции электрогенератора и изолированной системы управления.

Анализ расчетных моделей показал, что существуют перспективные методы расчета на основе теории поля, теории цепей, а также математических моделей, учитывающих взаимное влияние механической и электромагнитной подсистем.

Доведение до коммерческого использования электрических машин возвратно-поступательного действия возможно при создании прототипа и отработке на нем новых технических и технологических решений. Данный коммерческий продукт со свойствами, отвечающими требованиям потребителя, востребован на рынке уже в настоящее время.

## **1.5 Выводы**

1. Проведенный анализ основных направлений создания электромеханических линейных преобразователей на основе ЭМВПД показал, что в настоящее время широко распространены энергоустановки малой и микроэнергетики с модулями мощностью до 100 кВт на основе двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В этих установках для генерации электроэнергии за счет преобразования механической энергии движения поршней ДВС оптимально использовать ЭМВПД.

2. Математические модели расчёта электрических машин возвратно-поступательного действия на основе теории поля являются наиболее оптимальными, т.к. учитывают специфику геометрии машины и насыщение участков магнитопровода.

3. Проведенный анализ современной научно-технической литературы по тематике разработки и создания электрических машин возвратно-поступательного действия показал, что в настоящий момент различными научными группами разработаны прототипы, недоведённые до коммерческой реализации, но позволяющие отлаживать технологии.

## 2 ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ, МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЕ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

### 2.1 Особенности системы создания электрического поля машины

В результате анализа существующих и разрабатываемых линейных электрических машин было выделено несколько путей построения электрических машины возвратно-поступательного действия. Основные отличия рассмотренных прототипов заключаются в: способе создания электрического поля подвижной части машины (индуктора), пространственного расположения обмотки статора, как следствие этого, ориентации магнитного поля внутри машины, формы поперечного сечения индуктора (в плоскости перпендикулярной направлению движения), формы продольного сечения индуктора (в плоскости направления движения), схема обмотки статора.

При сравнении силовых и удельных характеристик линейных синхронных машин было выявлено, что при равных объемах активного пространства машина с высокоэнергетическими подвижными редкоземельными магнитами по сравнению с машиной с подвижной обмоткой возбуждения существенно выигрывает по величине осевой силы, развиваемой на единицу объема и единицу массы, и по удельной мощности [27, 41, 60, 76].

Так отношение электромагнитных сил, действующих на подвижный элемент с постоянными магнитами  $Q_{\text{пм}}$  и на подвижный элемент с медной обмоткой  $Q_{\text{обм}}$ , может быть выражено формулой:

$$\frac{Q_{\text{пм}}}{Q_{\text{обм}}} = \frac{2B_r}{\mu_0 j k_{\text{Cu}} b_M} \cdot \frac{L_M + 2\delta}{L_M + 2\delta \mu_r / \mu_0} \approx \frac{2B_r}{\mu_0 j k_{\text{Cu}} b_M}, \quad (2.1)$$

где  $B_r$  – остаточная индукция постоянных магнитов;

$j$  – плотность тока в обмотке подвижного элемента;

$k_{Cu}$  – коэффициент заполнения зазора медью проводников;

$b_M$  – ширина магнитопровода.

Если рассматривать использование редкоземельных магнитов  $Nd-Fe-B$ , то  $B_r$  имеет порядок 1,2 – 1,5 Тл [97]. Допустимую плотность тока для меди можно принять  $j = 5 \div 10 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, коэффициент  $k_{Cu}$  в лучшем случае составляет около 0,4÷0,5. Полагая ширину магнитопровода  $b_M = 0,1$  м, плотность тока  $j = 10 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>,  $k_{Cu} = 0,5$  и  $B_r = 1,2$  Тл, согласно формуле (2.1), получим:

$$\frac{Q_{\text{пм}}}{Q_{\text{обм}}} \approx \frac{2 \cdot 1,2}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 0,1} = 3,82.$$

На практике реальные величины могут иметь следующий порядок:  $j = 5 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, коэффициент  $k_{Cu} = 0,4$ ,  $b_M = 0,05$  м,  $B_r = 1,1$  Тл [98]. Тогда по формуле (2.1) получим:

$$\frac{Q_{\text{пм}}}{Q_{\text{обм}}} \approx \frac{2 \cdot 1,1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0,4 \cdot 0,05} = 17,5.$$

Таким образом, при равных объемах активного пространства (объем катушек на статоре и объем рабочего зазора) двигатель с постоянными магнитами развивает большую электромагнитную силу на единицу объема и единицу массы.

При одинаковой индукции в рабочем зазоре отношение электромагнитных сил, действующих на подвижный элемент с постоянными магнитами  $Q_{\text{пм}}$  и на подвижный элемент с медной обмоткой  $Q_{\text{обм}}$ , может быть выражено формулой:

$$\frac{Q_{\text{пм}}}{Q_{\text{обм}}} = \frac{2H_c}{jk_{Cu}b_M} \cdot \frac{(iw)_{\text{пм}}}{H_c L_M}, \quad (2.2)$$

где  $H_c$  – магнитная напряженность постоянных магнитов;

$j$  – плотность тока в обмотке подвижного элемента;

$k_{Cu}$  – коэффициент заполнения зазора медью проводников;

$b_M$  – ширина магнитопровода;

$(iw)_{\text{пм}}$  – МДС, создаваемая постоянными магнитами;

$L_M$  – длина магнитопровода.

На практике отношение  $\frac{(iw)_{\text{пм}}}{H_c L_M}$  имеет порядок  $0,2 \div 0,5$ .

Приняв  $H_c = 1 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ ,  $\frac{(iw)_{\text{пм}}}{H_c L_M} = 0,2$ ,  $j = 10 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ ,  $k_{Cu} = 0,4$ ,  $b_M = 0,1 \text{ м}$ ,

по формуле (2.2) получим:

$$\frac{Q_{\text{пм}}}{Q_{\text{обм}}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 0,2}{10 \cdot 10^6 \cdot 0,4 \cdot 0,1} = 1.$$

Силы, развиваемые постоянными магнитами и проводниками с током, одинаковы.

При подстановке в формулу более реальных параметров:  $H_c = 1 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ ,  $\frac{(iw)_{\text{пм}}}{H_c L_M} = 0,2$ ,  $j = 5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ ,  $k_{Cu} = 0,4$ ,  $b_M = 0,05 \text{ м}$  по формуле (2.2) получим:

$$\frac{Q_{\text{пм}}}{Q_{\text{обм}}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 0,2}{5 \cdot 10^6 \cdot 0,4 \cdot 0,05} = 4.$$

Таким образом, в реальных условиях двигатель с постоянными магнитами оказывается эффективнее. Случай теоретического равенства электромагнитных сил обеспечивается ценой увеличения объема меди обмотки возбуждения и, как следствие, массы двигателя. Так для площади поперечного сечения обмотки возбуждения с проводниками с током и с постоянными магнитами верны равенства:



$$(S_w)_i = \frac{(iw)_i}{jk_{Cu}}; \quad (2.3)$$

$$(S_w)_{\text{пм}} = \frac{(iw)_{\text{пм}}}{jk_{Cu}}; \quad (2.4)$$

Тогда, согласно формулам (2.3) и (2.4):

$$\frac{(S_w)_i}{(S_w)_{\text{пм}}} = \frac{(iw)_i}{(iw)_{\text{пм}}}; \quad (2.5)$$

или:

$$\frac{(S_w)_i}{(S_w)_{\text{пм}}} = \frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{H_c L_M}{(iw)_{\text{пм}}} \approx \frac{\mu_r}{\mu_0} \frac{H_c L_M}{(iw)_{\text{пм}}}. \quad (2.6)$$

При подстановке  $\frac{(iw)_{\text{пм}}}{H_c L_M} = 0,2$ , по формуле (2.6) получим  $\frac{(S_w)_i}{(S_w)_{\text{пм}}} \approx 5$ .

То есть при условии одинаковой индукции в рабочем зазоре масса меди обмотки возбуждения должна превышать массу меди рабочей обмотки машины с постоянными магнитами более чем в пять раз [56].

При использовании подвижного элемента в виде конструкции проводников с током, пространство между которыми с целью уменьшения магнитного сопротивления заполнено магнитопроводящей средой, машина с постоянными магнитами оказывается существенно более эффективной по использованию объема, чем машина с подвижной обмоткой. Кроме того, КПД машины с постоянными магнитами заметно выше, а отсутствие скользящих контактов или гибких токопроводов, работающих в условиях вибрации, повышает надежность машины.

С учетом температурных условий работы ЭМВПД возможно применение следующих магнитных материалов:

- *Al-Ni-Co*;
- *Sm-Co*;
- *Nd-Fe-B*.

Стоимость магнитов на основе *Nd-Fe-B* ниже, чем *Al-Ni-Co* и *Sm-Co*. Кроме того, рабочая температура магнитов *Nd-Fe-B* марки 38SH выше, чем *Al-Ni-Co* и *Sm-Co*: от -40 до +130 °С, как показано в таблице 2.1 [97, 100, 103], что особенно важно при работе ЭМВПД в одном корпусе с ДВС.

Таблица 2.1 – Физические характеристики магнитомягких сплавов

Характеристики	Сплав		
	<i>Al-Ni-Co</i>	<i>Sm-Co</i>	<i>Nd-Fe-B</i>
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7,3	7,7	7,35
Электросопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м	1,25	1,35	1,20
Термический коэффициент сопротивления, ·10 <sup>-4</sup> /К	1,8	0,8	1,0
Температура кристаллизации (скорость нагрева 20 К/с), °С	510	540	510
Максимальная рабочая температура, °С	120	105	130
Удельная стоимость сплава, руб./кг, ·10 <sup>3</sup>	38	26	22

Таким образом, для изготовления постоянных магнитов индуктора производится выбор сплава *Nd-Fe-B*, как наиболее термоустойчивого и относительно недорогого материала.

## 2.2 Особенности конструкции индуктора

Масса подвижного элемента существенно влияет на энергетические и скоростные показатели машины. Для перемещения индуктора большой массы требуется приложить большее усилие, кроме того, он обладает большей инерцией, и достижение высоких частот перемещения затрудняется.

Снижение массы подвижного элемента (индуктора) позволяет достичь больших частот его перемещения, так как в этом случае увеличивается частота собственных колебаний элемента.

В [56] было проведено сравнение исполнения магнитной системы

индуктора линейного электрического генератора, приведенное в таблице 2.2. При этом величина магнитной индукции и вырабатываемая ЭДС для рассматриваемых вариантов имеют распределение согласно рисунку 2.1 и 2.2.

Максимальная индукция и ЭДС достигаются в варианте №2 при наличии ферромагнитной прокладки под магнитами. При этом в варианте №1 (без ферромагнитных накладок) характеристики снижаются не столь значительно, в то время как, отсутствие дополнительной массы прокладки на индукторе значительно снижает его массу.

Таблица 2.2 – Конструктивные исполнения подвижного элемента с постоянными магнитами

№ варианта	Тип конструктивного исполнения	Описание
1		Активная система с постоянными магнитами
2		Активная система с постоянными магнитами и ферромагнитной накладкой, расположенной под магнитом
3		Активная система с постоянными магнитами и ферромагнитной накладкой, расположенной над магнитом
4		Активная система с постоянными магнитами и ферромагнитной накладкой, расположенной под и над магнитом

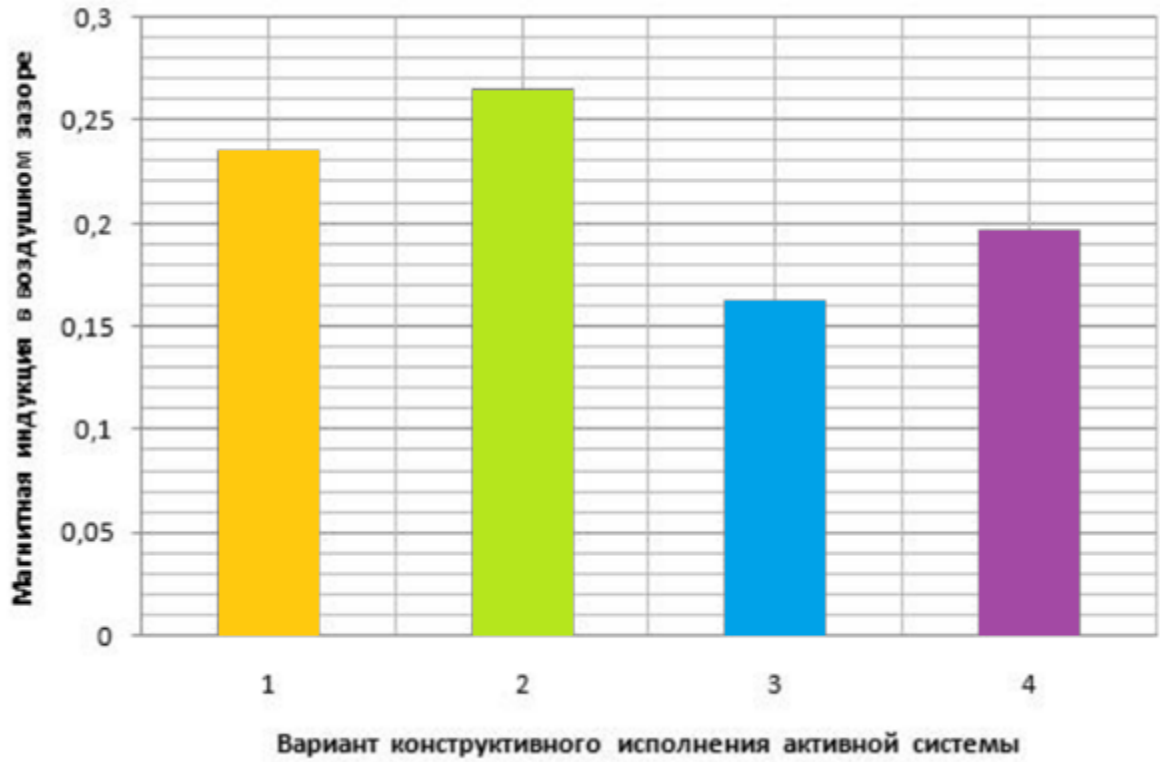


Рисунок 2.1 – Магнитная индукция в воздушном зазоре электрической машины

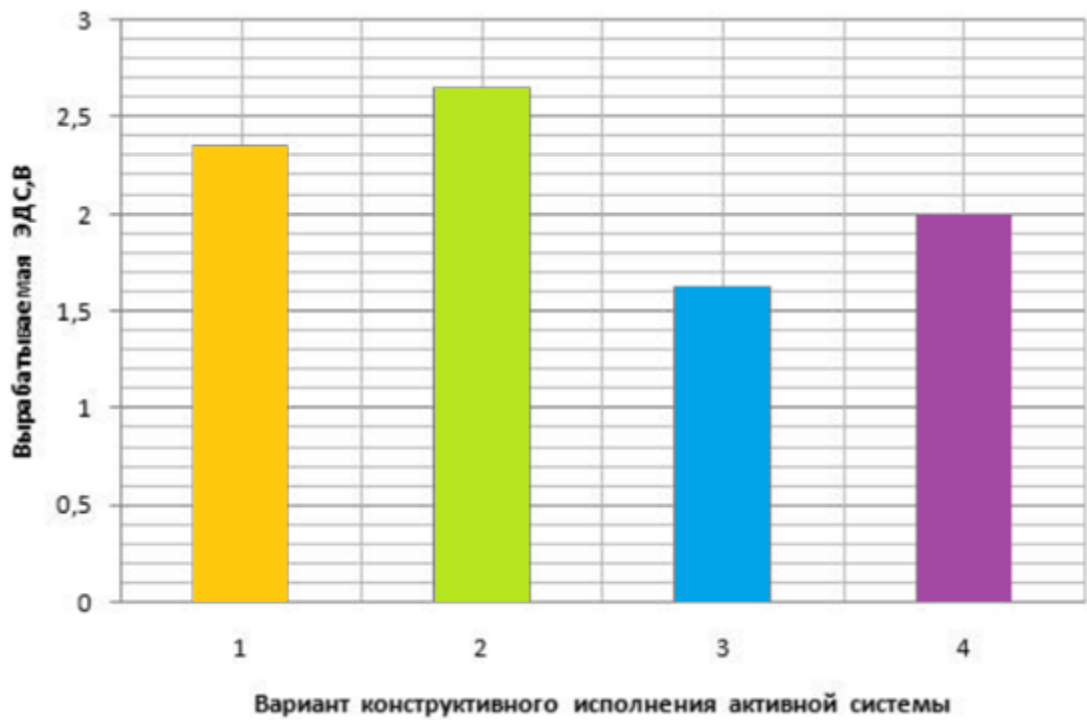


Рисунок 2.2 – Вырабатываемая ЭДС линейного генератора

### 2.3 Форма индуктора в поперечном сечении

Конструкция линейной электрической машины возвратно-поступательного действия на постоянных магнитах может быть с индуктором прямоугольного поперечного сечения и с индуктором цилиндрической формы. Конструкция линейного генератора на постоянных магнитах с индуктором прямоугольного поперечного сечения показана на рисунке 2.3. Наибольшее полезное использование магнитного потока достигается при цилиндрической форме индуктора рисунке 2.4.

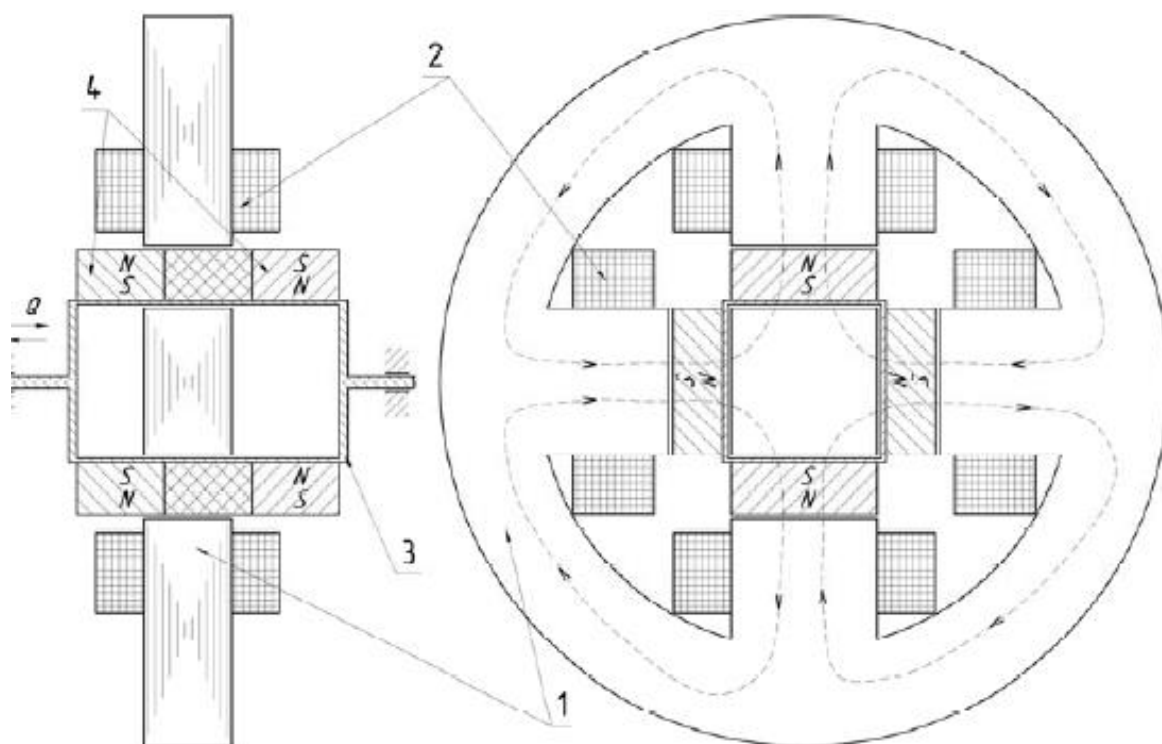


Рисунок 2.3 – Конструкция линейного генератора на постоянных магнитах с индуктором прямоугольного поперечного сечения: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – подвижная часть (индуктор); 4 – постоянный магнит [5]

Наибольшее полезное использование магнитного потока достигается при цилиндрической форме индуктора [102].



Рисунок 2.4 – Конструкция с цилиндрической формой индуктора

Известно, что для создания наибольшей силы линейного перемещения угол между взаимодействующими векторами тока и магнитной индукции должен составлять  $90^\circ$ . При конструкции линейной электрической машины, показанной на рисунке 2.4, объем активной части машины, участвующий в создании линейно действующей силы меньше, чем при конструкции, показанной на рисунке 1.5, так как лишь в местах выступов индуктора магнитный поток постоянных магнитов пересекает обмотку полюсов под углом  $90^\circ$ . Цилиндрическая форма индуктора повышает эффективность использования пространства машины.

#### 2.4 Форма индуктора в продольном сечении

W-образная форма индуктора, предложенная фирмой *Toyota*, изображенная на рисунке 1.10, обеспечивает лучшую изоляцию постоянных магнитов от воздействия агрессивной среды со стороны камеры сгорания, а также позволяет легче достичь высоких частот перемещения индуктора. Но такая форма менее технологична с точки зрения использования унифицированных деталей. Кроме того, такая конструкция допускает расположение движителя индуктора (поршня) только с одной стороны. Цилиндрическая форма индуктора, например, представленная на рисунке 1.8 в данном случае имеет преимущества с точки

зрения использования стандартных унифицированных форм и обеспечения универсальности привода машины.

## **2.5 Соотношение длин статора и индуктора**

Конечная длина активных элементов двигателя (статора и индуктора) влияет на эффективность машины следующим образом. При равной длине статора и индуктора сила, действующая на индуктор, снижается при отдалении индуктора от центра.

Для обеспечения постоянства действующей силы можно изменить соотношение длин статора и индуктора, как показано на рисунке 1.2.

В работе [7] рассмотрены случаи длинного статора и длинного индуктора. По сравнению с бесконечно длинными активными элементами статор и индуктор конечной длины снижают КПД двигателя примерно на одинаковую величину вне зависимости от соотношения их длин. Но при коротком индукторе с уменьшением массы подвижного элемента ухудшаются температурные условия, так как увеличивается плотность греющих потерь индуктора. При длинном статоре габариты и масса машины больше, но плотность греющих потерь самая низкая.

Результаты сравнительного анализа линейных машин с различным соотношением статора и индуктора по длине и расположению магнитов относительно поверхности элемента, на который они монтируются (утопленное или поверхностное), проведенного в работе проведенный в работе [7], представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры линейных машин

Машина	Магниты	КПД, %	Статор	Масса подвижного элемента, кг	Удельная мощность, кВт/кг	Фактор мощности
Продольный магнитный поток, подвижные магниты	Поверхностные	~ 93	Короткий	~ 15	~ 0,60	0,98
			Длинный	~ 12	~ 0,50	0,98
	Утопленные	~ 92	Короткий	~ 40	~ 0,40	0,94
			Длинный	~ 31	~ 0,35	0,94
Вентильные индукторные	нет	-----	-----	>55	<0,30	-----
Гибридные индукторные	поверхностные	~ 85	-----	>40	~ 0,10	-----
Подвижная катушка, переменного тока	утопленные	~ 97	короткий	~ 40	~ 0,45	-----
			длинный	~ 32	~ 0,40	-----
	поверхностные	~ 98	короткий	~ 30	~ 0,20	-----
			длинный	~ 20	~ 0,15	-----
Поперечный магнитный поток	утопленные	~ 95	короткий	~ 7	~ 0,81	0,35
		~ 94	длинный	~ 5	~ 0,67	0,35
	поверхностные	~ 95	короткий	~ 14	~ 1,1	0,35
		~ 94	длинный	~ 10	~ 0,67	0,35

Как видно из таблицы 2.3, при коротком статоре удельная мощность машины несколько больше.

## 2.6 Особенности выполнения обмотки статора

Существует два варианта выполнения статорной трехфазной обмотки: сосредоточенная обмотка и распределенная обмотка в несколько слоев, как показано на рисунке 2.5. Исследования [32, 92] показали, что выполнение однослойной сосредоточенной обмотки статора гораздо лучше с точки зрения эффективности двигателя.



Обмоточный коэффициент однослойной сосредоточенной обмотки:

$$k_{\text{обм}} = \frac{N_{\phi}}{\pi\alpha^{1/2}} \cdot \sin\left(\frac{\pi\alpha}{N_{\phi}}\right), \quad (2.7)$$

где  $N_{\phi}$  – количество фаз обмотки (или удвоенное число фаз, если оно нечетное);

$\alpha$  – ширина каждой обмоточной группы.

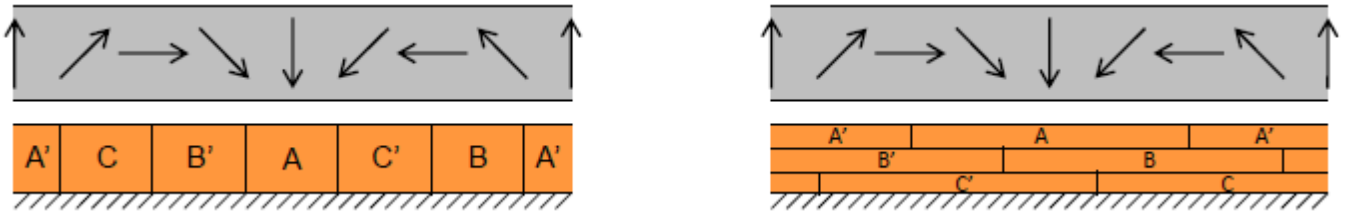


Рисунок 2.5 – Два варианта выполнения статорной

трехфазной обмотки: сосредоточенная обмотка (слева) и распределенная обмотка в несколько слоев (справа)

Направление тока в обмотках, обозначенных буквами А, В, С противоположно направлению тока в обмотках А', В', С' [92].

Для обмотки в несколько слоев обмоточный коэффициент определяется по формуле (2.8).

$$k_{\text{обм}} = \frac{2}{\pi\alpha^{1/2}} \cdot \sin\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right). \quad (2.8)$$

Введем для оценки характеристик двигателя [92] безразмерную величину – постоянную двигателя:

$$\hat{e} \equiv \frac{\hat{f}}{\sqrt{\hat{P}\hat{m}}}, \quad (2.9)$$

где  $\hat{f}$ ,  $\hat{P}$ ,  $\hat{m}$  – безразмерные коэффициенты, характеризующие удельную силу, потери мощности и массу машины, могут быть вычислены по выражениям (2.10), (2.11) и (2.12).

$$\hat{P} \equiv \frac{kt_c}{2}, \quad (2.10)$$

где  $k$  – пространственная частота гармоника магнитного поля, созданной постоянными магнитами;  
 $t_c$  – ширина обмотки.

$$\hat{m} \equiv kt_c + 2 \frac{\rho_m}{\rho_c} kt_m, \quad (2.11)$$

где  $t_m$  – ширина магнита;  
 $\rho_c$  – плотность проводника;  
 $\rho_m$  – плотность магнита.

$$\hat{f} \equiv e^{-kg} (1 - e^{-kt_c}) (1 - e^{-kt_m}), \quad (2.12)$$

где  $g$  – ширина воздушного зазора.

Величина  $\hat{e}$  отражает пространственное изменение магнитных полей, токов и массы магнитов. Независимо от параметров магнитов и конфигурации проводников с током, она позволяет сравнивать различные конфигурации машин, отличающиеся геометрией.

На средний КПД безразмерные корректирующие факторы влияют согласно выражению (2.13).

$$\hat{\eta} = \underbrace{\frac{\rho_c}{\sigma B_{rem}^2}}_{\text{материалы}} \times \underbrace{\frac{2}{\omega l_s}}_{\text{скорость}} \times \underbrace{F_0}_{\text{сила}} \times \underbrace{\hat{e}^{-2}}_{\text{геометрия машины}} . \quad (2.13)$$

При сравнении плоских линейных машин с ориентацией намагниченности постоянных магнитов в виде Холбах-массива при идеальном синусоидальном распределении токов  $\hat{e} = 0,33$ ,  $\hat{\eta} = 61\%$ .

При выполнении обмотки сосредоточенной постоянной машины снижается на 4,5%, а средний КПД до 58%. При выполнении обмотки распределенной:  $\hat{e} = 0,23$ ,  $\hat{\eta} = 44\%$ .

Выполнение обмотки многофазной (более 3 фаз) снижает рассеяние магнитного потока по краям статора, но требует удлинения статора и, как следствие, увеличения продольных габаритов машины. При этом значительный эффект снижения потерь магнитного потока может быть достигнут при количестве фаз статора более 12, что потребует удлинения статора в 3 раза [32].

## 2.7 Выводы

1. Выявлено, что материал *Nd-Fe-B* имеет максимальную индукцию 1,23 Тл среди магнитных материалов, наиболее термоустойчив и сравнительно недорогой. Применение магнитного материала *Nd-Fe-B* позволит сократить массо-габаритные характеристики постоянных магнитов индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия.

2. Выявлено, что наиболее перспективными являются цилиндрические конструкции электрических машин возвратно-поступательного действия, имеющие более высокий КПД за счет отсутствия краевого эффекта при создании магнитного потока. Кроме того цилиндрическая конструкция позволит в большей степени добиться унификации и стандартизации деталей электрической машины.

3. Выявлено, что преимущественной является реализация подвижной магнитной системы из кольцевых постоянных магнитов с осевой

намагниченностью в виде Холбах-массива с циклически изменяемой угловой ориентацией вектора намагниченности.

3. Как наиболее перспективная была принята следующая концепция электрической машины возвратно-поступательного движения: электрическая машина возвратно-поступательного движения с обмоткой на статоре и постоянными магнитами на цилиндрическом полом индукторе.

### 3 РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ, МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

#### 3.1 Математическая модель электрической машины возвратно- поступательного действия

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

Эквивалентная схема представлена на рисунке 3.1, 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 [42, 60].

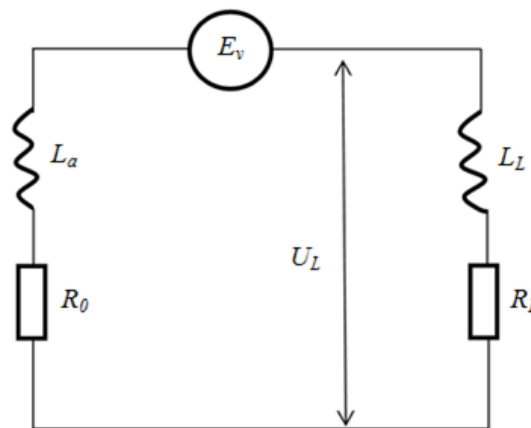


Рисунок 3.1 – Эквивалентная схема электрической машины возвратно-  
поступательного действия

Движение магнитов подчиняется закономерности (3.1).

$$x = x_m \sin \omega t, \quad (3.1)$$

где  $x_m$  – амплитуда движения магнитов;  
 $\omega$  – круговая частота перемещения магнитов.  
 ЭДС движения  $E_v$  описывается выражением (3.2).

$$E_v = C_{MW} \frac{dx}{dt} = C_{MW} x_m \omega \cos \omega t, \quad (3.2)$$

где  $C_{MW}$  – коэффициент электромагнитной силы, находится по формуле (3.3).

$$C_{MW} = k_{MW} \frac{2\mu_0 l F_M w}{\pi k_\mu a}, \quad (3.3)$$

где  $k_{MW}$  – коэффициент линеаризации электромагнитной силы;  
 $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$ ;  
 $l$  – 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.  
 Уравнение динамики движения индуктора линейного генератора описано выражением (3.4).

$$F_{пр} - F_{эм} - F_{тр} - F_{пруж} = m \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (3.4)$$

где  $F_{пр}$  – сила приводного механизма (например, двигатель внутреннего сгорания);  
 $F_{эм}$  – электромагнитная сила линейного генератора;  
 $F_{тр}$  – силы трения;  
 $F_{пруж}$  – сила пружины, или иного устройства, снижающего вибрации;  
 $m$  – масса индуктора.

Система уравнений равновесия напряжения для тока  $i$  описана в (3.5).

$$\begin{cases} (L_a + L_L) \frac{di}{dt} + (R_0 + R_L)i + E_v = 0 \\ U_L = L_L \frac{di}{dt} + R_L i \end{cases} \quad (3.5)$$

где  $U_L$  – напряжение нагрузки.

При динамическом расчете параметры движения подвижного элемента – перемещение  $S$  и скорость  $V$  задавались следующими зависимостями (3.6) и (3.7) соответственно [31, 61, 101], графики которых изображены на рисунке 3.2 [61]:

$$S = L_{\text{шт}} \cdot \sin(2\pi t / f), \quad (3.6)$$

где  $L_{\text{шт}}$  – рабочий ход подвижного элемента;

$f$  – частота, Гц;

$$V = \frac{dS}{dt} = \frac{L_{\text{шт}} \cdot 2\pi}{f} \cos\left(\frac{2\pi t}{f}\right). \quad (3.7)$$

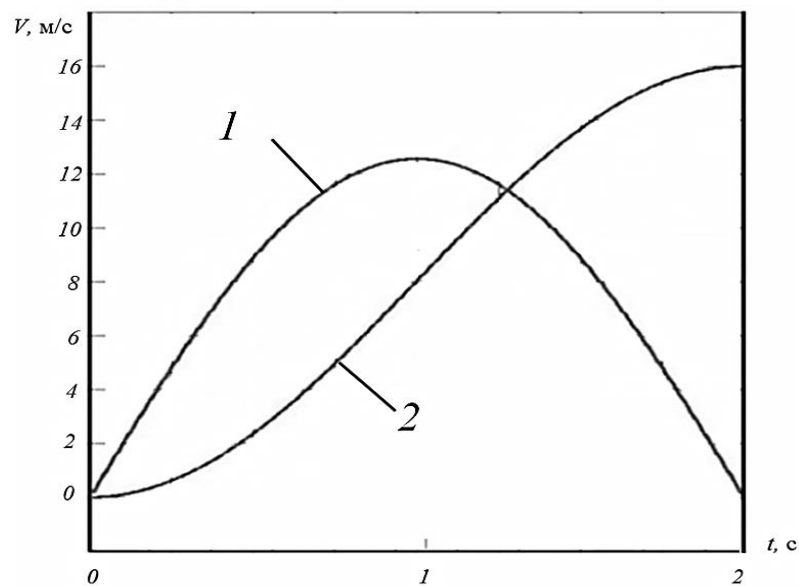


Рисунок 3.2 – Графики движения подвижного элемента

1 – скорость; 2 – перемещение

Задача решалась в осесимметричной постановке, для чего была разработана осесимметричная конечно-элементная модель электрической машины на основе моделей, представленных в [18, 39, 92, 99], в которых методом перемещения сетки моделировалась нестационарная задача перемещения подвижного элемента относительно магнитной системы статора. Вихревые токи в магнитопроводах и постоянных магнитах не учитывались. Поскольку нагрузка машины полагалась чисто активной, то электрическая мощность машины  $P$  вычислялась по формуле (3.8).

$$P = 2 \cdot f \cdot r \cdot \int_0^{T/2} I_{\text{сум}} dt, \quad (3.8)$$

где  $I_{\text{сум}}$  – суммарный мгновенный ток, А;

$r$  – эквивалентное сопротивление;

$T$  – период колебаний,  $T = 1/f$ , с.

Отличием модели является то, что она содержит две системы дифференциальных уравнений электрического состояния фаз, а также систему алгебраических уравнений (3.9) магнитного состояния для магнитной схемы замещения [27].

$$(u) = (R_\varphi)(i_\varphi) + (L_\varphi)(Di_\varphi) + (K_E)(D\Phi_{11});$$

$$(R_{11})(\Phi_{11}) - (R_{12})(\Phi_{22}) = (K_F)(i_\varphi);$$

(3.9)

$$-(R_{21})(\Phi_{11}) + (R_{22})(\Phi_{22}) = (i_c);$$

$$(r_c)(i_c) + (L_i)(Di_c) + (L_c)(v)(i_c) = -(D\Phi_{22}) - (v)(\Phi_{22}),$$

где  $(R_\varphi)$ ,  $(L_\varphi)$ ,  $(r_c)$ ,  $(L_c)$  – матрицы сопротивлений и индуктивностей фаз;

$(i_\varphi)$ ,  $(i_c)$  – векторы (матрицы-столбцы) мгновенных значений неизвестных токов фаз;



$D$  – оператор дифференцирования по времени;

$(\Phi_{11}), (\Phi_{22})$  – векторы мгновенных значений потоков;

$(K_F)$  – матрица распределения пазовых МДС;

$(R_{11}), (R_{22}), (R_{12}) = (R_{21})$  – матрицы собственных и взаимных магнитных сопротивлений схемы замещения;

$(K_E) = (K_F^T)$  – матрица формирования мгновенных значений ЭДС движения в фазах, содержащая ненулевые элементы  $a_{n,n-1} = -\nu/2t_z$  и  $a_{n,n+1} = \nu/2t_z$  [94].

Вектор мгновенных значений напряжений, приложенных к обмотке индуктора, определяет режим работы машины. Например, при симметричной системе напряжений источника питания он выражается по (3.10).

$$(u) = \begin{pmatrix} U_m \sin \omega t \\ U_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ U_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

После ряда преобразований можно получить выражения в виде (3.11).

$$\begin{aligned} (\Phi_{11}) &= (a_{11})(i_\varphi) + (a_{22})(i_c); \\ (\Phi_{12}) &= (b_{11})(i_\varphi) + (b_{22})(i_c), \end{aligned} \quad (3.11)$$

где  $(a_{11}) = (A)(R_{11}^{-1})(K_F)$ ;

$$(A) = (R_{12}^{-1} R_{22} - R_{11}^{-1} R_{12})^{-1};$$

$$(b_{11}) = (B)(R_{12}^{-1})(K_F);$$

$$(b_{22}) = (B)(R_{22}^{-1});$$

$$(B) = (R_{12}^{-1} R_{11} - R_{22} R_{12})^{-1}.$$

Выводится система уравнений (3.12).

$$\left. \begin{aligned} (A_{11})(Di_\varphi) + (A_{12})(Di_c) &= (u) - (R_\varphi)(i_\varphi) \\ (A_{21})(Di_\varphi) + (A_{22})(Di_c) &= -(d)(i_c) - (v)(a_{11})(i_\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

где  $(A_{11}) = (L_\varphi) + (K_E)(b_{11}),$

$$(A_{12}) = (K_E)(b_{22}),$$

$$(A_{21}) = (a_{11}),$$

$$(A_{22}) = (L_c) + (a_{22}),$$

$$(d) = (r_c) + (L_c)(v) + (v)(a_{22}).$$

В (3.13) система приведена к форме Коши.

$$\left. \begin{aligned} (Di_\varphi) &= (K_1)(u) - (K_2)(i_\varphi) + (K_3)(i_c) \\ (Di_c) &= (K_4)(u) - (K_5)(i_\varphi) + (K_6)(i_c) \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

где  $(K_1) = (A_{11}^{-1}) + (A_{11}^{-1})(A_{12})(A_A)(A_{21})(A_{11}^{-1});$

$$(K_2) = (A_{11}^{-1})(R_\varphi) + (A_{11}^{-1})(A_{12})(A_A)(B_B);$$

$$(K_3) = (A_{11}^{-1})(A_{12})(A_A)(d);$$

$$(K_4) = -(A_A)(A_{21})(A_{11}^{-1});$$

$$(K_5) = (A_A)(B_B);$$

$$(K_6) = (A_A)(d);$$

$$(A_A) = (A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12})^{-1};$$

$$(B_B) = (A_{21})(A_{11}^{-1})(R_\phi) - (v)(a_{11}),$$

или

$$(DI) = (T_1)(u) + (T_2)(I),$$

$$\text{где } (I) = \begin{pmatrix} (i_\phi) \\ (i_c) \end{pmatrix}; (T_1) = \begin{pmatrix} (K_1) \\ (K_4) \end{pmatrix}; (T_2) = \begin{pmatrix} (K_2) & (K_3) \\ (K_5) & (K_6) \end{pmatrix}.$$

Приведенное уравнение решается численными методами относительно вектора всех токов. Из этого вектора выделяются далее векторы токов фаз (3.14).

$$(i_c) = (S_S)(I), \quad (3.14)$$

$$\text{где } (S_S) = -(R_{21})(S_{TB}) + (R_{22})(S_{TA});$$

$$(S_{TA}) = ((a_{11}) \dots (a_{22}));$$

$$(S_{TB}) = ((b_{11}) \dots (b_{22})).$$

Вектор мгновенных значений потоков в участках ярма записывается в виде (3.15).

$$(\Phi_{22}) = (S_{TA})(I). \quad (3.15)$$

Вектор мгновенных значений индукций в участках зазора записывается в виде (3.16).

$$(B_{22}) = (DI)(\Phi_{22}), \quad (3.16)$$

где  $(DI)$  – матрица формирования производных по координате с ненулевыми элементами  $a_{n,n-1} = -1/2t$ ;  $a_{n,n+1} = 1/2t$ .

Усилие, действующее на индуктор, определяется как произведение транспонированной матрицы  $(B_{22}^T)$  на матрицу токов стержней  $(i_c)$  и записывается в виде (3.17).

$$F = [(DI)((S_{TA})(I))]^T ((S_S)(I)). \quad (3.17)$$

Для учета изменения скорости движения индуктора матрицы соответствующих коэффициентов становятся функциями скорости движения индуктора, а к системе уравнений добавляется уравнение (3.18).

$$F - F_c = m dv / dt, \quad (3.18)$$

где  $m$  – масса движущихся частей;

$F_c$  – усилие сопротивления движению.

### **3.2 Разработка имитационной численной модели электрической машины возвратно-поступательного действия**

Разработка и оптимизация синхронной ЭМВПД с ПМ проводится вместе с расчетом параметров преобразователя, рассматривая линейную машину и преобразователь, как единую систему [23, 68, 77, 88, 99]. В качестве среды имитационного моделирования ЭМВПД, 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 [40, 41].

Кроме того, в модели с применением *SimPowerSystems* можно использовать блоки остальных библиотек *Simulink*, а также функции самого *Matlab*, в том числе блок оптимизации *Optimization Toolbox*, что дает практически не ограниченные возможности для моделирования электротехнических систем [62].

Таким образом, *SimPowerSystems* в составе *Simulink* в настоящее время может считаться одним из лучших пакетов для моделирования электротехнических устройств и систем [20, 72].

Для трехмерного моделирования, прочностного и кинематического анализа деталей электрической машины выбран программный продукт *CatiaV5* – это комплексная система автоматизированного проектирования (*CAD*), технологической подготовки производства (*CAM*) и инженерного анализа (*CAE*), включающая в себя передовой инструментарий трёхмерного моделирования, подсистемы программной имитации сложных технологических процессов, развитые средства анализа и единую базу данных текстовой и графической информации [78].

В интегрированной среде создания инженерных приложений *Simulink* системы *Matlab 2010* смоделированы и исследованы различные виды работы ЭМВПД.

С целью определения рациональных конструктивных параметров ЭМВПД предлагается реализовать концепцию параллельного моделирования (в иностранной литературе *Co-Simulation*) [65, 75, 79, 85].

Данная концепция дает возможность производить обмен данными между различными программами с целью повышения эффективности, точности моделирования и оптимизации конструктивных размеров деталей.

В нашем случае предлагается производить обмен данными между программами *Matlab/Simulink*, *Ansys Maxwell* и *CatiaV5* через специально написанную оригинальную программу (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663605 от 20 февраля 2016 г. «Программный комплекс для моделирования электрической машины возвратно-поступательного» [48] – Приложение Е).

В качестве метода интегрирования выбран многошаговый метод переменного порядка *ode-23tb*, использующий формулы численного дифференцирования [88].

На основе предварительного расчета определены основные размеры электрической машины, которые позволят обеспечить выработку минимальной мощности 10 кВт (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Предварительные размеры электрические машины

Параметр	Значение	Единица измерения
Радиус воздушного зазора	100	мм
Активная длина индуктора	195,5	мм
Воздушный зазор	1,5	мм
Активная длина статора	315	мм

Математическая модель трехфазной линейной ЭМВПД, показанная на рисунке 3.3, состоит из последовательной ветви собственных параметров генератора, работающей на выпрямительный диодный мост *Universal Bridge*, подключенный к активно-индуктивной нагрузке.

На основе разработанной имитационной модели трехфазной линейной ЭМВПД проведены расчеты зависимостей вырабатываемой электрической мощности от частоты перемещения индуктора электрической машины (рисунок 3.4).

Рассчитанные осевые нагрузки, действующие на индуктор электрической машины, в зависимости от частоты перемещения индуктора (рисунок 3.5), позволяют провести прочностной анализ вала индуктора и закрепленных на нем магнитов.

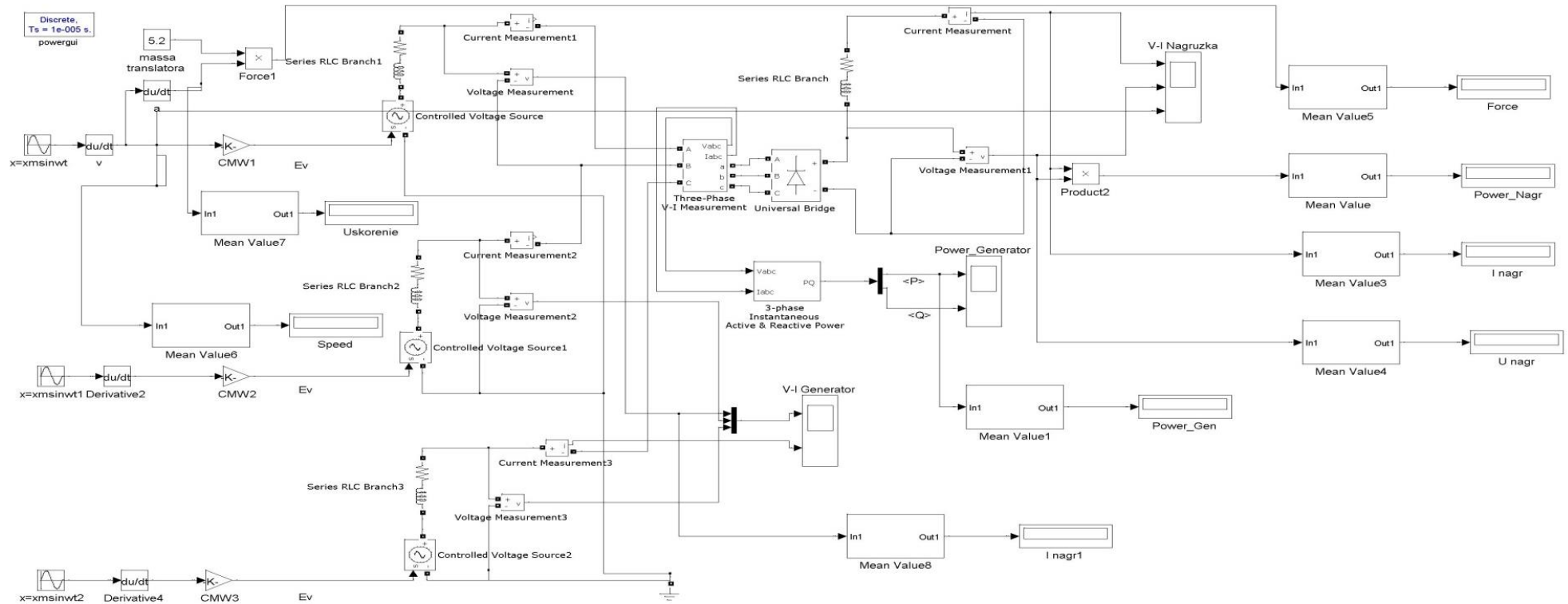


Рисунок 3.3 – Модель трехфазной линейной электрической машины возвратно-поступательного действия

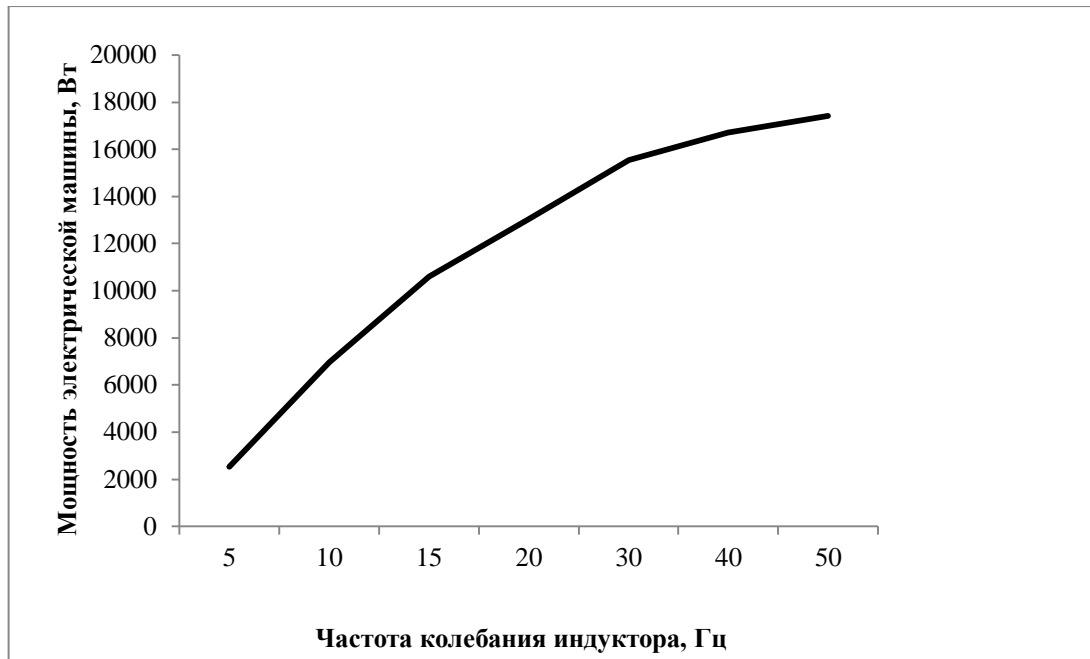


Рисунок 3.4 – Рассчитанная теоретическая зависимость мощности вырабатываемой электрической машиной (в режиме генератора) от частоты колебаний индуктора



Рисунок 3.5 – Рассчитанная теоретическая зависимость осевой нагрузки на индуктор от частоты его колебаний



### 3.3 Прочностной анализ элементов электрической машины возвратно-поступательного действия

С целью повышения прочности и надежности крепления магнитов предложена фиксация магнитов на индукторе с помощью биндажа из стекловолокна толщиной 1 мм. Изменения в конструкции внесены в 3D модель индуктора ЭМВПД.

Параметры моделирования в программном комплексе *Matlab/Simulink* на основе программ, написанных на языке *Matlab*, передаются в проектную таблицу *Microsoft Excel*, которая синхронизируется с системой автоматизированного проектирования (САПР) *CatiaV5*. В *CatiaV5* строятся 3D модели статора и индуктора ЭМВПД.

Блок *Force* в модели трехфазной линейной ЭМВПД (рисунок 3.3) рассчитывает осевые нагрузки на индуктор электрической машины, которые передаются на осциллограф *Scope*. Блок *ToWorkspace* производит запись полученных значений в файл «*nagruzka*».

Программный файл «*export*», интегрированный в данную модель, после окончания расчета выгружает полученные значения нагрузок в виде проектной *Excel*-таблицы, которая синхронизируется с САПР *CatiaV5*. Общий вид электрической машины представлен на рисунке 3.6.

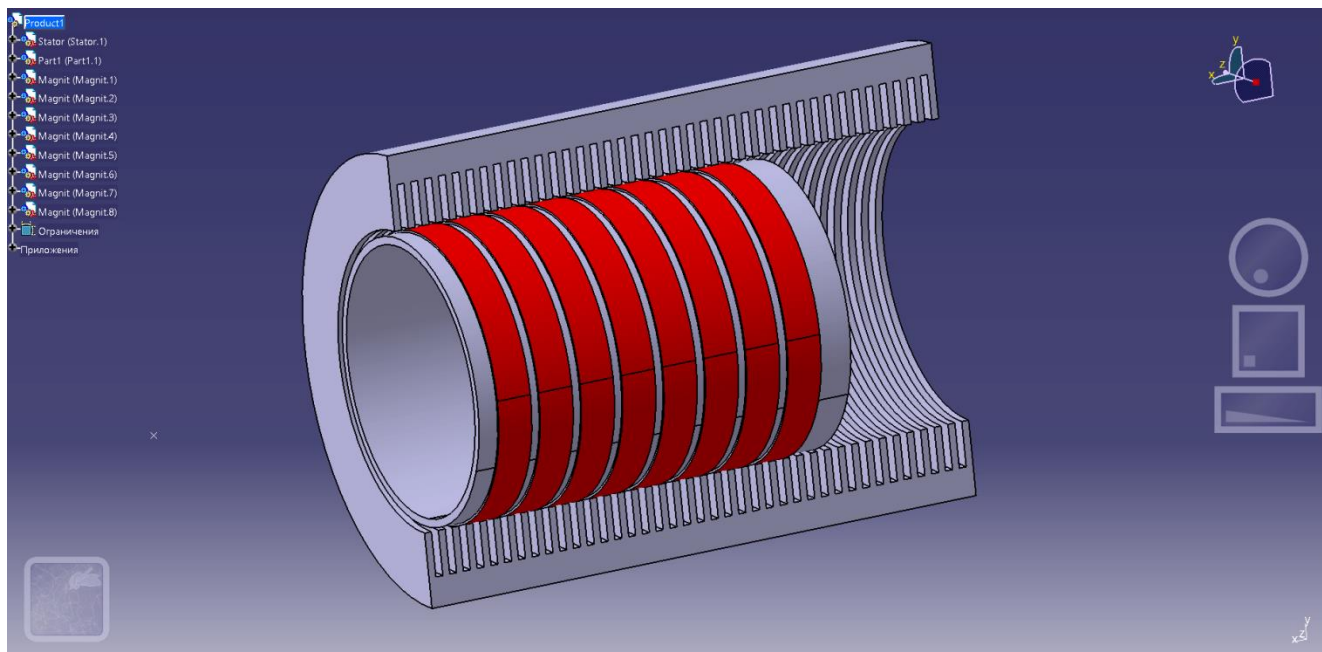


Рисунок 3.6 – 3D-модель линейного генератора в программе *CatiaV5*

Для основы индуктора из встроенной библиотеки выбран материал титан. Материал магнитов – *Nd-Fe-B* (Неодим-железо-бор). Масса индуктора, вычисленная в САПР *CatiaV5*, составляет 5,2 кг. Стоит отметить, что в аналогичных работах масса индуктора составляет порядка 10 кг [42, 71, 101].

На рисунке 3.7 представлен прочностной анализ крепления магнита на индукторе электрической машины. Максимальное механическое напряжение на креплении составляет 7,72 МПа, что необходимо учитывать при выборе способа монтажа магнитов на основу индуктора.

На рисунке 3.8 представлен прочностной анализ основы индуктора электрической машины. Предполагается наличие только осевых нагрузок. Максимальное механическое напряжение составило 110 МПа, что позволяет использовать титан в качестве материала основы индуктора, с учетом его механических характеристик.

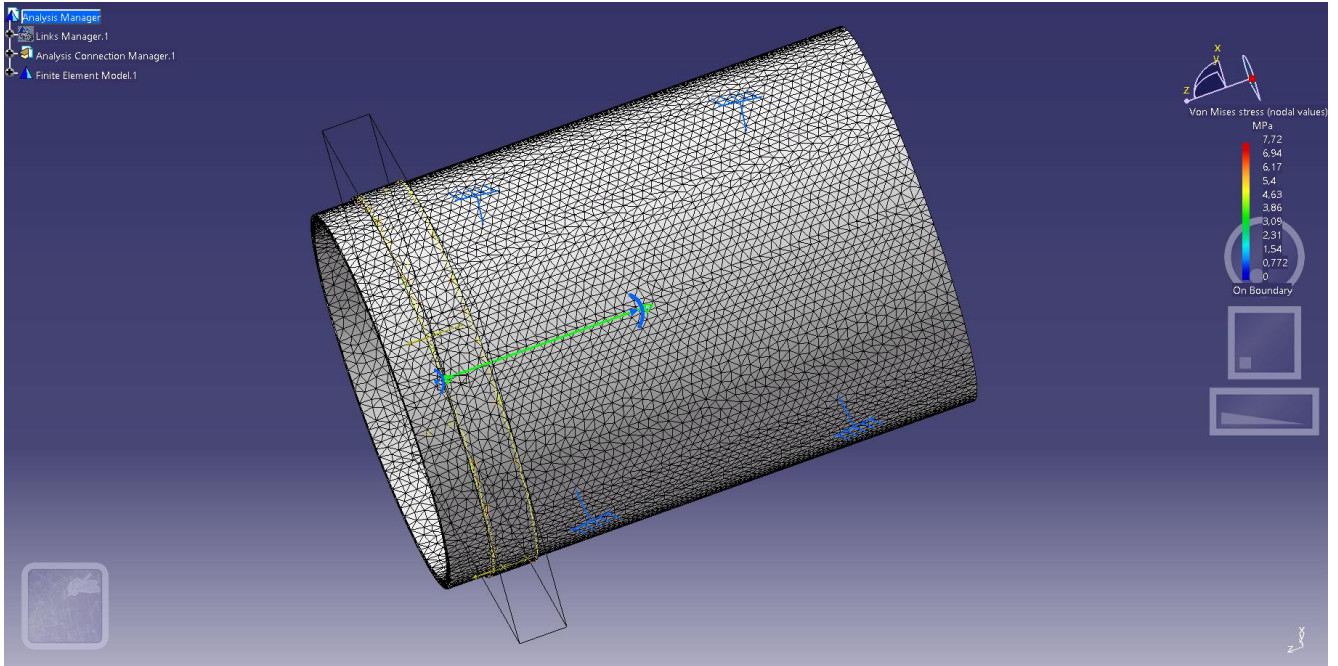


Рисунок 3.7 – Проведение прочностного анализа крепления магнита на индукторе ЭМВПД

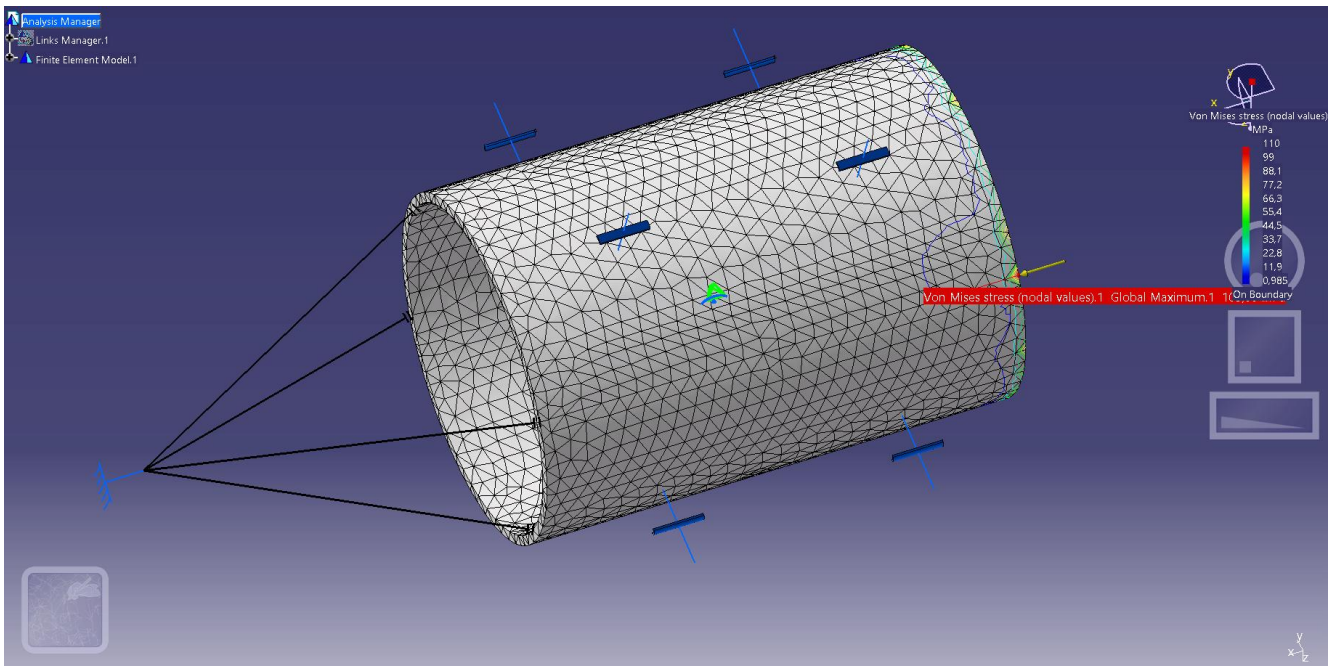


Рисунок 3.8 – Проведение прочностного анализа основы индуктора ЭМВПД

### 3.4 Оптимизация конструктивных размеров статора и индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия

Целью оптимизации конструкции ЭМВПД является получение максимальной электрической мощности машины  $P_g$ .

Согласно [25] максимальная электромагнитная мощность, которая может быть получена, составит:

$$P_g = \frac{1}{2} E_{vm} \cdot i_m \cdot \cos \varphi. \quad (3.19)$$

Учитывая выражение (3.2), получим:

$$P_g = \frac{1}{2} C_{MW} \cdot x_m \cdot \omega \cos \omega t_m \cos \varphi. \quad (3.20)$$

Проанализируем данное выражение. Повышение амплитуды колебаний  $x_m$  и частоты перемещения индуктора  $\omega$  являются тривиальными решениями и ограничиваются прочностными характеристиками машины. Ток генератора  $i_m$  ограничивается сечением обмотки статора и условиями охлаждения электрической машины. При работе на активную нагрузку можно принять  $\cos \varphi \approx 0,9$ .

Коэффициент электромагнитной силы  $C_{MW}$ , согласно выражению (3.3), включает в себя конструктивные размеры статора и индуктора электрической машины, а также магнитодвижущую силу магнитов.

Расширим целевую функцию с учетом уравнений (3.21 – 3.26). Полученную функцию внесем в блок оптимизации приложения *Optimization Toolbox*.

В таблице 3.2 представлены параметры, входящие в целевую функцию, пределы, накладываемые на них с учетом конструктивных особенностей, а также обозначения, принятые в приложении *Optimization Toolbox*.

Таблица 3.2 – Параметры, входящие в целевую функцию

Наименование переменной	Обозначение в приложении <i>Optimization Toolbox</i>	Пределы
$C_{MW}$	Максимизируемая величина	–
$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	–
$\mu_r$	$1,41 \cdot 10^{-7}$	–
$D_M$	X(1)	$(195 - 205) \cdot 10^{-3}$ м
$L_M$	X(2)	$(3 - 6) \cdot 10^{-3}$ м
$h_{\text{окна}}$	X(3)	$(25 - 45) \cdot 10^{-3}$ м
$b_{\text{окна}}$	X(4)	$(5 - 10) \cdot 10^{-3}$ м
$k_{MW}$	X(5)	0,6 – 0,9
$\alpha$	X(6)	0,045 - 0,05
$a$	X(7)	$(1,2 - 1,4) \cdot 10^{-3}$

$$C_{MW} = \left( 1 - \alpha \cdot \ln \left[ 1 + \frac{1}{2\alpha} \right] \right) \frac{2\mu_0 \cdot \pi \cdot D_M \cdot H_C \cdot L_{MW}}{\pi \cdot k_\mu \cdot a \cdot b_M} \rightarrow \max; \quad (3.21)$$

$$l = \pi \cdot D_M, \quad (3.22)$$

где  $l$  – длина окружности диаметра магнита.

$$F_M = H_C \cdot L_M, \quad (3.23)$$

где  $H_C$  – коэрцитивная сила магнита, Н/м;

$L_M$  – высота магнита.

$$w = \frac{k_{cu} \cdot h \cdot b}{S_M}, \quad (3.24)$$

где  $k_{cu}$  – коэффициент заполнения паза статора;

$h$  – высота паза статора;

$b$  – ширина паза статора;

$S_M$  – сечение проводника в статоре.

$$k_{MW} = 1 - \alpha \cdot \ln \left[ 1 + \frac{1}{2\alpha} \right]; \quad (3.25)$$

$$\alpha = \frac{a}{b_M}, \quad (3.26)$$

где  $\alpha$  – относительный параметр;

$b_M$  – ширина магнита.

$$a = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\mu_0}{\mu_r} L_M + 2\delta \right], \quad (3.27)$$

где  $a$  – условная толщина магнитов и зазоров, разделенная на  $\pi$ ;

$\delta$  – воздушный зазор;

$\mu_r$  – магнитная проницаемость магнита.

На рисунке 3.9 представлена визуализация вычислений на основе генетического алгоритма. Отрицательное значение целевой функции вызвано тем, что при максимизации целевой функции в программе *Matlab* ее необходимо взять со знаком минус. Как видно из графика, решение достигается уже на половине популяций (стандартное значение 100). Полученное значение  $C_{MW} = 17,79$  Н/А вводится в модель трехфазной линейной ЭМВПД.

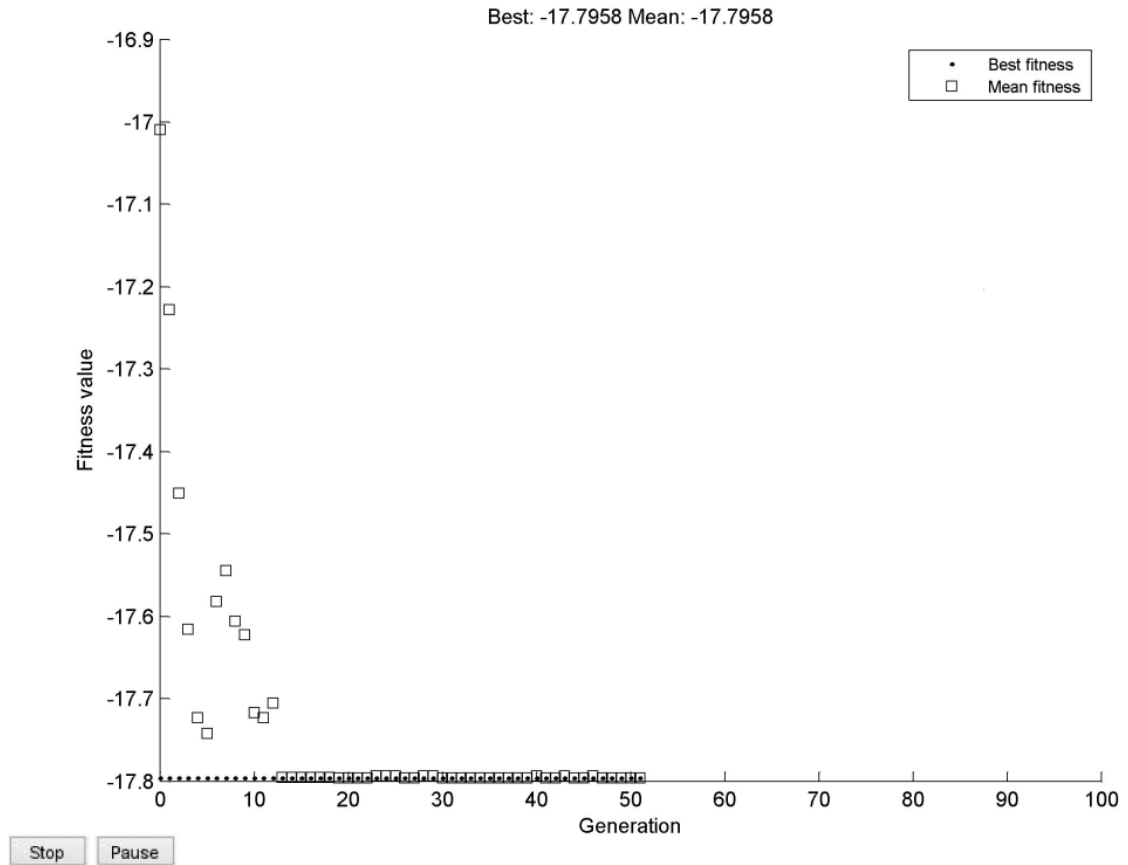


Рисунок 3.9 – График изменения значение целевой функции (*fitnessvalue*) в зависимости от количества популяций (*Generation*)

Рассчитанные параметры на основе представленного метода оптимизации сведены в таблицу 3.3. Данные значения закладываются в 3D модели линейной электрической машины в САПР *CatiaV5* для последующего кинематического и прочностного расчета.

Таблица 3.3 – Рассчитанные параметры целевой функции

Наименование переменной	Обозначение в приложении <i>Optimization Toolbox</i>	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
$h_{окна}$	X(3)	$30 \cdot 10^{-3}$ м
$b_{окна}$	X(4)	$5 \cdot 10^{-3}$ м
$k_{MW}$	X(5)	0,88
$\alpha$	X(6)	0,045
$a$	X(7)	$1,2 \cdot 10^{-3}$

Программы оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора ЭМВПД (Приложение А) зарегистрированы в Государственном реестре программ для ЭВМ, получен ряд свидетельств о регистрации:

- 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» [47] (Приложение Б);

- 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» [46] (Приложение В);

- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663776 от 20 ноября 2016 г. «Программа оптимизации конструктивных



размеров транслятора электрической машины возвратно-поступательного движения» [50] (Приложение Г).

### **3.5 Оптимизация топологии индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия на основе генетического алгоритма**

Генетический алгоритм (ГА) – это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Является разновидностью эволюционных вычислений, с помощью которых решаются оптимизационные задачи с использованием методов естественной эволюции, таких как наследование, мутации, отбор и кроссинговер.

Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе.

В предлагаемом алгоритме [40, 43, 44] область проектирования разделяется на сеть ячеек – конечных элементов (рисунок 3.10) с присущим каждой ячейке материалом. В данном случае рассматривается шесть типов материалов: воздух, титан и четыре разновидности магнита с различными направлениями намагниченности, которые обозначены 0, 1, 2, 3, 4, 5 соответственно, как показано на рисунке 3.11.

Два начальных образца выбираются случайным образом.

Далее выбираются несколько ячеек для обмена посредством однородного скрещивания (рисунок 3.12) и в результате создаются два новых образца.

Новые образцы наследуют лучшие характеристики предыдущих образцов, затем процесс повторяется.

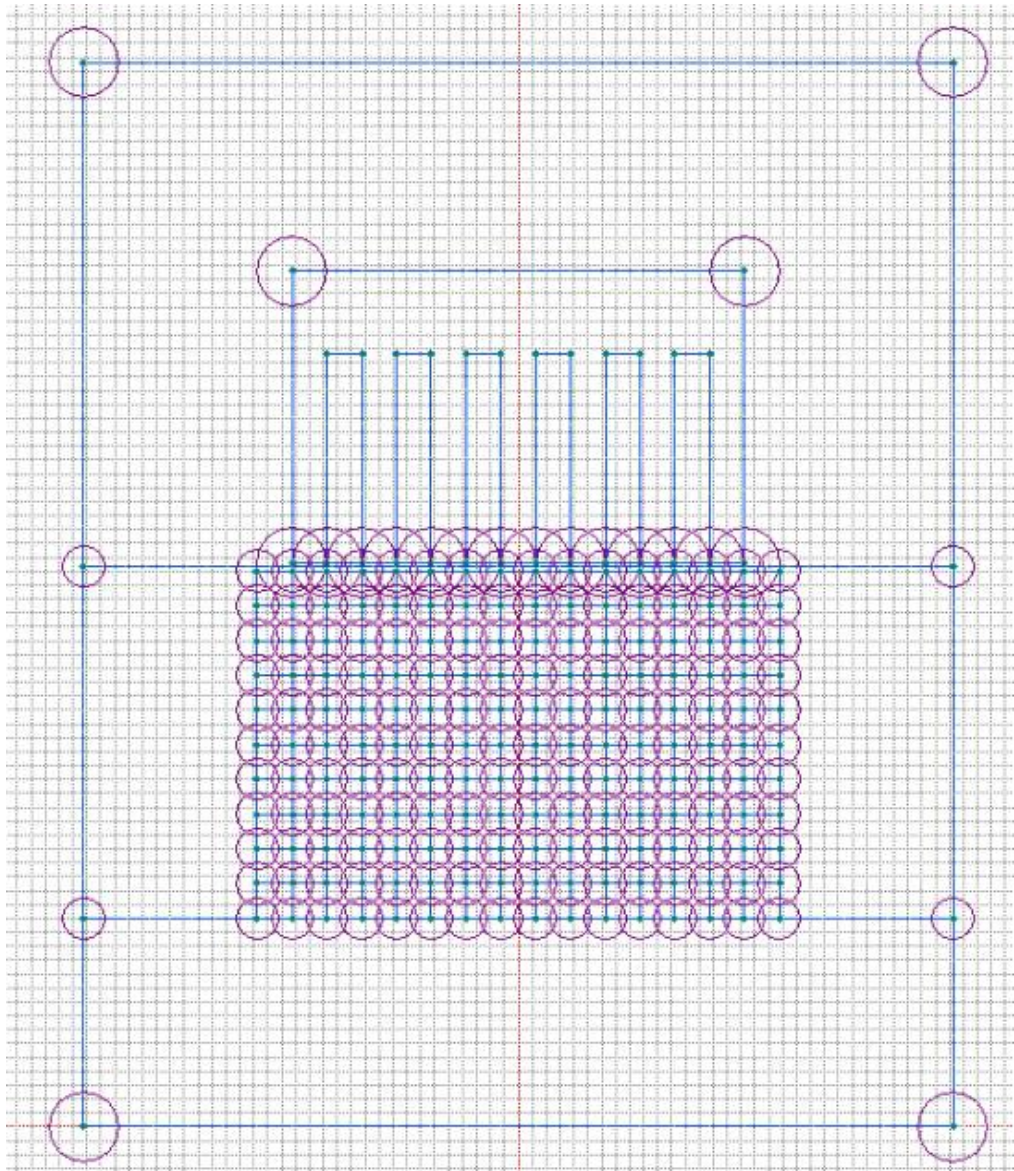


Рисунок 3.10 – Конечно-элементная модель электрической машины возвратно-  
поступательного действия

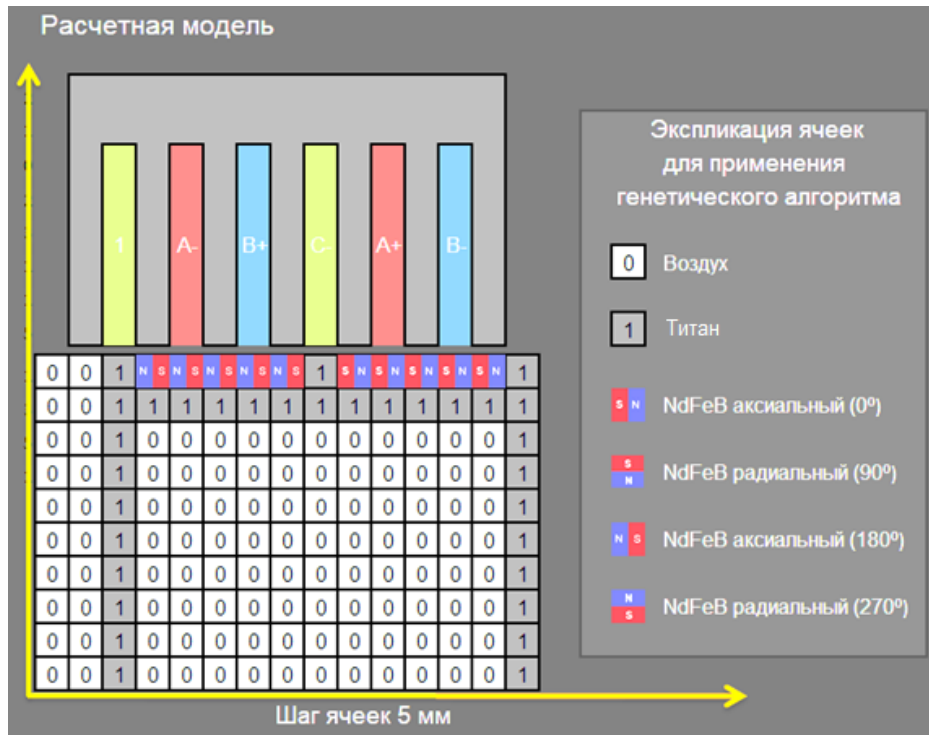


Рисунок 3.11 – Исходный набор генов хромосомы индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия

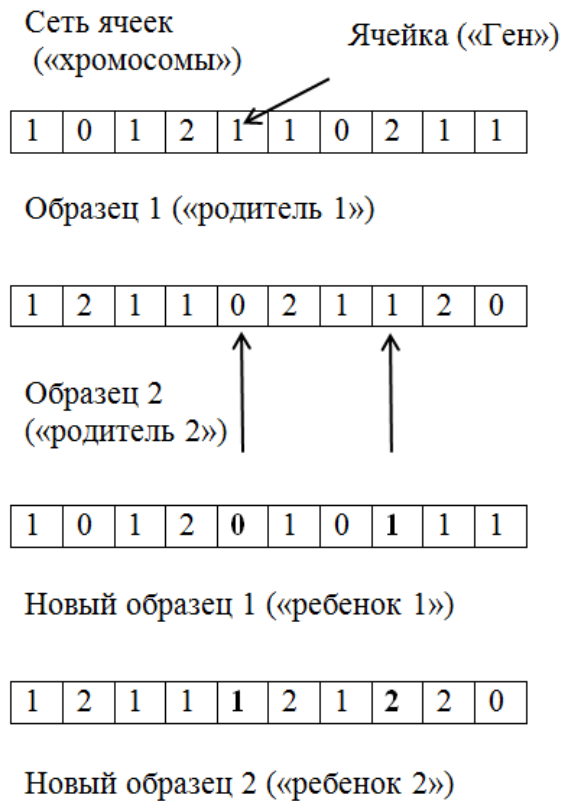
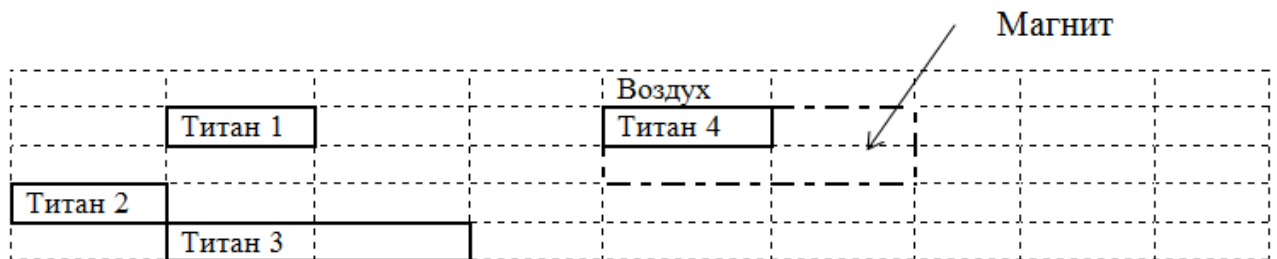
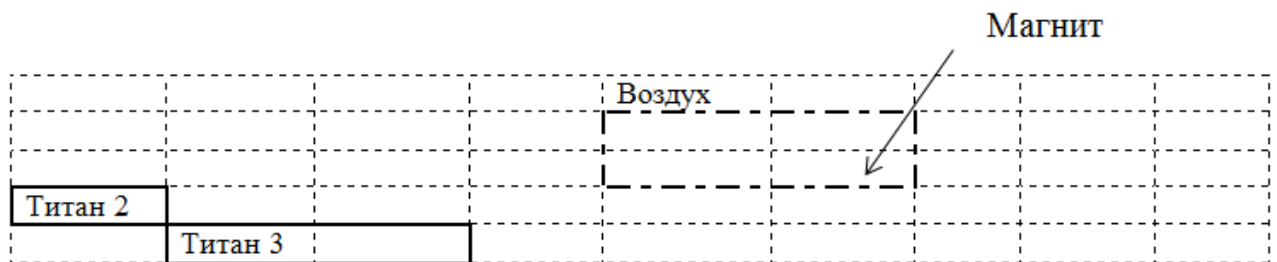


Рисунок 3.12 – Пример построения хромосом и процесса скрещивания

Предложена процедура очистки, которая производится следующим образом. Для каждого гена, находящегося со 2 по 9 строку и со 2 по 14 столбец (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 (рисунок 3.13).



*а)* перед «очисткой»



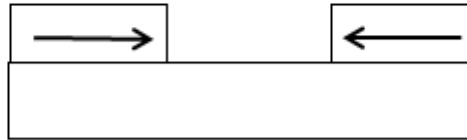
*б)* после «очистки»

Рисунок 3.13 – Концепция кластеров и процедуры «очистки»

Два направления намагниченности постоянного магнита показаны на рисунке 3.14 (*а*, *б*).



а) радиальная намагниченность



б) аксиальная намагниченность

Рисунок 3.14 – Направления намагниченности в постоянном магните

Затем разрабатывается более точная топология с использованием большого количества переменных проектирования для второй итерации в массиве ячеек  $10 \times 15$ . 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 3.15.

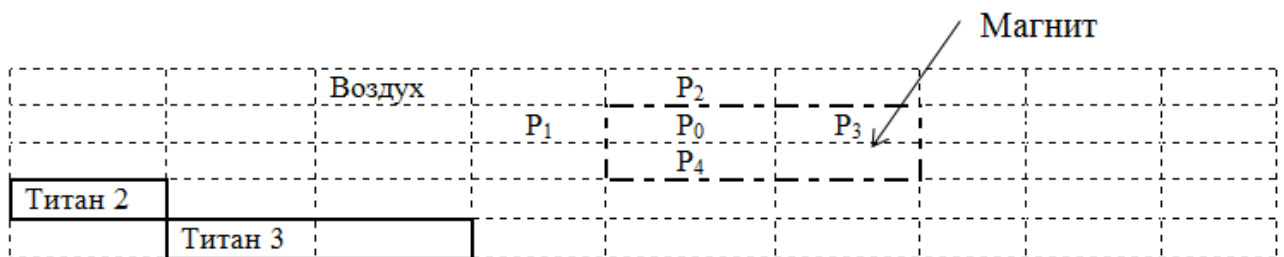


Рисунок 3.15 – Кластер материалов на второй итерации

Блок-схема предложенного алгоритма показана на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16 – Блок-схема генетического алгоритма для топологической оптимизации индуктора

Принцип работы разработанного генетического алгоритма заключается в следующем.

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. Каждый родитель содержит 150 генов (ячеек), расположенных в 10 строк и 15 столбцов;

1.2) В случае, если программа запущена впервые и новая популяция сгенерирована случайным образом, то производится процедура очистки родителя 1 и родителя 2.

2) Скрещивание:

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 двумя 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 методом 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 двумя 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;

б) 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 данный алгоритм получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613530 от 16 марта 2018 г. «Программа топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма» (Приложение Д).

На рисунке 3.17 в качестве примера графически представлен один из промежуточных результатов работы алгоритма, разработанного в рамках выполнения Соглашения № 216/647-С по гранту Российского фонда

фундаментальных исследований (РФФИ) и Правительства Республики Татарстан, проект № 17-48-160438, 2017 г.

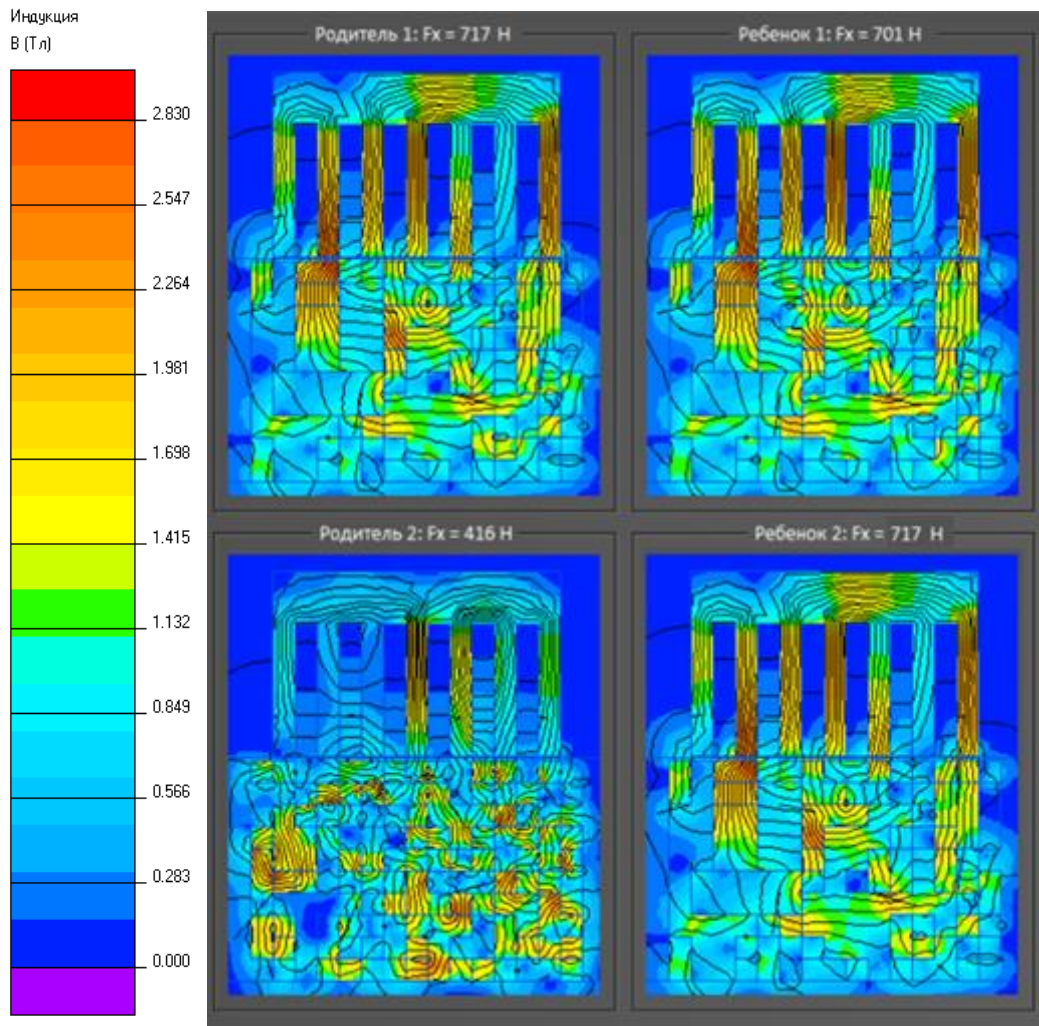


Рисунок 3.17 – Промежуточный результат работы генетического алгоритма топологической оптимизации индуктора в виде карт электромагнитной индукции, полученных в результате конечно-элементного моделирования

В результате конечно-элементного моделирования получены карты электромагнитной индукции, возникающей в индукторе электрической машины.

После чего рассчитано усилие, действующее на индуктор в требуемом направлении.

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 3.18) горизонтальная электромагнитная сила, действующая на интегральный контур индуктора составляет 849 Н.

При модифицированной сборке Холбаха (рисунок 3.19, 3.20) – 1015 Н.

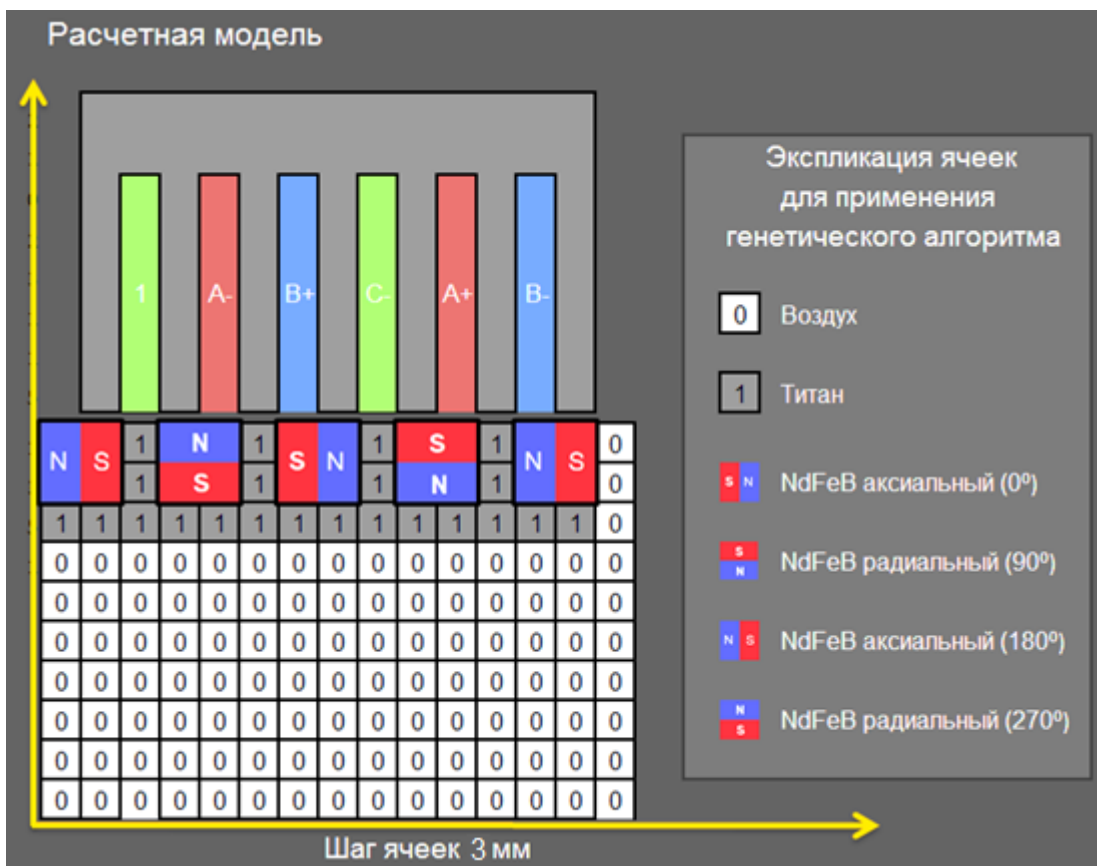


Рисунок 3.18 – Традиционная магнитная сборка Холбаха

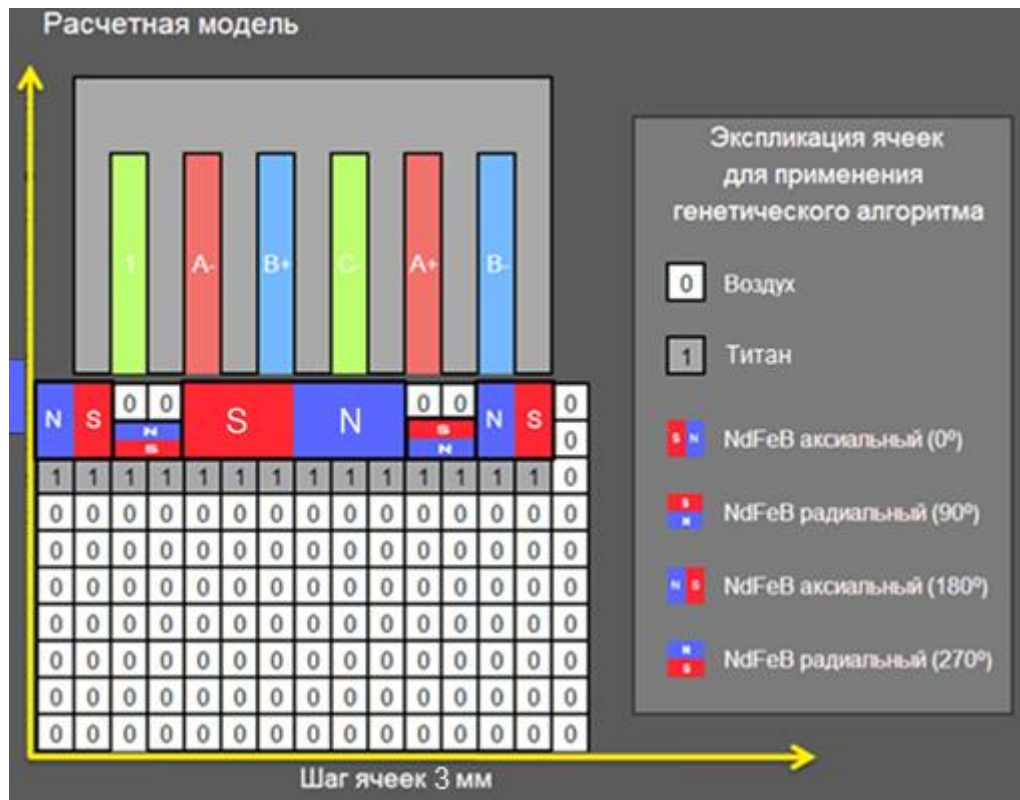


Рисунок 3.19 – Модифицированная магнитная сборка Холбаха

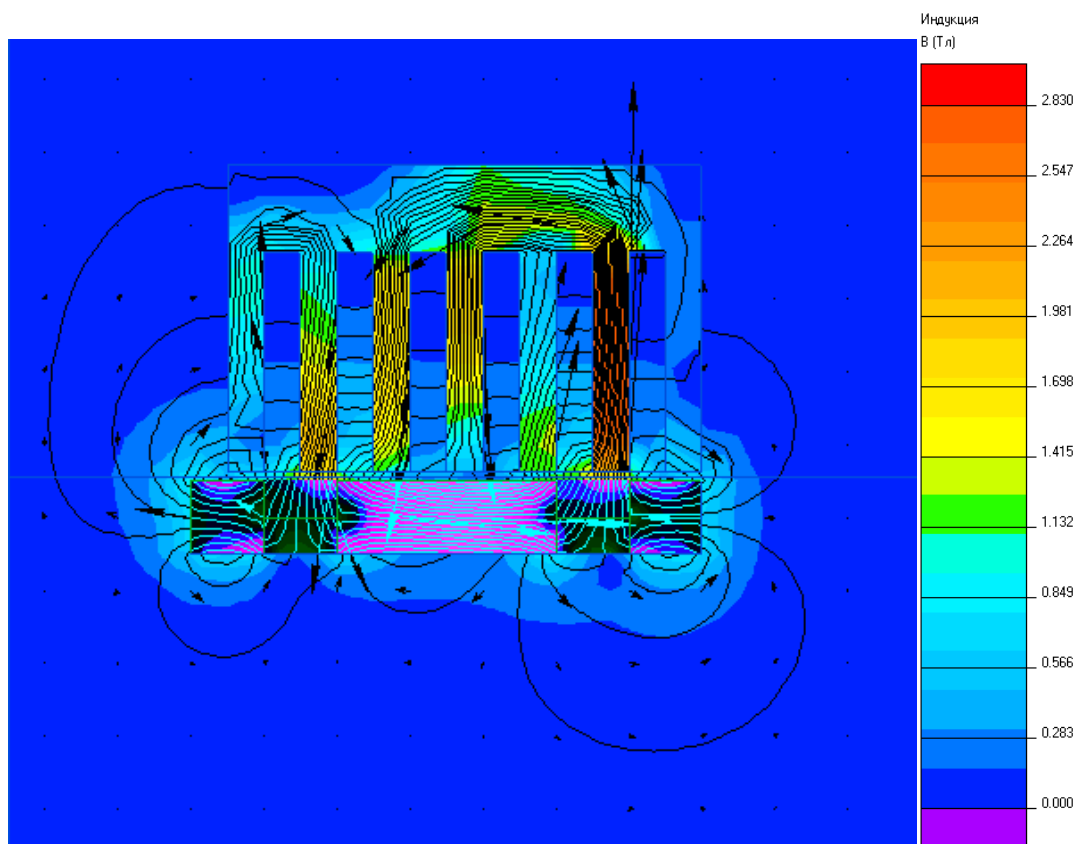


Рисунок 3.20 – Распределение магнитной индукции в модифицированной сборке Холбаха

При анализе потока от магнитной сборки Холбаха используется схема, в которой указаны направления векторов намагниченности. Каждый следующий вектор получается из предыдущего путем умножения на  $0,8j$ , где  $j = e^{j90^\circ}$ . Таким образом, за пять поворотов вектор совершает один оборот по часовой стрелке, следовательно, сборка состоит из пяти частей [66, 95, 100].

### **3.6 Моделирование и исследование работы трехфазной электрической машины возвратно-поступательного действия на выпрямительную нагрузку**

Имитационная модель трехфазной линейной ЭМВПД, представленная на рисунке 3.3, состоит из последовательной ветви собственных параметров генератора, работающей на выпрямительный мост *Universal Bridge*, подключенный к активно-индуктивной нагрузке [80, 93].

На основе разработанной имитационной модели трехфазной линейной ЭМВПД проведены расчеты зависимостей вырабатываемой электрической мощности от частоты перемещения индуктора электрической машины.

Потенциал использования разрабатываемого линейного генератора лежит в диапазоне от 3 до 16 кВт, что позволяет в перспективе найти применение данной конструкции в области малой энергетики и гибридного транспорта [82, 88, 90, 96].

Блок модели *Universal Bridge* позволяет задавать тип и характеристики полупроводниковых элементов выпрямительной схемы.

Частота широтно-импульсной модуляции (ШИМ) 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 (УВ) *Universal Bridge* в модели трехфазной линейной ЭМВПД использованы следующие блоки:

1) Блок управления линейной ЭМВПД, который реализует ШИМ на частоте 10 кГц (рисунок 3.21). В блоке производится непосредственное

преобразование трехфазной системы координат во вращающуюся систему координат  $(d, q)$  [35, 59].

Блок «ШИМ генератор» задает несущую частоту широтно-импульсной модуляции. Выходные электрические и механические параметры ЭМВПД подаются на блок «m», откуда они подаются в блок вычисления потребленной электроэнергии ЭМВПД.

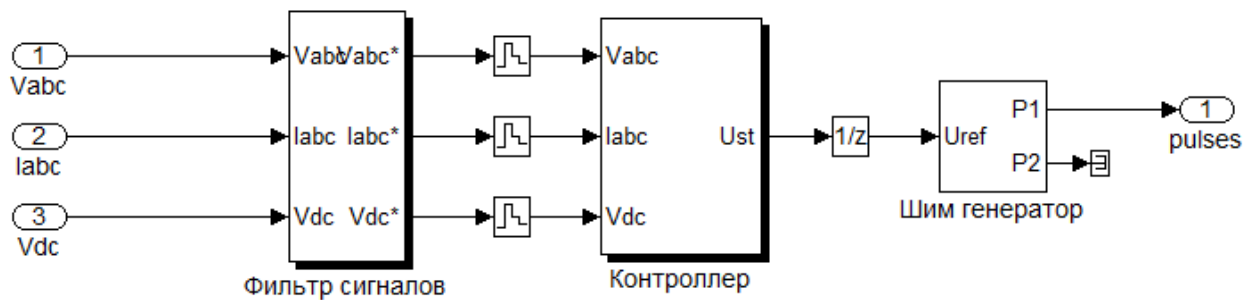


Рисунок 3.21 – Блок управления линейной ЭМВПД

2) Блок вычисления потерь в преобразователе (динамических, статических) представлен на рисунке 3.22 [2]. Блок позволяет задавать конкретные характеристики полупроводниковых элементов преобразователя, а также проверить тепловой режим работы преобразователей, с целью выбора соответствующего режима работы системы охлаждения.

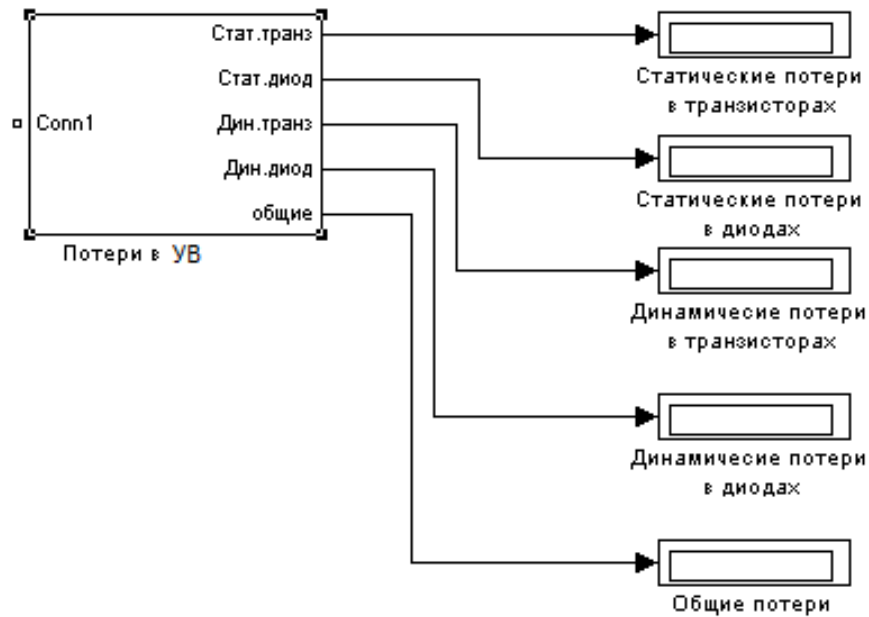


Рисунок 3.22 – Блок вычисления потерь в УВ

В блок вычисления потерь в УВ включены следующие два субблока.

В блоке расчета статических потерь определяется мгновенное значение тока в модуле *IGBT*, которое дальше пересчитывается в действующее значение (рисунок 3.23). Данное значение преобразуется в прямое падение напряжение на транзисторе в элементе «Зависимость  $V_{ce}(I_c)$ » на основе интерполяционных таблиц, которые задаются с учетом реальных характеристик *IGBT* транзистора. Далее вычисляется мощность и энергия потерь в одном модуле и во всех шести соответственно.

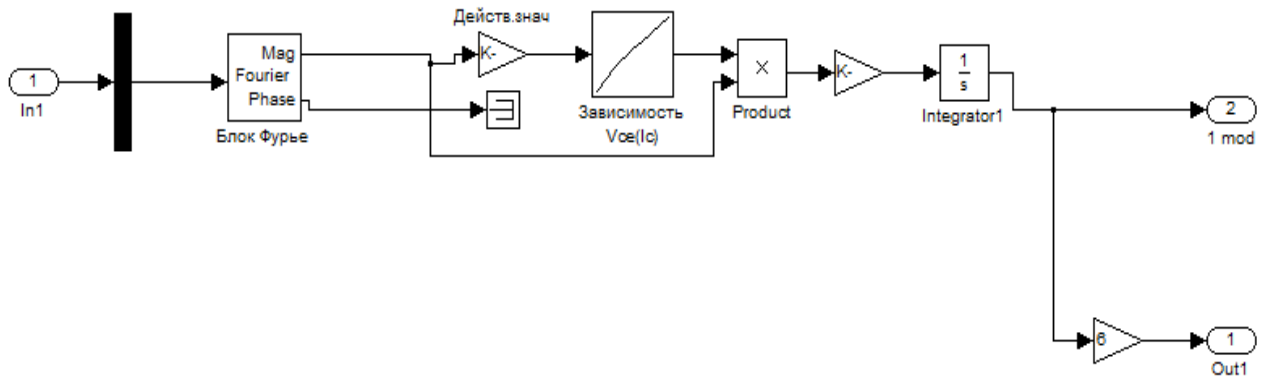


Рисунок 3.23 – Блок расчета статических потерь (потерь проводимости) в модуле *IGBT* транзистора

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 3.24). Данное значение преобразуется в Дж и умножается на несущую частоту ШИМ (в нашем случае 10 000 Гц). 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.

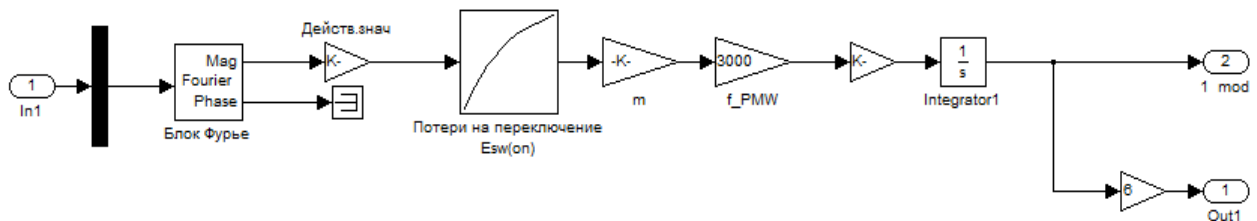


Рисунок 3.24 – Блок расчета динамических потерь (потерь на переключения) в модуле *IGBT*

3) Блок расчета генерируемой электроэнергии ЭМВПД. Данный блок рассчитывает активную и реактивную мощность и КПД преобразователя.

### 3.6.1 Результаты имитационного моделирования

Результаты моделирования представлены в табл. 3.4. Проведено моделирование на следующих частотах ШИМ генератора – 3 кГц, 5 кГц и 10 кГц при различных частотах перемещения индуктора ЭМВПД. Рассчитаны генерируемая электроэнергия, потери в УВ, КПД УВ и коэффициент мощности на выходе ЭМВПД. Как видно из табл. 3.4, выход на номинальный КПД УВ



начинается с частоты перемещения индуктора 20 Гц с последующим увеличением КПД. Потери в УВ уменьшаются с увеличением частоты перемещения индуктора.

Таким образом, рациональнее использовать частоты ШИМ генератора в области 3 – 5 кГц.

Таблица 3.4 – Результаты моделирования

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-10000 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
	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

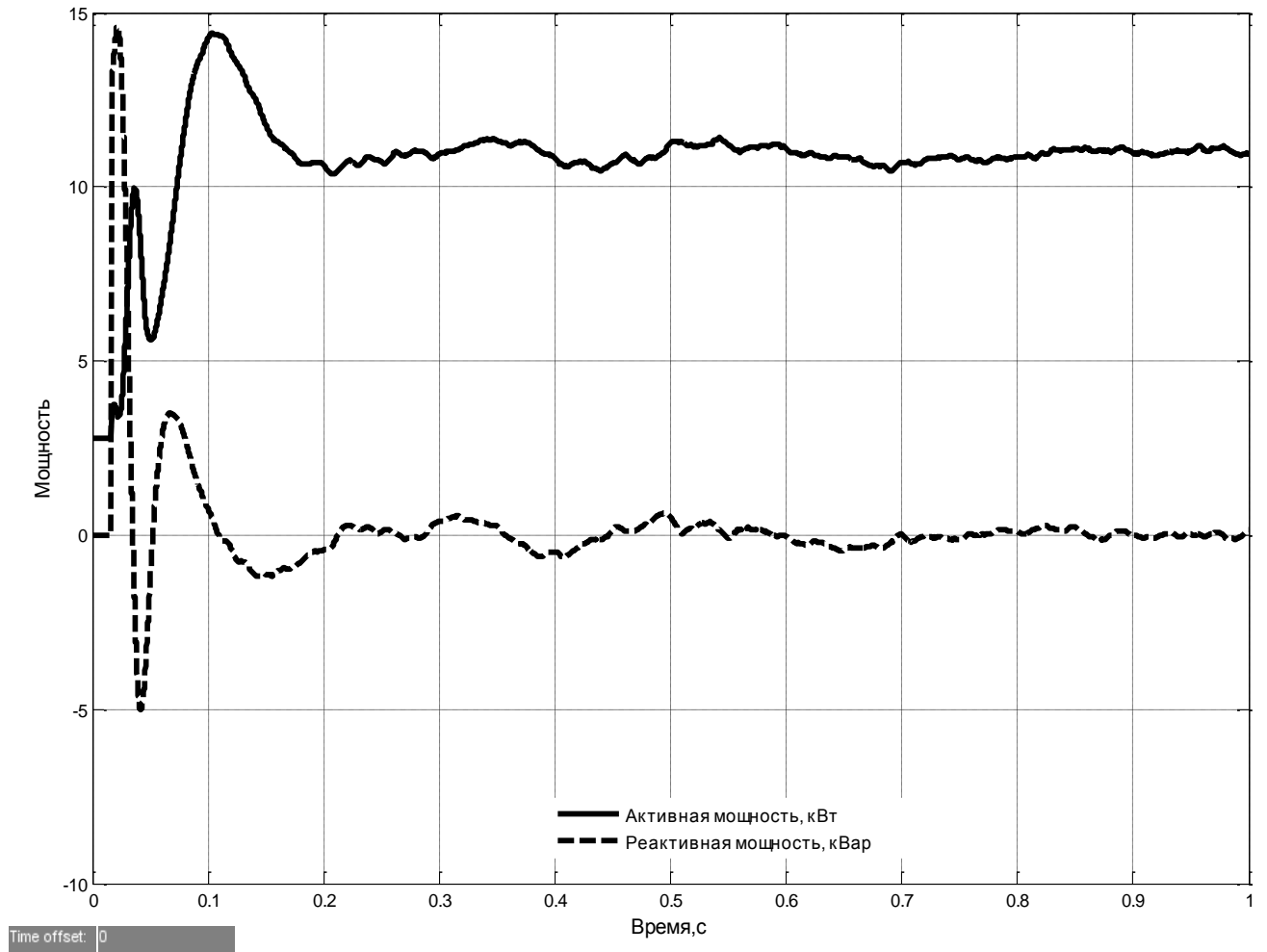


Рисунок 3.25 – Регулирование выходной мощности ЭМВПД

На рисунке 3.25 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 [80].

Система управления УВ, реализованная во вращающейся системе координат  $(d, q)$  с использованием ШИМ, обеспечивает управление ЭМВПД с возможностью поддержания коэффициента мощности в режиме генератора близким к единице, за счет регулирования реактивной мощности на выходе генератора.

Разработанная модель позволяет на стадии проектирования определить рациональные параметры УВ для ЭМВПД с последующей отладкой при изготовлении экспериментального образца.

### 3.7 Выводы

1. На основе математической модели разработана имитационная программная модель синхронной ЭМВПД с ПМ, которая позволяет на этапе проектирования учитывать конструктивные параметры электрической машины, а также усилия на вал индуктора и длину его хода.

2. Реализована концепция параллельно-последовательного моделирования (в иностранной литературе *Co-Simulation*), позволяющая производить обмен данными в процессе вычислений между программами *Matlab/Simulink*, *Ansys Maxwell* и *CatiaV5* через специально написанную оригинальную программу с целью повышения эффективности, точности моделирования и оптимизации конструктивных размеров деталей синхронных ЭМВПД с ПМ.

3. Проведены прочностные расчеты основы индуктора и крепления магнитов на индукторе для последующей разработки проектной документации. Прочностной анализ крепления магнита на индукторе электрической машины показывает, что максимальное механическое напряжение на крепления составляет 7,72 МПа, что необходимо учитывать при выборе способа монтажа магнитов на основу индуктора. Прочностной анализ основы индуктора показывает, что максимальное механическое напряжение составило 110 МПа, что позволяет использовать титан в качестве материала основы. Таким образом, масса индуктора, вычисленного в САПР *CatiaV5*, составляет 5,2 кг. С целью повышения прочности и надежности крепления магнитов предложена фиксация магнитов на индукторе с помощью бандажа из стекловолокна толщиной 1 мм. Изменения были внесены в 3D модель индуктора для дальнейших вычислений.

4. Разработаны алгоритмы и программы для оптимизации конструктивных параметров статора и индуктора электрической машины возвратно-поступательного движения. Критерием оптимизации является КПД при заданных условиях.

5. В результате конечно-элементного моделирования получены карты электромагнитной индукции в индукторе электрической машины, которые позволили рассчитать усилие, действующее на индуктор в требуемом направлении, при оптимизации его конструктивных параметров.

6. Разработан генетический алгоритм для топологической оптимизации индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия. В результате топологической оптимизации индуктора сделан вывод, что наибольшее усилие достигается, когда магниты представляют собой полученную в результате моделирования модифицированную сборку Холбаха. Оптимальная толщина магнитных колец индуктора при этом составляет 3 – 6 мм.

7. Полученные результаты в ходе имитационного моделирования ЭМВПД показывают эффективность использования различных программных комплексов с целью повышения эффективности проектирования и оптимизации конструктивных параметров.

## 4 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМВПД И ВЕРИФИКАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

### 4.1 Изготовление экспериментального образца электрической машины возвратно-поступательного действия

На основе результатов, полученных в главах 2 и 3 разработана конструкторская документация на ЭМВПД с ПМ, что позволило ученым кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» под руководством доктора технических наук профессора Ившина И.В. в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии от «20» октября 2014 г. № 14.577.21.0121, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) *RFMEFI57714X0121* изготовить экспериментальный образец электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 10 кВт для тяжелых условий эксплуатации, (рисунок 4.1) [21, 22, 29, 30, 45].

Достигнуты следующие параметры изготовленной машины:

- напряжение шины постоянного тока: 0...400 В;
- электрический ток: 0...150 А;
- перемещение индуктора: 50...120 мм;
- точность определения положения индуктора: 0,1 мм;
- скорость перемещения индуктора: 0...10 м/с.

Для испытаний изготовленного экспериментального образца ЭМВПД был изготовлен стенд (рисунок 4.2) [8, 9, 10, 11, 12, 28, 36, 37].



Рисунок 4.1 – Экспериментальный образец ЭМВПД



Рисунок 4.2 – Общий вид испытательного стенда образца ЭМВПД

Испытательный стенд для исследования работы ЭМВПД обеспечивает следующие условия испытаний:

- температура: 0...150 °С;
- усилие на индукторе 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): 2300х2150х1250 мм.

Основные технические характеристики Испытательного стенда представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики Испытательного стенда

<b>Наименование характеристики</b>	<b>Значение</b>
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

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 используется гидравлическим двигателем при испытании электрической машины в режиме электрического генератора, а также сервоприводом для получения характеристик ЭМВПД.

Испытательный стенд состоит из следующих составных частей (рисунок 4.3):

- рама;

- система контроля и управления;
- система привода и нагружения;
- система силового электропитания.

Рама с кривошипно-шатунным механизмом и системой направляющих предназначена для размещения и крепления ЭМВПД и систем стенда, обеспечения преобразования вращательного движения гидромотора в поступательное движение индуктора ЭМВПД.

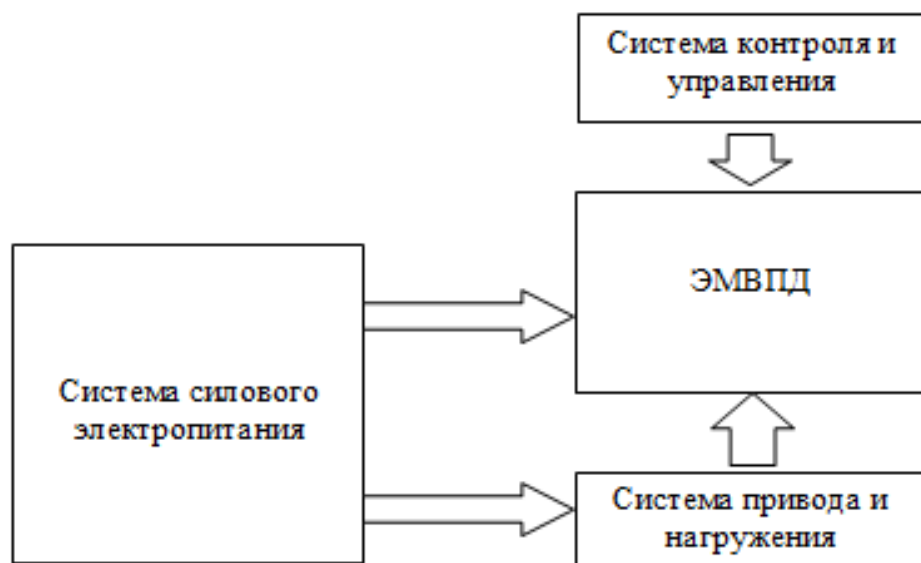


Рисунок 4.3 – Блок-схема испытательного стенда

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.

Блок нагрева осуществляет создание тяжелых условий работы ЭМВПД.

Блок нагрузки создает электрическую нагрузку для ЭМВПД, работающей в генераторном режиме.



Испытательный стенд при проведении испытаний обеспечивает параметры, представленные в таблице 4.2.

Аппаратный состав испытательного стенда представлен на рисунке 4.4.

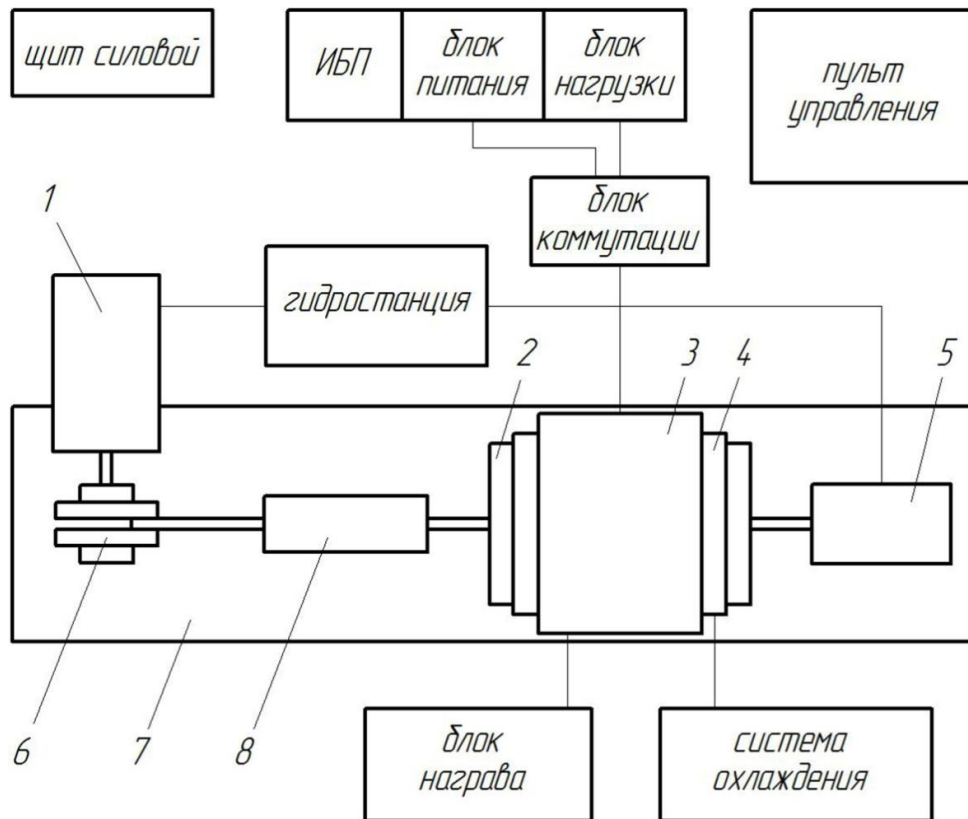


Рисунок 4.4 – Аппаратный состав испытательного стенда

1 – гидромотор; 2 – ЭМВПД; 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.

ЭМВПД 2 крепится на раме 7. С одной стороны ЭМВПД через систему направляющих 8 и кривошипно-шатунный механизм 6 соединена с гидромотором 1, с другой стороны - с гидроцилиндром 5. Сверху ЭМВПД расположены нагревательный элемент 3 и охлаждающий элемент 4. Работа охлаждающего

элемента 4 обеспечивается системой охлаждения, расположенной раме испытательного стола 7.

Таблица 4.2 – 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

Давление в гидросистемах привода гидромотора 1 и гидроцилиндра 5 нагнетается отдельно расположенной гидростанцией.

#### 4.2 КПД электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами

КПД линейной ЭМВПД в режиме генератора рассчитывается по формуле (4.1).

$$\eta = \frac{P_{эл}}{P_{мех}}, \quad (4.1)$$

где  $P_{эл}$  – выходная мощность ЭМВПД в режиме генератора, Вт,

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

Так как механическую мощность от приводного механизма не всегда можно точно измерить, ввиду линейного перемещения индуктора между двумя крайними положениями, формулу (4.1) рациональнее представить в виде (4.2).

$$\eta = \frac{P_{эл}}{P_{эл} + P_{стали} + P_{меди} + P_{доб}}, \quad (4.2)$$

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

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

$P_{доб}$  – добавочные потери, Вт.

КПД ЭМВПД 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 4.5 и 4.6 представлены КПД генератора при различных значениях хода индуктора.

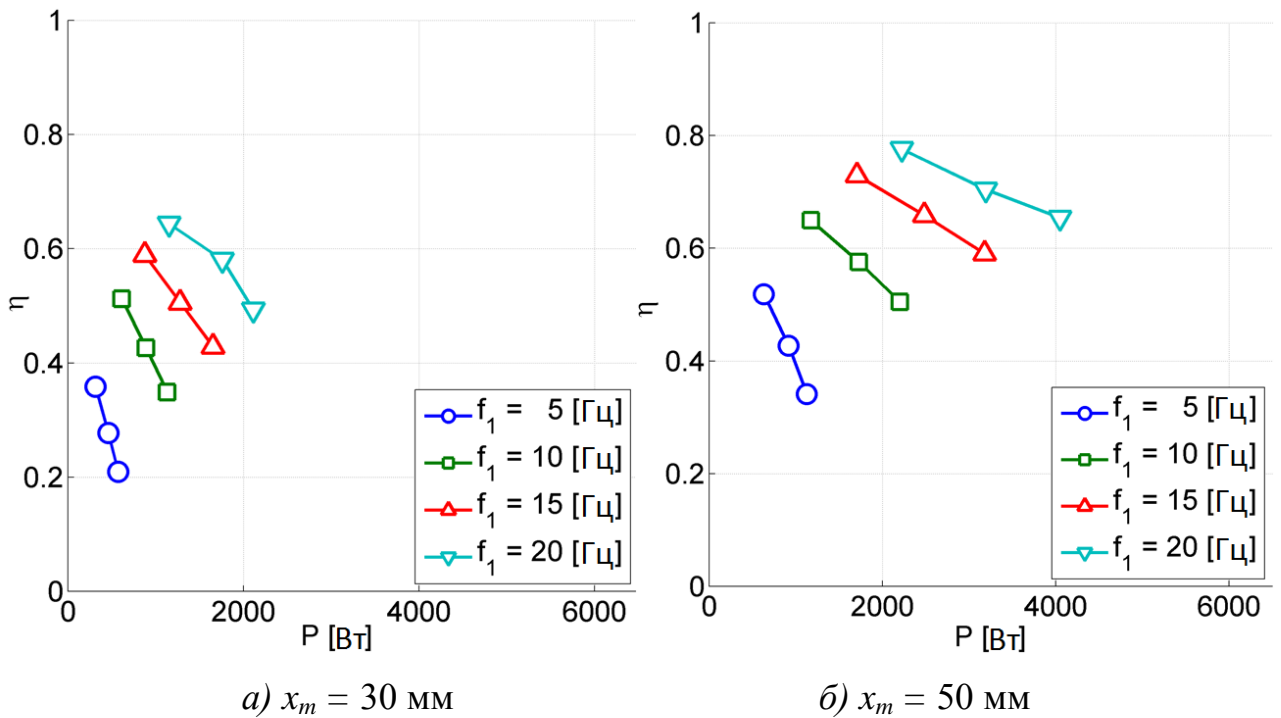


Рисунок 4.5 – КПД при ходе индуктора 30 мм и 50 мм

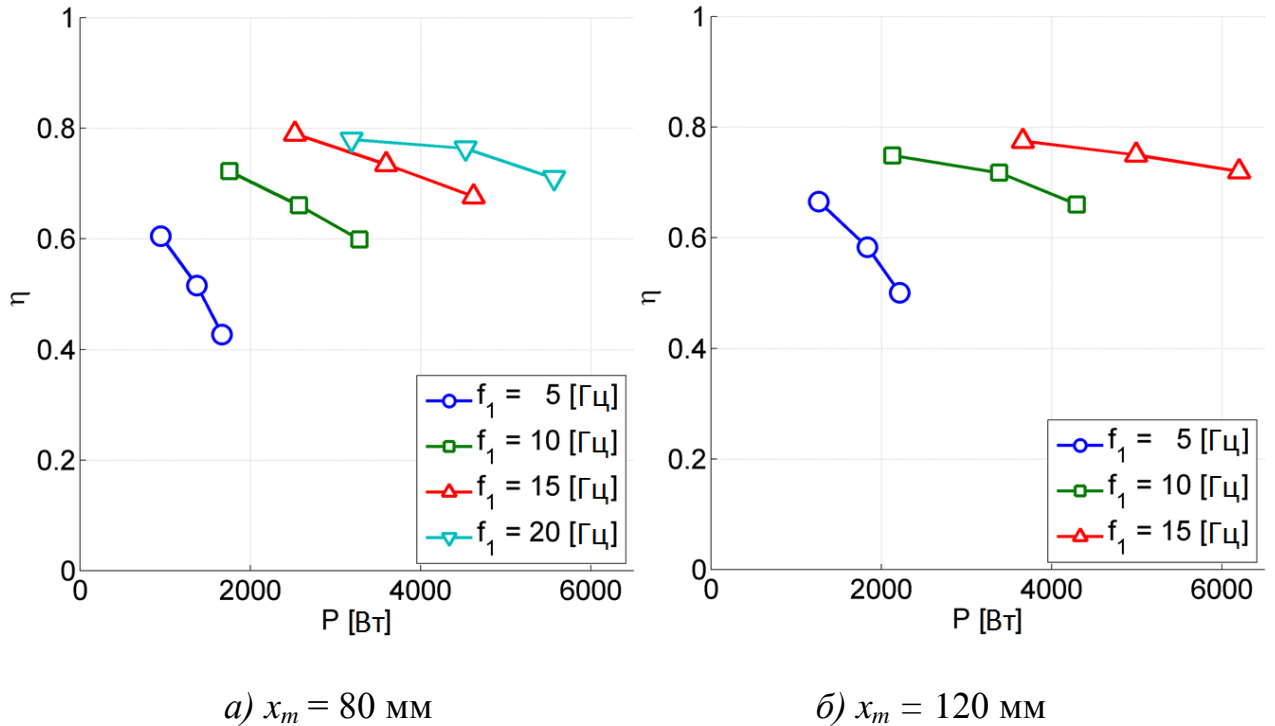


Рисунок 4.6 – КПД при ходе индуктора 80 мм и 120 мм

На рисунке 4.7 представлено сравнение КПД ЭМВПД в режиме генератора аналитически полученного на основе предложенной имитационной модели и измеренного на частотах перемещения индуктора 5 и 20 Гц.

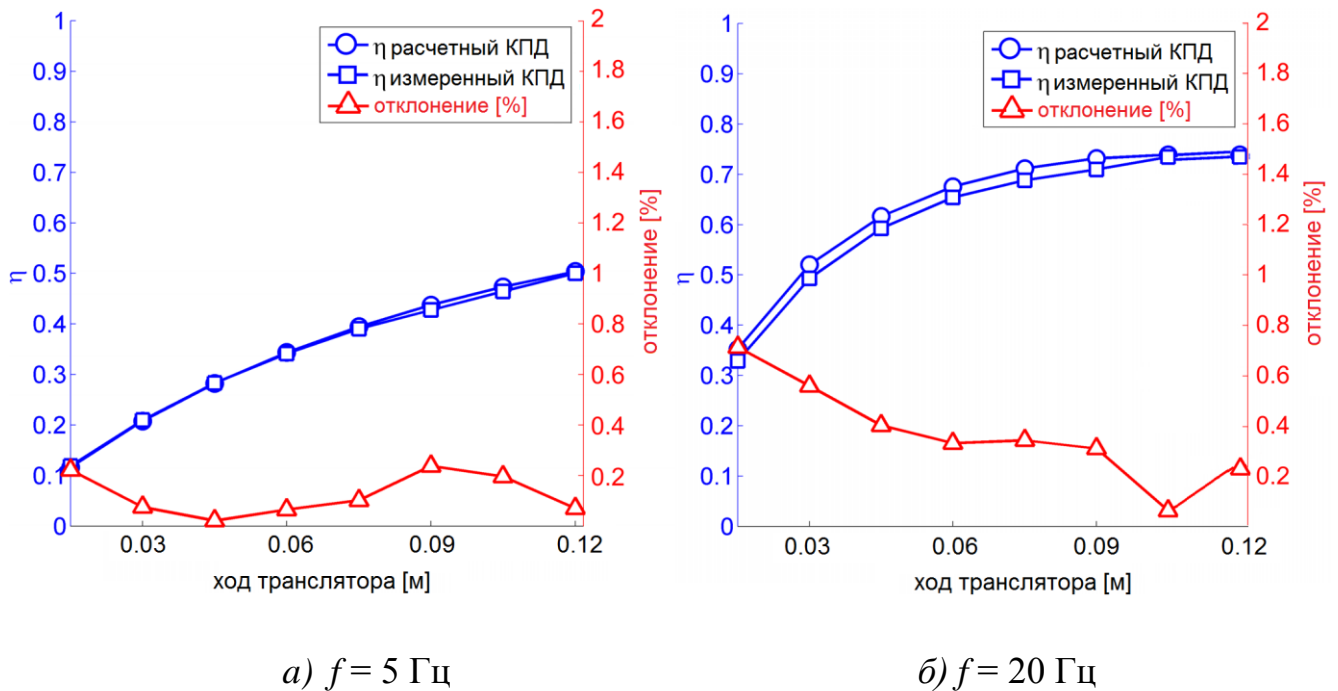


Рисунок 4.7 – Сравнение измеренного и рассчитанного КПД

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 [33].

С целью определения потенциальных возможностей ЭМВПД проведены расчеты КПД в режиме генератора на частотах перемещения индуктора до 50 Гц.

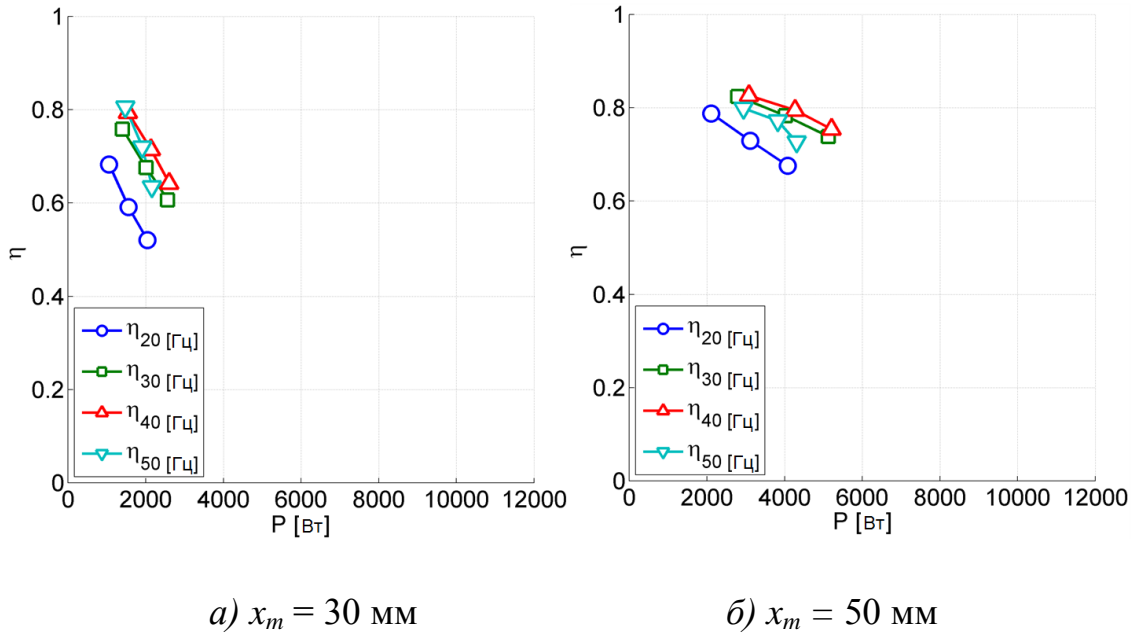


Рисунок 4.8 – КПД при ходе индуктора 30 мм и 50 мм

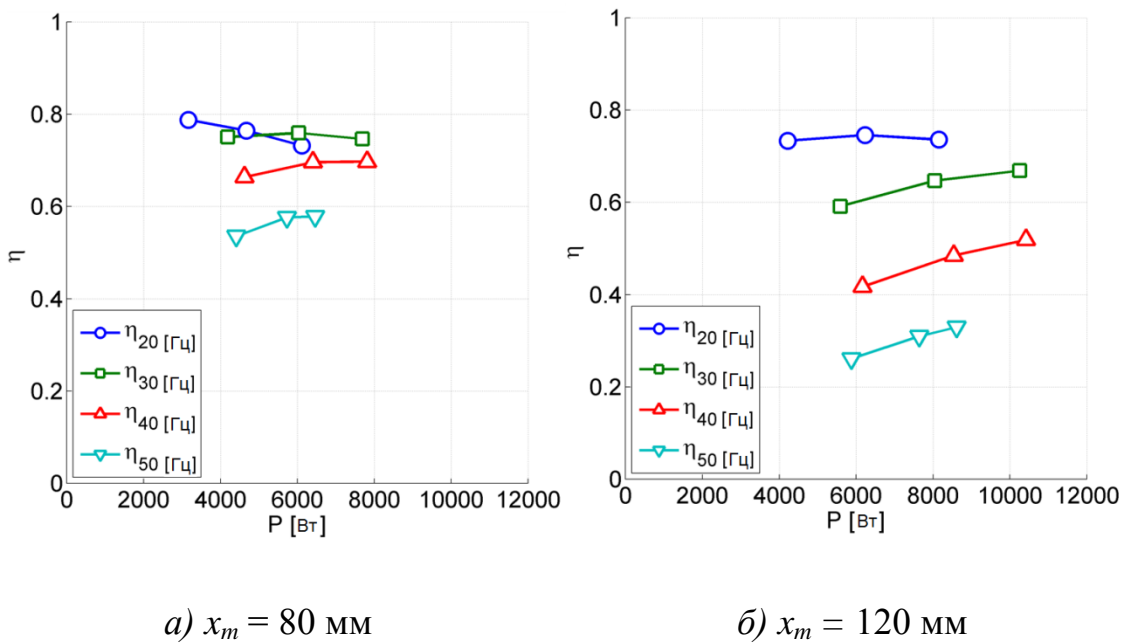


Рисунок 4.9 – КПД при ходе индуктора 80 мм и 120 мм

Как видно из рисунков 4.8 и 4.9, 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 зависит согласно формуле (4.3) увеличивается, если ход индуктора больше полюсного деления индуктора и наоборот, уменьшается, если ход индуктора меньше полюсного деления.

$$f_{f\delta} \approx \frac{2 \cdot x_m}{2 \cdot \text{полюсное деление}} \cdot f_{\text{мех}}, \quad (4.3)$$

где  $f_{f\delta}$  – частота перемагничивания в стали;

$f_{\text{мех}}$  – частота перемещения индуктора.

Для увеличения КПД в режиме генератора необходимо учесть влияния каждого компонента потерь энергии.

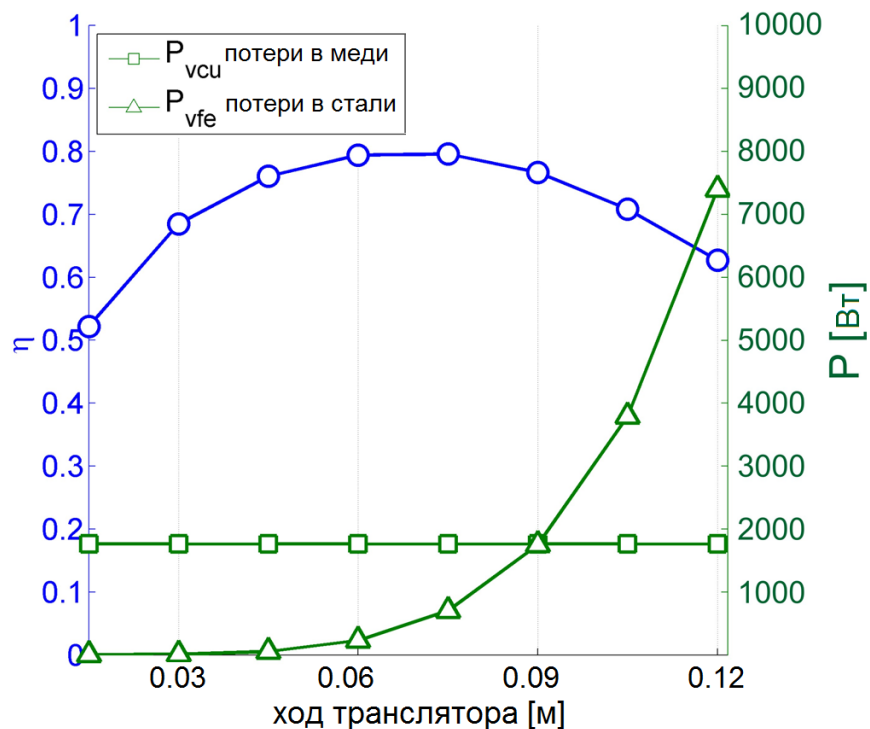


Рисунок 4.10 – Потери при частоте перемещения индуктора 40 Гц

Из рисунка 4.10 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. В то же время согласно формуле (4.3) 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 (4.4), приведет к снижению подаваемой механической энергии  $W_{\text{мех}}$ .

$$W_{\text{мех}} = F \cdot x_m, \quad (4.4)$$

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.

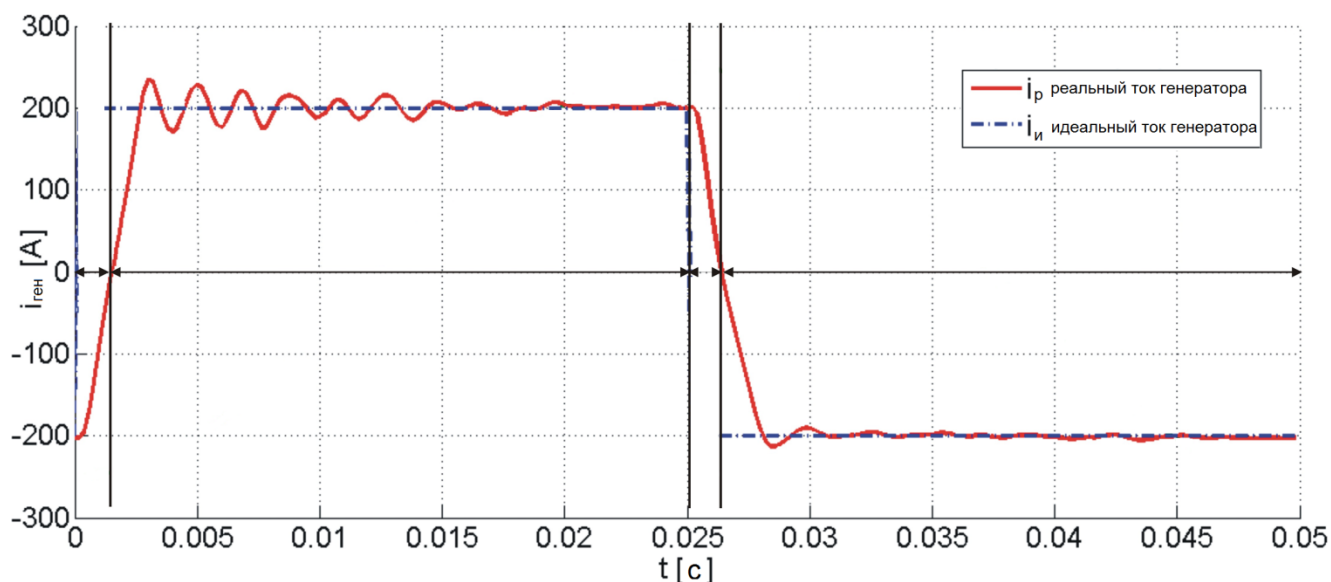


Рисунок 4.11 – Снижение КПД в режиме генератора

Дополнительным фактором снижающим КПД является наличие крайних положений, в которых происходит смена направления движения, как видно из рисунка 4.11. 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.

В связи с наличием крайних положений при перемещении индуктора, существует ограничение КПД ЭМВПД при заданных условиях: длина хода и частота перемещения индуктора. График расчётной функции зависимости максимального КПД ЭМВПД от амплитуды хода и частоты перемещения индуктора представлен на рисунке 4.12 [89].



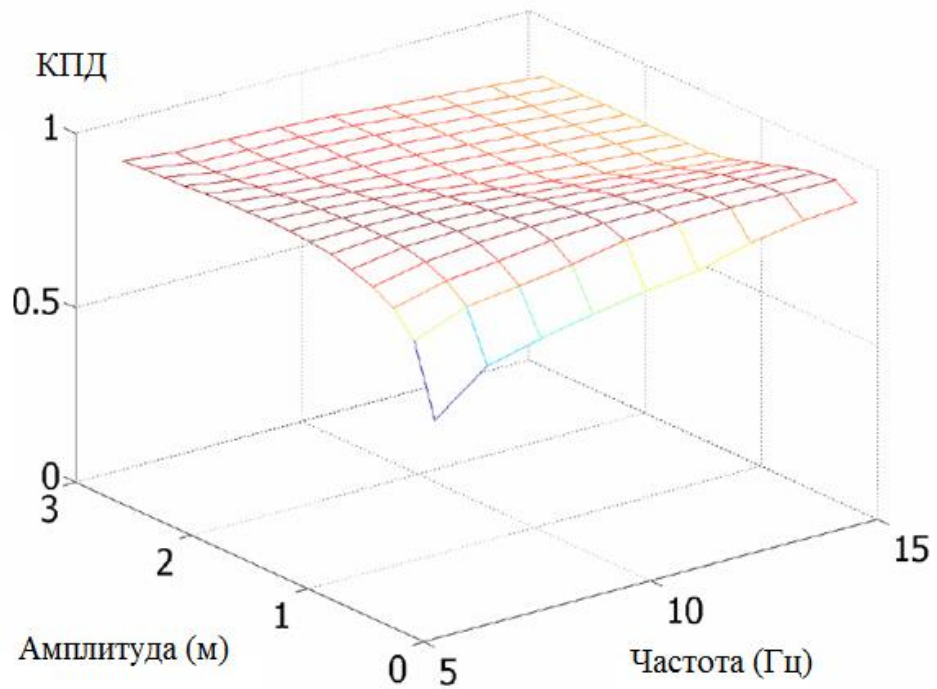


Рисунок 4.12 – Зависимости максимального КПД ЭМВПД от амплитуды хода и частоты перемещения индуктора

Таким образом, получен максимально-возможный КПД ЭМВПД при заданных условиях: длина перемещения индуктора до 120 мм, частота 5 - 20 Гц.

### 4.3 Расчет потерь в стали

Расчет потерь в статоре ЭМВПД производился в режиме генератора на холостом ходу.

На рисунке 4.13 показаны измеренные значения потерь в стали ЭМВПД.

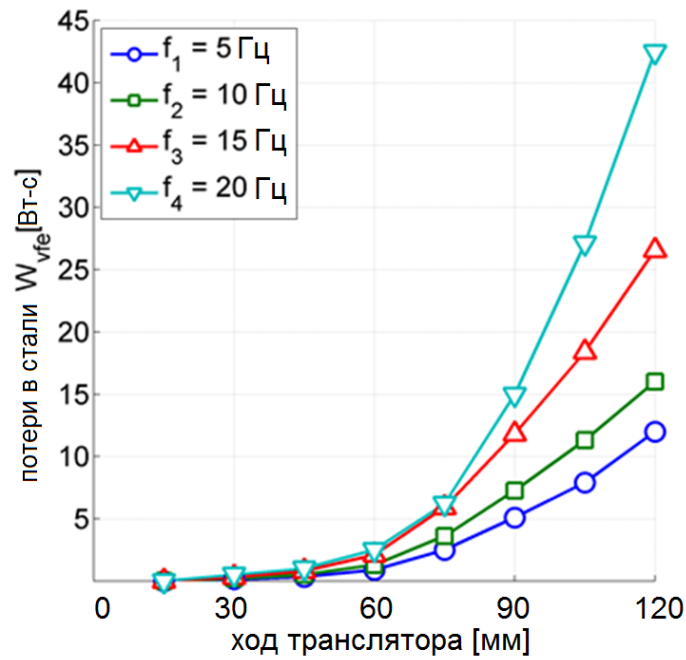


Рисунок 4.13 – Измеренные значения потерь в стали

На рисунке 4.14 представлены измеренные и аналитически рассчитанные потери в стали ЭМВПД при частоте перемещения индуктора в 15 Гц.

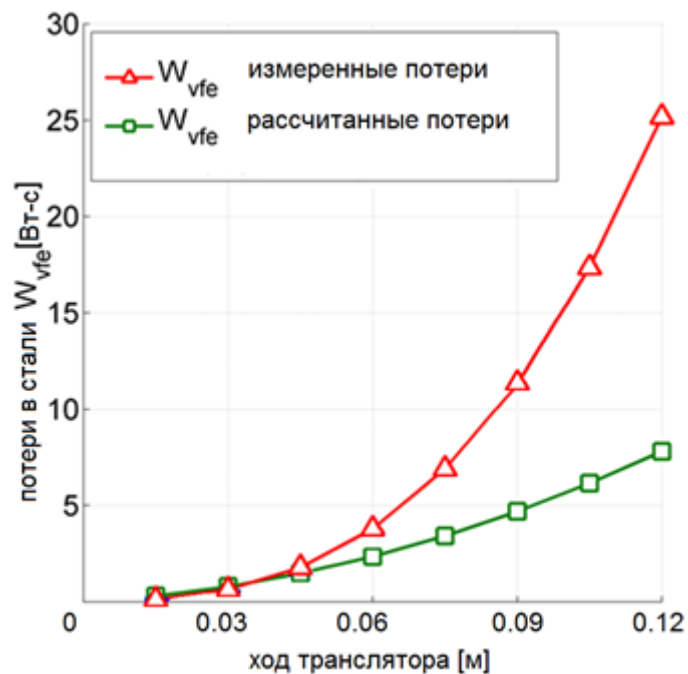


Рисунок 4.14 – Измеренные и аналитически рассчитанные значения потерь в стали

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 ЭМВПД такое возможно только при ходе индуктора 60 мм, в остальных случаях магнитное поле не проходит полный период.

#### 4.4 Индуцируемое напряжение в обмотках статора

В процессе испытаний измерялось фазное напряжение в обмотках статора. Схема измерения показана на рисунке 4.15.

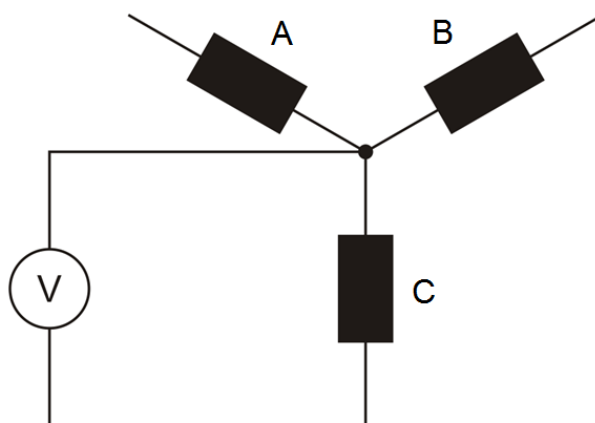


Рисунок 4.15 – Схема измерения индуцируемого напряжения

Во время измерений индуктор перемещался с постоянной частотой перемещения и наводил ЭДС на разомкнутую обмотку статора.

На рисунке 4.16 представлен график изменения напряжения от положения индуктора.

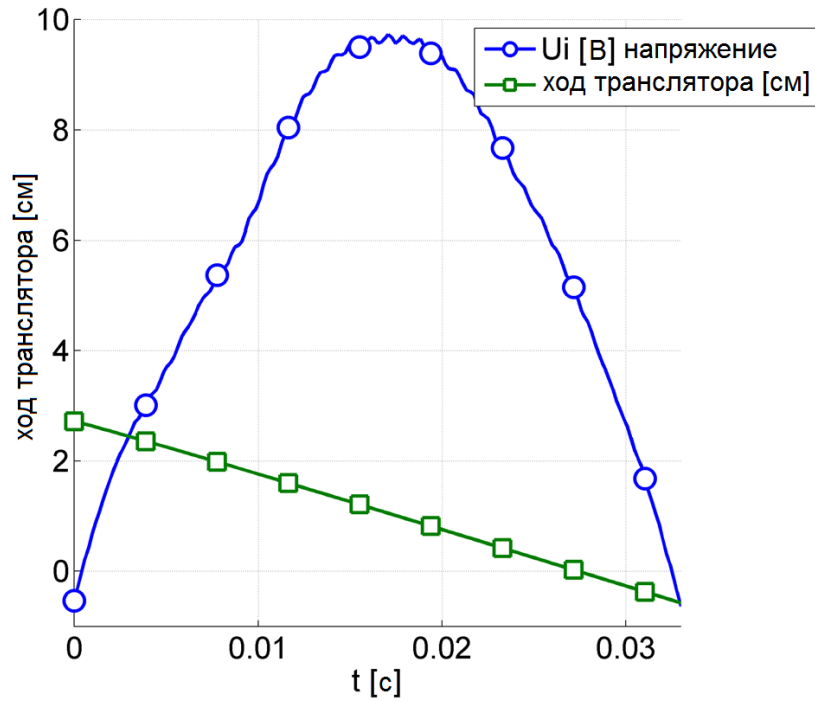


Рисунок 4.16 – Индуцируемое напряжение

По сравнению с рассчитанным 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.

#### 4.5 Оценка погрешности результатов измерений

Оценка погрешности измерительной системы проводилась вероятностно-статистическим методом, определенным ГОСТ Р 8.736-2011, предусматривающим определение погрешности по характеристикам законов распределения погрешностей средств измерений, входящих в состав системы [15].

При оценке результатов измерений был проведен анализ 50 результатов измерений амплитудных значений положения индуктора ЭМВПД на частотах вынужденных колебаний равной  $2 \pm 0,5$  Гц (рисунок 4.17).

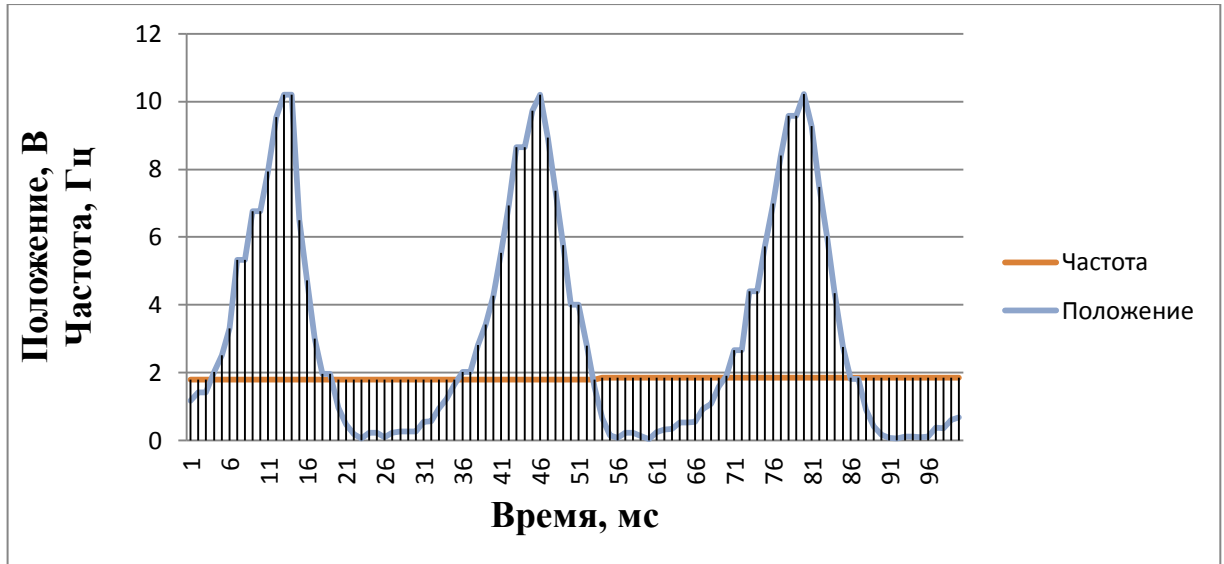


Рисунок 4.17 – График изменения положения и частоты колебаний индуктора

Для начала необходимо определить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений:

$$\tilde{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (4.4)$$

где  $\tilde{A}$  – это результат измерения (среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений);

$A_i$  –  $i$ -й результат измерения;

$n$  – число результатов наблюдений.

По результатам наблюдений  $\tilde{A} = 10,2130$  В.

Следующим шагом является оценка среднеквадратического отклонения результата измерения:

$$S(\tilde{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \tilde{A})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.5)$$

с учетом  $\tilde{A}$  получим  $S(\tilde{A}_g) = 0,0110$  В.

Результаты измерений амплитудных значений положения индуктора ЭМВПД были загружены в таблицу программы Microsoft Excel в виде ряда значений, полученных на выборке из 50 наблюдений.

Критические значения асимметрии и эксцесса сводятся в таблицы 4.3, 4.4.

Таблица 4.3 – Критические значения коэффициента асимметрии [1]

Объем выборки	Уровни значимости, $P$		Объем выборки	Уровни значимости, $P$	
	0,05	0,01		0,05	0,01
25	0,711	1,061	250	0,251	0,360
30	0,661	0,982	300	0,230	0,339
35	0,621	0,921	350	0,213	0,305
40	0,587	0,869	400	0,200	0,285
45	0,558	0,825	450	0,188	0,269
50	0,553	0,787	500	0,179	0,255
60	0,492	0,723	550	0,171	0,243
70	0,459	0,673	600	0,163	0,233
80	0,432	0,631	650	0,157	0,224
90	0,409	0,596	700	0,151	0,215
100	0,389	0,567	750	0,146	0,208
125	0,350	0,508	800	0,142	0,202
150	0,321	0,464	850	0,138	0,196
175	0,298	0,430	900	0,134	0,190
200	0,280	0,403	950	0,130	0,185
-	-	-	1000	0,127	0,180

Таблица 4.4 – Критические значения коэффициента эксцесса [1]

Объём выборки	Уровни значимости, $P$			Объём выборки	Уровни значимости, $P$		
	0,1	0,01	0,001		0,1	0,01	0,001
11	0,890	0,907	0,936	61	0,935	0,843	0,859
16	0,873	0,888	0,914	71	0,832	0,840	0,855
21	0,863	0,877	0,900	81	0,830	0,838	0,852
26	0,857	0,869	0,890	91	0,828	0,835	0,848
31	0,851	0,863	0,883	101	0,826	0,834	0,846
36	0,847	0,858	0,877	201	0,818	0,823	0,832
41	0,844	0,854	0,872	301	0,814	0,818	0,826
46	0,841	0,851	0,868	401	0,812	0,816	0,822
51	0,839	0,848	0,865	501	0,810	0,814	0,820

Доверительные границы (без учета знака) случайной погрешности результата измерения находят по формуле:

$$\varepsilon = tS(\tilde{A}), \quad (4.6)$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента, составляющий 1,960 для  $P = 0,95$  [63].

Соответственно  $\varepsilon = 0,0215$  В.

При суммировании составляющих неисключенной систематической погрешности результата измерения неисключенные систематические погрешности средств измерений каждого типа и погрешности поправок рассматривают как случайные величины.

Определим доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата измерений по формуле:

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2}, \quad (4.7)$$

где  $k$  – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью, при  $P = 0,95$   $k = 1,1$ ;

$\Theta_i$  – граница  $i$ -ой неисключенной систематической погрешности (без учета знака).

Для нашего случая справедлива формула:

$$\Theta = k \sqrt{\Theta_{дат}^2 + \Theta_{АЦП}^2}, \quad (4.8)$$

где  $\Theta_{АЦП}$  и  $\Theta_{дат}$  – границы неисключенной систематической погрешности АЦП и датчика.

Согласно инструкции по эксплуатации и спецификации модуля ввода-вывода NI 9215 погрешность (в процентах от диапазона) данного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) составляет 0,38% [60].

Диапазон входных напряжений: 10,4 В.

Граница систематической погрешности составляет:  $\Theta_{АЦП} = \pm 0,0395$  В.

Погрешность датчика *RM 200* составляет 0,3% [24] от предела шкалы, который равен 120 мм (ход индуктора).

Таким образом  $\Theta_{дат} = \pm 0,0180$  В.

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата измерений:

$$\Theta = 1,1 \sqrt{0,0180^2 + 0,0395^2} = 0,0482 \text{ В.}$$

Проверяем неравенство:

$$0,8 \leq \frac{\Theta}{S(\tilde{A})} \leq 8. \quad (4.9)$$



$$\frac{\Theta}{S(\tilde{A})} = \frac{0,0482}{0,011} = 4,389.$$

Абсолютная погрешность вычисляется по формуле:

$$\Delta = KS_{\Sigma}, \quad (4.10)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешностей;

$S_{\Sigma}$  – оценка суммарного среднего квадратичного отклонения результата измерения.

Оценку суммарного среднего квадратического отклонения результата измерения вычисляют по формуле:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Theta_i^2}{3} + S^2(\tilde{A})}. \quad (4.11)$$

Подставив известные параметры получаем:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 \frac{0,0395^2 + 0,0180^2}{3} + 0,0110^2} = 0,0276 \text{ В.}$$

Коэффициент  $K$  вычисляют по эмпирической формуле:

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta}{S(\tilde{A}) + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Theta_i^2}{3}}}. \quad (4.12)$$

Подставив известные параметры получаем:

$$K = \frac{0,0215 + 0,0482}{0,0110 + \sqrt{\sum_{i=1}^2 \frac{0,0395^2 + 0,0180^2}{3}}} = 5,999,$$

$$\Delta = 5,999 \cdot 0,0276 = 0,1656 \text{ В.}$$

С учетом полученных значений для технических параметров контрольно-измерительного оборудования  $\Delta = \pm 0,1656$  В при доверительной вероятности  $P = 0,95$  при результатах измерений  $\tilde{A} = 10,213$  В.

#### **4.6 Возможные области применения результатов**

Возможные области применения разработанной ЭМВПД: использование в качестве электромеханического преобразователя энергии в силовых установках на базе свободно-поршневых двигателей для нужд малой энергетики, в том числе и в удаленных районах Российской Федерации, выработка электричества на основе возобновляемых источников энергии, разработка силовых установок для гибридного транспорта, использование в качестве привода насоса (например, погружной нефтяной насос).

Разработанная концепция ЭМВПД может найти широкое применение:

- на объектах электроснабжения месторождений нефти и ее транспорта;
- на объектах нефтепереработки;
- на объектах электросетевого хозяйства распределительного электросетевого комплекса;
- на объектах электросетевого хозяйства железнодорожного транспорта.

Линейные электрические машины в качестве генераторов находят широкое применение в электроэнергетике в составе автономных энергетических установках со свободнопоршневыми двигателями, в волновых генераторах, а также в гибридных автомобилях.

Разработанные в результате данной диссертационной работы методы проектирования электрических машин возвратно-поступательного действия могут быть в дальнейшем использованы при разработке высокоэффективных устройств генерации электрической энергии в микроэнергетике. Так же результаты могут быть использованы в научно-образовательном процессе в средних образовательных учреждениях с математическим и техническим уклоном, в

профильных ВУЗах, а так же при создании электронных научных библиотек и электронных научных фондов.

#### 4.7 Выводы

1. На основе разработанных алгоритмов и программ разработана конструкторская документация на синхронную ЭМВПД с ПМ с повышенным КПД.

2. Для физического моделирования синхронной ЭМВПД с ПМ был изготовлен экспериментальный образец, а также стенд для его испытаний, что позволило верифицировать разработанную имитационную модель ЭМВПД. При этом отклонение расчетных и экспериментальных данных составило не более 0,8 %.

3. С целью определения потенциальных возможностей синхронной ЭМВПД с ПМ проведены расчеты КПД в режиме генератора на частотах перемещения индуктора до 50 Гц. Выявлено, что КПД ЭМВПД 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.

4. Проведена оценка погрешности результатов измерений. Инструментальная погрешность составляет 1,6%.

5. Для увеличения КПД в режиме генератора необходимо учесть влияния каждого компонента потерь энергии. При ходе индуктора до 60 мм преобладают потери в обмотках статора (меди), при превышении хода индуктора значения 60 мм потери в стали резко увеличиваются.

6. Предложен комплекс мероприятий по сокращению потерь в стали статора и повышению КПД ЭМВПД.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ основных направлений создания электромеханических линейных преобразователей на основе ЭМВПД показал, что наиболее перспективной является следующая концепция: ЭМВПД с обмоткой на статоре и постоянными магнитами на цилиндрическом полем трансляторе.

2. Разработана имитационная модель синхронной ЭМВПД с ПМ, которая позволяет на этапе проектирования учитывать конструктивные параметры электрической машины, а также усилия на вал индуктора и длину его хода.

3. Создана программа для реализации параллельно-последовательных алгоритмов моделирования электрической машины возвратно-поступательного действия. Данная концепция дает возможность в процессе моделирования производить обмен данными между различными программами с целью повышения эффективности, точности моделирования и оптимизации конструктивных размеров деталей синхронной ЭМВПД с ПМ.

4. Проведены прочностные расчеты основы индуктора и крепления магнитов на индукторе. Прочностной анализ крепления магнита на индукторе электрической машины показывает, что максимальное механическое напряжение на крепления составляет 7,72 МПа, что необходимо учитывать при выборе способа монтажа магнитов на основу индуктора. Прочностной анализ основы индуктора показывает, что максимальное механическое напряжение составило 110 МПа, что позволяет использовать титан в качестве материала основы. Таким образом, масса индуктора, вычисленного в САПР CatiaV5, составляет 5,2 кг. С целью повышения прочности и надежности крепления магнитов предложена фиксация магнитов на индукторе с помощью бандажа из стекловолокна толщиной 1 мм. Изменения внесены в 3D модель индуктора для дальнейших вычислений.

5. Разработаны алгоритмы и программы для совершенствования конструкции статора, индуктора, элементов магнитной цепи синхронной ЭМВПД с ПМ, что позволяет повысить её КПД.

6. Разработан генетический алгоритм для топологической оптимизации индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ, который позволил получить максимальную электромагнитную силу при заданных условиях. 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. 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 модифицированной сборке Холбаха горизонтальная электромагнитная сила, действующая на интегральный контур индуктора составляет 1015 Н.

7. На основе разработанных алгоритмов и программ разработана конструкторская документация на синхронную ЭМВПД с ПМ с повышенным КПД.

8. Для физического моделирования синхронной ЭМВПД с ПМ был изготовлен экспериментальный образец, а также стенд для его испытаний, что позволило верифицировать разработанную имитационную модель ЭМВПД. При этом отклонение расчетных и экспериментальных данных составило не более 0,8 %.

9. Потенциал использования разработанной синхронной ЭМВПД с ПМ лежит в диапазоне от 3 до 16 кВт, что позволяет в перспективе найти применение данной конструкции в области энергетики и гибридного транспорта.

**ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ**

ДВС	– двигатель внутреннего сгорания
ИМ	– индукторные машины
КПД	– коэффициент полезного действия
МКЭ	– метод конечных элементов
НИР	– научно-исследовательская работа
ПМ	– постоянный магнит
САПР	– система автоматизированного проектирования
ПМ	– постоянный магнит
ПЭ	– подвижный элемент
СГВПД	– синхронный генератор возвратно-поступательного движения
СПЛГ	– свободно-поршневый линейный генератор
УВ	– управляемый выпрямитель
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина
ЭДС	– электродвижущая сила
ЭМВПД	– электрическая машина возвратно-поступательного действия
<i>FPE</i>	– свободно-поршневый двигатель ( <i>англ. Free-Piston Engine</i> )

## СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. 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. – Vol. 792. – С. 134 – 142.

A2. Kopylov, A. M. Selection And Justification Of Design Parameters For Reversible Reciprocating Electric Machine / I. V. Ivshin, A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, A. M. Kopylov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 12. – С. 427 – 440.

A3. Копылов, А. М. Определение предельных эффективных конструктивных параметров и технических характеристик обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия / А. М. Копылов, И. В. Ившин, А. Р. Сафин, Р. Р. Гибадуллин, Р. Ш. Мисбахов // Энергетика Татарстана. – 2015. – № 4. – С. 75 – 81.

A4. Копылов, А. М. Разработка электрической машины возвратно-поступательного действия модульного типа / А. М. Копылов, А. Р. Сафин, Р. Р. Гибадуллин, Л. В. Долманюк, А. Н. Цветков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 9. – С. 102 – 108.

A5. Копылов, А. М. 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 – 17.

A6. Копылов, А. М. 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 – 40.

А7. Свидетельство № 2015615063 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров статора и транслятора 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.

А8. 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.

А9. Свидетельство № 2016611030 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров пазов 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. Максимов. – № 2016611030; заявл. 08.12.2015; опубл. 25.01.2016.

А10. Свидетельство № 2016663776 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров транслятора электрической машины возвратно-поступательного движения. / А. М. Копылов, А. Р. Сафин, И. В. Ившин, Р. Р. Гибадуллин. – № 2016663776; заявл. 25.08.2016; опубл. 20.11.2016.

А11. 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.

А12. Копылов, А. М. Обзор и анализ существующих математических моделей обратимых электрических машин возвратно-поступательного действия / А. М. Копылов, А. Р. Сафин, Р. Р. Гибадуллин // X Международная молодежная научная конференция «Научному прогрессу – творчество молодых». – В 3 ч. Ч. 2. – Йошкар-Ола, 2015. – С. 254 – 256.



A13. Копылов, А. М. Разработка обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия / И. В. Ившин, А. М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин // XV Международный симпозиум «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». – Казань, 2015. – С. 102 – 105.

A14. Копылов, А. М. 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 // Научно-техническая конференция по итогам совместного конкурса фундаментальных исследований РФФИ – РТ. – Казань, 2017. – С. 287 – 292.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Акимов, С. С. Использование коэффициентов асимметрии и эксцесса при гистограммном методе определения закона распределения вероятности / С. С. Акимов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2014. – № 1. – С. 225.
2. 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.
3. 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.
4. Бабилова, Н. Л. Генератор возвратно-поступательного движения в автономной системе электроснабжения маломощных потребителей: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Бабилова Наталья Львовна. – Уфа, 2009. – 122 с.
5. 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.
6. 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.
7. Высоцкий, В. Е. Линейный генератор с постоянными магнитами для систем электропитания автономных объектов / В. Е. Высоцкий // Известия вузов. Электромеханика. – 2010. – № 1. – С. 80.
8. 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.

9. 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.

10. 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. Долomanюк // Материалы I поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». – Казань, 2015. – С. 553.

11. 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. Долomanюк // Энергетика Татарстана. Развитие энергетики. – 2016. – № 1. – С. 22.

12. Гибадуллин, Р. Р. Стенд для испытания обратимых электрических машин для возвратно-поступательного действия / Р. Р. Гибадуллин, А. Н. Цветков, А. М. Копылов, Л. В. Долomanюк // Материалы I поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». – Казань, 2015. – С. 109.

13. ГОСТ 16264.2-85 Двигатели синхронные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1986.

14. ГОСТ 9630-80 Двигатели трехфазные асинхронные напряжением свыше 1000 В. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1987.

15. ГОСТ Р 8.736–2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2013.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. Дьяконов, В. П. MATLAB. Полный самоучитель: учебное пособие / В. П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.

21. 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.

22. Ившин, И. В. Разработка экспериментального образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия для тяжелых условий эксплуатации / И. В. Ившин, А. Р. Сафин, 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.

23. 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.

24. Индуктивные датчики линейных перемещений/положения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.eddylab.ru/eddylab-ru/products/induktivesensoren/pdf/inductive\\_transducer\\_rm\\_rus.pdf](http://www.eddylab.ru/eddylab-ru/products/induktivesensoren/pdf/inductive_transducer_rm_rus.pdf).

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. Копылов, А. М. Перспективы применения линейного двигателя-генератора для повышения энерго-эффективности 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).

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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. 100.

34. Новый линейный генератор позволит существенно увеличить дальность движения гибридных автомобилей [Электронный ресурс]. –Dailytechinfo, 2017. – Режим доступа: <http://www.dailytechinfo.org/auto/4876-novyy-lineynyy-generator-pozvolit-suschestvenno-velichit-dalnost-dvizheniya-gibridnyh-avtomobiley.html>.

35. 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.

36. 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. Долманюк, А. Н. Цветков, М. Ф. Низамиев. // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2016. – № 4. – 2 с.

37. 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. Долманюк, А. Н. Цветков, М. Ф. Низамиев. // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2016. – № 12. – 2 с.

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. Сафин, А. Р. Выбор и оптимизация конструктивных параметров обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, Е. И. Грачева, А. Н. Цветков, А. М. Копылов // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2014. – Т. 1. – № 8. – С. 21.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

46. Свидетельство № 2015615063 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров статора и транслятора 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.

47. Свидетельство № 2016611030 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров пазов 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. Максимов. – № 2016611030; заявл. 08.12.2015; опубл. 25.01.2016.

48. 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.

49. Свидетельство № 2016661811 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. – № 2016619117; заявл. 25.08.2016; опубл. 20.11.2016.

50. Свидетельство № 2016663776 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров транслятора электрической машины возвратно-поступательного движения / А. М. Копылов, А. Р. Сафин, И. В. Ившин, Р. Р. Гибадуллин. – № 2016663776; заявл. 25.08.2016; опубл. 20.11.2016.

51. 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.

52. 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.

53. 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.

54. Сергеенкова, Е. В. Синхронная электрическая машина возвратно-поступательного движения (генератор): дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Сергеенкова Елизавета Васильевна. – М., 2011. – 118 с.

55. 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.

56. Тамоян, Г. С. 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.

57. 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.

58. 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.

59. 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)

60. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения: учебное пособие / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. – СПб.: КОРОНА принт, 2008. – 358 с.

61. Хромов, Е. В. Линейный электропривод вибромашин / Е. В. Хромов, Ф. А. Мамедов // Сельский механизатор. – 2010. – № 10. – С. 28.

62. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink: учебное пособие / И. В. Черных – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

63. Штаргот, Д. Рекомендации по применению высокопроизводительных многоканальных АЦП с одновременной выборкой в системах сбора данных / Д. Штаргот // Компоненты и технологии. – 2009. – № 95. – С. 44.

64. 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.

65. ANSYS Maxwell 3D 15.1 User's Manual revision 6.0. – Procedures, Swanson Analysis Systems, Inc., 2010. – Vol. 1. – 1 optical disk (CD-ROM).
66. 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.
67. 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.
68. Boucher, J. Optimization of a dual free piston Stirling engine / J. Boucher, F. Lanzetta, P. Nika // Applied Thermal Engineering. – 2007. – № 27. – P. 802.
69. 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.
70. Filippo, M. Design optimization and control strategies for PM Multiphase Tubular Linear Actuators / M. Filippo // PhD Thesis, University of Bologna. – 2009.
71. Frank, R. The linear generator as integral component of an energy converter for electric vehicles / R. Frank // European All-Wheel Drive Congress Graz. – 2011.
72. 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.
73. 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.
74. Halbach, K. Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings / K. Halbach // Journal of Applied Physics. – 2008. – № 57. – P. 3605.
75. 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.

76. 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.

77. Ivshin, I. V. Numerical Modeling of Dynamic Processes of the reciprocating reversible Electrical Machine / I. V. Ivshin, A. R. Safin, A. M. Kopylov // *Applied Mechanics and Materials: Trans Tech Publications, Switzerland*. – 2015. – № 792. – P. 134.

78. 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.

79. 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.

80. 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.

81. 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).

82. 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.

83. 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.

84. 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).
85. Nassar, S. Linear electric actuators and generators / S. Nassar, I. Boldea // PhD Thesis, Cambridge University, Cambridge. – 1997.
86. 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.
87. 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. Gruosso, R. E. Zich // International Conference «POWERENG 2009». – 2009. – P. 78.
88. 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.
89. Polinder, H. Linear generator systems for wave energy conversion / H. Polinder, M. A. Mueller, M. Scuotto, M. Goden // Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference. – Porto, Portugal, 2007.
90. 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.
91. 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.
92. Ruddy, B. P. High Force Density Linear Permanent Magnet Motors: «Electromagnetic Muscle Actuators» / B. P. Ruddy // PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology. – 2012.
93. 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.

94. 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.

95. 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.

96. 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.

97. Sintered isotropic Nd-Fe-B magnet specification [Online]. – Applied Magnetic Materials (AMM), 2017. – Available: <http://www.appliedmagnet.com/catalog.0.html4.0.html>.

98. Sintered neodymium iron boron (sintered Nd-Fe-B) [Online]. – MMG MagDev. – 2008. – Available: <http://www.magdev.co.uk/permanent-magnets>.

99. 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.

100. 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.

101. Xiao, J. Motion characteristic of a free piston linear engine / J. Xiao, L. Qingfeng, Z. Huang // Applied Energy. – 2010. – № 87. – P. 1288.

102. 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.

103. 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.

## 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

<b>Наименование переменной</b>	<b>Обозначение в <i>Visual Basic for Applications</i></b>	<b>Значение по умолчанию</b>
$U_{mN}$ – 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
$H_c$ – коэрцитивная 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	$16,3 \cdot 10^{-7}$

$k_p$ – 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).

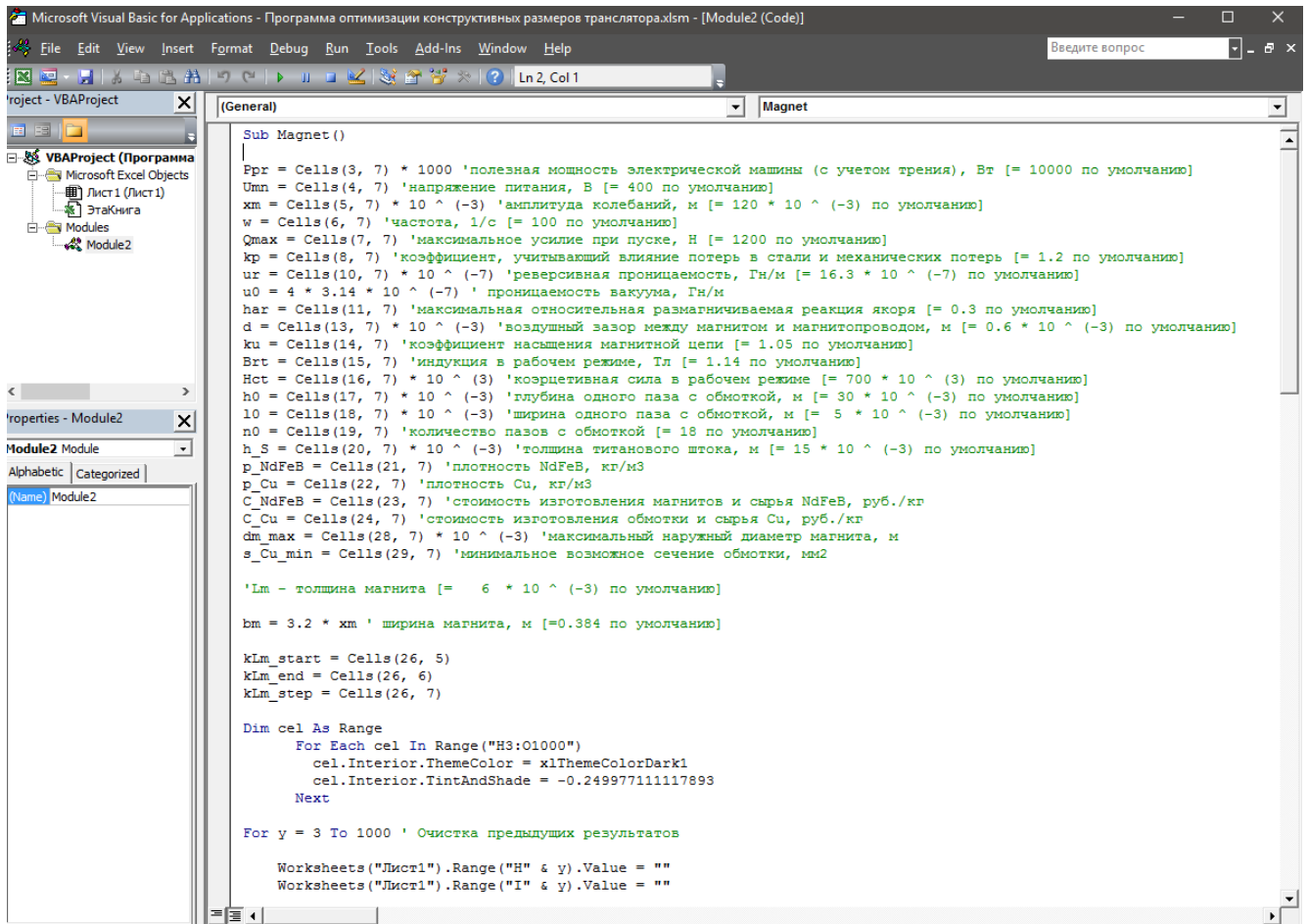


Рисунок А.1 – Окно ввода данных Visual Basic for Applications

## 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).

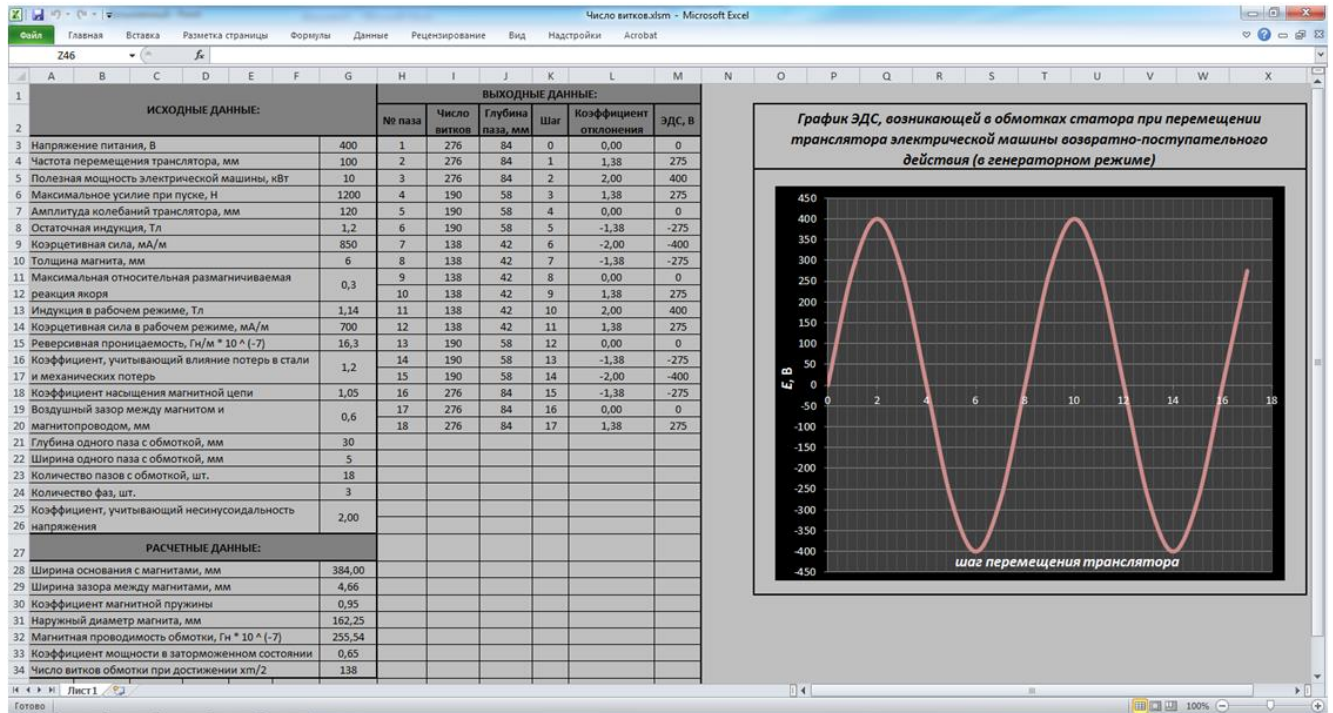


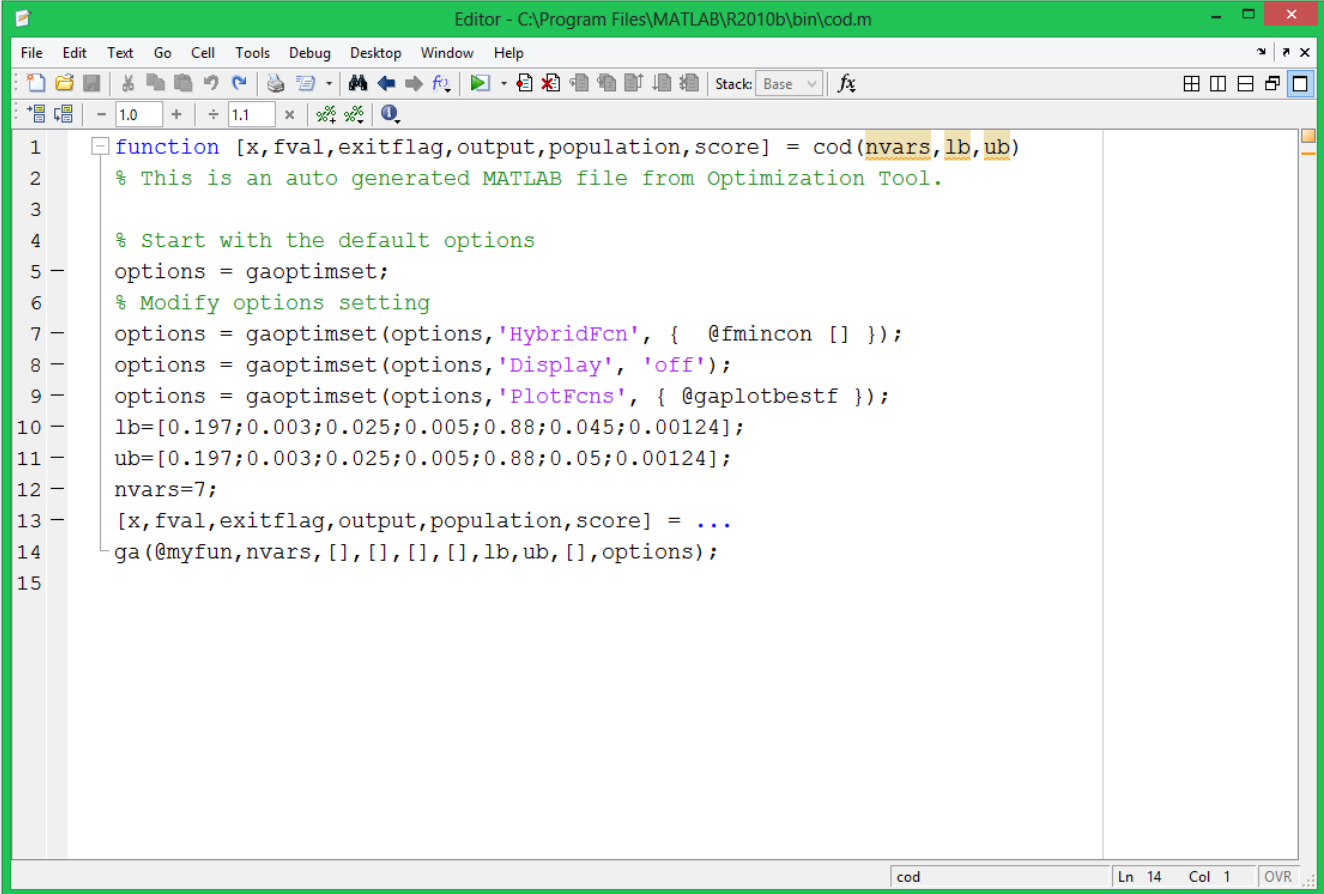
Рисунок А.2 – Окно визуализации вычислений Программы 1

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).



```

Editor - C:\Program Files\MATLAB\R2010b\bin\cod.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
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
cod Ln 14 Col 1 OVR

```

Рисунок А.3 – Окно вывода 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:							
ВВЕДИТЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И НАЖМИТЕ, ЧТОБЫ ПЕРЕСЧИТАТЬ			Толщина магнита, мм	Ширина зазора между магнитами, мм	Коэффициент магнитной пружины	Наружный диаметр магнита, мм	Число и сечение витков в одной обмотке	Масса меди, кг	Масса NdFeB, кг	Условная стоимость, руб.
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	94323,61
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>4</sup> (-7)	16,3								
11	Максимальная относительная размагничиваемая реакция якоря	0,3								
13	Воздушный зазор между магнитом и	0,6								
14	Коэффициент насыщения магнитной цепи	1,05								
15	Индукция в рабочем режиме, Тл	1,14								
16	Коррелятивная сила в рабочем режиме, мА/м	700								
17	Глубина одного паза с обмоткой, мм	30								
18	Ширина одного паза с обмоткой, мм	5								
19	Количество пазов с обмоткой	18								
20	Толщина титанового штока, мм	15								
21	Плотность NdFeB, кг/м3	7350								
22	Плотность Cu, кг/м3	8920								
23	Стоимость изготовления магнитов и сырья NdFeB,	2200								
24	Стоимость изготовления обмотки и сырья Cu, руб./кг	3000								
25	Диапазон анализируемых толщин магнитов, мм	ОТ	ДО	ШАГ						
26		1	50	1						
27	ОГРАНИЧЕНИЯ									
28	Максимальный наружный диаметр магнита, мм					205				
29	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).

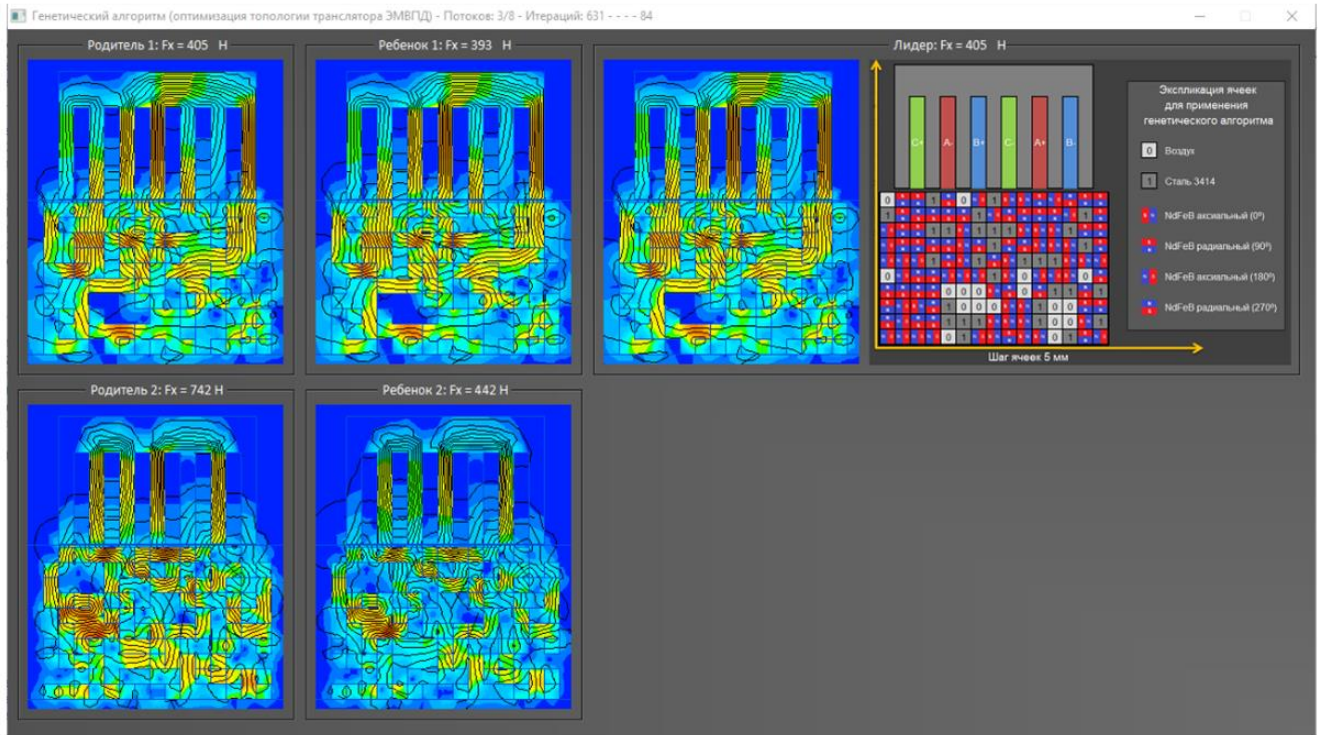


Рисунок А.5 – Окно визуализации вычислений Программы 4



## 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. Ивлиев*

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. Ивлиев



## 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. Ивлиев

## 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* Г.П. Ивлиев

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акт изготовления экспериментального образца обратимой электрической машины  
возвратно-поступательного действия

СОГЛАСОВАНО

Ректор

ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Ю. Ходулязов

«22» апреля 2016 г.



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ЗАО «МПОТК

«ТЕХНОКОМПЛЕКТ»

акционерное

общество

г. Дубна Московской области

«ТЕХНОКОМПЛЕКТ»

профессиональное

производственное

техническое

комплектующее

Российская Федерация

2016 г.

Н.В. Тингаев

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  
члены комиссии

Генеральный директор  
Коммерческий директор  
Руководитель проекта  
от ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Тингаев Николай Владимирович  
Иванов Валерий Викторович  
Ившин Игорь Владимирович

Заместитель генерального  
директора по правовым  
вопросам и экономике

Калинин Ю.В.

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» 04 2016 г. по «22» 04 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 обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия

СОГЛАСОВАНО

Ректор

ФГБОУ ВПО «КГЭУ»

Э.Ю. Абдуллаязнов

«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 комиссии

Генеральный директор  
Коммерческий директор  
Руководитель проекта  
от ФГБОУ ВПО «КГЭУ»

Тингаев Николай Владимирович  
Иванов Валерий Викторович  
Ившин Игорь Владимирович

Заместитель 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. № 1, 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 обратимой 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» июня 2015 г. по «10» ноября 2015 г. в соответствии с комплектом КД на испытательный стенд для проведения углубленных исследований характеристик обратимой 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 внедрения результатов научных исследований



ООО «СРЕДНЕВОЛЖСКСЕЛЬЭЛЕКТРОСЕТЬСТРОЙ»

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Директор ООО «СВСЭСС»  
 И.А. Кашапов  
 « 28 » \_\_\_\_\_ 2018 г.

## Акт

## внедрения результатов научных исследований

«Программный комплекс и методика оптимизации конструктивных параметров электрических машин возвратно-поступательного действия»

Результаты научных разработок Копылова А.М. использованы и внедрены в процесс проектирования ООО «СВСЭСС».

Объектом реализации являются:

1. Математическая модель электрической машины возвратно-поступательного действия (ЭМВПД), учитывающая конструктивные параметры электрической машины.
2. Программный комплекс для реализации параллельно-последовательных алгоритмов моделирования электрической машины возвратно-поступательного действия.
3. Методика выбора оптимальной конструкции ЭМВПД с постоянными магнитами на основе исследования и анализа особенностей электромагнитных и механических процессов преобразования энергии.
4. Программный комплекс для оптимизации конструктивных параметров статора и индуктора ЭМВПД.

Результаты внедрения научных исследований показывают эффективность использования разработанного программного комплекса и методики оптимизации конструктивных параметров электрических машин.

Начальник отдела  
проектирования



В.А. Курдюкова

## ПРИЛОЖЕНИЕ Л

## Акт о внедрении результатов диссертационной работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор –  
 проректор по учебной работе  
 ФГБОУ ВО «Казанский  
 государственный  
 энергетический университет»

А.В. Леонтьев

2018 г.



## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Копылова А.М.  
 «Совершенствование конструкции синхронной электрической машины возвратно-  
 поступательного действия с применением генетического алгоритма»  
 в учебный процесс

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы аспиранта Копылова А.М. «Совершенствование конструкции синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с применением генетического алгоритма» внедрены в учебный процесс кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» и используются при проведении лабораторных работ в рамках дисциплины «Электрооборудование промышленности» подготовки магистров по направлению 13.04.02 «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