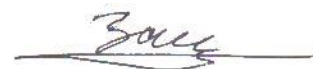


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи



Занегин Сергей Юрьевич

**ИССЛЕДОВАНИЯ ОБМОТОК НА ОСНОВЕ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ДЛЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук К.Л. Ковалев  
Научный консультант:  
доктор технических наук В.В. Зубко

Москва 2021

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	14
1.1 Обзор существующих проектов ВТСП машин с высокими удельными параметрами для систем электродвижения, применительно к авиации будущего (полностью электрические самолеты) .....	14
1.2 Особенности работы электрических машин на БПЛА с электрической силовой установкой (электролетах) .....	20
1.3 Современные технические ВТСП проводники.....	26
1.4 Особенности работы ВТСП обмоток на переменном токе .....	28
1.5 Механизм гистерезисных потерь в сверхпроводниках.....	29
1.6 Модели для расчета гистерезисных потерь в одиночных сверхпроводниках .....	31
1.7 Моделирование и расчет потерь в кабелях и обмотках на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения .....	33
1.8 Способы измерения потерь в ВТСП устройствах .....	35
1.8.1 Калориметрические методы измерения потерь .....	36
1.8.2 Электрические методы измерения потерь .....	40
1.9 Выводы и постановка задачи исследований .....	46
ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ И СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ В ОБМОТКАХ НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ .....	47
2.1 Построение математической модели для исследования потерь в обмотках и стопках ВТСП лент второго поколения.....	47

2.2	Испытательный стенд для измерения потерь в стопках и обмотках ВТСП лент .....	54
2.3	Сравнение результатов экспериментов и моделирования .....	57
2.4	Выводы к главе 2.....	59
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В МОДЕЛЬНЫХ КАТУШКАХ НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ .....		61
3.1	Анализ потерь в различных конфигурациях стопок ВТСП лент.....	61
3.2	Анализ потерь в катушках на основе ВТСП лент .....	65
3.2.1	Катушка типа двойной рейстрек на основе ВТСП ленты с немагнитной подложкой.....	65
3.2.2	Катушка типа двойной рейстрек на основе ВТСП лент с магнитной подложкой .....	67
3.3	Выводы к главе 3.....	69
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВТСП КАТУШЕК ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ .....		71
4.1	Разработка ВТСП двигателя для БПЛА .....	71
4.2	Изготовление ВТСП катушек.....	73
4.3	Экспериментальные исследования .....	78
4.4	Выводы к главе 4.....	84
ГЛАВА 5. ИСПЫТАНИЯ ВТСП КАТУШКИ В УСЛОВИЯХ, ИМИТИРУЮЩИХ РАБОТУ В СОСТАВЕ ДВИГАТЕЛЯ.....		85
5.1	Выбор датчика для измерений токов несинусоидальной формы .....	85
5.2	Испытания катушки от инвертора в режиме источника напряжения .....	90
5.3	Испытания катушки от инвертора в режиме источника тока .....	93
5.3.1	Формы тока в обмотках, присущие вентильным машинам.....	93

5.3.2	Результаты испытаний катушки от инвертора в режиме источника тока.	95
5.4	Выводы к главе 5	101
<b>ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЙСТРЕКОВЫХ ВТСП КАТУШЕК И ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ В ПРИСУТСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ</b>		
6.1	Изготовление ВТСП катушек и определение их критического тока	103
6.2	Экспериментальные исследования ВТСП катушек на переменном токе во внешнем магнитном поле	104
6.3	Исследование потерь в кольцевой ВТСП обмотке	108
6.4	Испытания кольцевой статорной обмотки с установленным ротором с постоянными магнитами	114
6.4.1	Измерение критического тока с установленным ротором	116
6.4.2	Экспериментальные исследования макета с неподвижным ротором на переменном токе	117
6.5	Испытания сверхпроводниковой машины в режиме генератора	122
6.6	Выводы к главе 6	126
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>		<b>128</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>		<b>130</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертационной работы.** Одна из ведущих проблем современной авиации заключается в повышении ее экономичности. Речь идет не только о гражданской авиации, где данный вопрос стоит наиболее остро – от него зависит и стоимость перевозок, и прибыль авиакомпаний, – но и в сельскохозяйственной и военной сфере: увеличивается дальность полета, время, доступное для выполнения задачи. Современные авиационные двигатели за счет широкого распространения численного, конечно-элементного моделирования приближаются к порогу повышения своих характеристик: КПД, шумность, удельная мощность. В краткосрочной перспективе авиастроение движется по пути создания так называемого «более электрического самолета» (БЭС). Данный термин подразумевает максимальное снижение доли гидравлических и пневматических систем в пользу электрических. К ним относятся электроприводы топливной системы, электроприводы уборки-выпуска шасси и электропривод колес для наземной рулежки. Применение последнего на SSJ-100 позволяет снизить среднее время использования маршевых двигателей на земле на 30-40 минут, уменьшив выбросы углекислого газа в атмосферу, а также шумового воздействия вблизи аэродрома [1].

В то же время концепция БЭС не решает проблемы, связанной с повышенным расходом топлива на взлете и переходных режимах. К примеру, в США процент потребления топлива ближнемагистральными рейсами, приближающимися к схеме «взлет-посадка», составляет около 25% от общемирового объема потребления авиационного керосина, и даже применение БЭС в таких случаях не принесет максимального эффекта. Требуется качественно иной подход, а именно полностью электрический самолет. Источником энергии для движителя может служить как аккумуляторная батарея, так и газотурбинный

двигатель (ГТД), работающий на генератор. Однако, вне зависимости от выбранной концепции и присущих ей достоинств и недостатков, на первый план выходит проблема создания электрических машин с высокой удельной мощностью.

Разработка конструкций обмоток в составе электрических машин на основе высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов позволяет увеличить их удельную мощность за счет существенно более высокой допустимой токовой нагрузки, а также снизить массу и габаритные размеры, что делает возможным создание принципиально новых систем.

Вследствие развития прикладной сверхпроводимости и индустрии производства новых ВТСП проводников второго рода (2G), которые обладают более высокой плотностью тока в собственном магнитном поле, а также значительного прогресса в криогенике стало возможным их использование в электрических машинах (ЭМ).

В мире уже созданы ЭМ с использованием ВТСП обмоток, работающих на постоянном токе [2], в том числе в МАИ [3], но их удельные параметры оказываются недостаточно высокими для применения в малоразмерных летательных аппаратах и в полностью электрических самолетах. Именно поэтому ведущие мировые научные центры проводят работы по созданию электрических машин с использованием ВТСП обмоток, работающих на переменном токе [4–6], в том числе в МАИ [7–11]. Сверхпроводниковые ЭМ за счет существенного увеличения токовой нагрузки позволяют достичь значения 10 кВт/кг и более, но максимальные значения в 20...30 кВт/кг могут быть достигнуты при использовании ВТСП как в обмотках возбуждения, так и в обмотках якоря (ОЯ).

При этом возникает большое количество сложных научно-технических задач. В частности, критические параметры ВТСП катушки и короткого ВТСП образца существенно отличаются. Кроме того, при работе устройств на

переменном токе в их металлических частях возникают потери, в том числе в сверхпроводнике, правильное определение которых необходимо при разработке криогенной системы. Потери в сверхпроводнике являются гистерезисными потерями и преобладают в ВТСП устройствах, и задача их определения является одной из важнейших при проектировании устройств, работающих на переменном токе.

Математическое моделирование ставит сложные задачи при проектировании и оптимизации устройств на основе ВТСП материалов из-за нелинейных зависимостей их тепловых и электромагнитных свойств. Моделирование потерь в 2G ВТСП лентах и устройствах на их основе представляет собой наиболее сложную задачу и может быть успешно реализовано только с помощью численных методов [12]. Разработки численных моделей для расчета и анализа различных характеристик ВТСП устройств ведутся во многих научных центрах мира, например, [13–17].

Экспериментальные исследования потерь в образцах ВТСП устройств проводят при питании синусоидальным током и напряжением [18]. Важно отметить, что обмотки якоря современных электрических машин работают не только на синусоидальном, но и на трапецеидальном токе (в случае вентильной машины). Так как предполагается, что катушки, подобные исследуемой в данной работе, могут представлять собой обмотки малоразмерного ВТСП двигателя для беспилотного летательного аппарата (БПЛА), то, соответственно, в качестве источника питания будет выступать электронный силовой преобразователь (инвертор) [19], который питает обмотки импульсным напряжением, формируемым с помощью широтно-импульсной модуляции с частотой коммутации силовых ключей от нескольких кГц до десятков кГц [20]. Данный режим реализуется при управлении электрической машиной большинством современных силовых электронных преобразователей. Поэтому необходимо

рассмотреть параметры ВТСП катушки при питании ее током различной формы, частоты и амплитуды.

В этой связи численное моделирование потерь в ВТСП обмотках электрических машин при их разработке, совместно с экспериментальными исследованиями их поведения в нестационарных условиях, представляют собой актуальную и важную задачу.

**Цели и задачи работы.** Целью диссертационной работы является разработка экспериментальных и численных методик для определения и детального исследования потерь в ВТСП обмотках электрических машин, работающих в различных нестационарных режимах.

Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

- разработка математических моделей для исследования потерь в обмотках и стопках ВТСП лент второго поколения;
- разработка комплекса оборудования для экспериментального исследования потерь в обмотках и стопках ВТСП лент второго поколения;
- исследования потерь в обмотках и стопках ВТСП лент второго поколения на синусоидальном токе, на несинусоидальном токе и сформированного при помощи высокочастотной модуляции, в том числе в присутствии внешнего постоянного магнитного поля;
- верификация результатов математического моделирования и полученных экспериментальных данных.

**Предмет исследования.** Предметом являются потери в сверхпроводниковых обмотках электрических машин из ВТСП ленты второго поколения, численное моделирование потерь в катушках на синусоидальном токе, изготовленных из этой ленты, а также экспериментальное исследование потерь на



несинусоидальных токах различной частоты и формы, в том числе полученных при помощи высокочастотной модуляции.

**Методы исследований.** При решении задач диссертации использовались методы электромеханики и прикладной сверхпроводимости; численные методы решения уравнений в частных производных (метод конечных элементов). Для обработки результатов экспериментов использовался пакет прикладных программ MathLab 2014; для решения задач методом конечных элементов (МКЭ) использовался пакет прикладных программ ANSYS; «твердотельное» моделирование было осуществлено на базе пакета Solidworks 2015; эскизное проектирование было осуществлено на базе пакета Компас-3D V12; составление программ для FDM 3D-принтера осуществлялось на программном обеспечении Repetier-Host.

**Научная новизна.** Разработана численная методика расчета потерь в катушках из ВТСП ленты второго поколения для электрических машин, учитывающая зависимость потерь в тонком сверхпроводящем слое как от значения транспортного тока, так и от величины и направления внешнего магнитного поля, значительную нелинейность зависимости сопротивления от плотности тока в ВТСП материалах, а также неоднородность критической плотности тока по ширине ВТСП слоя ленты.

Разработаны оригинальные экспериментальное оборудование и методики обработки результатов, позволяющие проводить измерения потерь в катушках из ВТСП ленты при питании их токами различной формы и частоты, сформированными в том числе при помощи высокочастотной модуляции.

Проведено детальное исследование потерь в ВТСП катушках электрических машин в различных условиях.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработанные модели и методики позволяют еще на этапе эскизного проектирования определить один из важнейших параметров сверхпроводниковой электрической машины: уровень потерь в обмотках якоря. От этой величины полностью зависит как необходимая холодопроизводительность криогенной системы охлаждения, так и комплекс принимаемых конструктивных решений по обеспечению эффективного охлаждения ВТСП обмоток.

Разработанные экспериментальные стенды и методики исследования ВТСП обмоток при питании их несинусоидальным током моделируют условия работы катушки в двигателе, работающем от силового преобразователя (инвертора), что особенно актуально в сфере применения сверхпроводниковых электрических машин на подвижных объектах различного типа и назначения с питанием от батарей. Таким образом, значимость работы состоит не только в том, что результаты численного моделирования являются критически важными при разработке сверхпроводниковых электрических машин, но также в том, что примененный практический опыт исследования потерь на несинусоидальных токах позволит сформировать требования к преобразовательной технике для создания высокоэффективных сверхпроводниковых электрических машин для силовых установок и подвижных объектов.

**Достоверность результатов,** полученных в диссертационной работе, определяется комплексным подходом к исследованиям, использованием большого количества различных методов и подтверждается успешными испытаниями рейстречковых ВТСП катушек для ЭМ, созданных с использованием предложенных в диссертации моделей. Расчетные данные согласуются как с экспериментальными данными, так и с данными, известными из литературы. Верность разработанной численной модели подтверждена серией экспериментов с

катушками из ВТСП лент второго поколения с разными типами подложек: магнитной и немагнитной.

**Апробация результатов работы.** Положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. Международной научной конференции по электротехническим комплексам и системам ICOECS2020, Уфа, 2020 г.;
2. Международной конференции по прикладной сверхпроводимости EUCAS2019, Глазго, Великобритания, 2019 г. (2 доклада);
3. Международном межотраслевом молодежном научно-техническом форуме «Молодежь и будущее авиации и космонавтики-2018», Москва, 2018 г.;

Представленные в диссертации результаты опубликованы в виде двух статей в российских журналах, входящих в перечень ВАК РФ, и пяти – в изданиях, индексируемых в базах Scopus.

**На защиту выносятся:**

1. Численная модель для расчета потерь в стопках и катушках из ВТСП лент второго поколения.
2. Оригинальные методики испытаний и комплекс установок для измерения потерь в стопках и катушках из ВТСП лент второго поколения.
3. Результаты экспериментального исследования потерь в стопках лент различной конфигурации и катушках, в том числе для верификации разработанной численной модели.
4. Результаты исследования и анализ потерь в катушках из ВТСП лент при питании их синусоидальным и несинусоидальным током различной формы и частоты.

5. Результаты исследования влияния внешнего магнитного поля на потери в катушках из ВТСП лент при питании их синусоидальным и несинусоидальным током различной формы и частоты.

**Авторский вклад.** Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены и разработаны лично или в соавторстве.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 91 наименование. Объем диссертации составляет 138 страниц, в том числе 80 рисунков и 8 таблиц.

**В первой главе** дан литературный обзор по теме диссертации. Здесь приведены примеры различных проектов ВТСП ЭМ, рассмотрены особенности работы сверхпроводников в системах электродвижения, описаны некоторые свойства ВТСП проводников, основное внимание уделено потерям в сверхпроводниках.

**Вторая глава** диссертации посвящена созданию численной модели для исследования потерь в обмотках на основе ВТСП лент второго поколения, работающих на переменном токе. В модели при определении гистерезисных потерь в сверхпроводящем слое ВТСП лент второго поколения учтена нелинейность их сопротивления и неоднородность критической плотности тока по ширине сверхпроводящего слоя ленты. Представлен разработанный испытательный стенд для измерения потерь при различных частотах. Представлена верификация численной модели.

**В третьей главе** изложены результаты численных и экспериментальных исследований потерь в различных модельных ВТСП катушках. Показано, что выполненные расчеты с высокой точностью согласуются с измеренными результатами.

**В четвертой главе** содержатся результаты изготовления и испытаний катушек для ВТСП двигателей. Показана возможность создания ВТСП электродвигателя при заданных параметрах.

**В пятой главе** описаны результаты испытания катушек в условиях, имитирующих работу в составе ВТСП двигателя. Приведены результаты влияния несинусоидальных токов, имитирующих работу двигателя с электронным преобразователем-инвертором, на потери в ВТСП обмотках.

**В шестой главе** приведены результаты экспериментальных исследований рейстречковой ВТСП катушки в присутствии внешнего постоянного магнитного поля, а также испытания обмоток ВТСП ЭМ в различных условиях, в том числе при работе ЭМ в генераторном режиме. Получены значения потерь как на синусоидальном токе, так и на токе, полученном с помощью высокочастотной модуляции. Приведены результаты влияния внешнего магнитного поля на потери в ВТСП катушках и обмотках.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОЕКТОВ ВТСП МАШИН С ВЫСОКИМИ УДЕЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АВИАЦИИ БУДУЩЕГО (ПОЛНОСТЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ САМОЛЕТЫ)**

Использование ВТСП обмоток для систем электродвижения применительно к авиации, а также в сопутствующих ВТСП устройствах (кабели, накопители) значительно улучшает их характеристики за счет повышения плотности тока и, следовательно, удельных показателей, но для этого необходимо создание принципиально новых систем.

Одной из таких систем является аэродинамическая концепция облика летательного аппарата, основанная на ускорении пограничного слоя [21], именуемого в англоязычной литературе аббревиатурой BLI (Boundary Layer Ingestion, буквально «поглощение пограничного слоя»). Принцип заключается в максимальном приближении движителя к фюзеляжу, интеграции его в обводы воздушного судна, что приводит к снижению неравномерности поля скоростей обтекающего ЛА потока воздуха (рисунок 1.1а). Максимальный положительный эффект достигается при использовании такой силовой установки на аэродинамических схемах типа «летающее крыло» или «смешанное крыло» (англ. blended wing body) [22]. В данном случае выгодно разместить двигатели-«поглотители» пограничного слоя вдоль задней кромки крыла (рисунок 1.1б) для распределения тяги по ширине крыла.

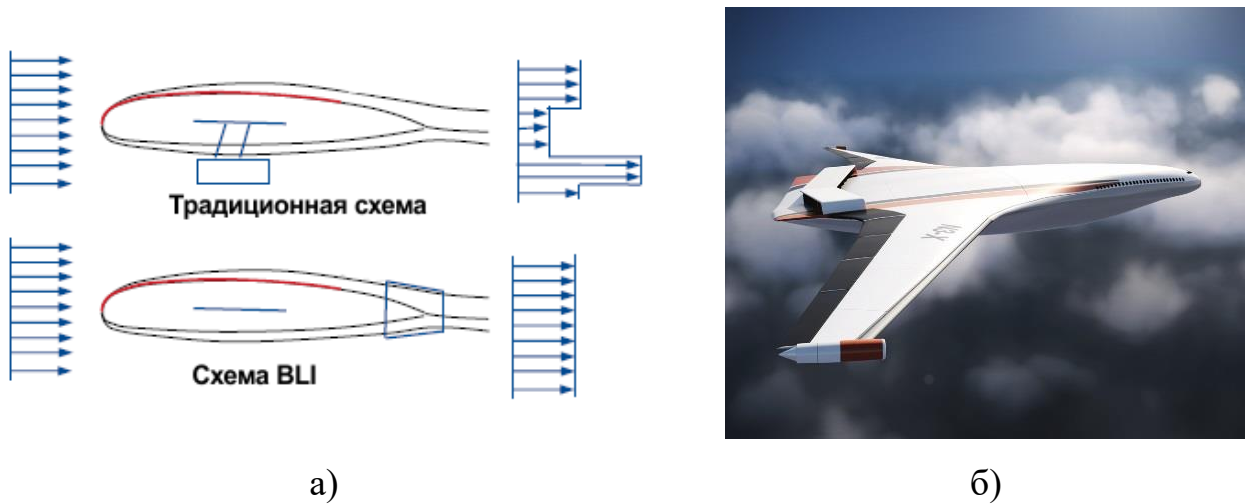


Рисунок 1.1 – Принцип ускорения пограничного слоя: а) поля скоростей воздушного потока; б) внешний вид ЛА типа «летающее крыло» или «смешанное крыло» (blended wing body)

Подобная конфигурация силовой установки и, как следствие, облик летательного аппарата практически нереализуемы при традиционных газотурбинных двигателях (ГТД). Механическая передача (рисунок 1.2а) энергии от одного ГТД на несколько вентиляторов (воздушных винтов) невозможна без валов и редукторов; распределение горячих газов от общего газогенератора (рисунок 1.2б) требует наличия длинных жаропрочных трубопроводов, – оба этих метода существенно утяжеляют конструкцию летательного аппарата.

Кроме того, удельная мощность ГТД падает с уменьшением мощности и габаритов [23], соответственно, заменить один двигатель несколькими меньшими, эквивалентными по суммарной мощности, снова неэффективно с точки зрения массы (рисунок 1.3б).

В случае использования сверхпроводниковых технологий в электрических машинах и кабелях данная проблема имеет решение. Становится возможным как создание движителей (на основе сверхпроводниковых электродвигателей) с высокой удельной мощностью и малыми габаритами [24], так и распределение

энергии между ними за счет применения компактных СП кабелей, имеющих большую плотность тока.

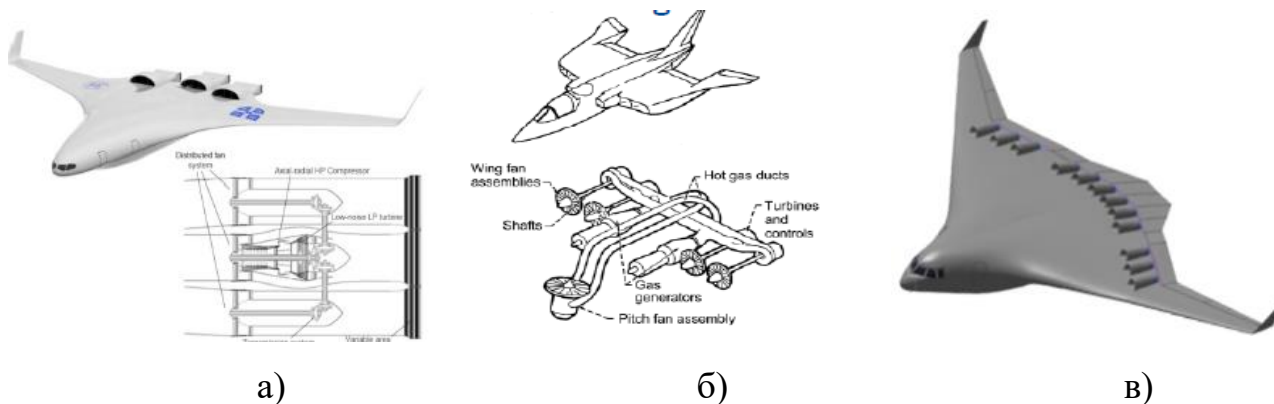


Рисунок 1.2 – варианты реализации силовой установки с распределенной тягой с использованием газотурбинных двигателей: а) механическая передача; б) распределение горячих газов на несколько турбин; в) система распределенной тяги на основе 12 ГТД

Концепт NASA N3x [25] (рисунок 1.1б) является ярким примером подобного подхода: самолет предполагается оснастить двумя СП генераторами мощностью по 50МВт каждый и 16 воздушными винтами с приводом от СП двигателей. Для распределения энергии предполагается использовать как кабели переменного, так и постоянного тока с общей протяженностью около 400 метров. Однако на данный момент более подробной информации о конструкции электрических машин для данного проекта нет, тем не менее, существует достаточно большое количество других разработок ВТСП ЭМ для систем электродвижения.

Отдельно стоит упомянуть успехи [26] центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (ЦИАМ) в кооперации с компанией «СуперОкс» в испытаниях ВТСП двигателя для привода воздушных винтов в составе летающей лаборатории Як-40ЛЛ (рисунок 1.3).





Рисунок 1.3 – ВСТП двигатель компании «СуперОкс» в процессе установки на летающую лабораторию Як-40ЛЛ

Определенный интерес представляет проект High Efficiency Megawatt Motor (HEMM) (рисунок 1.4), разрабатываемый в исследовательском центре NASA Glenn [27].

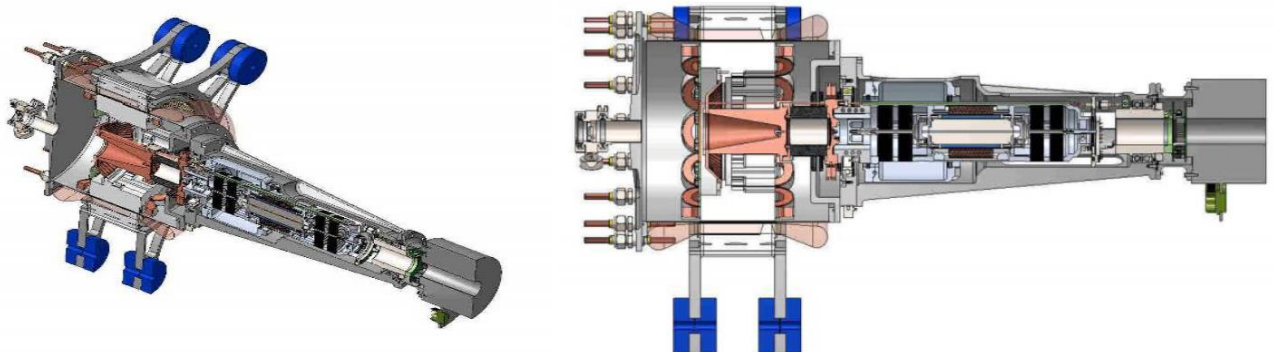


Рисунок 1.4 – Проект HEMM исследовательского центра NASA Glenn, оснащенный встроенным криокулером

Несмотря на то, что обмотки якоря медные с масляным охлаждением, для проекта заявлена высокая удельная мощность не менее 16 кВт/кг. Ротор выполнен сверхпроводящим, с 12 катушками из 2G ВТСП ленты. Ключевой особенностью данного проекта является автономный криокулер, встроенный непосредственно в ротор. Подобное решение не требует наличия криосистемы на борту самолета.

Компания General Electric ведет разработку [28] униполярного генератора авиационного назначения с проектной мощностью 5 МВт при 35 тыс. об/мин. Расчетная удельная мощность составляет порядка 9 кВт/кг. При испытаниях демонстратора (рисунок 1.5а) получена мощность 1,3 МВт на частоте вращения вала 10 тыс. об/мин. Индуктор сверхпроводящий и благодаря расположению на статоре охлаждается при помощи стандартного криокулера. Обмотка якоря медная, с жидкостным охлаждением (рисунок 1.5б). Авторы подчеркивают простоту конструкции и технологии изготовления СП обмотки (соленоид), а также отсутствие на ней центробежных сил.

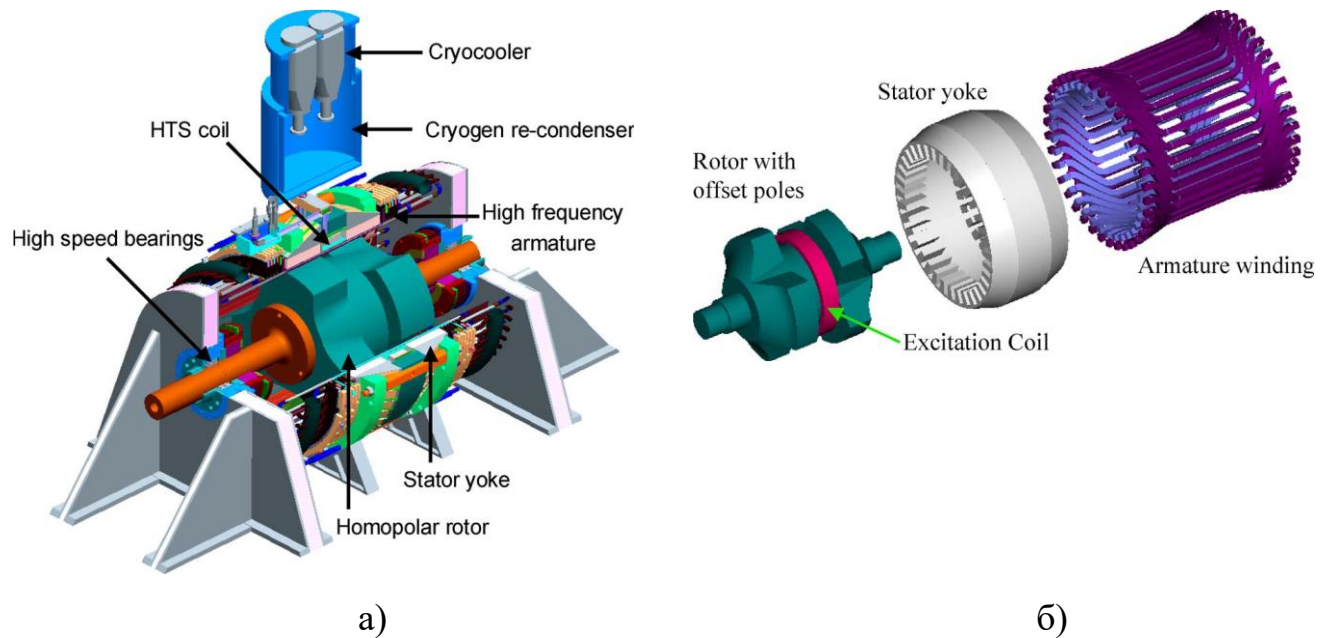


Рисунок 1.5 – Униполярный генератор авиационного назначения от компании General Electric: а) общий вид, б) конструкция активной зоны

Еще один проект исследовательского центра NASA [29] имеет обращенную конструкцию. Трехфазная медная обмотка якоря размещена на роторе, а сверхпроводящий индуктор, соответственно, расположен на статоре, что существенно упрощает криообеспечение и позволяет использовать стандартный криокулер. Общий вид машины показан на рисунке 1.6а. В проекте решено отказаться от железного магнитопровода в пользу активного экранирования за счет СП катушек, расположенных на статоре специальным образом.

Такая технология (как и конструкция креплений СП катушек) взята из томографии [30]. Распределение магнитного поля в поперечном сечении машины изображено на рисунке 1.6б.

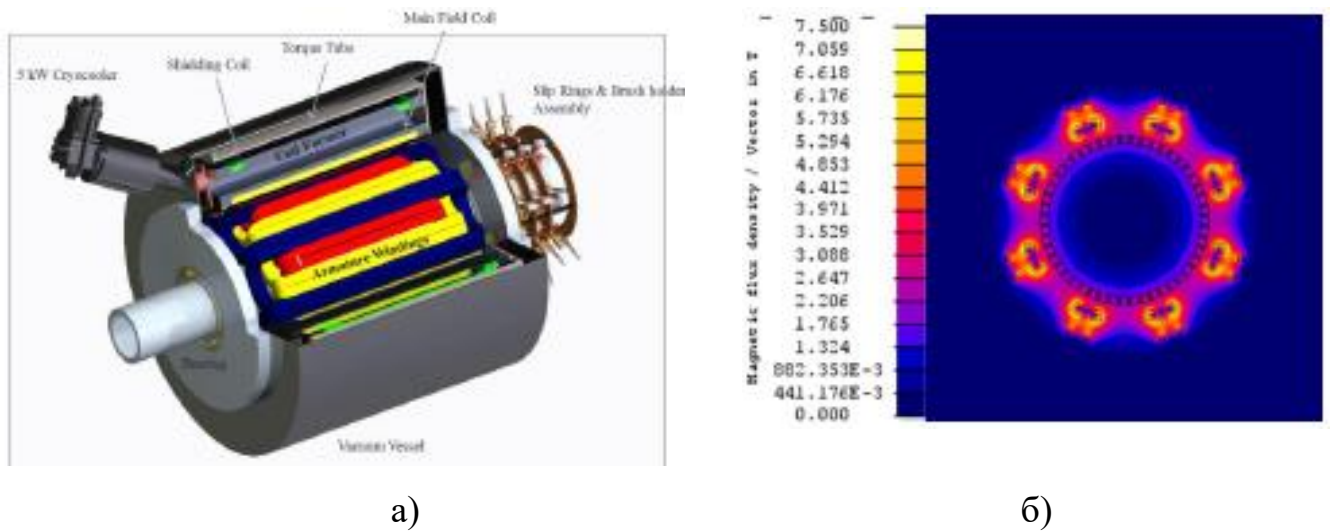


Рисунок 1.6 – а) Общий вид машины проекта исследовательского центра NASA, б) Распределение магнитного поля в поперечном сечении машины

Примечательно, что авторы выделяют расчет потерь в СП обмотках, работающих на переменном токе, как ключевую проблему при создании полностью сверхпроводящих электрических машин и избегают ее, используя традиционные медные обмотки переменного тока.

## 1.2 ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА БПЛА С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ (ЭЛЕКТРОЛЕТАХ)

В современных микро- и малоразмерных БПЛА и радиоуправляемых авиамоделях в качестве источника энергии часто используется аккумуляторная батарея. Благодаря аккумуляторным батареям на основе лития с высокой удельной плотностью энергии, а также развитию микроэлектроники и широкому распространению импульсных регуляторов для электродвигателей появилась возможность создания компактных силовых установок. Кроме того, существует тенденция по увеличению размеров и массы электролетов, растет мощность их

силовых установок. На сегодняшний день проекты крупноразмерных (класса магистральных пассажирских самолетов) пилотируемых ЛА с электрической или гибридной силовой установкой находятся на этапе эскизного проектирования и выбора оптимальных параметров силовой установки. Также изготовлено несколько экспериментальных одноместных легкомоторных самолетов [31–33], проходящих летные испытания, однако наибольшее практическое применение нашли среднеразмерные (рисунок 1.7) БПЛА [34], с успехом используемые как в гражданской, так и в военной сфере.



Рисунок 1.7 – Среднеразмерный БПЛА Penguin BE

Применение гибридных силовых установок (ГСУ) на мультироторных платформах (рисунок 1.8) существенно увеличивает время нахождения аппарата в воздухе [35] при сохранении высокой стабильности в полете, присущей данному типу ЛА. Среднеразмерные ( $\approx 20 \dots 30$  кг взлетной массы и размах крыла 3...5м) БПЛА самолетного типа с электрической силовой установкой более бесшумны, а электродвигатель создает меньше вибраций, чем ДВС аналогичной мощности, что

является важным преимуществом при наличии чувствительных датчиков либо телевизионной аппаратуры на борту. Мощность силовой установки подобных аппаратов составляет 2...5 кВт.



Рисунок .1.8 – Мультироторная платформа с ГСУ «Perimeter 8»

Неотъемлемыми компонентами силовой установки с использованием электродвигателей являются силовые электронные преобразователи: конверторы, преобразователи частоты и инверторы. В случае батарейного питания последняя функция является основной и служит для управления двигателями БПЛА. В последние годы благодаря появлению на рынке новых моделей силовых транзисторов на основе полупроводников GaN (нитрид галлия) и SiC (карбид кремния) появились прототипы мощных ( $>>1$  кВт) инверторов с высокими удельными характеристиками. Устройство, разрабатываемое в университете

Иллинойса [36] на основе GaN транзисторов, имеет мощность 10 кВт при компактных размерах (рисунок 1.9), а удельная мощность составляет 17,3 кВт/кг.

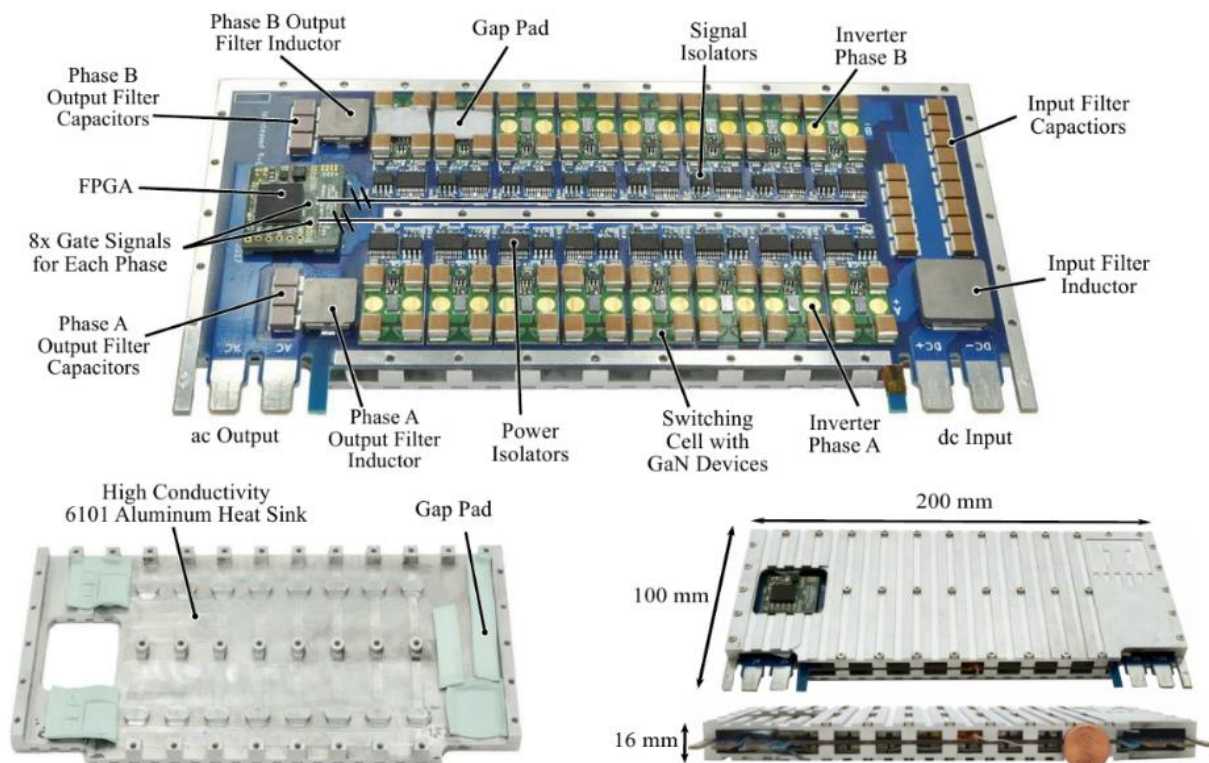


Рисунок 1.9 – Инвертор мощностью 10 кВт

Также для будущих систем электродвижения на основе сверхпроводниковых электрических машин разрабатываются и преобразователи с криогенным охлаждением. В США при совместном участии The University of Tennessee, The Boeing Company и NASA Glenn Research Center [37] ведется разработка трехфазного инвертора мегаваттного класса (рисунок 1.10).

В этом проекте используются силовые ключи, выполненные по SiC технологии, а высокая мощность достигнута за счет параллельного включения двух преобразователей по 500 кВт.

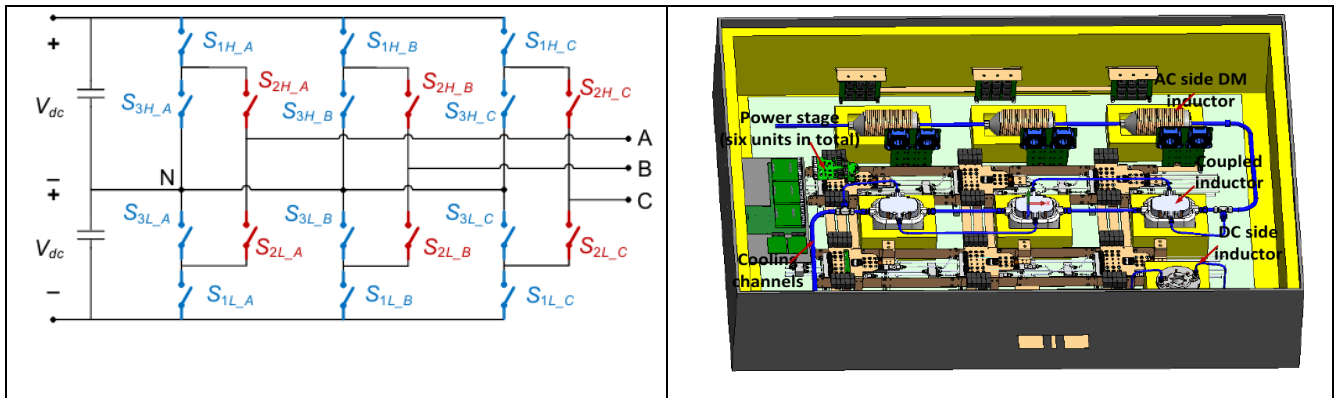


Рисунок 1.10 – Топология (слева) преобразователя с криогенным охлаждением и его компоновка (справа)

Вне зависимости от используемой технологии изготовления транзисторов, а также схемотехнических решений инвертора, его выходное напряжение будет не синусоидальным, а ступенчатым, либо состоять из импульсов высокой частоты (рисунок 1.11), либо полученным сочетанием этих методов.

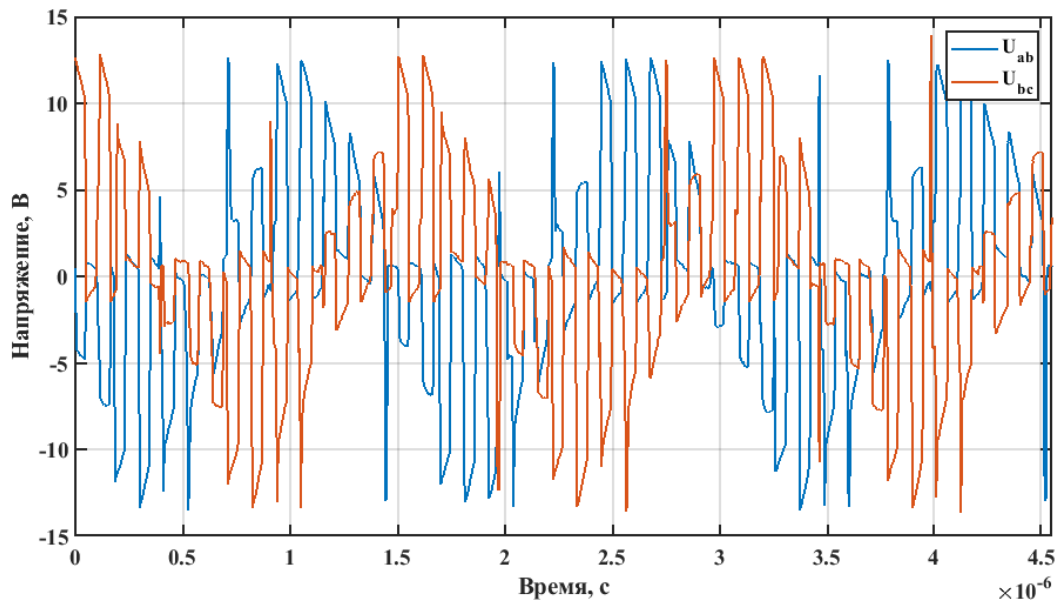


Рисунок 1.11 – Осциллограммы фазных напряжений на выходе 300 Вт инвертора для авиамodelей. Напряжение на третьей фазе не показано для наглядности



Следовательно, ток в нагрузке также будет несинусоидальным и будет содержать большое количество гармоник высокого порядка.

Кроме того, наиболее распространенный тип двигателя, применяемый на малых и среднеразмерных БПЛА, – бесколлекторный двигатель постоянного тока, отличительной особенностью которого является трапецеидальная ЭДС в обмотках. Форма тока (рисунок 1.12) при этом также существенно отличается от синусоидальной, с характерным изломом (обусловленным переключением транзисторов инвертора) на участке, когда ток достигает максимального амплитудного значения. Осциллограммы сняты с бесколлекторного двигателя постоянного тока (БДПТ) номинальной мощностью 1000 Вт, работающего на холостом ходу от инвертора с частотой ШИМ 8 кГц.

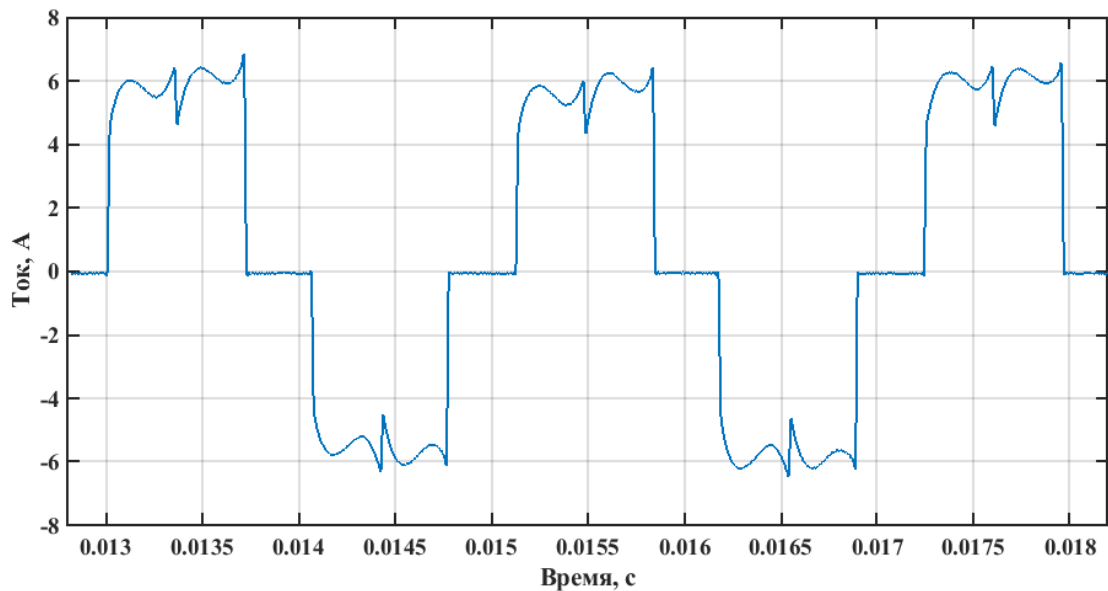


Рисунок 1.12 – Ток фазы бесколлекторного двигателя постоянного тока

Ввиду существенного отличия формы тока от синусоидальной, необходимы исследования потерь в ВТСП обмотках электрических машин при питании их токами несинусоидальной формы [38–41], в том числе сформированными путем

ВЧ модуляции. При этом подобные формы сигналов невозпроизводимы стандартными лабораторными источниками тока, так как их частотный диапазон, как правило, ограничен частотой 0,5-1 кГц, следовательно, возникает необходимость в создании специализированных лабораторных стендов.

### 1.3 СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ВТСП ПРОВОДНИКИ

Используемые на практике технические сверхпроводники являются “жесткими” сверхпроводниками второго рода, они имеют высокую критическую плотность тока в широком диапазоне магнитных полей и температур.

В настоящее время основные технические ВТСП – это соединения первого поколения (1G) на базе висмутовой керамики (Bi-2212 и Bi-2223) и соединения второго поколения (2G) на основе соединения ReBaCuO, где Re – редкоземельный элемент: Y, Gd, Ho и другие [42].

В таблице 1.1 приведены основные параметры ВТСП проводников, где  $T_c$  – критическая температура в нулевом магнитном поле,  $B_{c2}$  – верхнее критическое магнитное поле “жесткого” сверхпроводника.

Таблица 1.1 - Критические свойства технических ВТСП

ВТСП	$T_c$ , К	$B_{c2}(0)$ , Тл
Bi-2223	110	>100
Bi-2212	91	>100
YBCO	92	>100

1G ВТСП представляют собой набор ВТСП волокон в серебряной матрице, которая является стабилизатором и не позволяет температуре сверхпроводника быстро расти при переходе в нормальное состояние.

2G ВТСП – это совокупность тонких слоев, где сверхпроводящий слой толщиной 1-3 мкм нанесен (через буферные слои) на подложку (хастеллой, сталь,

текстурированные сплавы Ni). Такие сверхпроводники также стабилизируются слоями несверхпроводящего (нормального) металла.

Для реализации своего потенциала широкомасштабного применения сверхпроводники должны иметь значительную строительную длину. ВТСП провода изготавливаются в виде лент. Основным методом, с помощью которого изготавливаются 1G ВТСП ленты, называется «порошок в трубе» [43]. Одной из стадий этого технологического процесса является заключение ВТСП волокон в матрицу из серебра.

Две основные технологии производства 2G ВТСП лент – это технология IBAD российской компании «SuperOx» [44] и компании «SuperPower» [45], а также технология MOD/RABiTS™ [46] компании «American Superconductor» («AMSC») [47].

Для примера на рисунке 1.13 показано поперечное сечение 1G и 2G ВТСП лент.

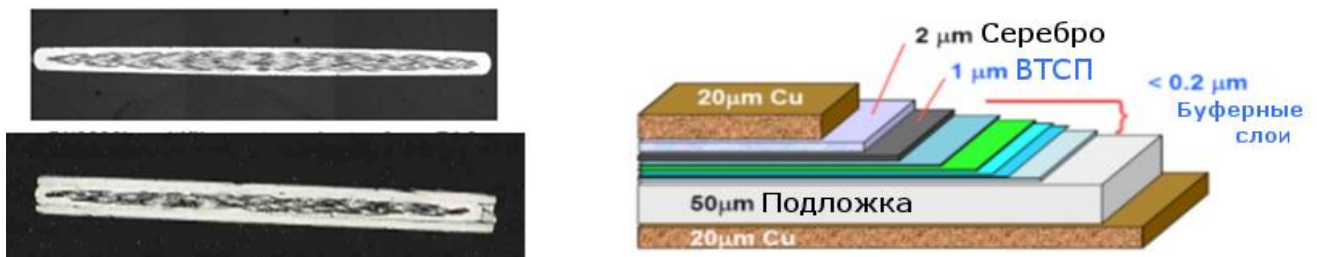


Рисунок 1.13 – Поперечное сечение 1G (слева) и 2G (справа) ВТСП лент

## 1.4 ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВСП ОБМОТОК НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Одним из основных этапов проектирования любой электрической машины является разработка геометрии активной зоны. Ее размеры определяются расчетным путем на основе технического задания и большого числа различных коэффициентов и ограничивающих факторов. Основным параметром является диаметр расточки ярма статора, а также активная длина машины. Также при расчете вычисляются важные с точки зрения обмоточных данных катушек ОЯ ширина зубца и высота катушки, а также количество витков при заданном токе ленты. В результате полностью определяется геометрия ВСП катушки, подлежащей исследованию уровня потерь.

В результате моделирования уровня потерь в ВСП катушке может возникнуть ситуация, требующая пересчета размеров активной зоны машины. Учитывая то, что катушка многослойная, неизбежно возникнет проблема передачи тепла между витками катушки, обусловленная низким коэффициентом теплопроводности межвитковой изоляции. Соответственно, может возникнуть потребность в организации каналов для хладагента между витками, и, следовательно, возрастут габариты катушки. Расстояние между линейными частями соседних катушек, также используемое как канал для хладагента, сократится либо исчезнет вовсе вследствие геометрического конфликта при значительных размерах межвитковых каналов охлаждения. Итогом станет увеличение диаметра активной зоны машины, что повлечет за собой падение удельных характеристик.

В то же время недооценка уровня потерь может привести к перегреву обмоток, вскипанию хладагента и образованию газовых пробок в каналах охлаждения во время испытаний, что приведет к переходу СП в нормальное состояние [48] и, при отсутствии должной защиты, к неизбежной аварии.

Таким образом, величина потерь в ВТСП катушках, работающих на переменном токе, – один из основополагающих факторов при проектировании полностью СП ЭМ.

## 1.5 МЕХАНИЗМ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ПОТЕРЬ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ

На микроскопическом уровне механизм гистерезисных потерь вследствие переменного магнитного поля и транспортного тока в жестких сверхпроводниках второго рода связан с диссипацией энергии при движении квантовых вихревых нитей или флюксоидов под действием магнитного поля.

С феноменологической точки зрения, изменяющееся магнитное поле индуцирует в сверхпроводнике электрическое поле, которое, в свою очередь, ускоряет электроны до тех пор, пока они не достигнут критической скорости, что соответствует появлению в сверхпроводнике тока критической плотности  $j_c$ . В этот момент экранирующая способность сверхпроводника уменьшается, магнитный поток начинает проникать вглубь образца, и возникает электрическое сопротивление.

Эти два подхода полностью эквивалентны друг другу, и расчеты потерь с помощью любой из этих моделей дают идентичные результаты [49].

Рисунок 1.14 поясняет феноменологический подход: на нем показан образец сверхпроводника, помещенный во внешнее магнитное поле. Проникновение магнитного поля в сверхпроводник изображено в виде линий магнитного потока. Если внешнее магнитное поле изменяется, картина линии потока и внутреннее магнитное поле также изменяются. Изменение магнитного поля внутри сверхпроводника индуцирует электрическое поле  $E$  согласно закону Фарадея:

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.1)$$

Электрическое поле вызывает “экранирующие токи” в сверхпроводнике (рисунок 1.14). Направления токов обозначены знаками + и – в поперечном сечении образца.

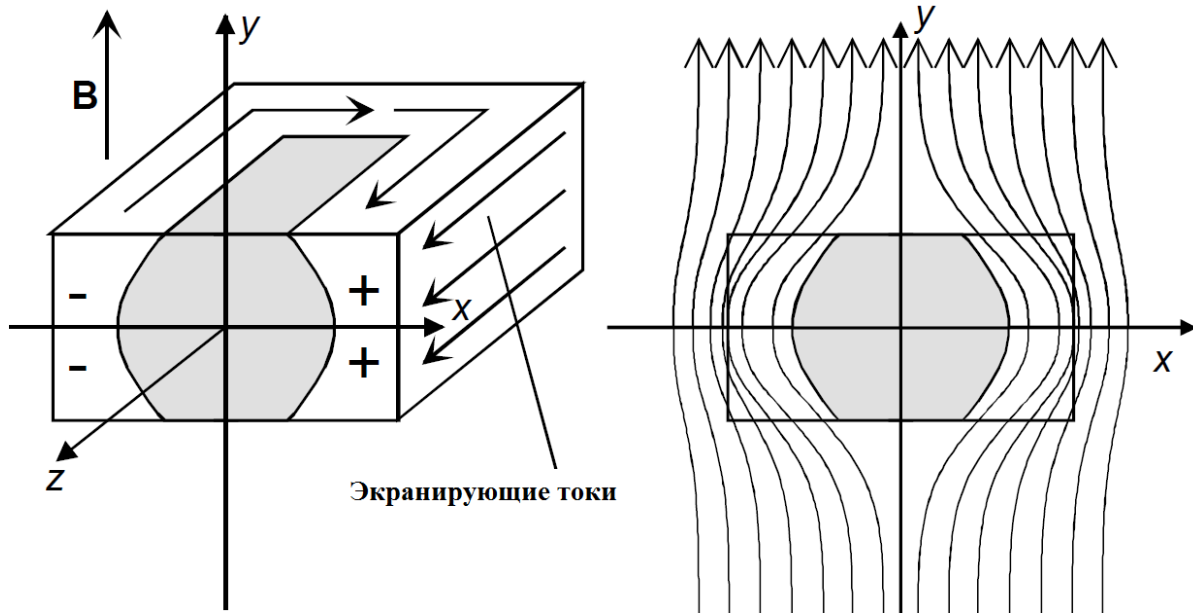


Рисунок 1.14 – Образец сверхпроводника в изменяющемся внешнем магнитном поле. Токи в белой области экранируют внутреннюю часть образца (серую) от магнитного поля.

Упрощенная модель представлена на рисунке 1.14, где объем, выделенный серым цветом, экранируется токами, протекающими в объеме белого цвета с плотностью, практически равной плотности критического тока. Экранирующие токи определяют распределение магнитного поля в сверхпроводнике в соответствии с законом Ампера:

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (1.2)$$

Экранирующие токи также рассеивают энергию, которая требуется для депиннинга и перемещения линий потока, что является диссипативным процессом и требует дополнительного охлаждения, локальная мощность которого равна  $J \times E$ , т.е. потери можно вычислить как работу внешнего поля из уравнения:

$$p = \vec{j} \cdot \vec{E} \quad (1.3)$$

где  $\vec{j}$  и  $\vec{E}$  – плотность тока и напряженность электрического поля в данной точке сверхпроводника.

Потери также можно искать как энергию магнитного поля, затрачиваемую на перемагничивание образца. Величина энергии может быть найдена из площади под кривой намагничивания сверхпроводника. Потери на единицу объема за цикл равны:

$$W = \frac{1}{V} \int \oint M(H) dH dV \quad (1.4)$$

где  $M(H)$  – намагниченность образца сверхпроводника,  $V$  – объем образца. Учитывая при этом, что в случае жестких сверхпроводников  $j = j_c$  при  $\text{rot } \vec{H} \neq 0$ ,  $E \neq 0$ .

## 1.6 МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ПОТЕРЬ В ОДИНОЧНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

С использованием вышеуказанных подходов для расчета мощности потерь в одиночном сверхпроводнике прямоугольного сечения (что соответствует ВТСП слою лент второго поколения), в меняющемся магнитном поле, направленном параллельно и перпендикулярно широкой поверхности ленты, получены выражения [50]:

$$P_{II} = \begin{cases} \frac{2f \cdot B_m^2 \beta_{II}}{\mu_0 \cdot 3} & \beta_{II} < 1 \\ \frac{2f \cdot B_m^2}{\mu_0} \left( \frac{1}{\beta_{II}} - \frac{2}{3\beta_{II}^2} \right) & \beta_{II} > 1 \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\beta_{II} = \frac{B_m}{B_p}$$

$$P_{\perp} = \frac{f \cdot a \cdot \pi}{b \cdot \mu_0} B_c \cdot B_m \left[ \frac{2}{\beta_{\perp}} \ln(\cosh \beta_{\perp}) - \tanh \beta_{\perp} \right] \quad (1.6)$$

$$\beta_{\perp} = \frac{B_m}{B_c}$$

где  $f$  – частота,  $B_m$  – максимальное магнитное поле (параллельное или перпендикулярное),  $B_p$  – максимальное поле полного проникновения,  $B_c$  – критическое максимальное поле,  $a$  и  $b$  – удвоенные ширина и толщина прямоугольного сверхпроводника.

Для расчета потерь в одиночном сверхпроводнике, несущем транспортный ток, на практике часто используют аналитические выражения Норриса [51], основанные на модели критического состояния для случаев эллиптического сечения или прямоугольного сечения сверхпроводника (что соответствует ВТСП слою лент второго поколения).

Эти выражения получены при условии, что плотность критического тока не зависит от магнитного поля ( $J_c = J_{c0} - const$ ) и сверхпроводник изотропен относительно его электромагнитных свойств.

Так, для сверхпроводника прямоугольного и эллиптического сечения мощность гистерезисных потерь на единицу длины определяются уравнениями:

$$P = \frac{f \mu_0 I_c^2}{\pi} \left[ (1 - \beta) \cdot \ln(1 - \beta) + (1 + \beta) \cdot \ln(1 + \beta) - \beta^2 \right] \text{ (прямоугольник),} \quad (1.7)$$

$$P = \frac{f \mu_0 I_c^2}{\pi} \left[ (1 - \beta) \cdot \ln(1 - \beta) + (2 - \beta) \cdot \frac{\beta}{2} \right] \text{ (эллипс),} \quad (1.8)$$

где  $f$  – частота,  $\beta = I_0 / I_c$ ,  $I_c$  и  $I_0$  – критический и транспортный ток в сверхпроводнике.

Из уравнений (1.7, 1.8) следует, что гистерезисные потери в сверхпроводнике с транспортным током возрастают пропорционально квадрату критического тока, а не его первой степени, как следует из модели для сверхпроводника во внешнем



магнитном поле. Физическая причина такого различия состоит в том, что при любой конечной ширине ленты с увеличением транспортного тока насыщенная зона (зона с критической плотностью тока) движется от краев ленты к ее середине, в то время как во внешнем магнитном поле граница насыщенной зоны параллельна его поверхности.

## 1.7 МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПОТЕРЬ В КАБЕЛЯХ И ОБМОТКАХ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Для расчета потерь в кабелях на основе ВТСП лент первого поколения можно использовать аналитическую “моноблочную модель”, в которой токонесущий элемент в кабеле рассматривается как трубка сверхпроводника.

Мощность гистерезисных потерь в таком токонесущем элементе определяется уравнением [52]:

$$P = \frac{f \mu_0 I_c^2}{\pi \cdot \delta_0^2} \left[ (1 - \delta_0 \cdot \beta) \cdot \ln(1 - \delta_0 \cdot \beta) + \delta_0 \cdot \beta \cdot \ln(1 - \delta_0 \cdot \beta / 2) \right]$$

$$\delta_0 = \frac{(D_o^2 - D_i^2)}{D_i^2} \quad (1.9)$$

где  $f$  – частота,  $\beta = I/I_c$ ,  $D_o$  и  $D_i$  – внешний и внутренний диаметр токонесущего элемента.

Вычисление потерь на переменном токе в кабелях на основе ВТСП лент второго поколения – сложная задача, для ее решения необходимо провести численное моделирование нестационарной нелинейной электромагнитной задачи. При определении потерь должны учитываться следующие особенности: сильная нелинейность сопротивления ВТСП слоев лент второго поколения (параметр нарастания  $n > 20$ ); гистерезис магнитной подложки ВТСП лент; зависимость

потерь в тонком ВТСП слое ленты от транспортного тока, а также величины и ориентации магнитного поля.

На рисунке 1.15 показаны (в пересчете на 1 метр одной ленты) результаты эксперимента, а также аналитического и численного расчета потерь, в зависимости от отношения  $I/I_c$  в силовом кабеле на основе ВТСП лент второго поколения (производства «SuperOx»), изготовленном в ОАО «ВНИИКП» [53].

Из рисунка 1.15 видно, что только численными, а не аналитическими методами можно точно определить потери в 2G ВТСП кабелях. Также из рисунка следует, что потери при рабочих токах ( $I/I_c = 0,5-0,6$ ) в несколько раз превышают потери (рассчитанные по Норрису) в одиночных лентах.

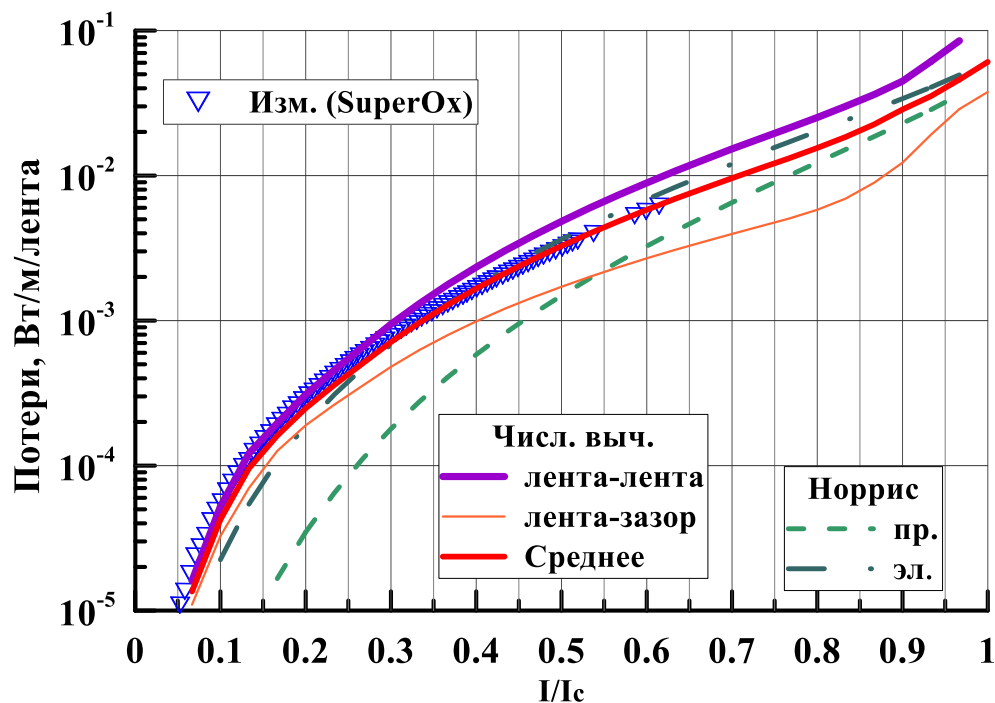


Рисунок 1.15 – Измеренные и рассчитанные (численно и по моделям Норриса) величины потерь на метр и на ленту в ВТСП кабеле в зависимости от  $I/I_c$ . Треугольниками обозначены данные эксперимента, пунктирными кривыми – результаты расчета по моделям Норриса, сплошными кривыми – результаты численного расчета для различных конфигураций ВТСП лент в кабеле

Вычисление потерь в обмотках или стопках 2G ВТСП лент – также сложная задача. При определении потерь должны учитываться следующие особенности: значительная нелинейность сопротивления ВТСП слоев лент; зависимость потерь в тонком ВТСП слое ленты от транспортного тока, а также от величины и ориентации магнитного поля. Поэтому только расчетом численными методами можно определить потери в стопках ВТСП лент. Примеры различных численных моделей представлены в работе [13]. В работе [54] показано, что потери в стопках 2G ВТСП лент второго поколения могут на порядок превышать потери в одиночных лентах.

Электродвигатели с высокой удельной мощностью (например, для перспективных самолетов) могут иметь ВТСП обмотки, работающие только на постоянном токе [55], однако и в этом случае они находятся в переменном внешнем магнитном поле, что также вызывает потери в сверхпроводнике. В настоящее время для данного случая наряду с численными [55] разработан аналитический метод для расчета потерь [56].

## **1.8 СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ В ВТСП УСТРОЙСТВАХ**

Экспериментальные исследования по изучению и определению потерь в устройствах на основе технических сверхпроводников являются довольно непростой задачей, равно как и описанные ранее численные модели. Главные проблемы при определении потерь – их абсолютная малая величина и необходимость выделить эту величину из большой полезной мощности испытуемого устройства.

Существует два основных способа определения потерь на переменном токе в устройствах на основе технических сверхпроводников: это калориметрические и электрические методы.

Электрические методы измерения потерь имеют высокую скорость измерения и высокую точность, но они чувствительны к электромагнитным помехам. Калориметрические методы, напротив, имеют низкую скорость и точность, но они не чувствительны к помехам.

### 1.8.1 Калориметрические методы измерения потерь

При протекании транспортного тока, а также при наличии внешнего переменного магнитного поля потери в сверхпроводнике вызовут повышение температуры (при процессе, близком к адиабатическому), что позволяет при помощи термометра определить их величину. Вторым способом является измерение массы испарившегося хладагента. Оба способа позволяют измерять полные потери в сверхпроводнике в любых электромагнитных условиях.

#### 1.8.1.1 Измерение роста температуры при помощи термометра

На рисунке 1.16 представлена схема измерения потерь в сверхпроводнике по росту температуры.

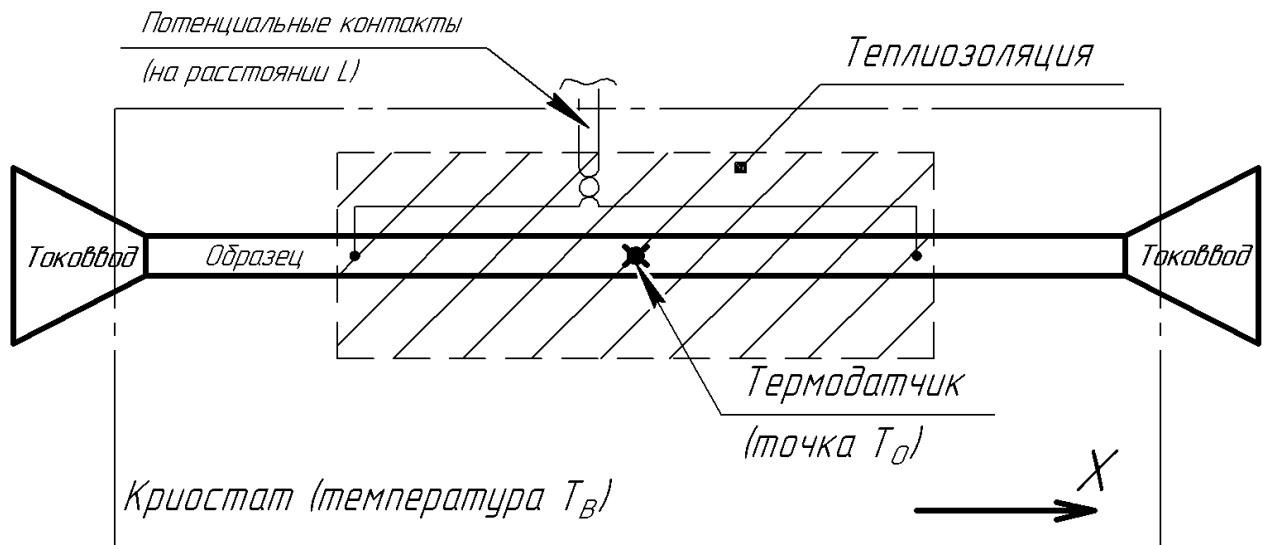


Рисунок 1.16 – Схема установки для определения потерь в сверхпроводнике по росту температуры

Образец находится в криостате, в котором температура хладагента  $T_B$  постоянна. Центральная часть образца покрыта слоем теплоизоляции для устранения теплообмена между сверхпроводником и хладагентом и создания таким образом адиабатических условий [57]. Датчик температуры установлен посередине образца, потенциальные контакты установлены симметрично относительно середины образца на расстоянии  $L$ , равному длине адиабатической части. Распределение температуры по длине образца представляет собой гиперболическую функцию от координаты, в которой самая высокая температура  $T_0$  находится в середине образца (в месте установки датчика).

В таком случае потери рассчитываются из зависимости распределения температуры:

$$P = \frac{8 \cdot k \cdot A(1 - \lambda) \cdot |T_0 - T_b|}{L^2} \quad (1.10)$$

где  $\lambda$ ,  $k$  и  $A$  - коэффициент заполнения, коэффициент теплопроводности и поперечное сечение образца соответственно. Для данного выражения принято допущение, что температура возрастает незначительно и теплопроводность  $k$  не зависит от температуры, таким образом, для случая, когда потери вызывают значительный нагрев образца, эта методика неэффективна. Тем не менее, измерить потери возможно и в такой ситуации, но требуется дополнительная калибровка термометра.

Важно отметить, что эта методика пригодна только для небольших внешних магнитных полей, так как магнитное поле значительно влияет на точность датчиков температуры.

### 1.8.1.2 Измерение роста температуры с помощью оптоволоконной брэгговской решётки

Волоконная брэгговская решетка представляет собой участок оптического волокна, в сердцевине которого показатель преломления периодически изменяется в продольном направлении [58]. Датчик такого типа [59] применяется для измерения микродеформаций, диаметр волокна составляет всего 250 мкм, благодаря чему температурный баланс между образцом и датчиком достигается очень быстро. При изменении температуры длина волны изменяется согласно следующей формуле:

$$\Delta\lambda_B = \alpha_T \cdot \Delta T \quad (1.11)$$

где  $\alpha_T$  – температурный коэффициент, определяемый из зависимости  $\alpha_T = \lambda_B(\alpha + \zeta)$ ,  $\lambda_B$  – длина волны оптоволоконна. При комнатной температуре для волокна из диоксида кремния, легированного германием, коэффициенты  $\alpha$  и  $\zeta$  равны  $0.55 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  и  $7.1 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  соответственно. Зависимость  $\Delta\lambda_B$  линейна для температур выше 60 К, поэтому применение оптоволоконна наиболее оправданно при температуре жидкого азота.

В установке для измерений один конец оптоволоконной брэгговской решетки закреплен на образце, другой находится в криостате в свободном состоянии. Таким образом, механические напряжения в оптоволоконной брэгговской решётке будут вызваны только нагревом образца. Перед началом измерений производится калибровка: к образцу прикладывается внешнее магнитное поле, достаточное для перехода образца в нормальное состояние, затем в образец вводится постоянный ток. По напряжению на потенциальных контактах определяется мощность, выделяемая на образце, и, соответственно, зависимость коэффициента  $\Delta\lambda_B$  от выделяемой мощности.

### 1.8.1.3 Измерение потерь по скорости испарения хладагента

Потери в сверхпроводнике можно определить по объему испарившегося хладагента [60]. Если обозначить объемную теплоемкость сверхпроводника  $\gamma C(T)$ , то потери в нем можно определить через изменение энтальпии хладагента:

$$P = A \cdot f \cdot \int_{T_b}^{T_m} \gamma C(T) dT = A \cdot f \cdot (H(T_m) - H(T_b)), \quad (1.12)$$

где  $A$  – эффективное сечение образца,  $f$  – частота переменного тока или переменного магнитного поля,  $T_m$  – усредненная температура образца,  $T_b$  – температура хладагента в криостате,  $H(T)$  – энтальпия хладагента при данной температуре. Потери в сверхпроводнике определяются после калибровки установки по зависимости расхода газа от нагревателя известной мощности.

На рисунке 1.17 схематично изображен данный калориметрический метод измерения потерь.

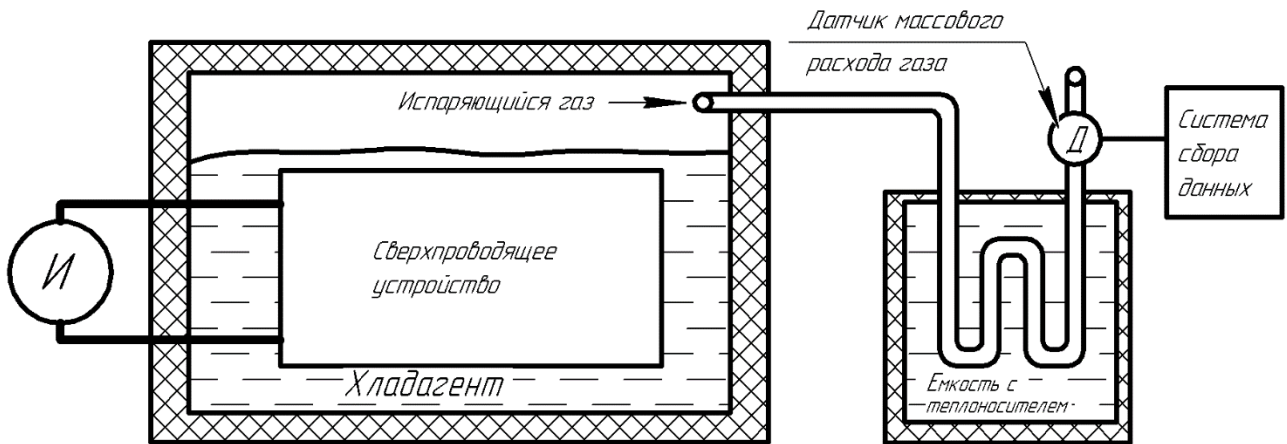


Рисунок 1.17 – Схема установки для измерения объема испарившегося хладагента

Криостат обязан быть немагнитным и непроводящим, так как поля от сверхпроводника вызовут вихревые потери в любых конструкциях из ферромагнитных материалов. Данный метод подходит для измерения потерь в экспериментах с самыми сложными электромагнитными условиями, а также для

измерения потерь в крупногабаритных устройствах, таких как ВТСП катушки или изделия из них. Основными недостатками методики являются ее низкая скорость и точность, так как величина потерь в СП изделии определяется по сопоставлению полученного значения расхода газа с калибровочной кривой.

## ***1.8.2 Электрические методы измерения потерь***

### **1.8.2.1 Метод с использованием измерительной катушки**

Измерительная установка состоит из источника переменного тока, криостата, сверхпроводящего магнита, создающего переменное магнитное поле, измерительной катушки, компенсационной катушки, компенсационной цепи, изолирующих усилителей и системы сбора данных (рисунок 1.18). Образец сверхпроводника установлен концентрично с измерительной и компенсационной катушками, причем компенсационная катушка находится внутри измерительной, за счет чего не только компенсирует наводимую в измерительной катушке ЭДС, но и измеряет переменное магнитное поле [61].



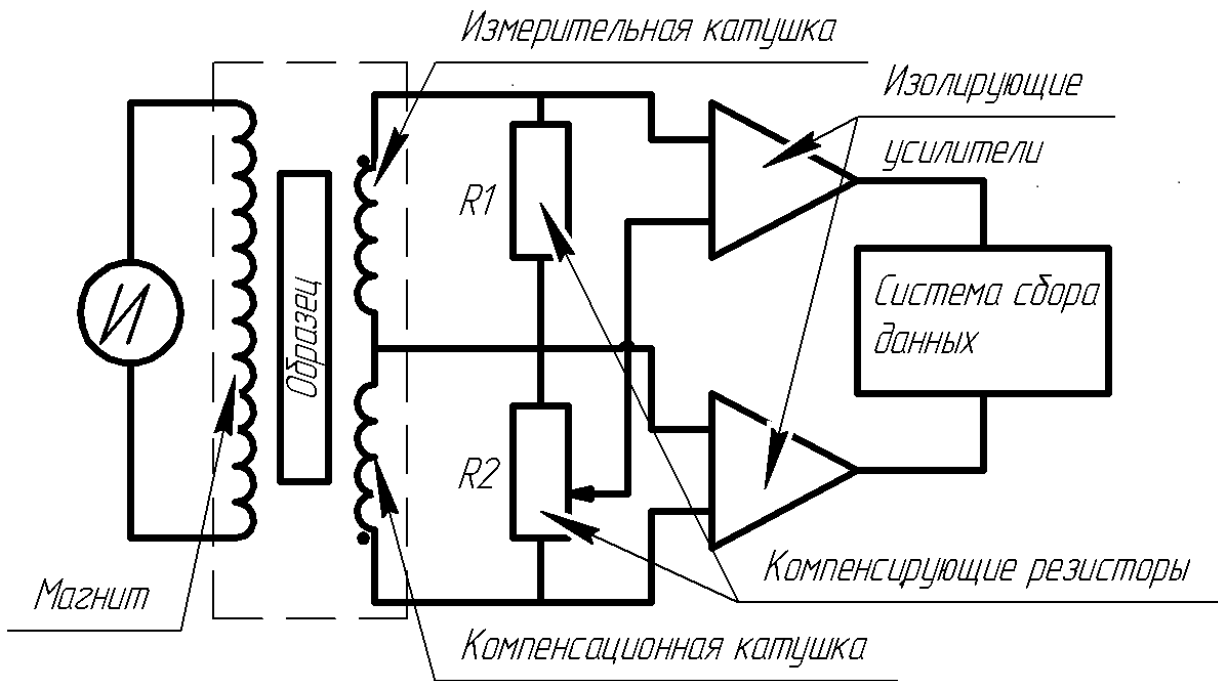


Рисунок 1.18 – Схема установки для измерения гистерезисных потерь в сверхпроводнике компенсационным методом.

Компенсационная цепь (состоящая из безындуктивных резисторов) служит для обнуления сигнала в случае, если образец отсутствует. Длина измерительных и компенсационных катушек должна быть одинаковой, но меньше длины образца как минимум втрое. На некоторой частоте переменное магнитное поле, создаваемое СП магнитом, может быть определено при помощи компенсационной катушки. В этом случае разница напряжений между измерительной и компенсационными катушками определяется уравнением  $V = (V_p - kV_c)$ , где  $V_p$  и  $V_c$  – это ЭДС, наводимые в измерительной и компенсационной катушках внешним магнитным полем  $H_e$ ,  $k$  является подстроечным коэффициентом. Разница напряжений  $V$  равна нулю, когда образец отсутствует.

Одновременно, внешнее магнитное поле  $H_e$  вычисляется путем интегрирования  $V_c$ , так как магнитное поле образца много меньше внешнего магнитного поля.

В результате, потери в образце, находящемся во внешнем магнитном поле, определяются путем измерения напряжений на измерительной и компенсационной катушке с последующим вычислением по формуле:

$$P = -\frac{A_s}{V_s \cdot n_p} \frac{G}{T} \int_0^T (V_p - kV_c) H_e dt, \quad (1.13)$$

где  $V_s$  и  $A_s$  – это объем образца и площадь, охваченная СП магнитом,  $G$  – геометрический коэффициент, который необходим из-за неизбежности технологических погрешностей (например, неидеальная соосность катушек) в измерительной установке,  $n_p$  – число витков на единицу длины измерительной катушки,  $T$  – период изменения внешнего магнитного поля.

### 1.8.2.2 Измерения с использованием синхронного усилителя

Синхронный усилитель используется в дополнение к четырехконтактной схеме измерений. На рисунке 1.19 изображена схема установки [62], состоящая из источника переменного тока, криостата, безындуктивного резистора, компенсационной катушки (катушки Роговского), синхронного усилителя и системы сбора данных.

Потенциальные контакты, установленные на образце, и контакты компенсационной катушки включены встречно, затем поданы на вход синхронного усилителя. Опорный сигнал усилителя снимается с безындуктивного резистора, который также может служить для измерения действующего тока  $I_\Delta$ . Потери (Вт/м) вычисляются по формуле:

$$P = \frac{I_\Delta \cdot V_\Delta}{L}, \quad (1.14)$$

где  $I_0$  – действующее значение тока,  $V_0$  – действующее значение напряжения, являющееся выходным сигналом синхронного усилителя, и  $L$  – длина образца между потенциальными контактами.

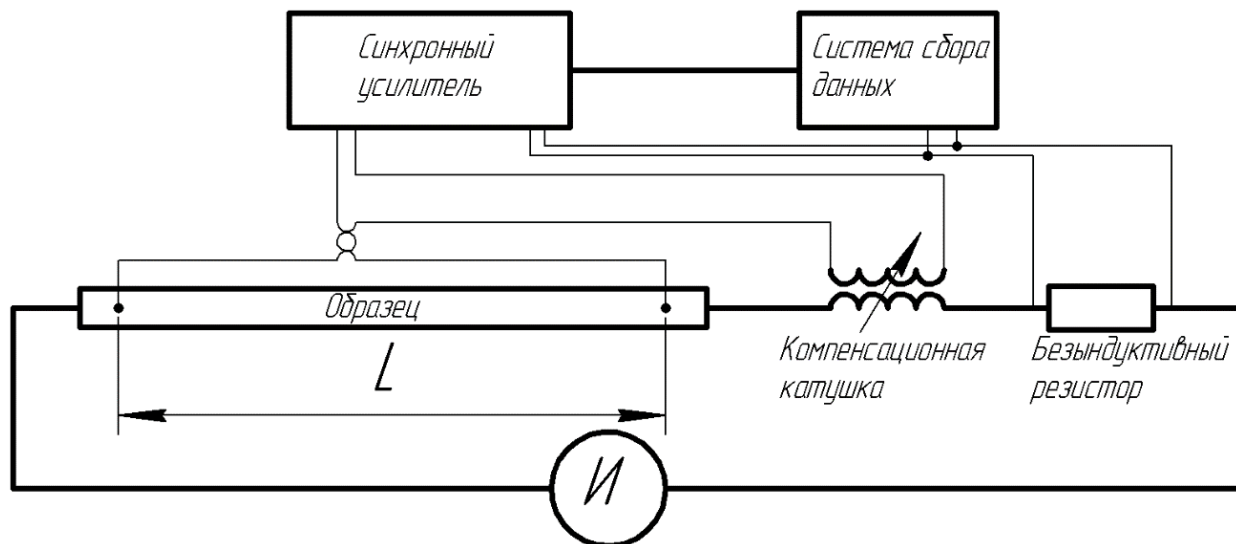


Рисунок 1.19 - Измерение потерь образца в собственном поле с использованием синхронного усилителя

Если в дополнение к предыдущей системе добавить СП магнит, создающий переменное магнитное поле, тогда потери определяются по методике измерения потерь от внешнего магнитного поля по формуле 1.13, а потери от транспортного тока по формуле 1.14. Полные потери представляют собой алгебраическую сумму двух типов потерь.

### 1.8.2.3 Прямой электрический метод

В данном методе используется классическое определение потерь в системе с током  $I$  и напряжением  $V$ . Потери являются интегралом [63] мгновенной мощности за единицу времени:

$$P = \frac{1}{t} \int_0^t V(t) \cdot I(t) \cdot dt \quad (1.15)$$

Ниже, на рисунке 1.20, приведен пример испытательного стенда, который использовался для измерения потерь прямым электрическим методом в кабелях [64], разработанных и изготовленных в ОАО «ВНИИКП» [65,66].

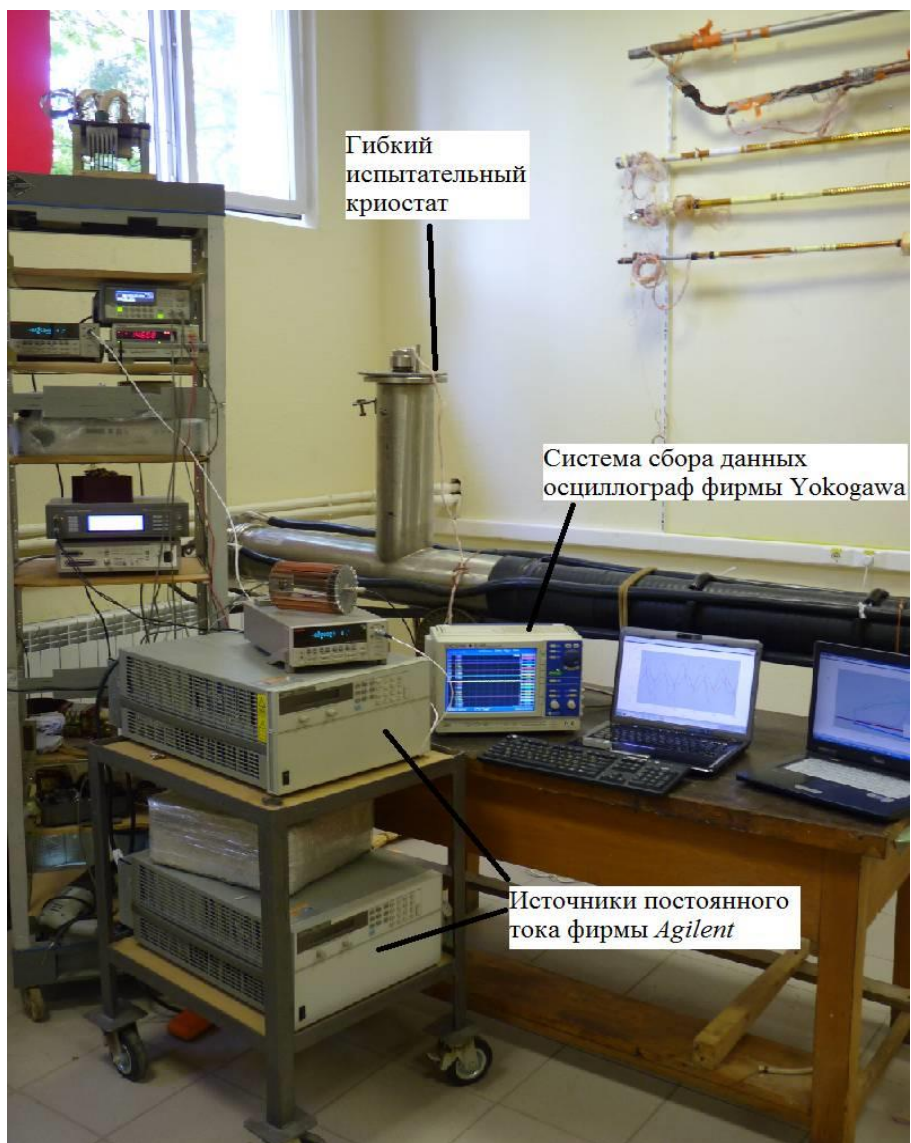


Рисунок 1.20 – Испытательный стенд измерения потерь электрическим методом в кабелях

В качестве системы сбора данных используется цифровой осциллограф, имеющий 16 каналов записи:

- 8 скоростных каналов с минимальным разрешением 50 мкВ, имеющие частоту опроса на канал до 10 МГц.
- 8 чувствительных каналов с минимальным разрешением 1 мкВ и частотой опроса на канал до 500 Гц.

Измерительный комплекс обеспечивает измерение:

- токов кабеля постоянного и переменного, ток измеряется с помощью безындуктивных шунтов, использование которых необходимо для точного определения потерь на переменном токе в модели кабеля; пределы измерения от 100 мА до 10 кА с точностью 0,3%;
- напряжений, как на всем кабеле, так и на его частях; пределы измерения от 100 нВ до 200 В с точностью 0,2%;
- распределения токов и магнитных полей с помощью катушек Роговского и датчиков Холла.

## 1.9 ВЫВОДЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Проведенный обзор отечественных и зарубежных источников показал, что реализация систем электродвижения подвижных объектов невозможна без применения в их составе электромеханических преобразователей с высокой удельной мощностью.
- Создание электромеханических преобразователей с высокой удельной мощностью (более 10-20 кВт/кг) возможно только с использованием современных ВТСП материалов.
- Применение ВТСП материалов в качестве обмоток якоря электрических машин делает актуальной задачу расчета и исследования потерь в обмотках при питании их переменным током и напряжением.
- Рассмотрены основные методы расчета и измерения потерь в ВТСП обмотках при питании их переменным током и напряжением.
- Определена основная задача исследования – теоретическое и экспериментальное исследование потерь в ВТСП обмотках электрических машин.

## ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ И СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ В ОБМОТКАХ НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

### 2.1 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ В ОБМОТКАХ И СТОПКАХ ВТСП ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Численное моделирование потерь в устройствах на основе ВСП, в том числе в обмотках ЭМ или стопках на основе 2G ВТСП лент, представляет собой задачу, для решения которой необходимо использовать нестационарные уравнения электродинамики Максвелла:

$$\operatorname{rot} H = J, \quad \operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad \operatorname{div} B = 0 \quad (2.1)$$

$$B = \mu \mu_0 H, \quad J = \frac{E}{\rho} \quad (2.2)$$

где  $B$  и  $H$  – индукция и напряженность магнитного поля (для магнитных материалов, если зависимость  $B=B(H)$  нелинейная, используются измеренные значения),  $E$  – напряженность электрического поля,  $J$  – плотность тока,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость,  $\rho$  – сопротивление. Для сверхпроводника сопротивление зависит от плотности тока  $\rho=\rho(J)$ , для определения которого в дальнейшем использована степенная функция или модель Бина.

Для обмоток электрических машин на основе 2G ВТСП лент должны быть учтены следующие факторы: высокое значение отношения длины к толщине сверхпроводящего слоя, значительная нелинейность зависимости сопротивления от плотности тока в ВТСП материалах, зависимость потерь в тонком

сверхпроводящем слое как от значения транспортного тока, так и от величины и направления внешнего магнитного поля. В 2G ВТСП ленте дополнительно необходимо учитывать:

- неоднородность критической плотности тока по ширине ВТСП слоя ленты  $J_{c0}(x)$ , где  $x$  – координата вдоль ширины ВТСП слоя;
- гистерезисные явления магнитной подложки;
- критическая плотность тока на краях ВТСП слоя при отсутствии внешнего поля может быть значительно ниже, чем в ее середине;
- для магнитной подложки 2G ВТСП ленты необходим учет ее нелинейных анизотропных магнитных свойств.

Конечно-элементная модель для расчета потерь в 2G ВТСП кабелях, использующая программный комплекс ANSYS [67], была разработана ранее [50]. Однако для расчета потерь в стопках лент (поперечном сечении ВТСП катушки) данная модель нуждается в модернизации.

Тепловыделения в ВТСП обмотке состоят из: гистерезисных потерь, обусловленных проникновением магнитного потока в сверхпроводящий слой; гистерезисных потерь в материалах, обладающих магнитными свойствами; потерь от вихревых токов в металлических частях ВТСП катушки. Таким образом, для расчетов необходимо использовать нестационарный электромагнитный анализ (анализ переходных процессов). Разработанная в среде ANSYS численная модель использует параметрический язык APDL (ANSYS Parametric Design Language) – эффективный инструмент для инженерных расчетов двух- и трехмерных моделей переходных электромагнитных процессов в различных устройствах. Для таких задач в ANSYS реализована формулировка в терминах векторного магнитного потенциала с тремя степенями свободы в непроводящих зонах; в проводящих зонах добавлена еще одна степень свободы — это интегрируемый по времени электрический потенциал (именуемый в зарубежной литературе как «А, V-A



formulation»). ANSYS позволяет рассчитывать распределение вихревых токов в любых традиционных проводящих средах без учета нелинейности их проводимости. Помимо этого, система ANSYS может вести расчет для анизотропных магнитных материалов с нелинейными свойствами, так как предусмотрен алгоритм задания  $B(H)$  – кривых намагничивания; следовательно, становится возможным вычисление гистерезисных потерь в таких материалах. К примеру, данная особенность была использована для расчета тепловыделений в NiW подложке 2G ВТСП лент силового кабеля [68].

Для точного моделирования гистерезисных потерь в сверхпроводящем слое 2G ВТСП ленты необходимо учитывать сильную нелинейную зависимость его сопротивления от плотности тока (параметр нарастания  $n > 20$ ), для чего требуется большое количество итераций. Кроме того, очень высокое (более 1000:1) отношение ширины к толщине сверхпроводящего слоя приводит к появлению значительного количества элементов с малыми линейными размерами в расчетной модели. Сочетание этих факторов превращает задачу вычисления гистерезисных потерь в крайне сложную, требующую значительных объемов памяти и машинного времени для вычислений. Выходом из ситуации является применение 2D моделей.

Нелинейное соотношение между сопротивлением и плотностью тока в сверхпроводнике в данном случае будет описываться следующим степенным законом:

$$\rho\left(J, \vec{B}, x\right) = \frac{E_0}{J_c\left(\vec{B}, x\right)} \left[ \frac{J}{J_c\left(\vec{B}, x\right)} \right]^{n-1} \quad (2.3)$$

Где  $E_0 = 1$  мкВ/см;  $n$  – параметр нарастания (переходный индекс) вольтамперной характеристики сверхпроводника. Зависимость критической

плотности тока от величины и направления магнитного поля и координаты вдоль ширины ВТСП слоя ( $x$ ) можно представить следующим образом:

$J_c(\vec{B}, x) = J_c(B, \theta, x) = J_c(B, \theta) \cdot J_{c0}(x)$ , где  $\theta$  – угол ориентации магнитного поля относительно нормали ВТСП ленты. Для определения  $J_c(B, \theta)$  используется выражение из работы [69]. Для описания неравномерности критической плотности тока по ширине ленты в собственном магнитном поле  $J_{c0}(x)$  использована кусочно-линейная функция.

Зависимость  $J_{c0}(x)$ , как правило, симметрична относительно середины ленты [13] и определяется уравнением:

$$J_{c0}(x) = J_{c0c} \cdot \begin{cases} 1, & \text{если, } |x| < h_w \cdot w / 2 \\ \left(1 - \frac{2|x|}{w}\right) \frac{1-h_J}{1-h_w} + h_J, & \text{если, } |x| \geq h_w \cdot w / 2, \end{cases} \quad (2.4)$$

где  $0 < h_J < 1$ ,  $0 < h_w < 1$  являются входными параметрами кусочно-линейной функции [50],  $J_{c0c}$  – зависимость плотности критического тока, отсчитываемая от центра ВТСП слоя до  $h_w$ ; если был измерен только критический ток ленты  $I_c$ , то  $J_{c0c}$  определяется выражением:  $J_{c0c} = \int_0^w J_{c0}(x) dx = I_c / \delta_{hts}$ , где  $w$  и  $\delta_{hts}$  – это ширина и толщина ВТСП слоя ленты.

Таким образом, зависимость критической плотности тока от величины и направления магнитного поля и координаты вдоль ширины ВТСП слоя ленты можно определить следующим выражением:

$$J_c(\vec{B}, x) = J_c(B, \theta, x) = J_c(B, \theta) \cdot J_{c0}(x) = \frac{\alpha J_{c0}(x)}{\left(1 + \left(k^2 \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)\right)^{0.5} \frac{B}{B_0}\right)^\beta}, \quad (2.5)$$

где  $k$ ,  $B_0$  и  $\beta$  – параметры для аппроксимации  $J_c(B, \theta)$ , параметр  $\alpha$  учитывает, что критический ток ( $I_c$ ) ленты отличается от измерений образца ленты в собственном поле.

Для реализации алгоритма расчета потерь необходимо включить в численную модель вышеупомянутые зависимости (2.3 – 2.5). На рисунке 2.1 показан пример конечно-элементной сетки МКЭ модели стопки из 5 ВТСП лент. Это возможно при использовании итерационного алгоритма, основанного на том, что проникновение магнитного поля в сверхпроводник можно представить как изменение распределения вихревых токов в обычном проводнике, состоящем из множества элементов с конечными сопротивлениями [70].

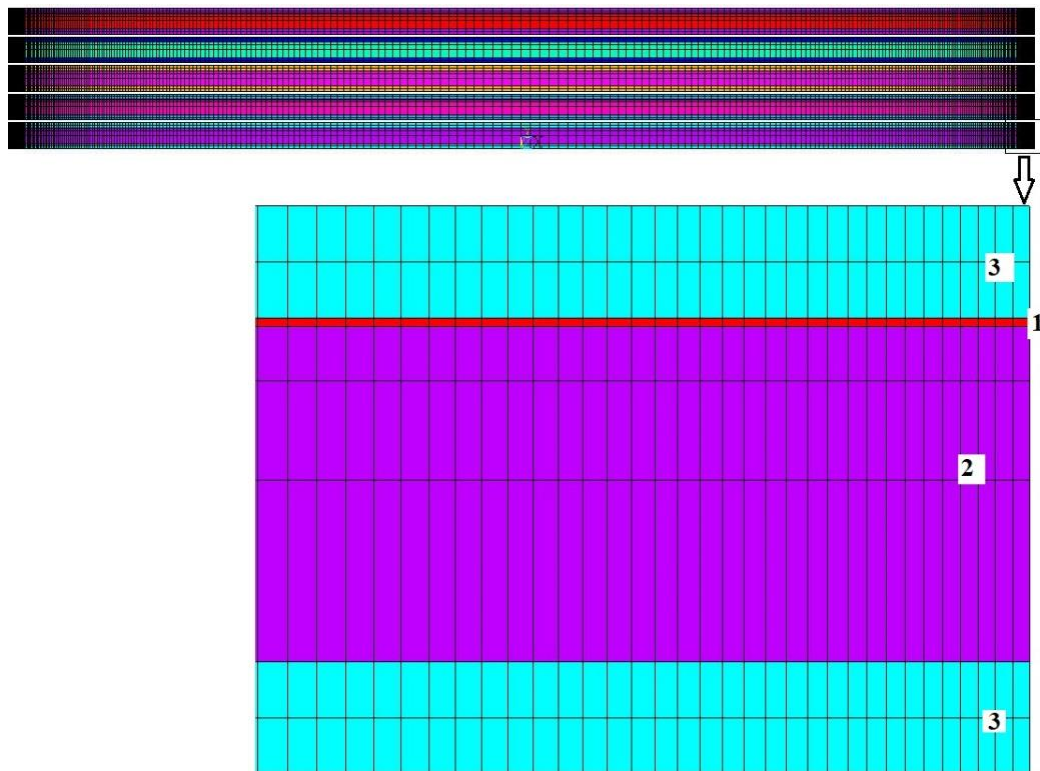


Рисунок 2.1 – Пример конечно-элементной сетки из МКЭ модели стопки из 5 ВТСП лент. На выделенном стрелкой укрупненном участке одной ленты «1» – ВТСП слой, «2» – подложка, «3» – стабилизирующие слои

На начальном этапе, после создания конечно-элементной сетки (рисунок 2.1), каждому элементу ВТСП слоя ( $i$ ) задается соответствующее сопротивление ( $\rho_i^0$ ). Затем рассчитывается плотность тока ( $J_i$ ) в каждом элементе сетки. Далее, итеративным методом, сопротивление каждого элемента пересчитывается по следующему степенному закону:

$$\rho_i^0, \quad \rho_i^{k+1} = f(\rho_i^k) = \frac{E_0}{J_{c,i}} \left( \frac{J_i^k}{J_{c,i}} \right)^{n-1} \quad (2.6)$$

Критерий окончания итерационного процесса для каждого элемента сопротивления определяется выражением  $\frac{\rho_i^{k+1} - \rho_i^k}{\rho_i^k} < \zeta$ .

Для 2G ВТСП слоя ленты минимальными начальными значениями для  $\rho_i^0$  и для  $\zeta$  принято  $10^{-17}$  Ом·м и  $10^{-4}$  соответственно.

В процессе расчета сопротивления  $\rho_i^{k+1}$  на  $k+1$  итерации по закону (4) удобно пользоваться релаксационным фактором  $\alpha = 0,1$ :

$$\rho_i^{k+1} = \rho_i^k + \alpha \cdot (\rho_i^{k+1} - \rho_i^k) \quad (2.7)$$

Для решения уравнений вида  $\rho = f(\rho)$  можно использовать известный метод простых итераций или метод последовательных приближений. В итоге, по завершении всех итераций, гистерезисные потери в ВТСП слое за цикл на единицу длины определяются следующим выражением:

$$Q = 4 \cdot \sum_{i_1}^{N_1} \Delta\tau \sum_i^N J_i \rho_i, \quad (2.8)$$

где  $N$  – число элементов сетки, представляющих ВТСП слой,  $N_1$  – номер временного интервала для значений тока от 0 до амплитуды транспортного тока  $I_m$ , что соответствует 1/4 периода,  $\Delta\tau$  – шаг по времени.

Также для сокращения времени, требуемого для расчета, были использованы стандартные методы оптимизации:

• Метод Бина, когда при порядковом номере итерации для резистивности на  $k+1$  итерации для каждого ( $i$ )-го элемента сетки используется выражение:

$$\rho_i^{k+1} = \rho_i^k \frac{J_i^k}{J_{c,i}} \quad (2.9)$$

• Для ускорения сходимости выражений вида  $\rho = f(\rho)$  можно использовать метод Вегстейна [71], который и был использован в разработанной модели:

$$\begin{aligned} \rho_i^0, \quad \rho_i^1 = f(\rho_i^0) \\ \rho_i^{k+1} = f(\rho_i^k) + \frac{(f(\rho_i^k) - f(\rho_i^{k-1})) \cdot (f(\rho_i^k) - \rho_i^{k-1})}{(f(\rho_i^k) - f(\rho_i^{k-1})) - (\rho_i^k - \rho_i^{k-1})}, \quad k \geq 2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Следует отметить, что помимо собственно ускорения сходимости метод Вегстейна сходится при условиях, когда не достигается сходимость методом простых итераций.

Так как потери в ВТСП слоях являются гистерезисными, следовательно, при пересчете на цикл, не зависят от частоты. Потери однозначно определяются профилями плотности тока в ВТСП слоях и максимальной амплитудой протекающего тока. Независимость от частоты открывает возможность провести расчет только по одному временному интервалу для временного расчета для амплитудного значения тока  $I_m$ , или, иными словами, на  $\Delta\tau = 1/4$  периода тока. Для расчета гистерезисных потерь возможно использовать векторный потенциал. Основой данного метода является наличие «электрического центра» или «ядра», то есть региона или линии внутри сверхпроводника, где электрическое поле остается нулевым в течении всего периода тока. Тогда потери в ВТСП слое на

единицу длины и за один период протекающего тока могут быть представлены в виде:

$$Q = 4 \cdot \sum_i^N J_i (A_{z,i} - A_{z,0}) s_i, \quad (2.11)$$

где  $A_{z,i}$  есть магнитный векторный потенциал в узле ( $i$ ) каждого из элементов сетки, а  $A_z$  – магнитный векторный потенциал в узле рядом с ядром.

С использованием методов 1-3 для расчета потерь на заданном значении протекающего тока максимальное число итераций составляет от 5 до 40 до наступления сходимости (при  $\zeta = 10^{-4}$ ).

Если подложка в 2G ВТСП ленте магнитная, ток в ней, как и в любом магнитном материале, вызывает гистерезисные потери из-за нелинейного характера процесса и различий при намагничивании и размагничивании. За время цикла  $T$  площадь, охватываемая кривой намагниченности в координатах  $B(H)$ , представляет гистерезисные потери энергии в единице объема:

$$W_h = \int_T H dB \quad (2.12)$$

Так как в качестве подложки 2G ВТСП ленты используется сплав NiW, необходимо знать его зависимость  $B(H)$ . Данная зависимость была измерена в ОАО «ВНИИКП» и приведена в работе [68].

## 2.2 ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ В СТОПКАХ И ОБМОТКАХ ВТСП ЛЕНТ

Для измерений потерь в стопках и обмотках ВТСП лент был разработан специализированный испытательный стенд [72]. На его основе проведены эксперименты по измерению потерь в стопке лент, имитирующей линейный участок ВТСП катушки типа рейстрек. Ленты от 1 до  $N_t$  (число зависит от

эксперимента) с расстоянием в 200 мм между потенциальными контактами изолированы друг от друга полиимидной изоляцией и собраны в стопку. Концы лент разведены друг от друга для обеспечения индивидуального токоподвода к каждой ленте (рисунок 2.2). Исследуемая линейная часть стопки лент выделена на рисунке фигурной скобкой, а узел, фиксирующий ленты слева, не отображен для наглядности.

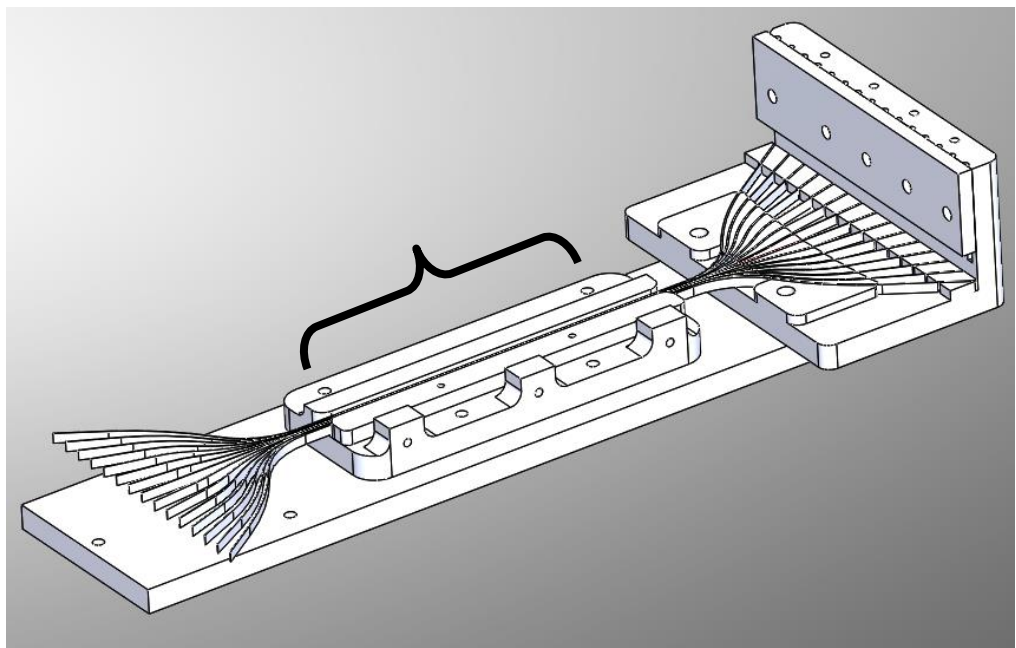


Рисунок 2.2 – 3D модель установки для испытаний лент и стопок. Узел, фиксирующий ленты слева, не отображен. Фигурной скобкой показан рабочий участок, на котором проводятся измерения

На рисунке 2.3 показана фотография припаянных к лентам индивидуальных токовводов.

В реальной катушке ленты в такой стопке соединены последовательно (так как представляют собой витки одного проводника, которым намотана катушка), но в рамках эксперимента для этого потребовалось бы соединить между собой

концы и начала всех лент в стопке при помощи длинных проводников, которые создадут множественные контуры с током, что, в свою очередь, приведет к возникновению помех в сигналах, снимаемых с потенциальных контактов. Для исключения эффектов, связанных с перераспределением тока в стопке из параллельных ВТСП лент используются балансирующие резисторы ( $R_{b_1} \dots R_{b_n}$ ), подобранные таким образом, что их сопротивление различается не более, чем на 2%. Резисторы подключены к индивидуальным токовводам лент.

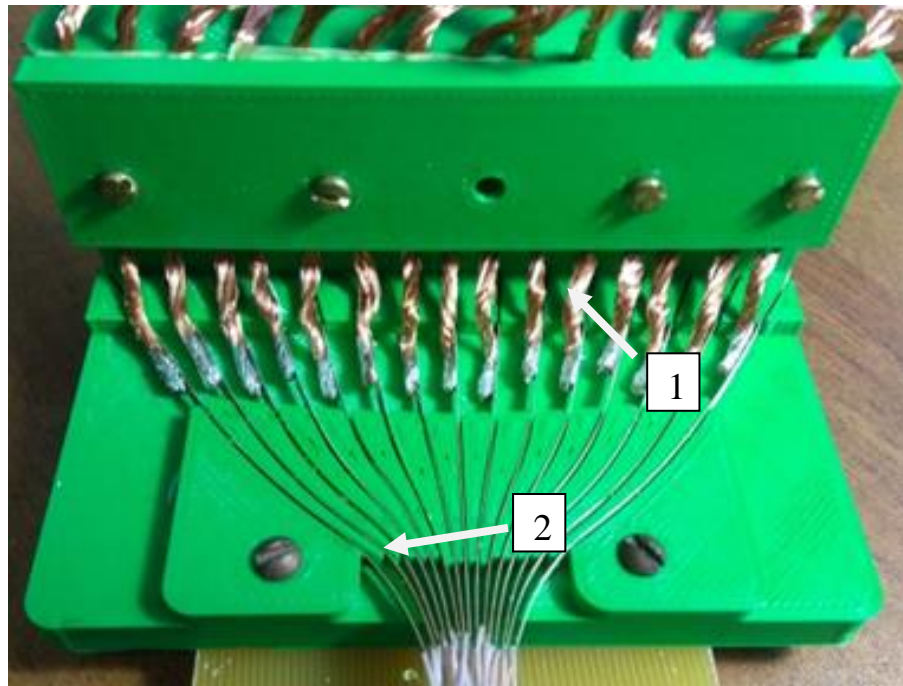


Рисунок 2.3 – Фотография собранного токоввода: 1 – концы лент с индивидуальными медными токовводами; 2 – зона припайки потенциальных контактов

Электрическая схема стенда изображена на рисунке 2.4. Программируемый источник «И» может отдавать в нагрузку ток до 4 кА с частотой от 17 до 400 Гц. Сигналы с потенциальных контактов от каждой из ВТСП лент в стопке, а также от датчика тока «Д» записываются системой сбора данных с частотой 1 млн выборок в секунду.



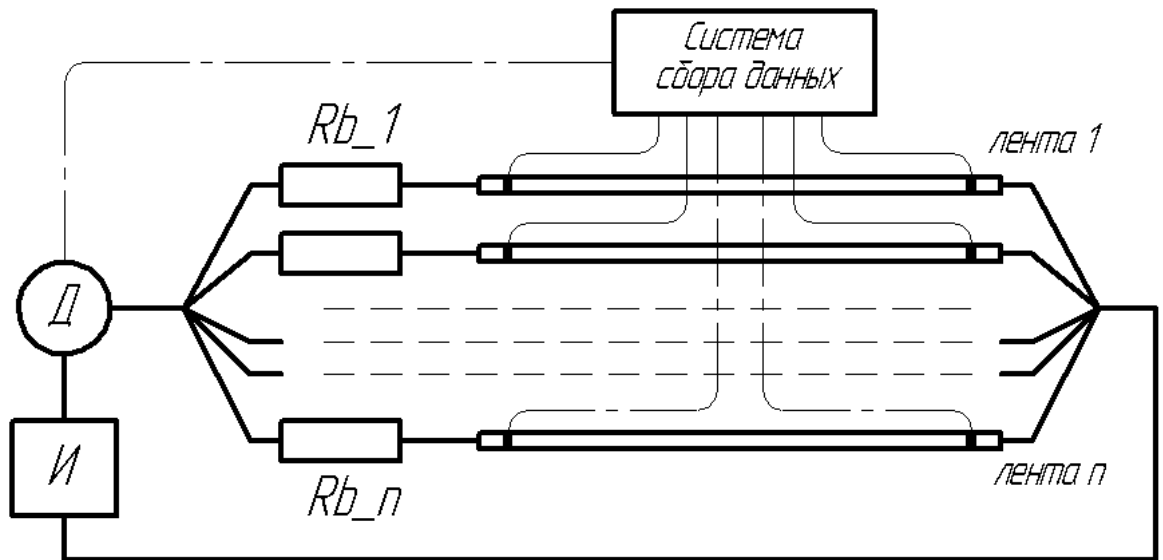


Рисунок 2.4 – Электрическая схема измерительного стенда

Затем записанные сигналы обрабатываются на персональном компьютере (ПК), электрические потери вычисляются по формуле:

$$P = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} u \cdot i \cdot dt, \quad (2.13)$$

где  $u$ ,  $i$  – мгновенные значения тока и напряжения в одной ленте,  $t_m$  – временной интервал, состоящий из нескольких периодов (для повышения точности).

### 2.3 СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Первоначально сравнение было проведено для следующих конфигураций: одна лента и стопка из пяти лент. Для этого использовалась 2G ВТСП лента производства ЗАО «СуперОкс» со следующими характеристиками: поперечное сечение  $4 \times 0,1 \text{ мм}^2$ , критический ток  $I_c$  ( $1 \text{ мкВ/см}$ ,  $77,4 \text{ К}$ ) около  $110 \text{ А}$ , при этом параметр нарастания  $n \sim 26$ .

Для большей полноты также проведено сравнение с аналитическими моделями Норриса, которые позволяют рассчитать потери для одной ленты и

соответствуют случаю  $J_c = \text{const}$  (уравнения 1.7-1.8) [51], а также результатами моделирования потерь численным методом (известным в зарубежной литературе как «variational formulation»), приведенным в работах [73,74], который позволяет рассчитать потери в стопке ВТСП лент также для случая  $J_c = \text{const}$ .

На рисунке 2.5 показана зависимость измеренных потерь при температуре 77 К от амплитуды тока в сравнении с вышеуказанными моделями.

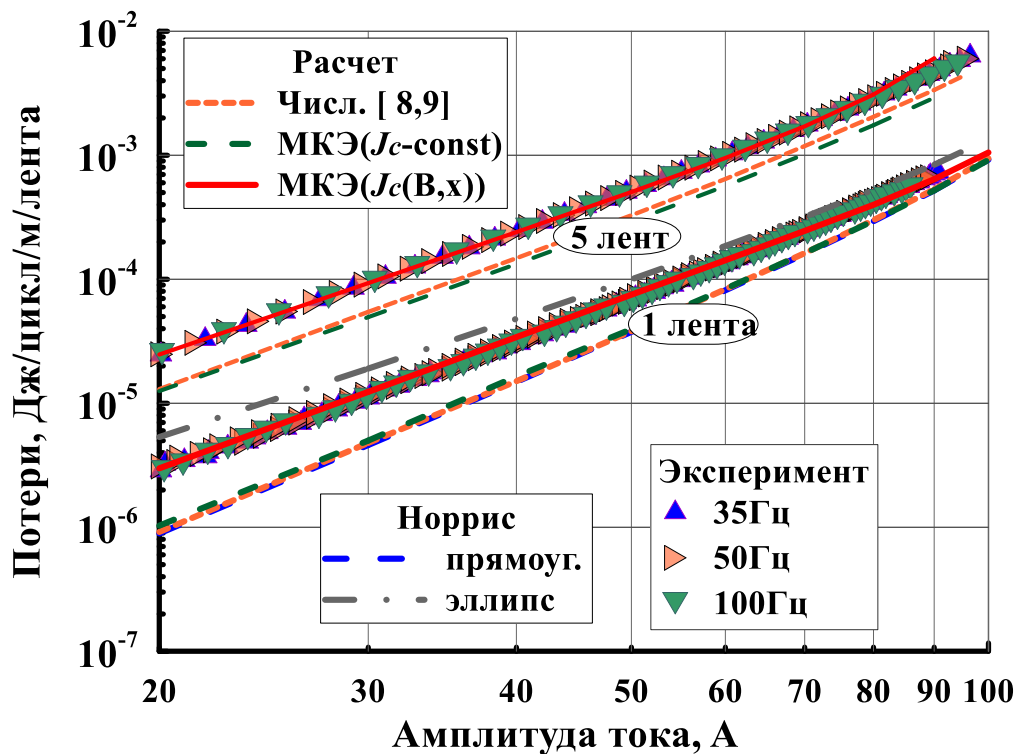


Рисунок 2.5 – Сравнение измеренных и вычисленных различными способами потерь для единичной ВТСП ленты и стопке из 5 ВТСП лент в зависимости от амплитуды тока. Расчеты проведены по разработанной МКЭ модели для варианта  $J_c = \text{const}$  и с учетом зависимости  $J_c(B, \theta, x)$ , а также по двум моделям Норриса и по численной модели из работ [73,74]. Экспериментальные данные обозначены символами, линиями – результаты расчета

Измерения проводились на разных частотах (35, 50 и 100 Гц). Расчеты для единичной ленты как по разработанной МКЭ модели с  $J_c = \text{const}$ , так и по модели

Норриса для прямоугольного сечения сверхпроводника и по модели из работ [73,74] показывают совпадение между собой с точностью до 2%. Также демонстрируют совпадение друг с другом расчеты по модели, представленной в работах [73,74], и по разработанной МКЭ модели, если  $J_c = const$  для стопки из пяти лент. Из рисунка 2.5 видно, что результаты, полученные путем расчета по разработанной модели, совпадают с экспериментальными данными только если правильно учтена зависимость  $J_c(B, \theta, x)$ .

Для достоверного расчета потерь в ВТСП слоях лент, собранных в стопку, очень важно определить коэффициенты зависимости критической плотности тока по ширине ленты, а также зависимость критической плотности тока от вектора магнитного поля  $J_c(B, \theta, x)$ . Если же эти параметры не известны заранее, то их можно установить из данных эксперимента. Для данной 2G ВТСП ленты измеренные параметры для функции  $J_c(B, \theta)$  составили:  $k = 2,05$ ,  $B_0 = 0,21$ ,  $\beta = 0,65$ . Для зависимости  $J_{c0}(x)$  использованы параметры  $h_J = 0,6$  и  $h_w = 0,85$ , а для учета собственного поля коэффициент  $\alpha = 1,05$ .

## 2.4 ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

- На основе проанализированных в главе 1 аналитических и численных моделей построена двухмерная конечно-элементная модель в среде ANSYS для расчета потерь в ВТСП лентах второго поколения, стопках и обмотках из данных лент, работающих на переменном токе.
- Разработан и создан специализированный стенд, а также методика измерений потерь на переменном токе в ВТСП лентах и стопках из данных лент.

- Проведены экспериментальные исследования потерь в стопке из ВТСП лент при питании их синусоидальным переменным током для верификации разработанной численной модели.
- Результаты расчета потерь по разработанной конечно-элементной модели сравнены как с результатами расчетов по другим известным аналитическим и численным методикам, так и с собственными экспериментальными данными для стопок лент в различной конфигурации. Показано, что для получения наиболее точных результатов расчета необходимо точное определение коэффициентов функции  $J_c(B, \theta, x)$ , описывающей как неравномерность критической плотности тока по ширине ленты, так и ее зависимость от вектора внешнего магнитного поля.

## ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В МОДЕЛЬНЫХ КАТУШКАХ НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

### 3.1 АНАЛИЗ ПОТЕРЬ В РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ СТОПОК ВТСП ЛЕНТ

В двухмерном подходе рейстректовую обмотку в линейной части можно представить как стопку ВТСП лент. В данном разделе приведены результаты экспериментов с 15 ВТСП лентами, собранными в одну стопку, и трех стопок, расположенных рядом по 5 лент в каждой. Использовалась 2G ВТСП лента компании «SuperOx» со следующими характеристиками: поперечное сечение  $3 \times 0,1 \text{ мм}^2$ , критический ток  $I_c$  ( $1 \text{ мкВ/см}$ ,  $77,4 \text{ К}$ ) составляет  $150 \text{ А}$  при значении параметра нарастания  $n \sim 36$ . Толщина изоляции между лентами составила  $60 \text{ мкм}$ .

Аналогично экспериментам, описанным в главе 2, измерения проводились на различных частотах. При пересчете измеренных потерь на один цикл отсутствует зависимость от частоты, что подтверждает их гистерезисную природу. Для расчета потерь в разработанную модель были заложены те же параметры функции  $J_c(B, \theta)$ , что и в главе 2. В зависимости  $J_{c0}(x)$  использовались значения  $h_J = 0,9$  и  $h_w = 0,85$ .

На рисунке 3.1 для конфигурации из трех стопок по пять лент приведено сравнение измеренных и рассчитанных потерь (в пересчете на метр длины) в зависимости от амплитуды тока. В таком же виде на рисунке 3.2 представлены потери для пакета из 15 лент.

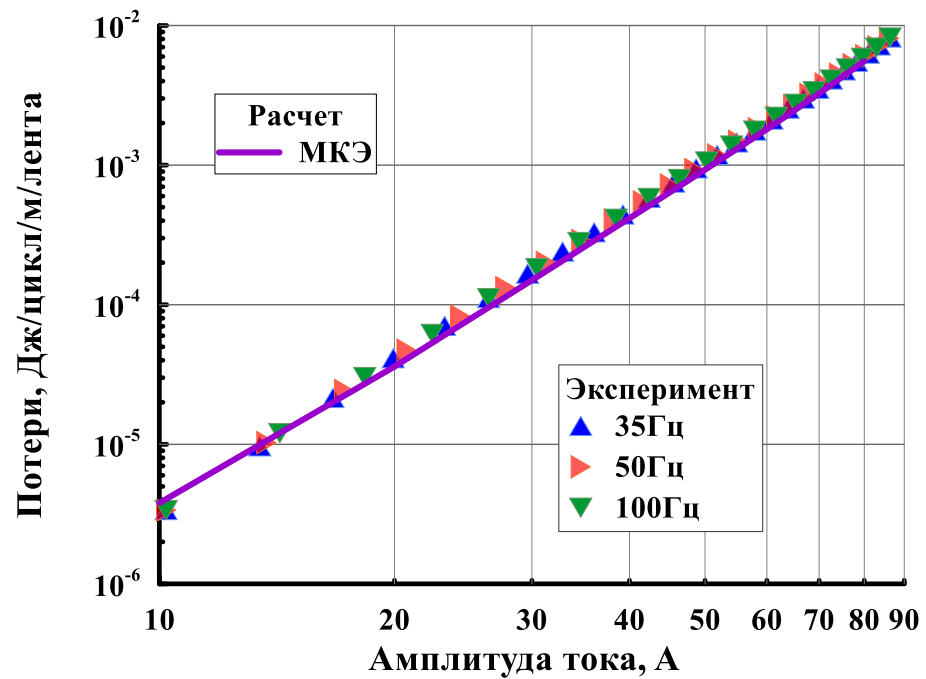


Рисунок 3.1 – Сравнение измеренных и рассчитанных потерь (на метр длины) в зависимости от амплитуды тока для конфигурации три пакета по пять лент

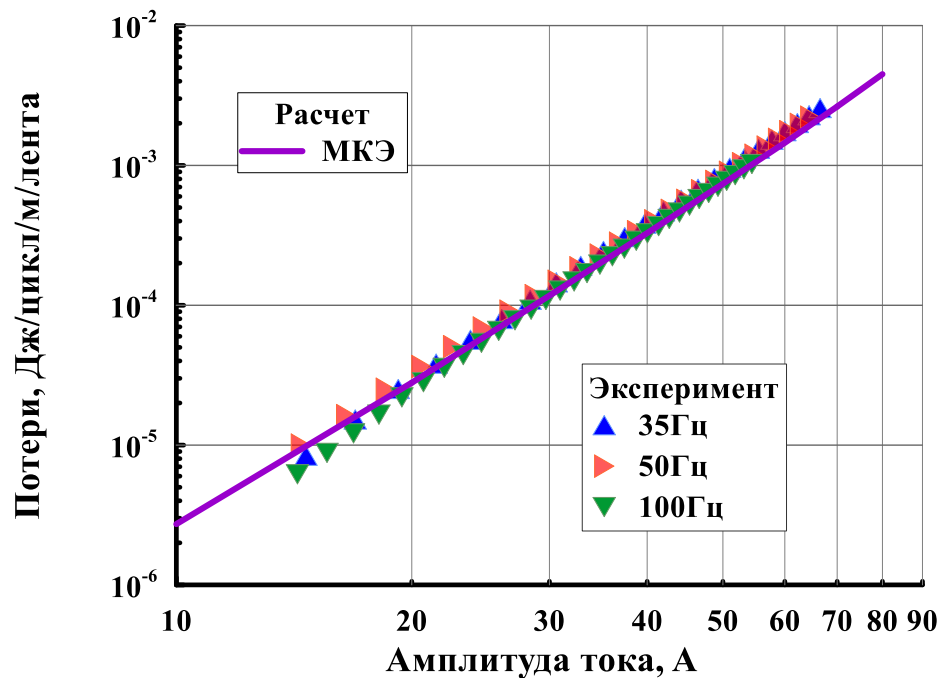


Рисунок 3.2 – Сравнение измеренных и рассчитанных потерь (на метр длины) в зависимости от амплитуды тока для 15 лент, сложенных в один пакет

Для обоих случаев характерно очень хорошее совпадение между разработанной моделью и результатами эксперимента (отклонение составляет несколько процентов), что объясняется введением в модель  $J_c(B, \theta, x)$  – зависимости плотности критического тока от вектора магнитного поля и ее неравномерности по ширине ленты (2.5).

На рисунках 3.3 и 3.4 изображено распределение магнитного поля для обеих конфигураций лент в момент времени, когда значение протекающего через них синусоидального тока принимает амплитудное значение 80 А.

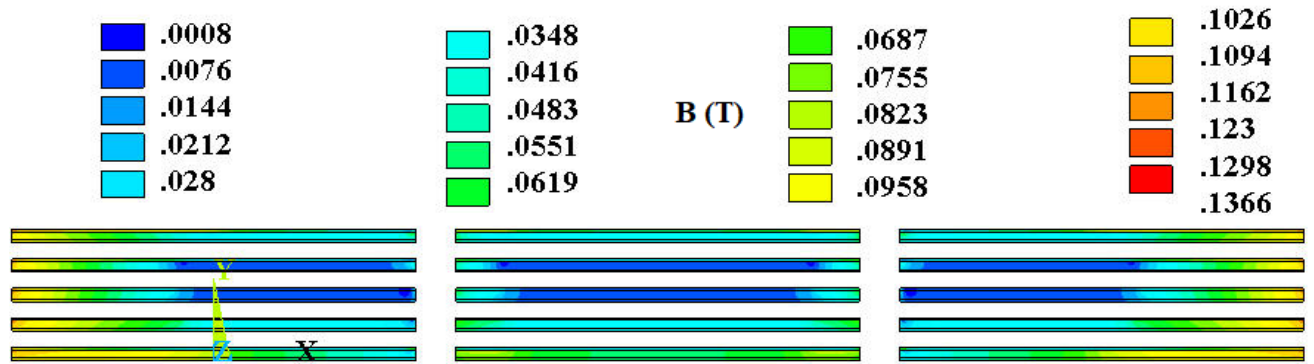


Рисунок 3.3 – Распределение магнитного поля в лентах конфигурации 3 стопки по 5 лент в момент, когда значение протекающего через них синусоидального тока принимает амплитудное значение 80 А

Для аналогичного момента времени на рисунке 3.5 показано распределение плотности тока в ВТСП слоях 15 лент, сложенных в одну стопку.

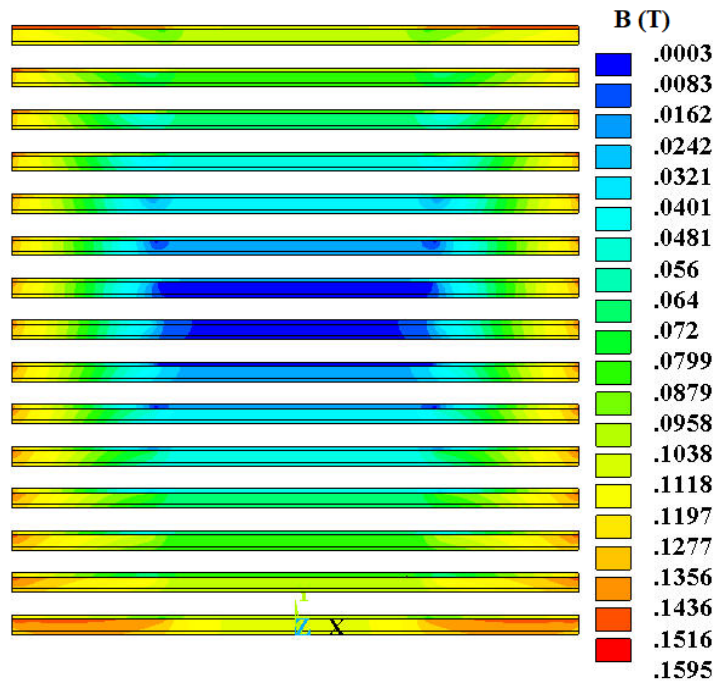


Рисунок 3.4 – Распределение магнитного поля в стопке из 15 ВТСП лент для момента времени, когда амплитуда тока составляет 80А

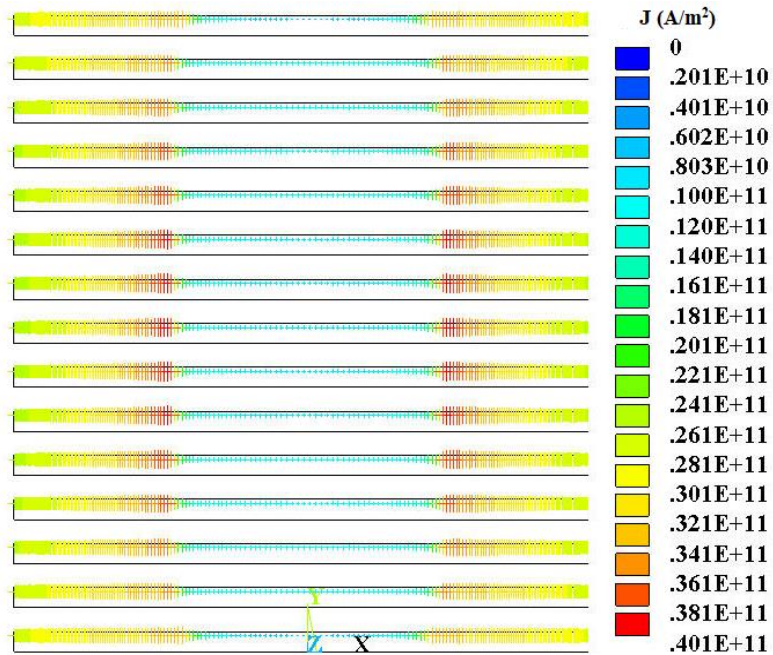


Рисунок 3.5 – Распределение плотности тока в ВТСП слоях в стопке из 15 лент для момента времени, когда амплитуда тока составляет 80А



## 3.2 АНАЛИЗ ПОТЕРЬ В КАТУШКАХ НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТ

Катушки обмоток электрических машин на основе ВТСП лент часто имеют форму рейстрека, в связи с чем было проведено сравнение экспериментальных данных и результатов расчета потерь для двух двойных рейстрековых катушек [72],[17]. Катушки имеют идентичные размеры каркаса: внутренний радиус лобовой части 10 мм, длина прямого участка 70 мм, полное число витков – 24, но отличаются производителем ленты: «SuperOx» [44] и «AMSC» [47].

### 3.2.1 Катушка типа двойной рейстрек на основе ВТСП ленты с немагнитной подложкой

Использованная при изготовлении 2G ВТСП лента имеет следующие параметры: поперечное сечение  $4 \times 0,1 \text{ мм}^2$ , критический ток  $I_c$  (1 мкВ/см, 77,4 К) составляет 150 А при значении параметра нарастания  $n \sim 30$ . Толщина изоляции составляет 15 мкм.

Для моделирования реальной геометрии катушки потери на переменном токе (в пересчете на метр длины) были рассчитаны для двух сечений обмотки: первое  $W_1$  – середина линейной части катушки (расчет велся в декартовой системе координат); второе  $W_2$  – середина лобовой части (расчет велся в цилиндрической системе координат). В таком случае потери можно представить в виде суммы  $W_{coil} = L_1 \cdot W_1 + L_2 \cdot W_2$ , где  $L_1$  и  $L_2$  – это длины стопок лент, соответственно, линейной и лобовой части катушки. Для зависимости  $J_c(B, \theta)$  были использованы те же параметры, что и в разделе 3.1. Для функции  $J_{co}(x)$  были применены коэффициенты  $h_J = 0,8$  и  $h_w = 0,85$ .

Результаты измерений на трех частотах, а также соответствующие результаты моделирования приведены на рисунке 3.6.

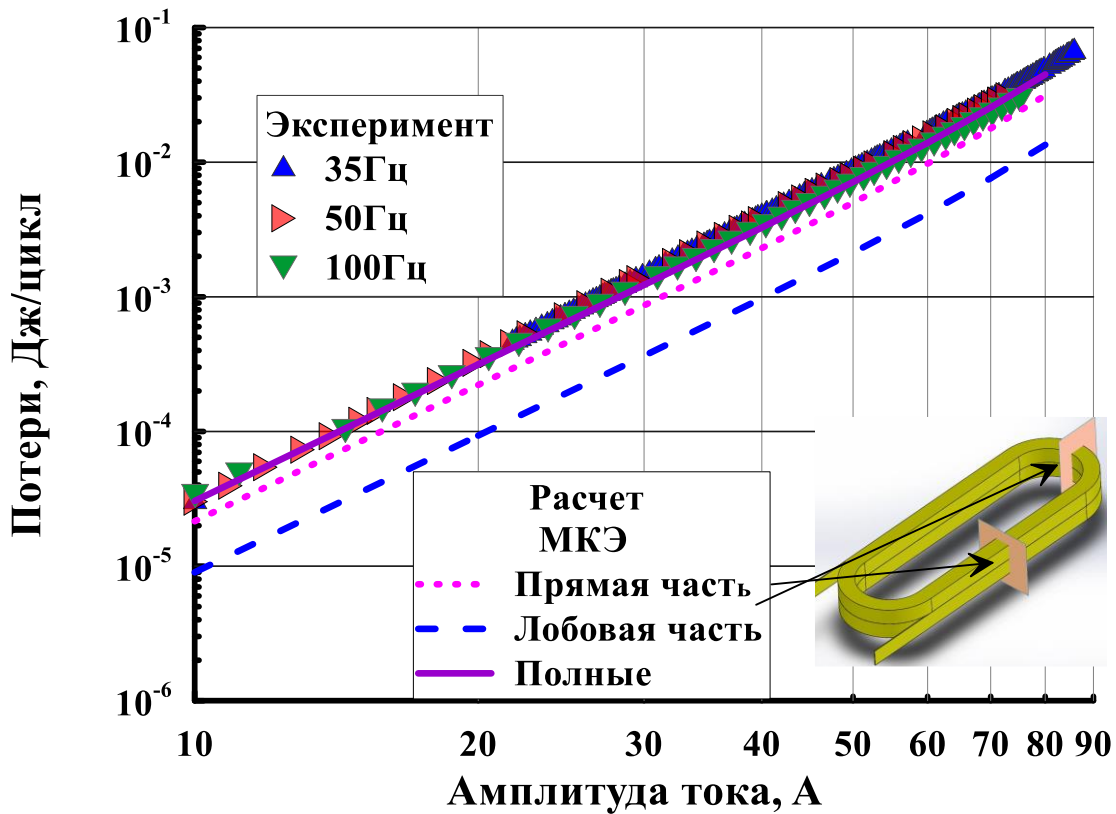


Рисунок 3.6 – Рассчитанные потери в прямой и лобовой частях катушки, а также сравнение их суммы с данными эксперимента. Катушка выполнена из ленты «SuperOx»

Аналогично предыдущим экспериментам со стопкой лент, видно хорошее совпадение результатов моделирования и измерений (отклонение составляет несколько процентов). На рисунке 3.7 показано распределение магнитного поля в двух вышеописанных поперечных сечениях для момента времени, когда амплитуда тока достигает 80 А.

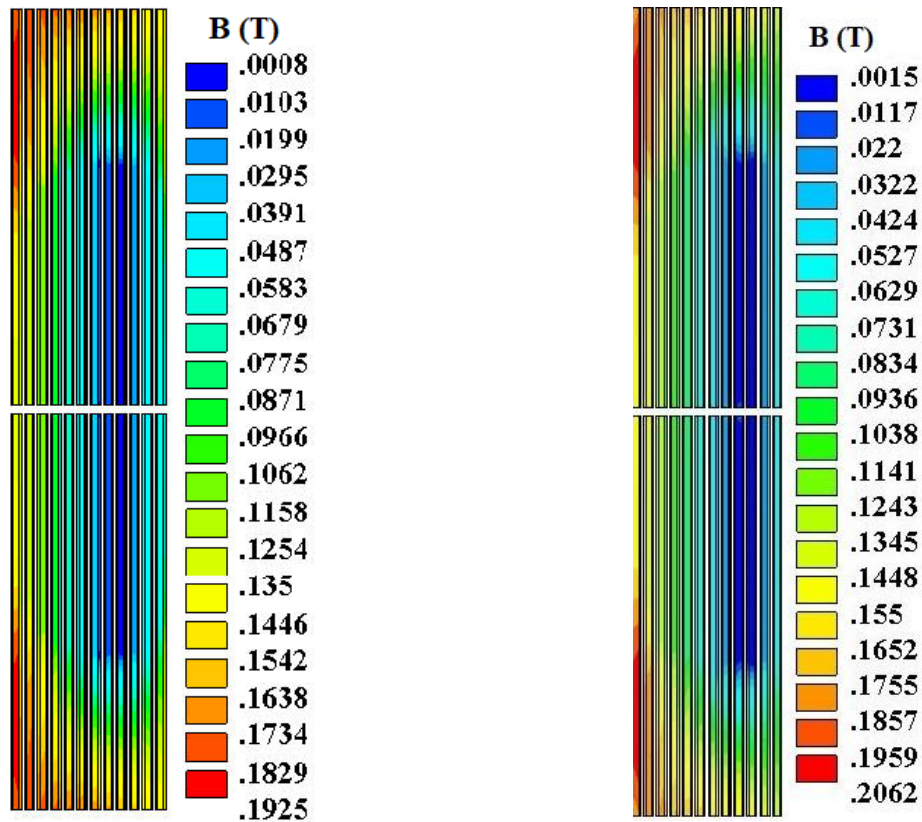


Рисунок 3.7 – Распределение магнитного поля в среднем сечении прямой части катушки (слева) и в среднем сечении лобовой части (справа) для амплитудного значения тока 80 А

### 3.2.2 Катушка типа двойной рейстрек на основе ВТСП лент с магнитной подложкой

2G ВТСП лента поколения от производителя «AMSC» имеет следующие параметры: поперечное сечение по проводнику  $4,8 \times 0,21 \text{ мм}^2$ , с изоляцией  $4,95 \times 0,36 \text{ мм}^2$ , критический ток  $I_c$  (1 мкВ/см, 77,4 К) 105 А, параметр нарастания  $n \sim 28$ . Данный проводник изготовлен по технологии MOD/RABiTS™ [46] с использованием никель-вольфрамовой подложки, обладающей слабовыраженными ферромагнитными свойствами. Их наличие оказывает влияние на потери в ВТСП ленте двумя способами: наличие гистерезиса у

материала подложки вызывает в ней потери, а ее магнитная проницаемость изменяет картину распределения магнитного поля вокруг ВТСП слоя за счет усиления перпендикулярной к нему компоненты.

Потери в катушке были рассчитаны по методике, описанной в разделе 3.2.1, однако для данной ленты коэффициенты в выражении  $J_c(B, \theta, x)$  были иными:  $\alpha = 1,02$ ,  $k=0,6$ ,  $B_0 = 0,45$ ,  $\beta = 0,65$ ,  $h_J = 1$  и  $h_w = 1$ .

На рисунке 3.8 показано сравнение измеренных на трех частотах потерь (символы), а также гистерезисных потерь в ВТСП слое и подложке ленты (линии).

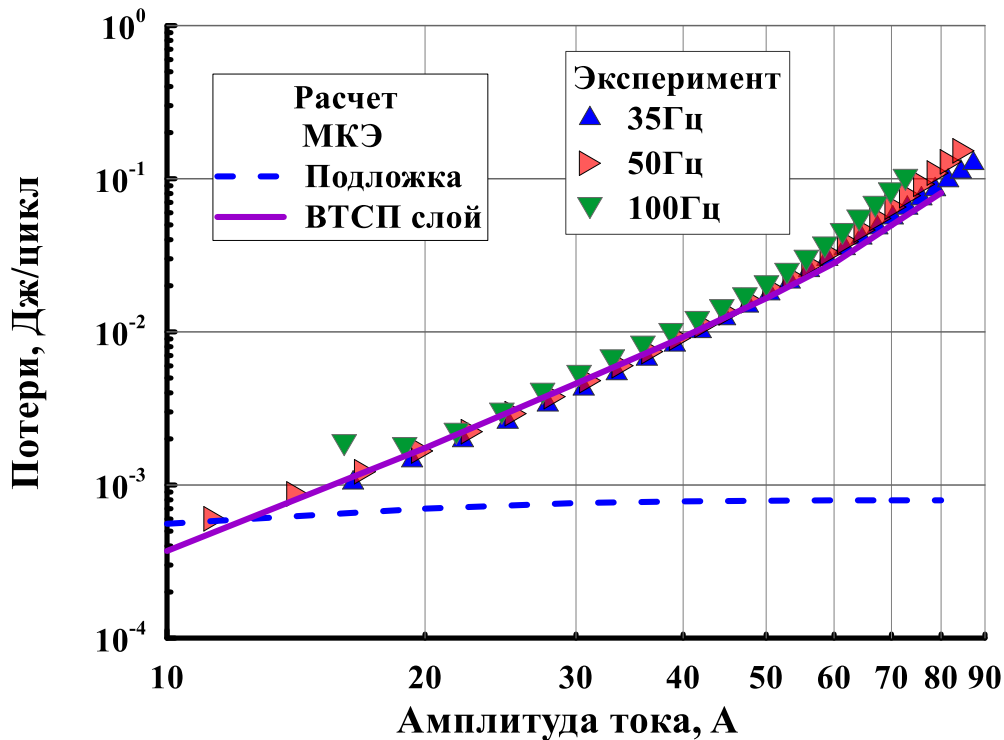


Рисунок 3.8 – Сравнение измеренных и расчетных потерь в ВТСП слое и магнитной подложке AMSC ленты обмотки

Гистерезисные потери в подложке ВТСП ленты обмотки пренебрежимо малы, однако ее магнитные свойства приводят к изменению магнитного поля в ВТСП слое ленты, что ведет к увеличению потерь в обмотке. Распределение магнитного поля на прямом участке катушки в момент времени, когда амплитуда тока достигает 80А, показано на рисунке 3.9.

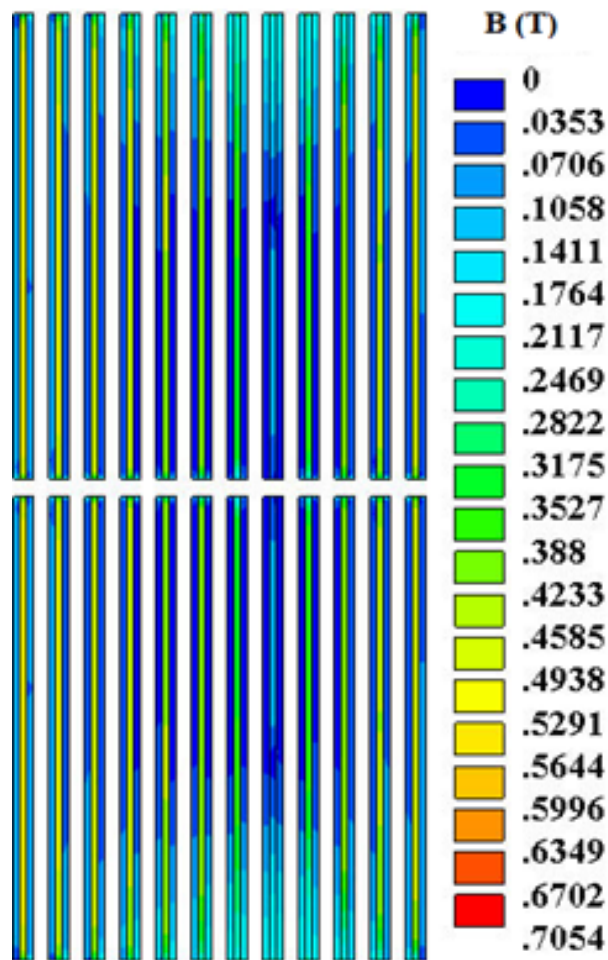


Рисунок 3.9 – Распределение магнитного поля в среднем сечении прямой части катушки, намотанной из ленты «AMSC» при амплитудном значении тока 80 А

### 3.3 ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

- Изготовлены рейтрековые катушки для обмоток электрических машин из ВТСП лент второго поколения двух производителей: «SuperOx» с немагнитной подложкой, «AMSC» – с магнитной подложкой.
- С помощью описанной в главе 2 численной методики проведены расчеты распределения магнитных полей и гистерезисных потерь в изготовленных катушках.

- Проведены экспериментальные исследования потерь в изготовленных катушках при питании их переменным током различной частоты и амплитуды. Показано, что результаты расчетов с высокой точностью совпадают с экспериментальными данными, подтверждая возможность использования созданной численной модели для прогнозирования потерь на переменном токе в катушках любой конфигурации.
- Установлено, что гистерезисные потери в магнитной подложке ВТСП лент в обмотке пренебрежимо малы, однако ее магнитные свойства вызвали изменение картины магнитного поля в ВТСП слоях лент (увеличивается перпендикулярная компонента поля к широкой поверхности ленты), что привело к повышению потерь.

## ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВТСП КАТУШЕК ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ

### 4.1 РАЗРАБОТКА ВСП ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ БПЛА

Рассматриваемая электрическая машина является синхронной машиной с возбуждением от постоянных магнитов и зубцовой обмоткой якоря. При этом катушки обмотки якоря выполнены из ВТСП ленты второго поколения. Принципиальная схема машины показана на рисунке 4.1.

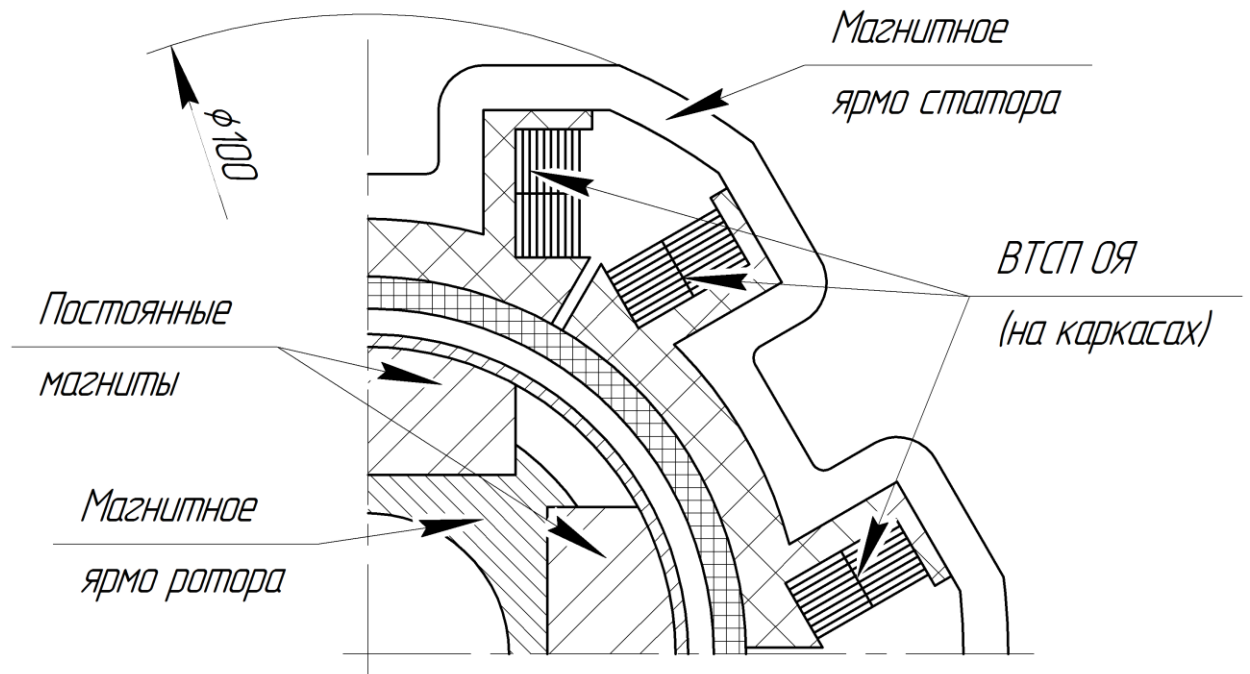


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема машины с ВТСП обмоткой якоря

Для определения основных параметров машины выполнен ее электромагнитный расчет. Исходные данные и результаты расчета приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Исходные данные и результаты электромагнитного расчета

Наименование параметра	Значение
Механическая мощность, кВт	3
Расчетная частота вращения, об/мин	6000
Число пар полюсов	2
Частота основной гармонической, Гц	200
Активная осевая длина, мм	70
Напряжение питания, В	82
Амплитудное значение тока фазы, А	58
Действующее значение тока фазы, А	41
ЭДС холостого хода, В	26
Индуктивное сопротивление фазы, мОм	406
Число витков в фазе	48
Масса двигателя, кг	4,2
Рабочая температура, К	77

При работе синхронной машины как в двигательном, так и в генераторном режиме в обмотке якоря протекает переменный ток. При этом в обмотке будут выделяться потери, которые зависят от кратности протекающего тока по отношению к критическому току короткого образца, частоты и величины магнитной индукции в области ВТСП катушек [53,75,76].

Катушки обмоток выполнены из ВТСП ленты, намотаны на каркас и имеют форму рейстрека. Охлаждение осуществляется с помощью жидкого азота при температуре 77 К путем заполнения внутреннего объема машины. Такой тип охлаждения является наиболее рациональным для лабораторных испытаний, т.к. позволяет сократить расходы на разработку системы охлаждения. Машина



выполнена в двухщитовом исполнении. Возбуждение от постоянных магнитов позволяет отказаться от щеточно-контактного узла.

Для катушек статора на расчетном этапе выбрана лента «AMSC», ширина ленты 5 мм, толщина 0,5 мм. Основные параметры катушек приведены в таблице 4.2. Для производства каркасов катушек ОЯ использована технология трехмерной печати, основанной на послойном выращивании модели из слоев расплавленного пластика. В качестве материала использован полилактид (PLA). Путем проведения термоциклирования образцов, изготовленных по данной технологии, было установлено, что изделия из данного материала не разрушаются при температуре жидкого азота, сохраняют конструкционную прочность и не подвержены значительным термическим деформациям.

Таблица 4.2. Параметры ВТСП катушек статора

Параметр	Значение
Число витков	12
Ширина ленты, мм	5
Толщина ленты, мм	0,5
Длина линейной части, мм	70
Высота катушки, мм	10
Ширина катушки, мм	5
Длина ВТСП ленты, м	12
Материал каркаса	Полилактид

## 4.2 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВТСП КАТУШЕК

Для обмотки якоря выбрана обмотка типа двойной рейстрек. Ее характерная особенность состоит в том, что оба вывода катушки находятся снаружи, что

позволяет избежать трудностей с подведением тока к концу ленты, который в традиционной однослойной катушке или при рядовой намотке находится на внутреннем слое. Однако у данного типа обмотки существует следующая особенность технологии изготовления: намотку требуется осуществлять из середины, что требует специализированного оборудования.

Принцип работы намоточного устройства для двухслойных катушек представлен на рисунке 4.2.

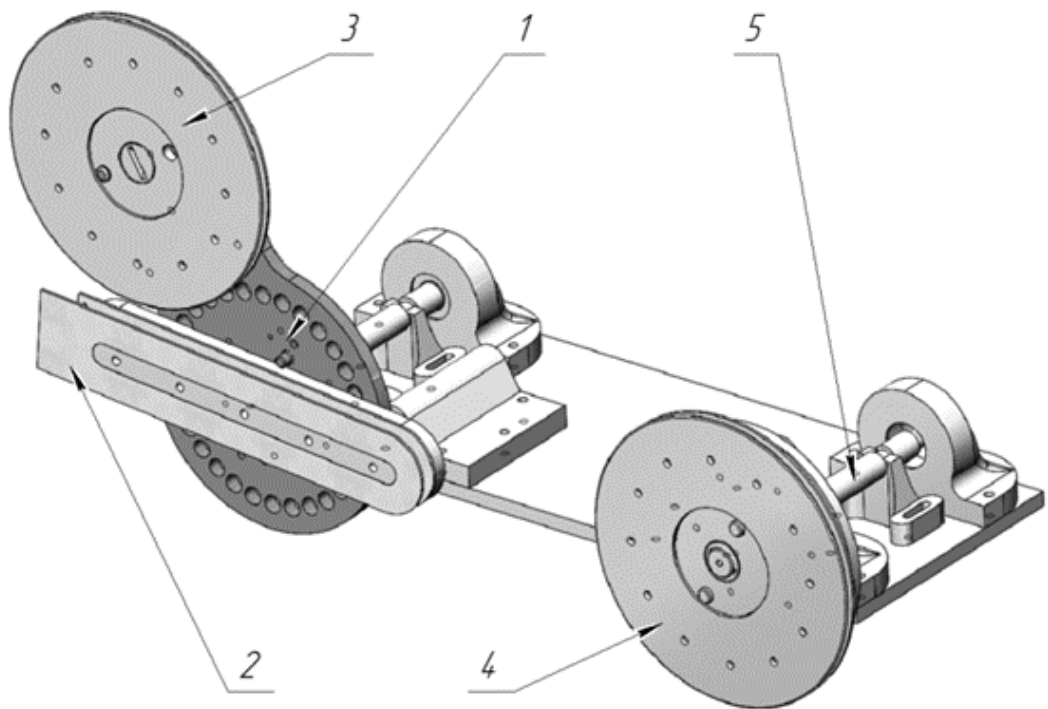


Рисунок 4.2 – Схема намоточного устройства для изготовления ВТСП катушек типа двойной рейстрек

Устройство состоит из основного вала с планшайбой (1), на которой закреплен каркас изготавливаемой катушки (2). На планшайбе также закреплена неподвижная (относительно каркаса катушки) кассета (3) с половиной длины ВТСП ленты. На дополнительном валу (5) закреплена отдающая кассета (4) со второй половиной ленты.

Требуемое натяжение ленты создается с помощью троса, закрепленного на дополнительном валу, и системы блоков с грузом (не показаны). В процессе намотки сначала на каркас сматывается лента с отдающей кассеты (4), наружный виток готового ряда закрепляется при помощи прижима (не показан). Затем пустая кассета снимается с дополнительного вала и ее место занимает кассета (3), ранее закрепленная на планшайбе, после чего осуществляется намотка второго ряда. В процессе изготовления осуществляется нанесение на широкую сторону ВТСП ленты эпоксидной смолы марки «Loctite Stycast 2850» [77]. Указанная смола хорошо зарекомендовала себя при изготовлении токовводов [78], а также обмотки ВТСП трансформатора [79]. После окончания намотки наружный виток второго ряда фиксируется аналогично первому, готовая катушка снимается с приспособления и выдерживается до застывания смолы.

Практически все детали данного устройства, за исключением осей и подшипников, изготовлены по той же технологии, что и сами каркасы катушек (3D печать), что обеспечило превосходную технологичность, а также очень низкие стоимость и трудоемкость изготовления.

На основе описанного выше приспособления был спроектирован и изготовлен намоточный станок под управлением ПК (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Станок для намотки ВСПП катушек

С использованием вышеописанной технологии была изготовлена катушка (рисунок 4.4) из 2G ВТСП ленты производства компании «AMSC». Размер ленты – 5 x 0,5 мм с изоляцией. Катушка имеет 24 витка, по 12 в слое, полная длина ленты – 5 м.

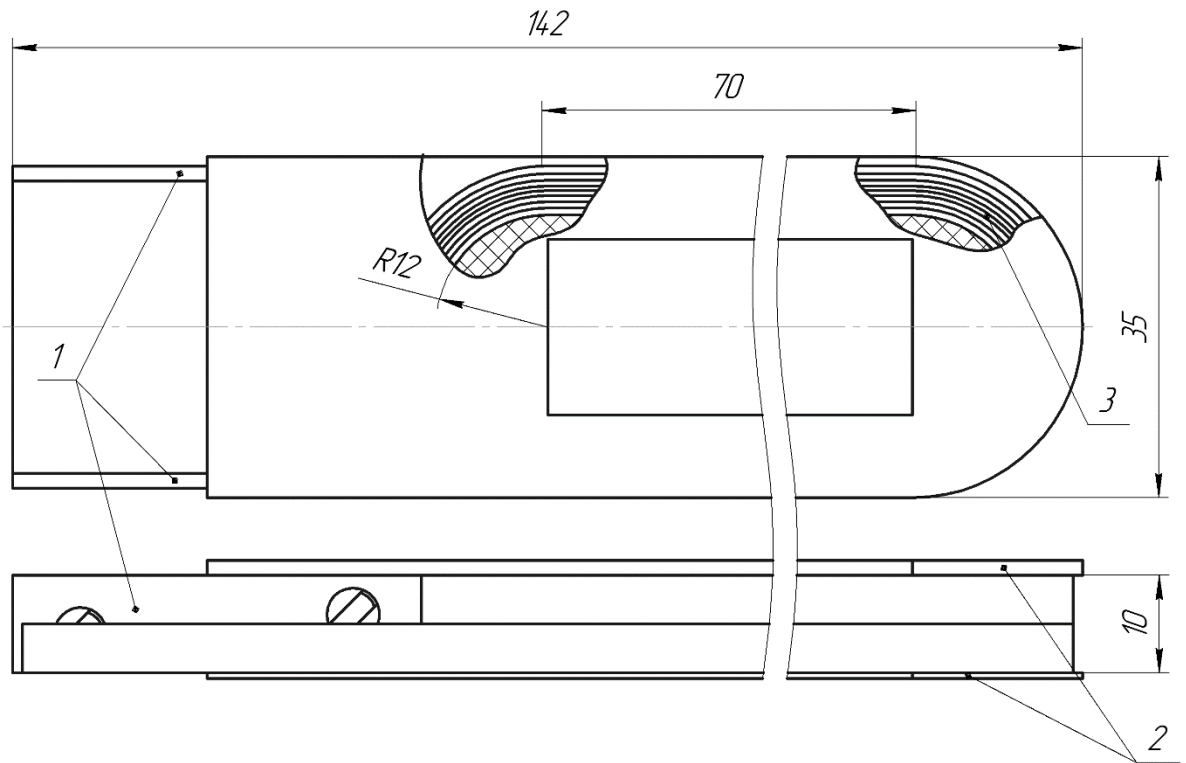


Рисунок 4.4 – Эскиз ВТСИ катушки, изготовленной с использованием разработанного намоточного станка: 1 – медные клеммы, 2 – каркас катушки, 3 – ВТСИ лента

Каркас катушки предусматривает возможность установки ферромагнитного сердечника для имитации магнитопровода. Для подключения источника питания к выводным концам-токовводам катушки припаяны два силовых медных провода. Выводы потенциальных контактов расположены в точках, максимально отдаленных от токовводов для минимизации переходных эффектов. Индуктивность катушки составила 0,051 мГн без сердечника и 0,072 мГн с установленным нешихтованным ферромагнитным сердечником.

### 4.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Различные источники приводят данные для потерь в коротких образцах ВТСП ленты [80][75], кабелях [53] и катушках [80] при питании синусоидальным током и напряжением. Для более детального исследования потерь было решено провести испытания ВТСП катушки при питании ее током различной формы, частоты и амплитуды. Для генерации токов использовались имеющиеся в наличии лабораторные источники, а также источник синусоидального тока, задействованный ранее в испытаниях стопок лент (п. 2.2).

В результате испытаний при паспортном значении для ВТСП ленты 106 А (рисунок 4.5) критический ток ВТСП обмотки составил 81 А (рисунок 4.6). Параметр нарастания  $n$  ВТСП обмотки составил 23.

В процессе намотки ленты изгиб ВТСП ленты на радиусах каркаса приводит к деградации критического тока, поэтому особенно важно установить факт того, что критический ток ВТСП катушки с достаточным запасом превышает номинальный ток фазы. Снижение критического тока на ~20% в данном случае можно считать приемлемым, так как радиус изгиба ленты при намотке был близок к предельно допустимому значению по данным производителя ВТСП ленты. Также на снижение критического тока повлияло собственное магнитное поле катушки.

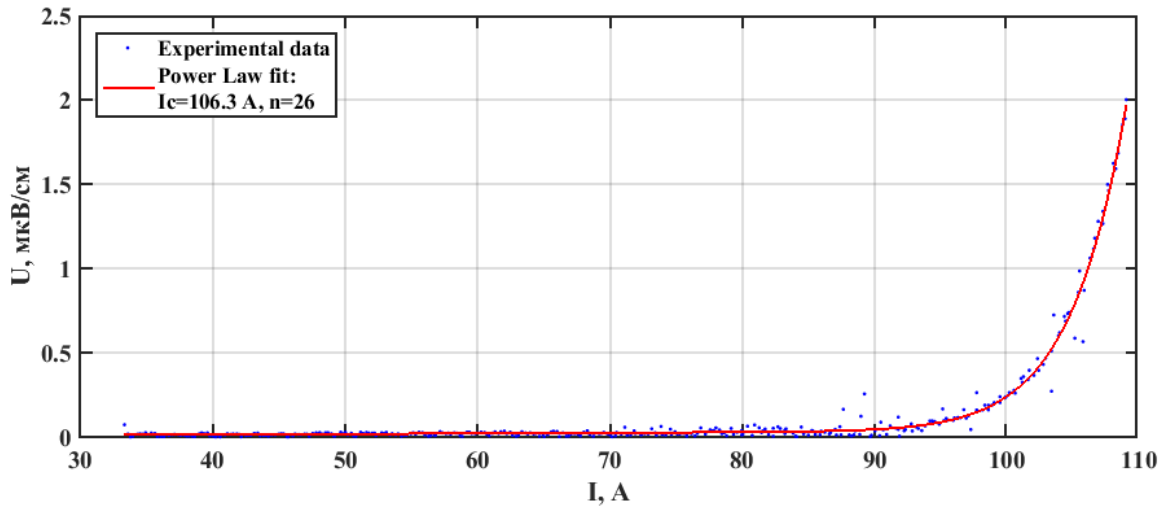


Рисунок 4.5 – Вольт-амперная характеристика короткого образца ВТСП ленты

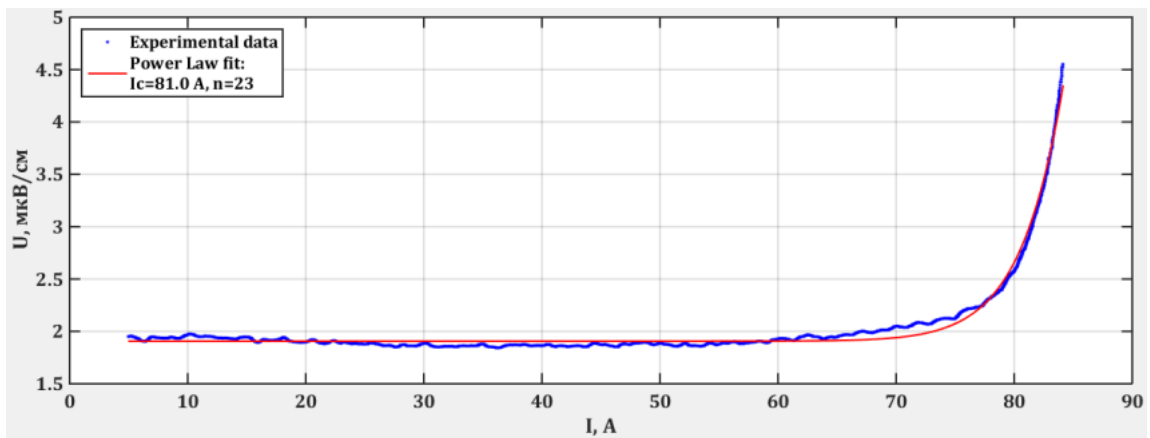


Рисунок 4.6 – Вольт-амперная характеристика изготовленной катушки

Вторым этапом стали исследования на синусоидальном токе разной частоты (измерение потерь). Для эксперимента выбраны фиксированные частоты: 50, 100 и 200 Гц. Потери измерялись электрическим методом, который описан в п. 1.8.2.3 и вычислялись методом, описанным в п. 2.2.

Измерения проводились на испытательном стенде, схема которого приведена на рисунке 4.7, состоящем из управляемого источника тока,

холловского датчика тока и испытуемой катушки. Форма и амплитуда тока задаются при помощи внешнего генератора сигналов (клеммы «1»-«2»), а сигналы с потенциальных контактов «3»-«4» на катушке и датчика тока «5»-«6» поступают на входы измерительных каналов осциллографа и записываются в файл с частотой дискретизации 1 млн точек в секунду. Вычисление потерь осуществляется по формуле (2.13) путем обработки файла в среде MATLAB [81].

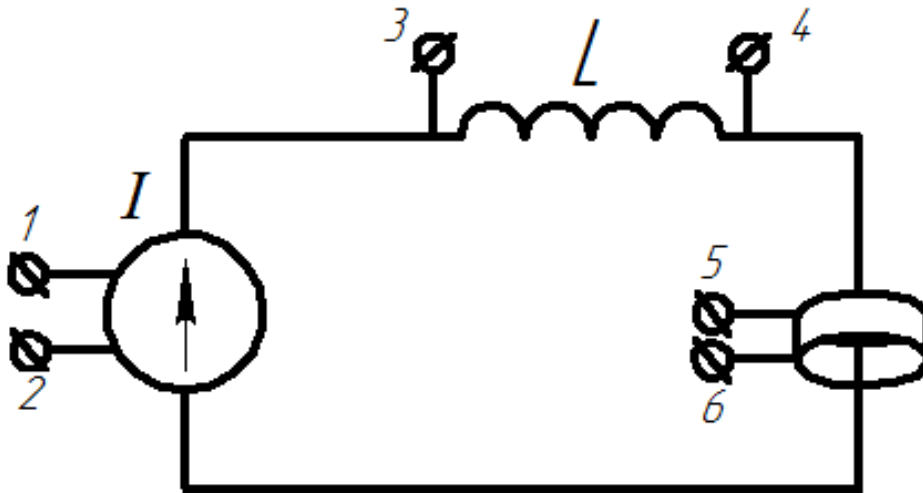


Рисунок 4.7 – Схема испытательного стенда для испытаний ВТСП катушки на переменном токе

Первоначально измерения потерь в катушке проводились на синусоидальном токе при наличии и отсутствии стального (ферромагнитного) сердечника. Результаты измерений приведены на рисунке 4.8.



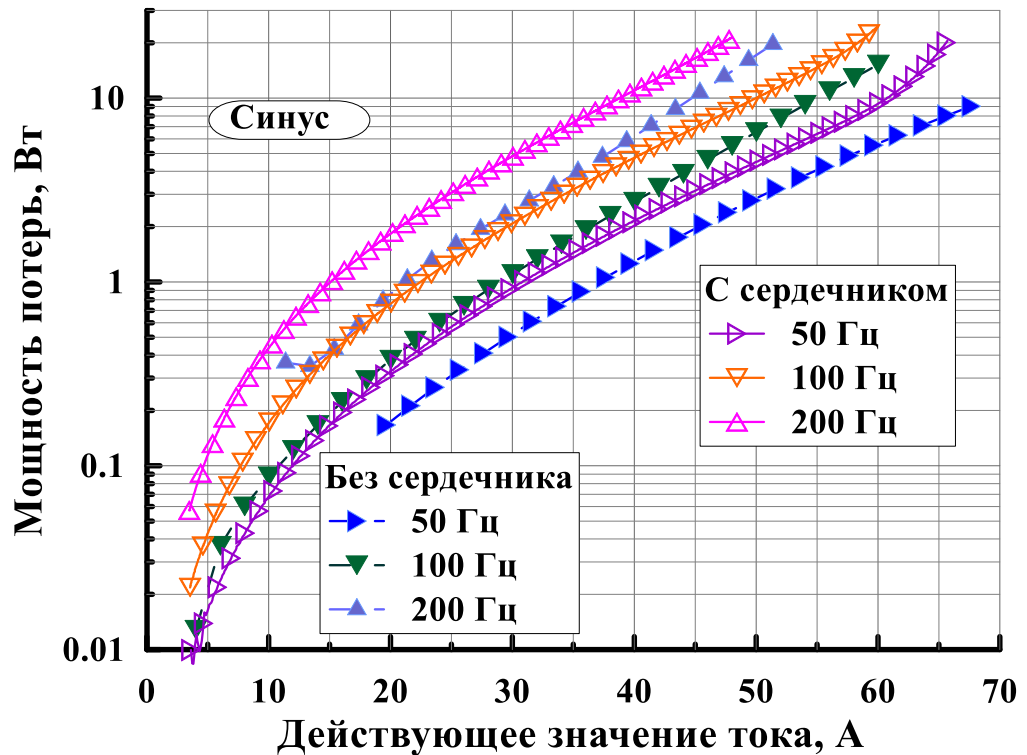


Рисунок 4.8 – Измеренные потери на синусоидальном токе (катушка с сердечником и без него)

Далее на генераторе сигналов «У1» задавался знакопеременный ток прямоугольной формы (меандр). Важно отметить, что в данном случае ток имел значительные всплески на передних фронтах (рисунки 4.9, 4.10), что обусловлено особенностями работы имеющегося лабораторного источника питания в режиме источника тока.

На рисунке 4.11 приведены результаты измерения потерь при прямоугольном сигнале при наличии и отсутствии стального сердечника в катушке. При установке стального сердечника величина потерь возрастает вследствие гистерезисных потерь в сердечнике.

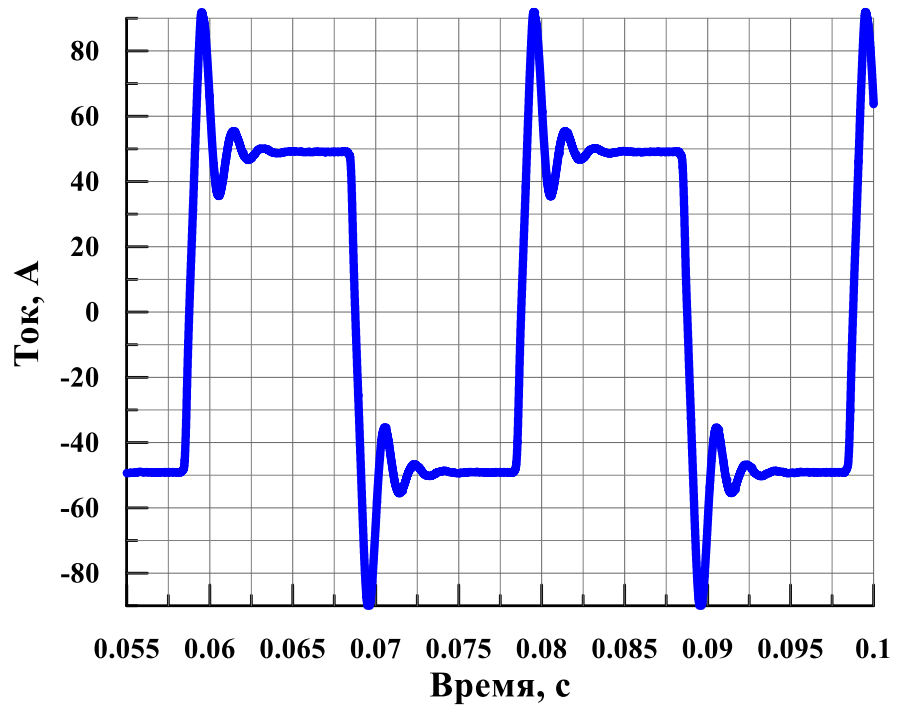


Рисунок 4.9 – Форма тока в катушке при частоте 50 Гц

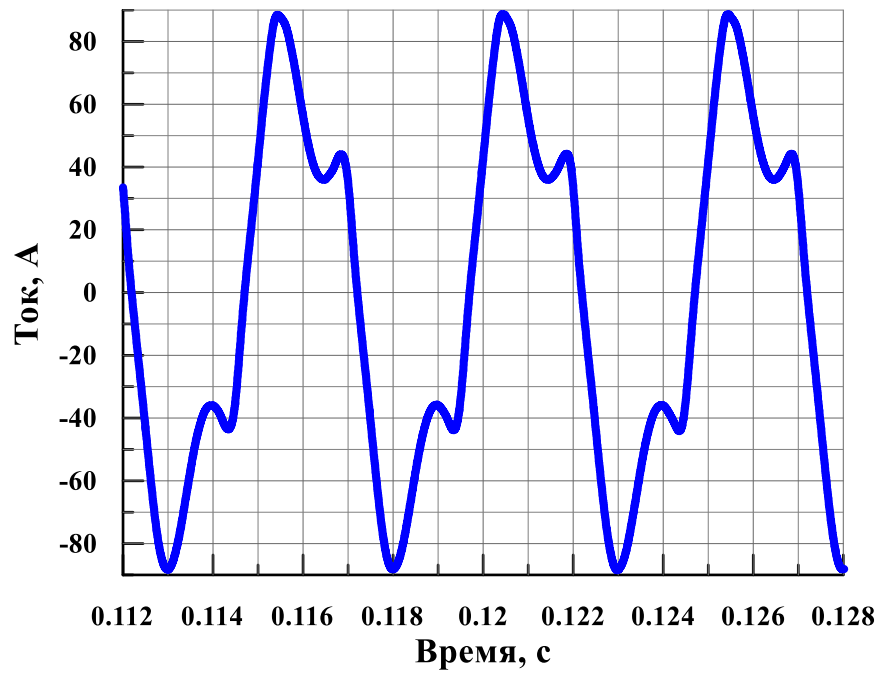


Рисунок 4.10 – Форма тока в катушке при частоте 200 Гц

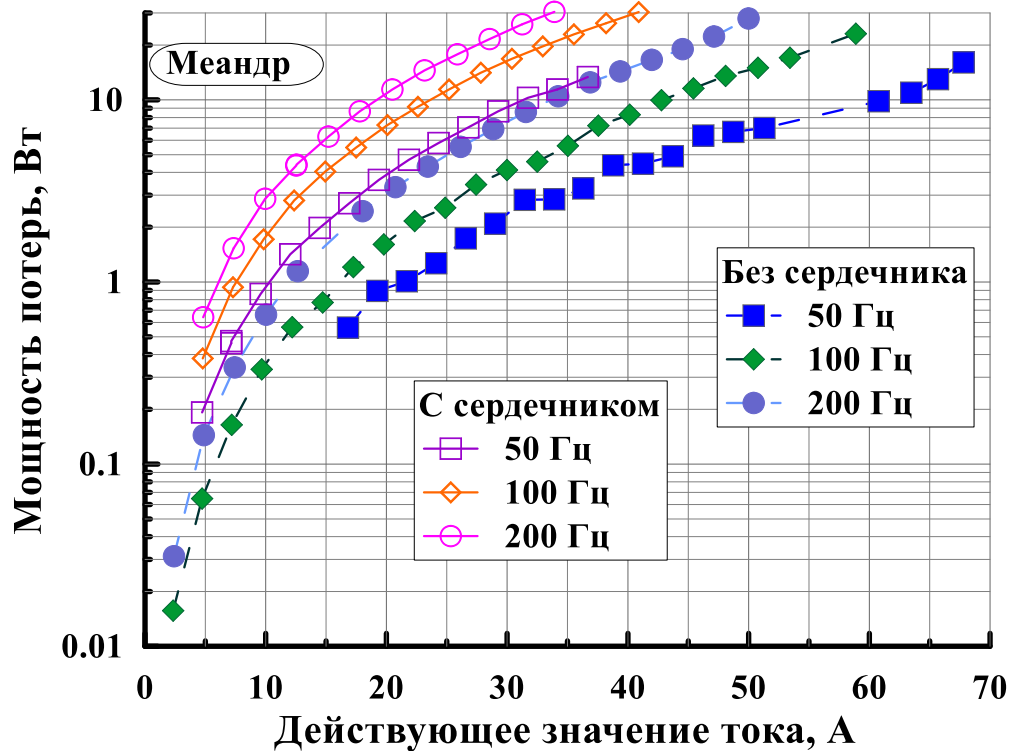


Рисунок 4.11 – Измеренные потери на меандре (катушка с сердечником и без него)

При сравнении результатов измерений (рисунки 4.8 и 4.11) видно, что при одинаковой частоте потери ниже в случае питания катушки синусоидальным током по сравнению с прямоугольным сигналом, что обусловлено отсутствием высших гармоник в первом случае и большим числом высших гармоник во втором.

Попытка сформировать меандр в катушке дала, напротив, повышенный уровень потерь, обусловленный особенностями работы лабораторного источника питания в режиме источника тока с индуктивной нагрузкой. В связи с этим представляют интерес исследования потерь в катушке на меандре, сформированном при помощи ШИМ-модуляции с более высокими частотами ШИМ (5...50 кГц), а также более крутыми фронтами нарастания тока в катушке, что требует существенной модернизации имеющихся испытательных стендов.

#### 4.4 ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

- Разработан и изготовлен намоточный станок для изготовления катушек из 2G ВТСП ленты.
- Создана и апробирована технология изготовления ВТСП катушек для обмоток электрических машин.
- Изготовленная с помощью разработанного стенда ВТСП катушка испытана различными по форме и частоте токами с целью определения величины потерь на переменном токе.
- Результаты измерения потерь показали возможность использования ВТСП обмоток на переменном токе в составе СП электрических машин.

## **ГЛАВА 5. ИСПЫТАНИЯ ВТСП КАТУШКИ В УСЛОВИЯХ, ИМИТИРУЮЩИХ РАБОТУ В СОСТАВЕ ДВИГАТЕЛЯ**

### **5.1 ВЫБОР ДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТОКОВ НЕСИНУСОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ**

В связи с тем, что одной из основных целей работы является определение потерь в катушках из ВТСП ленты при питании их переменным и импульсным напряжением, датчик тока – крайне важный элемент системы. От его характеристик зависит, насколько адекватными окажутся результаты эксперимента. Самым главным требованием, предъявляемым к датчику, входящему в состав стенда, является обеспечение широкого частотного диапазона, т.е. он должен обладать высокими динамическими свойствами. Кроме того, необходимо подчеркнуть, что датчик должен работать и на постоянном токе.

Существует несколько различных типов датчиков тока, среди них самыми распространенными являются трансформаторы тока, шунтовые датчики, датчики на базе детектора магнитного поля. К последнему типу относятся датчики тока на базе элемента Холла, во множестве выпускаемые промышленностью.

Промышленно выпускаемые датчики, принцип действия которых основан на измерении магнитного потока (в том числе Холловские) имеют достаточно широкий частотный диапазон (порядка нескольких сотен килогерц). Так, для имеющегося датчика [82] в паспорте указано значение 100 кГц. Однако с учетом того, что рабочий ток катушек не превышает 100 А, а ожидаемые амплитуды пульсаций тока, обусловленные принципом работы инвертора, составляют от нескольких ампер до 10 А, возникает вопрос о чувствительности датчика в этом диапазоне. Для указанного датчика паспортное значение номинального тока составляет 1000 А, то есть исследуемые пульсации будут составлять около 1% от паспортного значения. В связи с этим было принято решение разработать

оригинальную конструкцию и изготовить шунтовой датчик ввиду отсутствия подходящих вариантов в продаже (с учетом диапазона измеряемых токов, мощности шунта и его частотного диапазона).

Разработана конструкция шунтового датчика тока на основе безындуктивных низкоомных резисторов LVR03 производства «Vishay» [83], параметры которых отображены в таблице 5.1. На рисунке 5.1а показана конструкция разработанного датчика тока, представляющего собой 10 параллельно соединенных резисторов. На рисунке 5.1б представлен внешний вид шунтового датчика. С помощью коротких проводов марки МГТФ напряжение с датчика подается на разъем типа BNC, к которому подключается осциллограф-регистратор.

Таблица 5.1. Параметры резисторов LVR03

Параметр	Значение
Номинальное сопротивление	0,1 Ом
Точность	1%
Рассеиваемая мощность	3 Вт

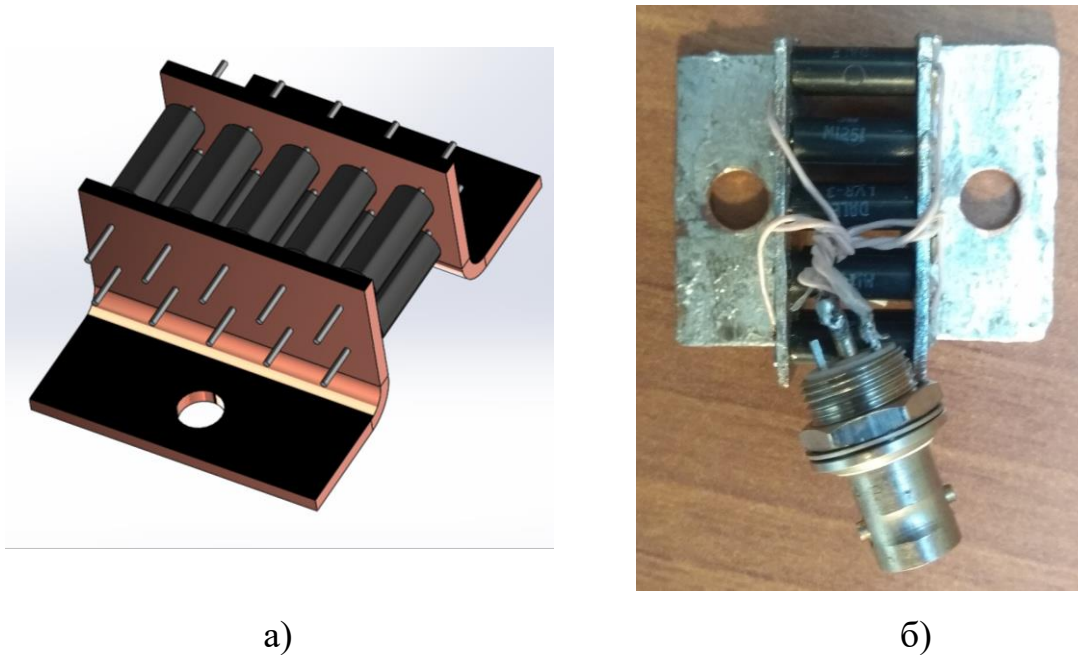


Рисунок 5.1 – Датчик тока: а) 3D-модель; б) внешний вид с установленным ВЧ-разъемом для подключения к системе сбора данных

Шунтовой датчик на переменном токе можно представить схемой замещения [84], содержащей активную (резистивную) часть  $R_S$  и паразитную индуктивность  $L$  (рисунок 5.2).

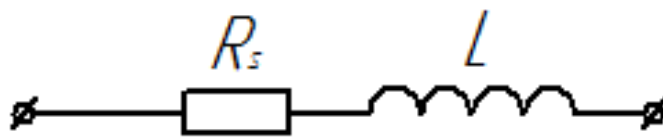


Рисунок 5.2 – Эквивалентная схема шунтового датчика на переменном токе

Таким образом, на относительно высоких частотах будет увеличиваться вклад комплексной составляющей в импеданс датчика, что внесет ошибку в измерения. В комплексной форме импеданс такого двухполюсника можно записать в виде:

$$Z_S = R_S + j\omega L \quad (5.1)$$

В таком случае величину ошибки в зависимости от частоты можно оценить при помощи соотношения:

$$\delta = \frac{\sqrt{R_S^2 + (2\pi fL)^2} - R_S}{R_S} * 100\% \quad (5.2)$$

Параметры изготовленного датчика были измерены LCR-метром. Паразитная индуктивность  $L$  находится в диапазоне  $0,1 \div 0,3$  нГн, а сопротивление по постоянному току  $0,98$  мОм. На рисунке 5.3 приведена зависимость ошибки  $\delta$  от частоты тока через шунт:

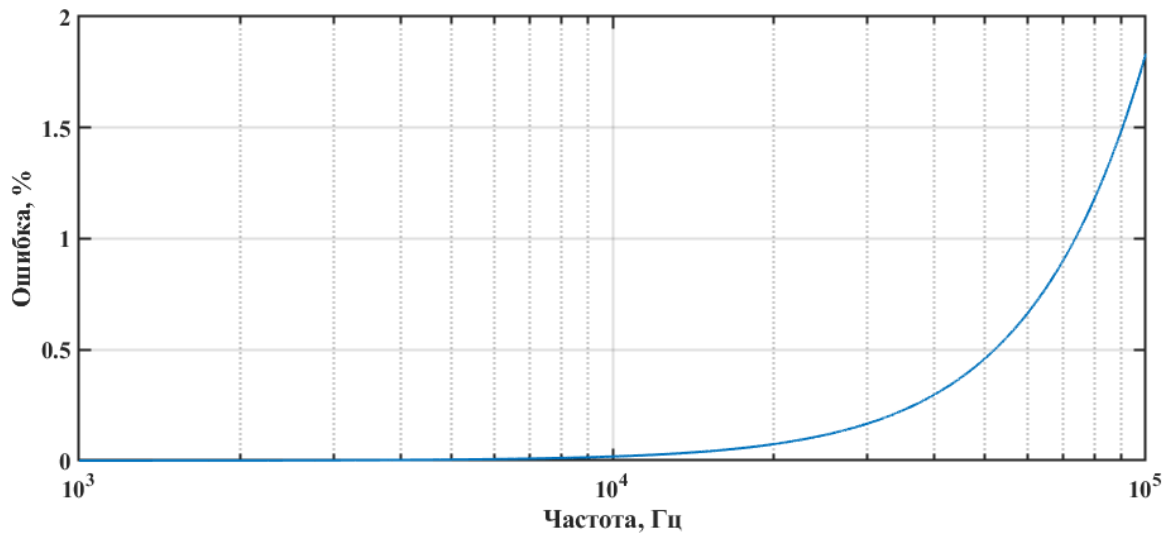


Рисунок 5.3 – Ошибка, вносимая индуктивностью шунта в зависимости от частоты тока

До частоты  $90$  кГц вносимая паразитной индуктивностью ошибка составляет не более  $1,5\%$ , что позволяет использовать шунт в данном диапазоне частот без введения коррекции.

Также был проведен эксперимент для сравнения шунтового датчика и серийного холловского, для чего был собран простой испытательный стенд (рисунок 5.4). IGBT транзистор VT1 работает в режиме ключа и управляется лабораторным источником сигналов (клемма «1») через специализированный



драйвер DD1. Сигналы с испытуемого шунта  $R_s$  (клеммы «2» и «3»), а также холловского датчика (клеммы «4» и «5») поступают в систему сбора данных (не показана). Такая схема позволяет получить однополярные импульсы напряжения на нагрузке и провести их последующий анализ. В качестве нагрузки использована тороидальная катушка из медного провода с индуктивностью 43 мкГн.

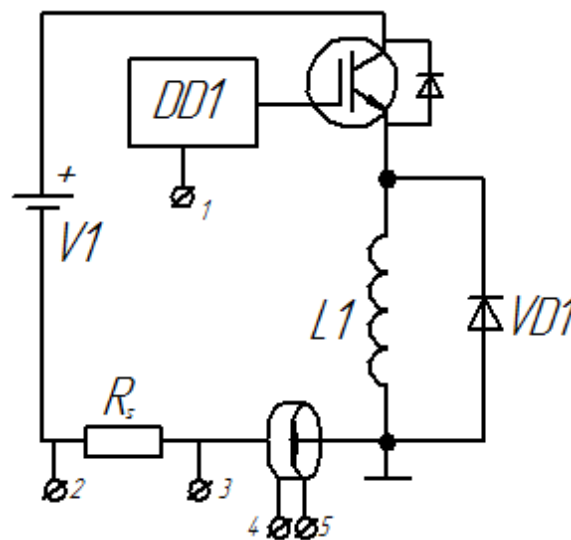


Рисунок 5.4 – Схема испытательного стенда для датчиков тока

На рисунке 5.5 приведены осциллограммы сигналов с обоих датчиков в момент переключения транзистора. Видно, что сигналы с датчиков повторяют (с некоторой погрешностью) друг друга, при этом сигнал с резистивного датчика тока имеет несколько меньшие по амплитуде колебания, вызванные процессами коммутации транзистора, что облегчит фильтрацию. По итогам эксперимента для последующих измерений выбран разработанный и изготовленный токовый шунт как более компактный и удобный в использовании (не требует дополнительного внешнего питания), а также служащий естественным фильтром ВЧ-помех.

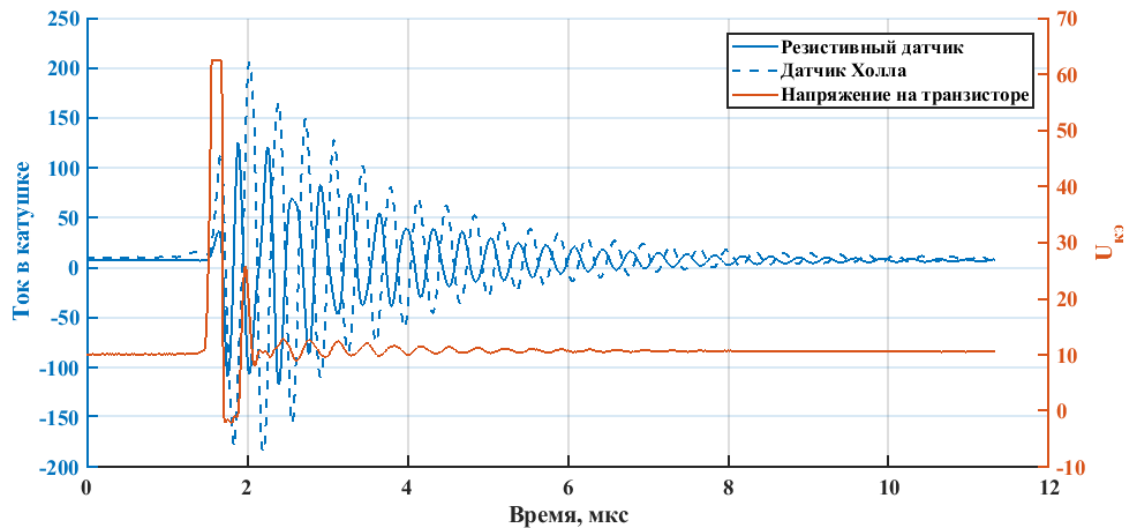


Рисунок 5.5 – Осциллограммы токов, полученные с датчиков в момент переключения транзистора

## 5.2 ИСПЫТАНИЯ КАТУШКИ ОТ ИНВЕРТОРА В РЕЖИМЕ ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ

Проведен эксперимент, имитирующий работу катушки от силового преобразователя (инвертора). Для этих целей собран H-мост, изображенный на рисунке 5.6, состоящий из четырех IGBT транзисторов «К1-К4».

Сигналы управления «У1-У4» подаются на затворы от внешней системы управления, позволяющей путем коммутации ключей создать на нагрузке «L» ШИМ-модулированный знакопеременный ток (рисунок 5.7а).

Сигналы «С1-С2» с токового шунта и потенциальных контактов «П1-П2» катушки поступают в систему сбора данных. Частота ШИМ составила 10 кГц (рисунок 5.3б).

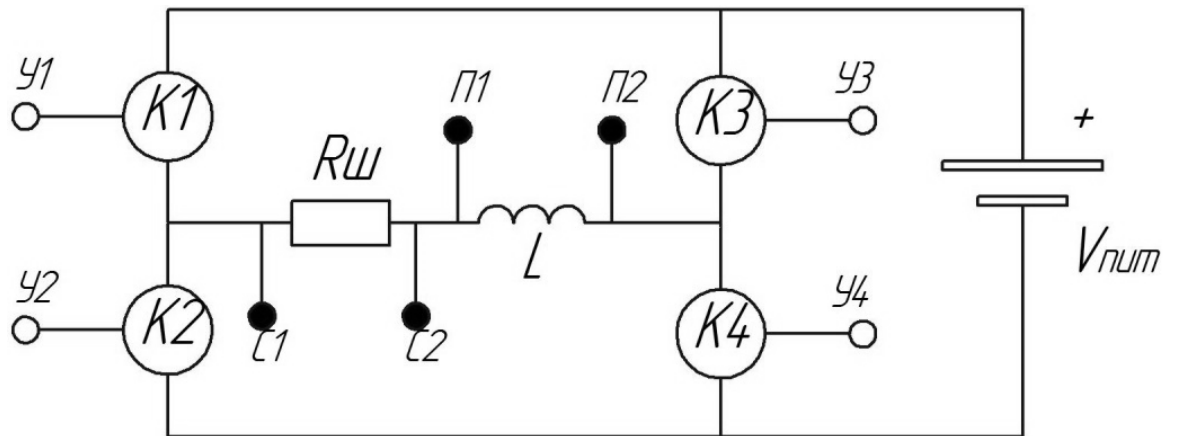


Рисунок 5.6 – Схема испытательного стенда для исследования ВТСП катушки при питании от инвертора. К1-К4 – транзисторы, У1-У4 – сигналы управления транзисторами, Rш – датчик тока, L – ВТСП катушка, С1-С2 и П1-П2 – сигналы тока и напряжения на катушке

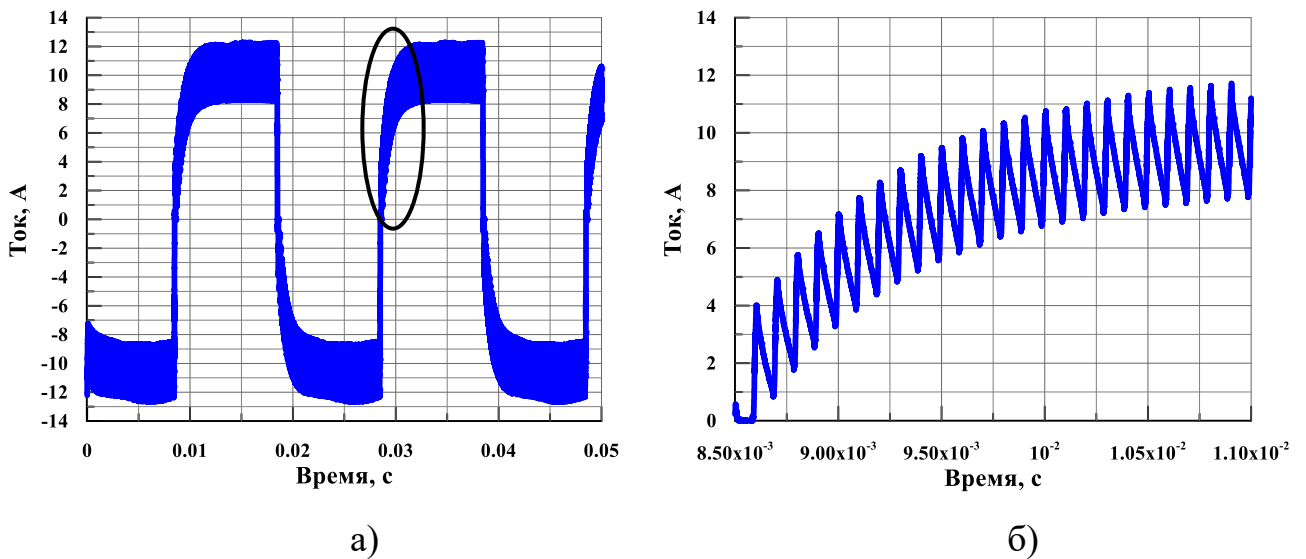


Рисунок 5.7 – Форма тока в катушке: а) основная частота 50 Гц; б) увеличенный участок нарастания тока, видны осцилляции на частоте ШИМ 10 кГц

Результаты измерений, как и прежде, сравниваются со случаем синусоидального тока в катушке без сердечника (рисунок 5.8).

Графики на рисунке 5.8 показывают, что при увеличении действующего значения питающего тока значение потерь в катушке увеличивается. При этом потери при синусоидальном сигнале оказываются выше.

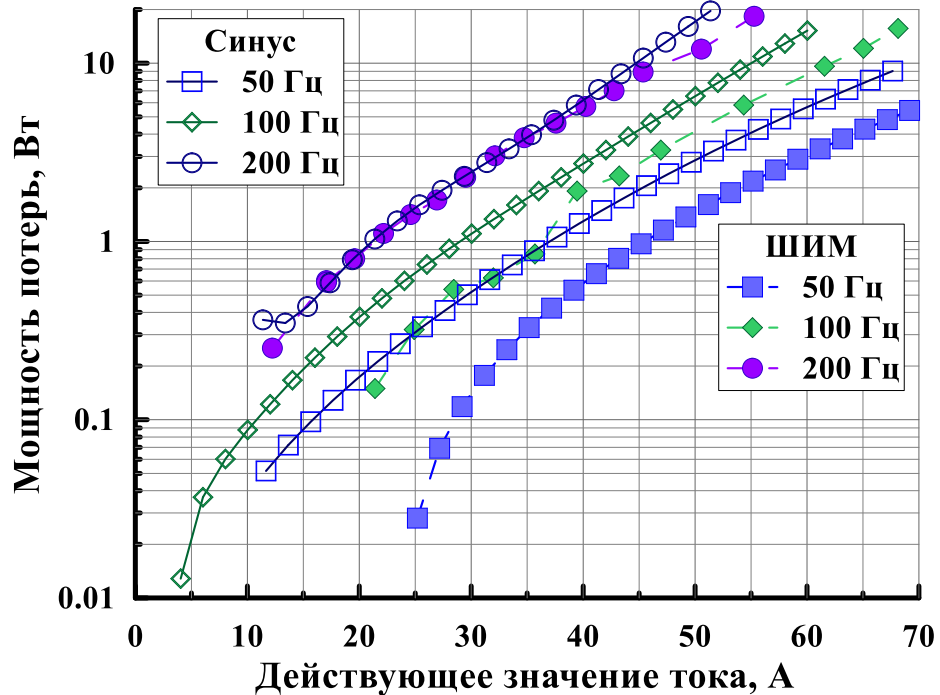


Рисунок 5.8 – Сравнение измеренных потерь на синусоидальном токе и токе, сформированном при помощи ШИМ

В то же время из рисунка 5.8 видно, что потери на синусоидальном токе и токе, сформированном при помощи ШИМ для частоты 200 Гц, практически совпадают, что объясняется следующим образом: так как испытательный стенд работает в режиме источника напряжения, то фронты нарастания и спада тока определяются индуктивностью испытуемой катушки, что при повышении частоты основной гармоники (рисунок 5.7а) с 50 до 200 Гц приводит к сокращению участка с квазипостоянным значением тока и вырождением сигнала из формы, близкой к прямоугольной, к форме, напоминающей синус.

## 5.3 ИСПЫТАНИЯ КАТУШКИ ОТ ИНВЕРТОРА В РЕЖИМЕ ИСТОЧНИКА ТОКА

### 5.3.1 *Формы тока в обмотках, присущие вентильным машинам*

Для того, чтобы создать ток специальной формы в отдельно взятой ВТСП катушке, возникла необходимость в создании специализированного испытательного стенда. Структурная схема изображена на рисунке 5.9, фото – на рисунке 5.10. В основе его – транзисторный мост, состоящий из двух IGBT-модулей (стоек) со встроенными обратными диодами (3). Управление осуществляется через драйверы затворов (2) микроконтроллером (1), формирующим необходимую последовательность коммутации. Источником энергии служит лабораторный источник питания с выходными параметрами 15В/100А (5). Испытуемая катушка (7) расположена в криостате (8).

В устройстве реализовано релейное регулирование [85], при котором ток в нагрузке является пульсирующим около заданного значения, образуя т.н. «токовый коридор». Частота пульсаций непостоянна и в среднем находится в пределах от 6 до 8 кГц. Обратная связь по току реализована через датчик холловского типа (4), сигнал с которого поступает на АЦП микроконтроллера (10). В процессе работы каждые 16 мкс сигнал с датчика тока сравнивается с заданным, и формируются соответствующие управляющие сигналы для транзисторов. Преобразователь позволяет воспроизвести в нагрузке ток любой формы (задается программно 127 точками на период) с частотой до 400 Гц и мгновенным значением тока до 50 А.

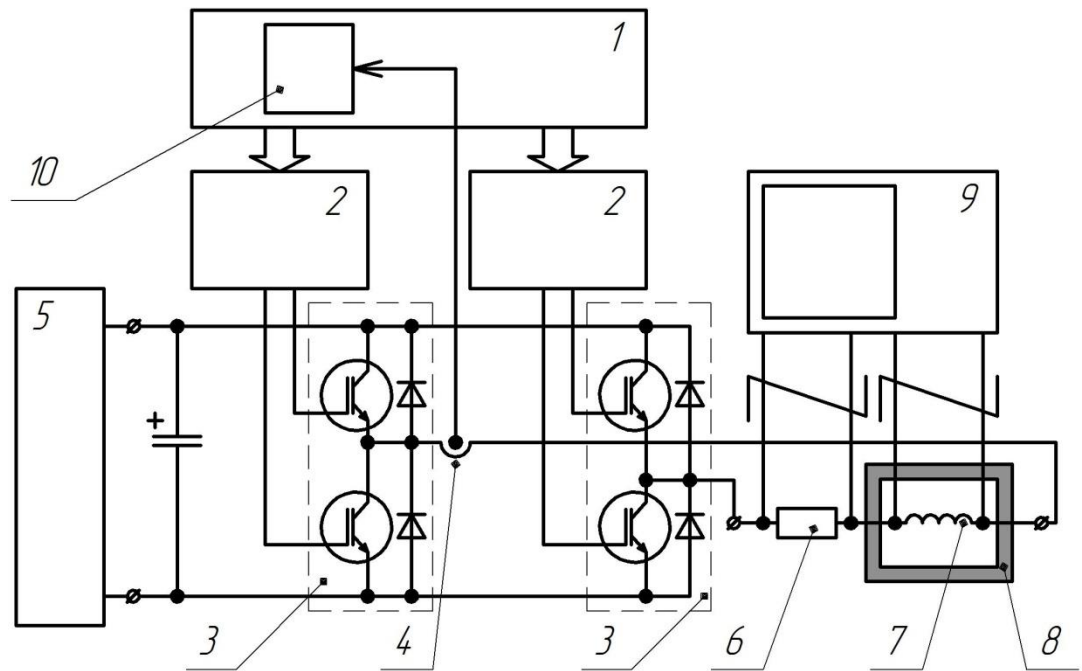


Рисунок 5.9 - Структурная схема испытательного стенда

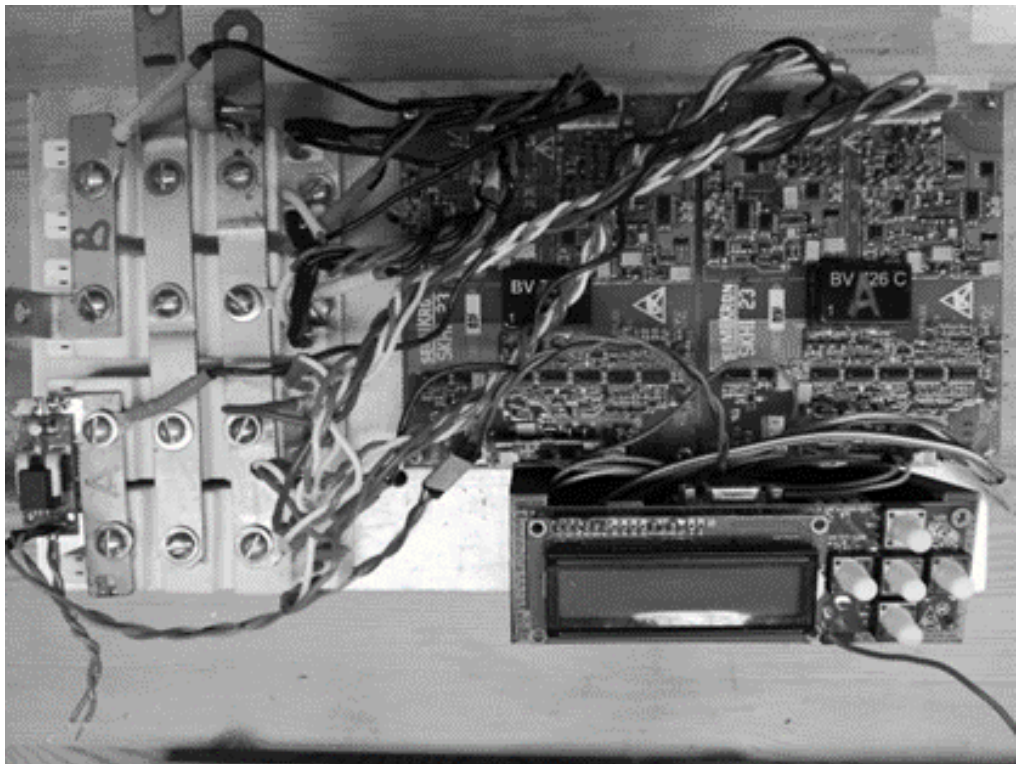


Рисунок 5.10 – Общий вид инвертора

### 5.3.2 Результаты испытаний катушки от инвертора в режиме источника тока.

Устройство было запрограммировано на создание в ВСТП катушке двух форм тока: синусоидальный ток, имитирующий ток фазы синхронной машины, работающей от инвертора (режим «СМ») (рисунок 5.11), и трапецеидальный ток фазы бесколлекторного двигателя постоянного тока (режим «БДПТ») (рисунок 5.12).

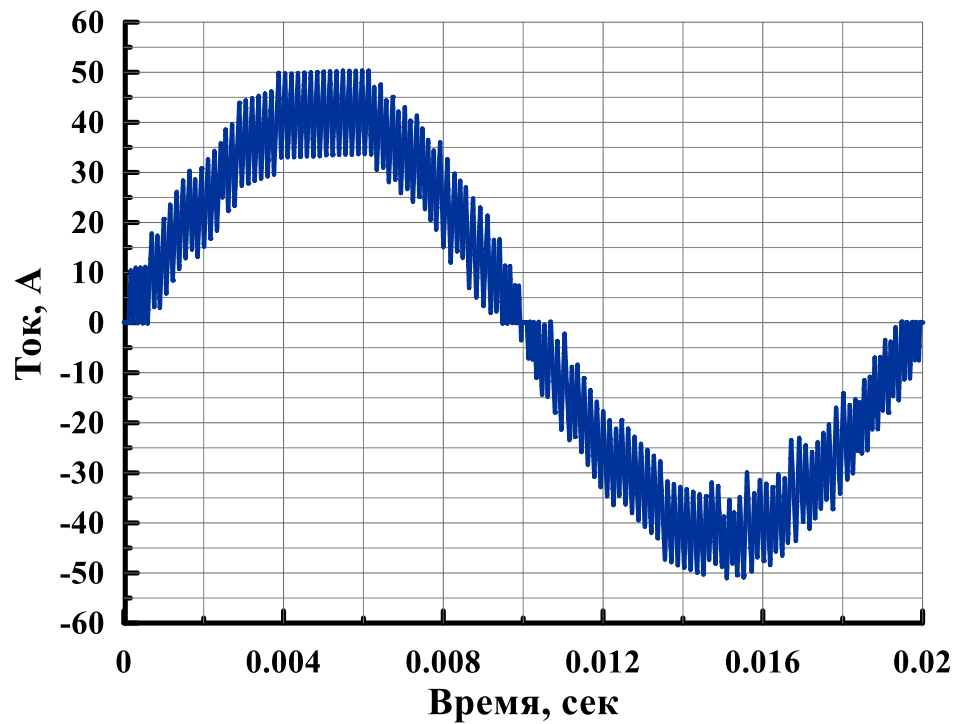


Рисунок 5.11 – Сформированный в ВСТП катушке синусоидальный ток с частотой 50 Гц (режим «СМ»)

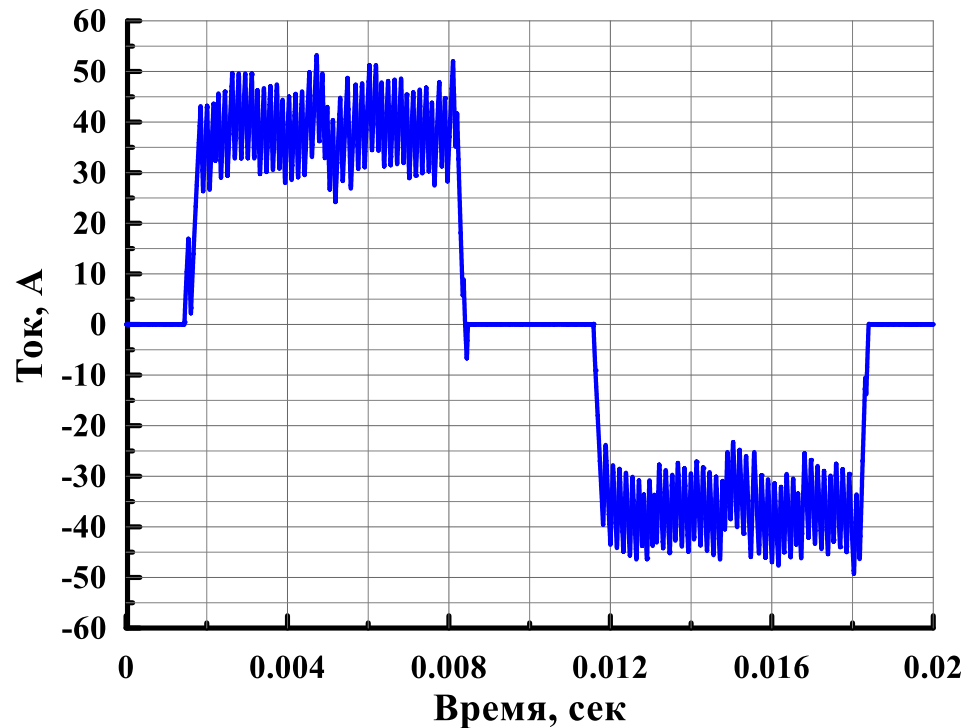


Рисунок 5.12 – Трапецеидальный (режим «БДПТ») ток в ВТСП катушке с частотой 50 Гц

Форма тока фазы БДПТ была скопирована с осциллограммы фазного тока регулятора хода для БДПТ китайского производства компании "Flier" [86], предназначенного для использования на крупномасштабных моделях самолетов или для мотопарапланов с электрической силовой установкой. Для записи тока фазы был использован вышеописанный резистивный шунт, а инвертор был подключен к БДПТ, выпускаемому серийно. Затем, при проведении эксперимента, ток масштабировался программными методами по частоте и амплитуде для получения различных рабочих точек.

Для этого эксперимента была изготовлена еще одна катушка, из изолированной ленты «SuperOx», основной отличительной чертой которой является немагнитная подложка. Остальные данные приведены в таблице 5.2.



Таблица 5.2 - Параметры ВТСП лент

Параметр	AMSC	SuperOx
Средняя толщина, мм	0,21	0,11
Максимальная ширина, мм	4,95	4,1
$I_c$ (короткий образец), А	100	150
$n$ (короткий образец)	>30	>30
$I_c$ (обмотка), А	83	130
$n$ (обмотка)	>23	>23

Аналогично всем предыдущим экспериментам, измерения мощности потерь проводились электрическим методом с последующей цифровой обработкой сигналов и интегрированием на ПК. Однако используемая ранее методика, дающая отличные результаты на чистых либо относительно незашумленных сигналах [72,80], в данной ситуации требует значительно больших усилий как при проведении эксперимента и записи сигналов, так и при их последующей обработке.

На рисунке 5.13 отображено напряжение на потенциальных контактах катушки и соответствующий ток.

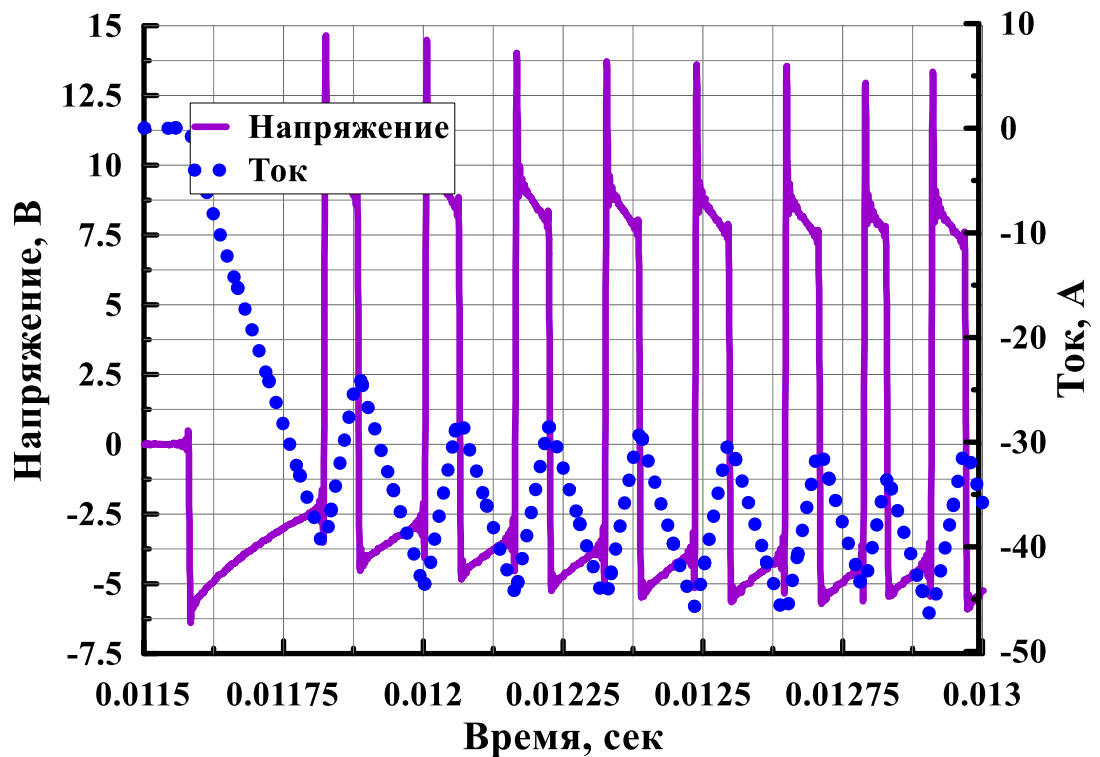


Рисунок 5.13 – Напряжение и ток в ВТСП катушке

На осциллограмме напряжения присутствуют высокочастотные пики и помехи, неизбежно возникающие в процессе коммутации силовых ключей [87] и искажающие полезный сигнал. Для минимизации данного эффекта потребовалось уделить особое внимание вопросу помехозащищенности разработанного стенда. Помимо специальных мер по прокладке силовых и сигнальных цепей, на выходные клеммы лабораторного источника (ЛИ) питания пришлось установить конденсатор большой емкости (1 Ф) с низким эквивалентным сопротивлением (менее 1,5 мОм). В отсутствие конденсатора ЛИ оказался неспособен работать на нагрузку, потребляющую высокочастотные импульсы тока, что выражалось в появлении акустического шума (звона) в самом ЛИ, а также в генерации столь значительных электромагнитных помех, на фоне которых полезные сигналы (напряжение и ток в катушке) становились неразличимы.

Дальнейшая обработка экспериментальных данных также претерпела ряд изменений. Для выделения периодов тока использовался программный фильтр нижних частот Баттерворта с частотой среза, близкой к частоте первой гармоники (т.е. 50, 100 и 200 Гц). Таким образом были получены временные отметки начала каждого из периодов, по которым на следующем шаге производилось интегрирование по формуле (2.13), но с использованием сигнала тока уже без фильтрации. При проведении экспериментов на всех частотах и амплитудах токов на самописец записывалось 4 секунды сигналов, что представляет собой 200, 400 и 800 периодов тока для вышеуказанных частот соответственно. На рисунке 5.14 в качестве примера приведены расчетные значения мощности по периодам для эксперимента на частоте 200 Гц.

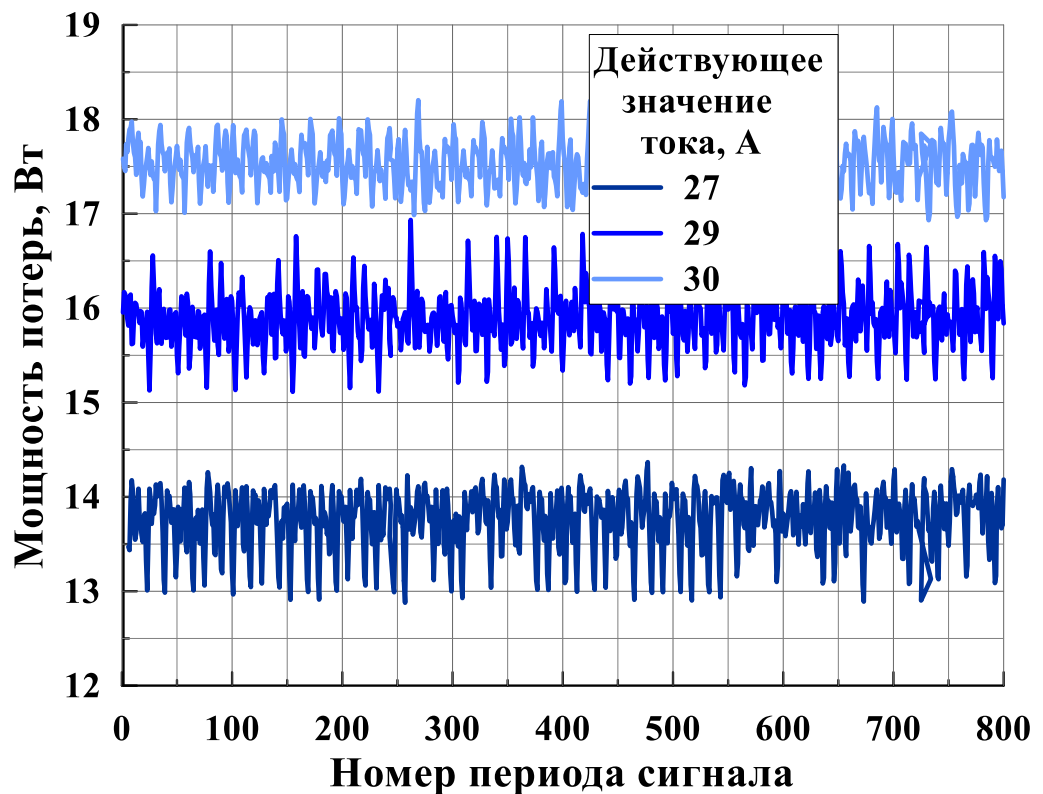


Рисунок 5.14 – Потери в ВСТП катушке по периодам для трех значений трапецеидального тока при частоте 200 Гц

Из-за присутствия помех вычисленное значение мощности от периода к периоду непостоянно, и для получения корректного результата требуется усреднение. При этом очевидно, что количество записанных во время эксперимента периодов для вычисления достоверного среднего значения потерь должно значительно превышать 2...5 периодов, использовавшихся ранее в п. 2.2 для токов синусоидальной и прямоугольной формы.

Итоговые значения потерь в каждой из катушек («SuperOx» и «AMSC») для двух режимов отображены на рисунках 5.15 и 5.16. Потери возрастают монотонно и более плавно, чем на синусоидальном токе, но значения оказываются в несколько раз выше.

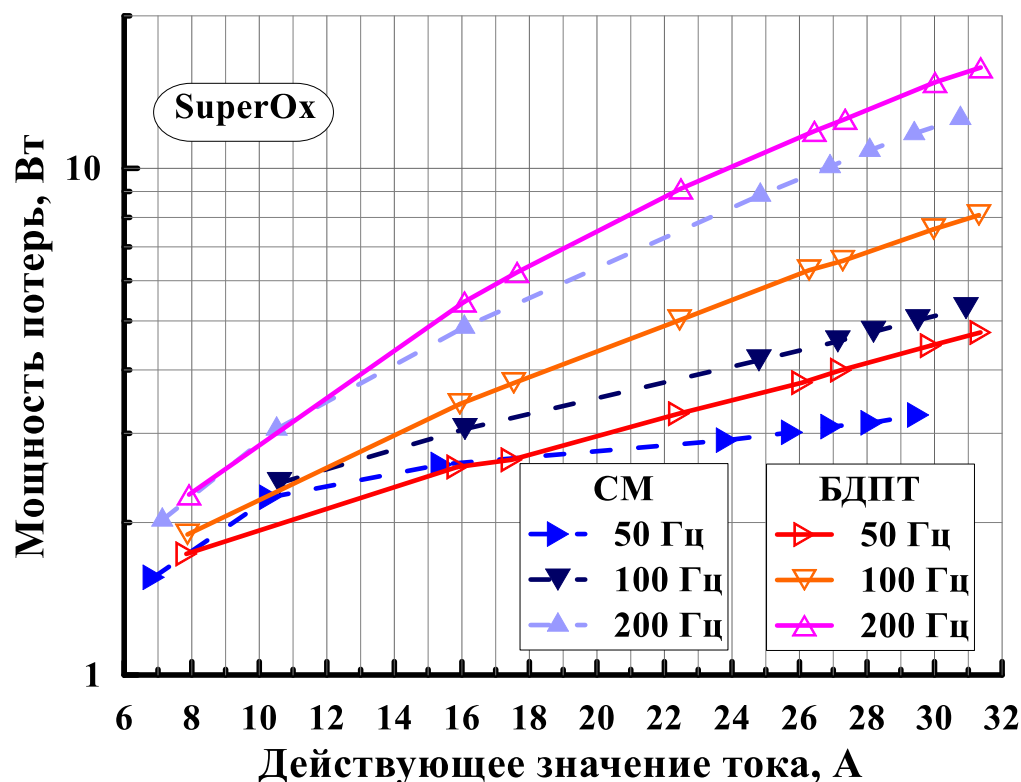


Рисунок 5.15 – Потери в катушке на основе ленты «SuperOx» для режимов «СМ» и «БДПТ», сформированных высокочастотной модуляцией

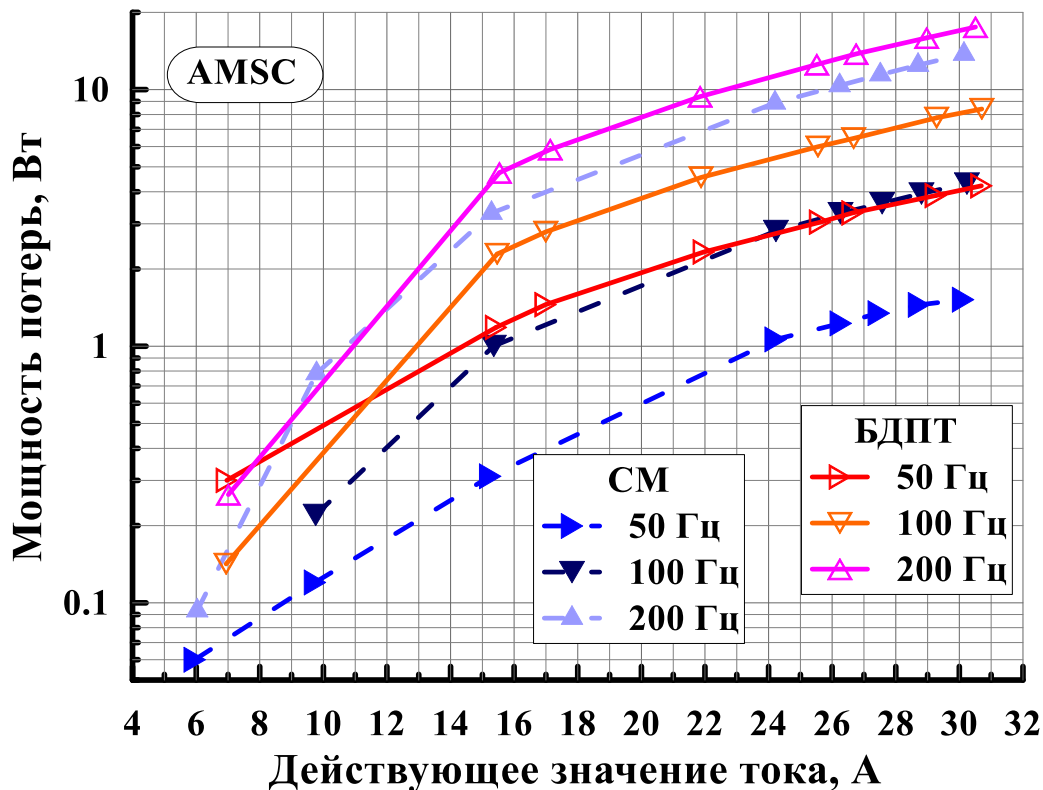


Рисунок 5.16 – Потери в обмотке на основе ленты «AMSC» для режимов «СМ» и «БДПТ», сформированных высокочастотной модуляцией

Причина возрастания потерь состоит в наличии токового коридора с частотой 6...8 кГц [88]. Его амплитуда не зависит от частоты и формы основного сигнала и определена только алгоритмом, заложенным в систему управления. Трапецеидальная форма тока (режим «БДПТ») создает больше потерь, что можно объяснить наличием высших гармоник.

#### 5.4 ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5

- Разработаны и изготовлены оригинальные испытательные стенды, работающие как в режиме источника напряжения, так и в режиме

источника тока для исследования ВТСП обмоток электрических машин. Изготовлен токовый шунт специальной конструкции.

- Для случая с источником тока доработаны ранее использовавшаяся методика проведения эксперимента и алгоритм расчета потерь.
- Для детального изучения работы ВТСП катушек проведены их испытания на несинусоидальных токах, в режимах, имитирующих работу двигателя с электронным преобразователем-инвертором.
- Измерения потерь показали, что в случае питания катушки от силового преобразователя в режиме источника напряжения не возникает дополнительных потерь, связанных с высокой частотой ШИМ.
- Анализ экспериментальных данных показывает, что наличие значительных по амплитуде пульсаций тока (размах 15 А) в режиме источника тока приводит к ощутимому возрастанию потерь как в режиме генерированного синуса (режим «СМ»), так и трапеции (режим «БДПТ»). Кроме того, на этих режимах потери на трапецеидальном токе выше на 20%, чем на синусоидальном.

## ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЙСТРЕКОВЫХ ВТСП КАТУШЕК И ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ В ПРИСУТСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

### 6.1 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВТСП КАТУШЕК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА

Испытуемая катушка является одной из 16 ВТСП катушек, изготовленных для статора экспериментальной электрической машины с кольцевой конструкцией обмотки [89].

Катушка имеет форму двойного рейстрека. Ее внешний вид приведен на рисунке 6.1, а основные параметры – в таблице 6.1.



Рисунок 6.1 – Внешний вид исследуемой ВТСП катушки

Таблица 6.1. Параметры ВТСП катушки

Лента	AMSC
Минимальный критический ток ленты при 77 К, А	100
Изоляция	каптон
Тип катушки	двойной рейстрек
Число витков	24
Длина линейной части, мм	100
Высота катушки, мм	10
Ширина катушки, мм	7
Длина ВТСП ленты, м	8
Материал каркаса	полиамид

В процессе изготовления каждая катушка пропитана компаундом для обеспечения механической связи между витками и создания монолитной структуры. Для катушки использована 2G ВТСП лента от производителя «AMSC», имеющая следующие параметры: поперечное сечение по проводнику  $4,8 \times 0,21 \text{ мм}^2$ , с изоляцией  $4,95 \times 0,36 \text{ мм}^2$ , критический ток  $I_c$  ( $1 \text{ мкВ/см}$ ,  $77,4 \text{ К}$ )  $105 \text{ А}$ , параметр нарастания  $n \sim 28$ . Стоит отметить, что подложка данного ВТСП проводника обладает слабовыраженными ферромагнитными свойствами.

## **6.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВТСП КАТУШЕК НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Перед сборкой статора были проведены эксперименты с отдельными катушками во внешнем магнитном поле.



Для исследования рабочих параметров ВТСП катушек использована оснастка (рисунок 6.2а), состоящая из: постоянных магнитов, испытуемой катушки, датчиков Холла и пластикового каркаса. Магниты устанавливаются таким образом, что направление их намагниченности совпадает, расположены они в середине линейной части катушки, равноудаленно от лобовых частей. На рисунке 6.2б показано распределение магнитного поля, создаваемое постоянными магнитами на исследуемой ВТСП катушке.

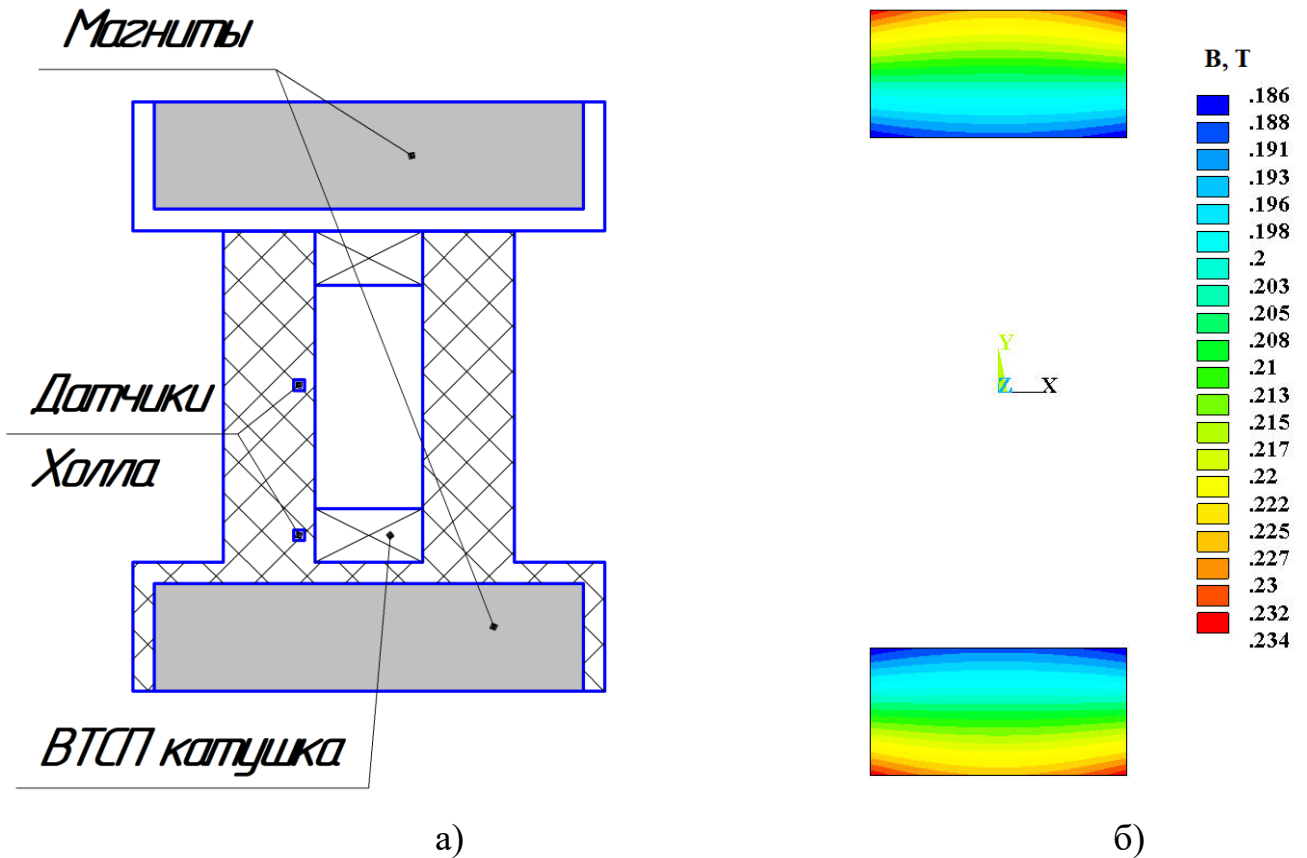


Рисунок 6.2. а) Структура оснастки; б) Магнитное поле на катушках, полученное расчетным путем

Расчетные значения магнитного поля в области катушки изменяются от 0,19 Тл до 0,23 Тл.

Измерения выполнены для следующих диапазонов амплитуд и форм тока и частот питающего напряжения:

- амплитудное значение тока: 0 А – 60 А;
- частота: 50 Гц, 100 Гц, 200 Гц;
- форма сигнала: синусоидальный, ВЧ-модуляция.

На рисунке 6.3 приведены измеренные потери на синусоидальном токе в ВТСП катушке, используемой в статорной обмотке во внешнем магнитном поле около 0,2 Тл [90].

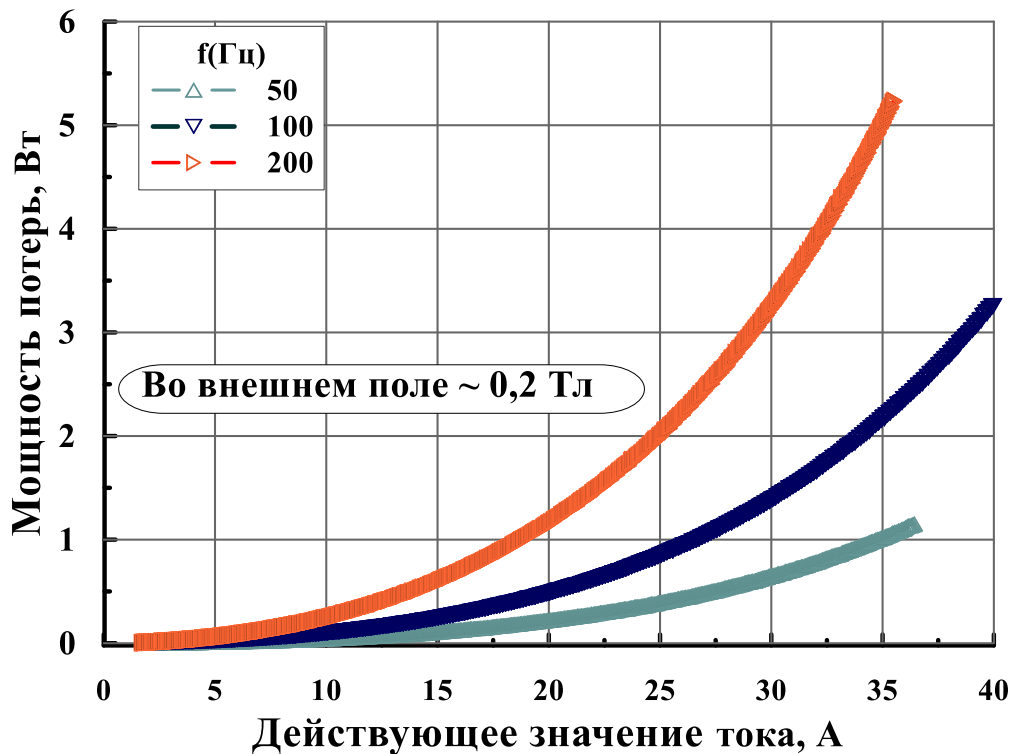


Рисунок 6.3 – Измеренные потери на синусоидальном токе в катушке, используемой в кольцевой статорной обмотке во внешнем поле 0,2 Тл

Далее были проведены измерения потерь в катушке, питающейся от преобразователя. Принцип его работы более подробно описан в п. 5.3.1.

Использованы две формы тока: «БДПТ», соответствующая трапецеидальной форме тока, характерной для обмоток бесколлекторных двигателей постоянного тока, и «СМ» (синхронная машина) – синус, полученный высокочастотной модуляцией, что характерно для синхронного двигателя, питающегося от преобразователя.

Результаты измерений показаны на рисунках 6.4 и 6.5.

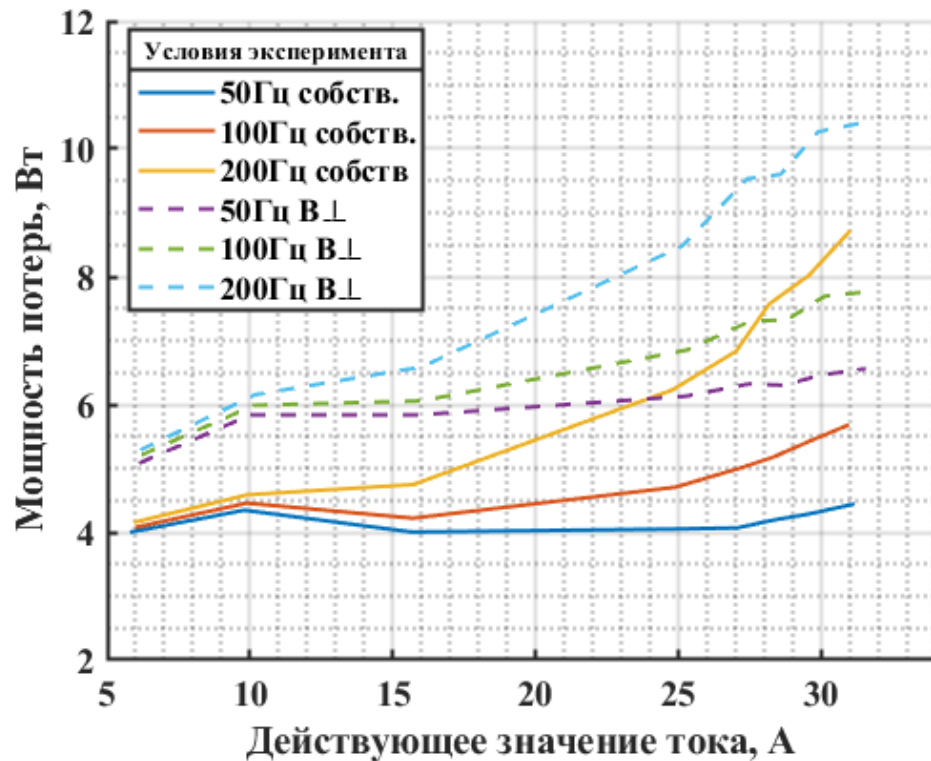


Рисунок 6.4 – Измеренные потери в катушке в «СМ» режиме

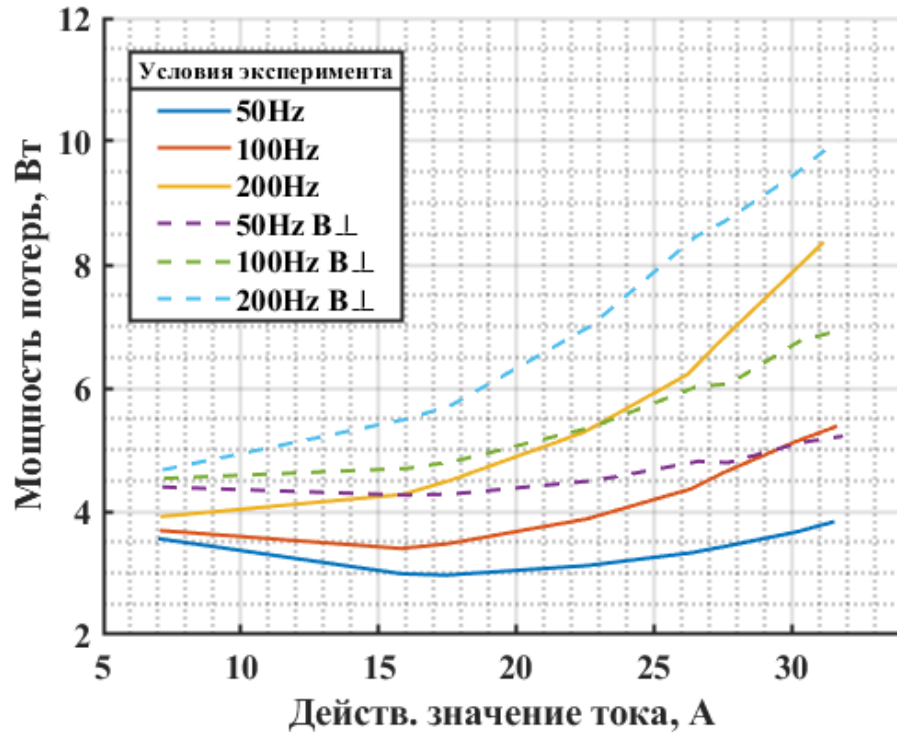


Рисунок 6.5 – Измеренные потери в катушке в «БДПТ» режиме

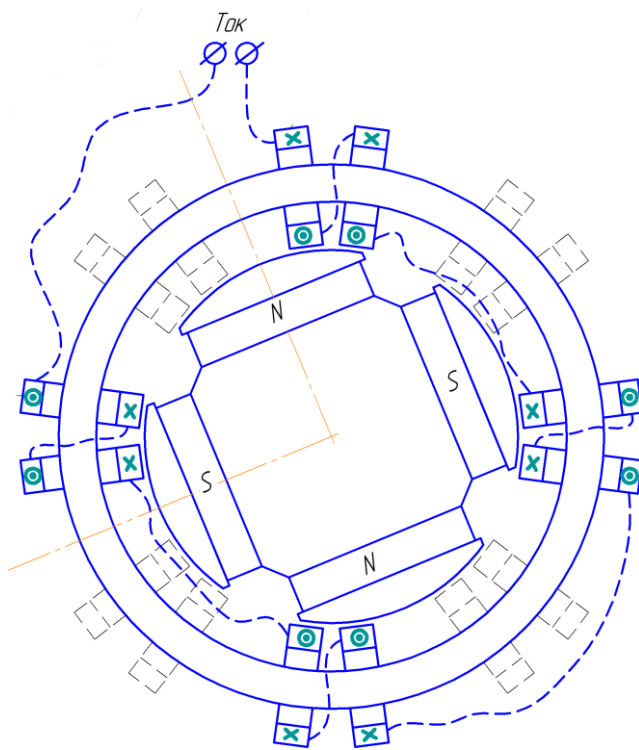
При сравнении потерь на рисунках 6.3-6.5 видно, что влияние высокочастотных колебаний тока на потери очень значительно и повышает их уровень в несколько раз. Внешнее магнитное поле также увеличивает потери.

### 6.3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В КОЛЬЦЕВОЙ ВТСП ОБМОТКЕ

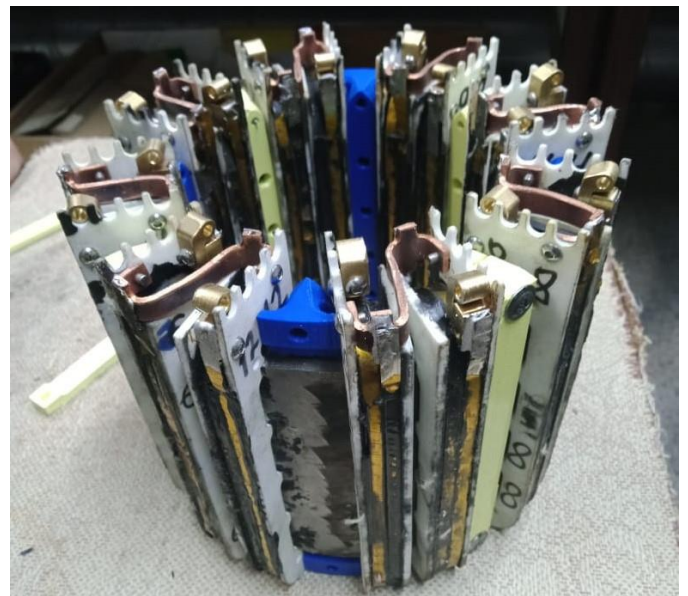
Из катушек, описанных в п. 6.1, изготовлен пакет статорной обмотки кольцевой ОЯ для сверхпроводниковой электрической машины (схема отображена на рисунке 6.6а). Он представляет собой замкнутый магнитопровод из шихтованной электротехнической стали, на который надеты ВТСП катушки, соединенные попарно-последовательно при помощи перемычек из листовой меди. Получившиеся таким образом спаренные катушки равномерно распределены по

окружности. Для удобства коммутации клеммы всех катушек расположены с одной стороны магнитопровода. Общий вид конструкции представлен на рисунке 6.6б.

При помощи коротких отрезков медного изолированного провода сформированы две фазы. При этом катушки в фазах подобраны по критическому току таким образом, чтобы получить максимально близкие средние значения тока в обеих фазах. Коммутация спаренных катушек каждой из фаз осуществлена последовательно между собой так, чтобы при протекании тока его направление соответствовало схеме на рисунке 6.6а.



а)



б)

Рисунок 6.6. а) Схематичное изображение статорной обмотки с установленным внутри ротором; сплошными линиями обозначена обмотка одной из двух фаз.

б) Собранный пакет кольцевой статорной обмотки

После монтажа фазы были испытаны на критический ток, а также измерена их индуктивность. Критический ток составил 89,4 А и 89,9 А, индуктивность 2,25 мГн и 2,33 мГн. Разброс этих параметров составил около 3%, схожесть характеристик фаз высокая.

Далее были проведены испытания на переменном токе по методике, описанной в п. 4.3. На рисунке 6.7 показана мощность измеренных потерь при различных частотах.

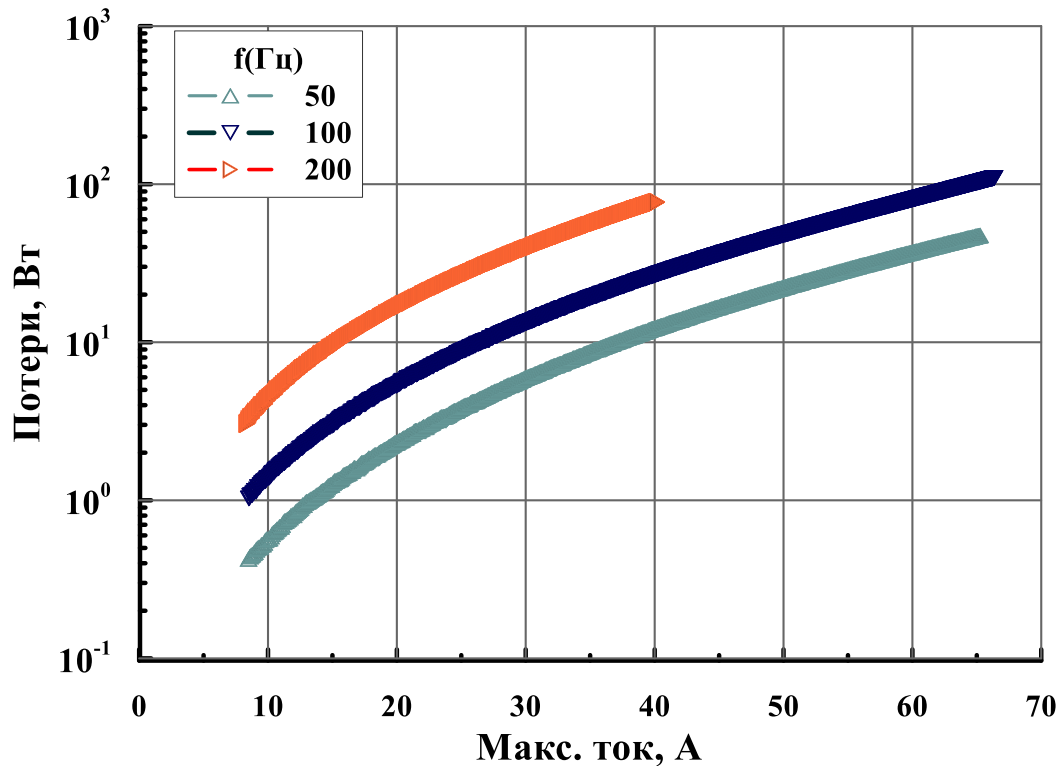


Рисунок 6.7 – Мощность измеренных потерь на синусоидальном токе в кольцевой статорной обмотке

На переменном токе в устройстве на основе 2G ВТСП лент возникают следующие виды потерь: гистерезисные потери в ВТСП слое лент, гистерезисные потери в подложке лент, если она магнитная, а также гистерезисные потери в

магнитопроводе и вихревые потери в различных металлических элементах устройства.

Прежде всего проведена оценка гистерезисных потерь в магнитопроводе по двумерной модели в программном комплексе ANSYS. На рисунке 6.8 показано магнитное поле в кольцевой статорной обмотке при максимальном токе 60 А, рассчитанное разработанной численной моделью. В расчётах учтена реальная зависимость  $B(H)$  материала магнитопровода. На рисунке 6.9 приведена кривая намагниченности стали 2412, из которой изготовлен магнитопровод.

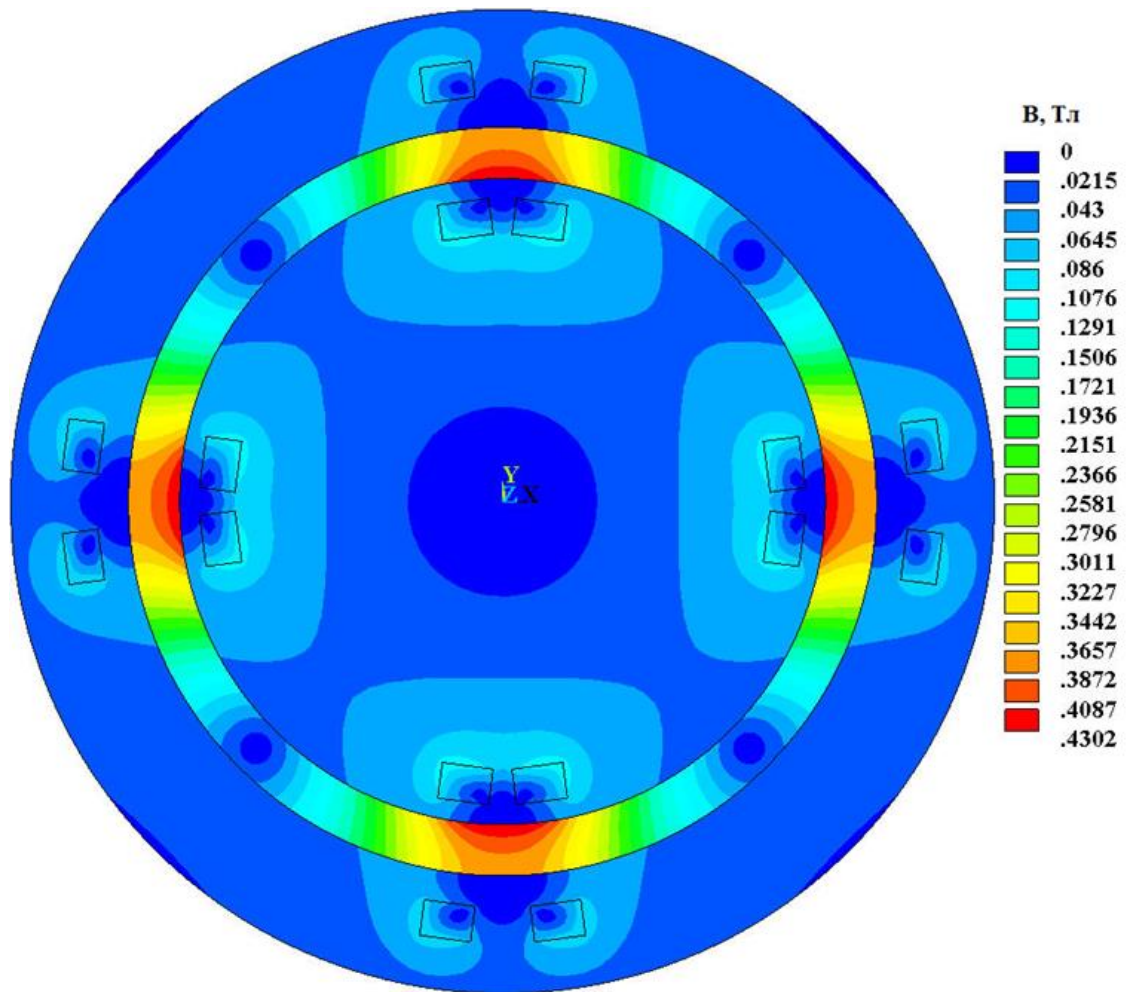


Рисунок 6.8 – Магнитное поле в кольцевой статорной обмотке при максимальном токе 60 А

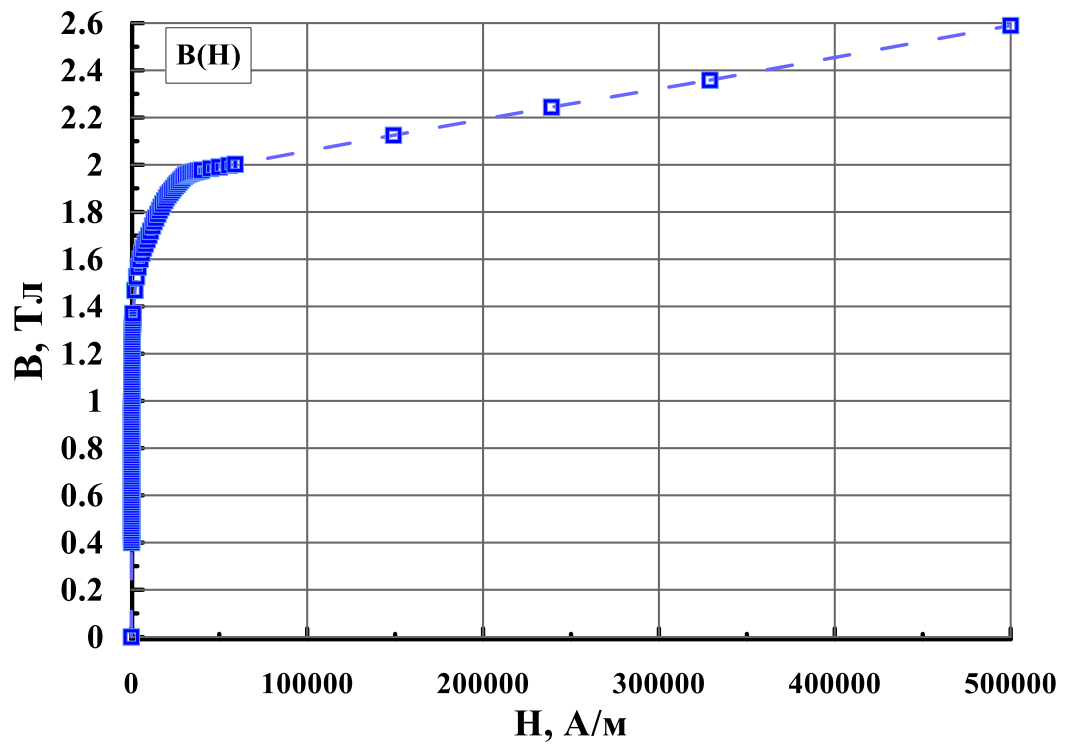


Рисунок 6.9 – Кривая намагниченности стали 2412

На рисунке 6.10 показаны расчетные потери в магнитопроводе за цикл изменения тока. Из рисунка видно, что потери в магнитопроводе на порядок меньше измеренных потерь, следовательно, основные потери — это гистерезисные потери в ВТСП лентах катушек.



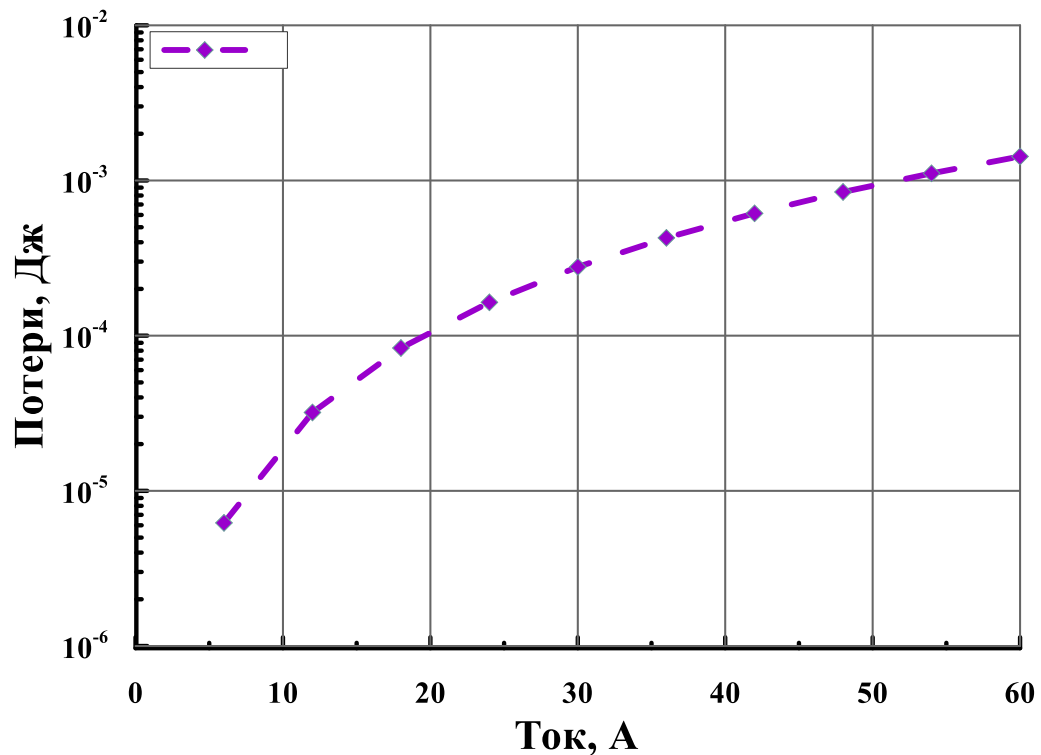


Рисунок 6.10 – Расчетные потери за цикл изменения тока в магнитопроводе

В работах [17,91] и главе 3 диссертации приведены расчетные и измеренные потери в подобной катушке (с меньшими размерами) как из ленты без магнитной подложки (рисунок 3.6), так и из ленты «AMSC» (рисунок 3.8). Сравнивая кривые потерь на рисунках 3.6 и 3.8, можно видеть, что гистерезисные потери в подложках преобладают при токах менее 10 А. Так, при токе 40 А потери в данной катушке будут в основном потерями в ВТСП слое.

Еще одним доказательством преобладания потерь в ВТСП катушках рассматриваемого изделия над потерями в стали является то, что в нашем случае речь идет о 8 катушках, которые имеют приблизительно в 2 раза больший объем. Если пересчитать потери из рисунка 6.7 при токе 40 А на объем, то они составят около 0,24 Дж, что близко к данным, приведенным на рисунке 3.8.

На рисунке 6.11 приведены измеренные потери в ВТСП катушке, используемой в статорной обмотке во внешнем магнитном поле около 0,2 Тл [3]. Сумма потерь (8 катушек) приближенно равна измеренным потерям в статорной обмотке (рисунки 6.7 и 6.11).

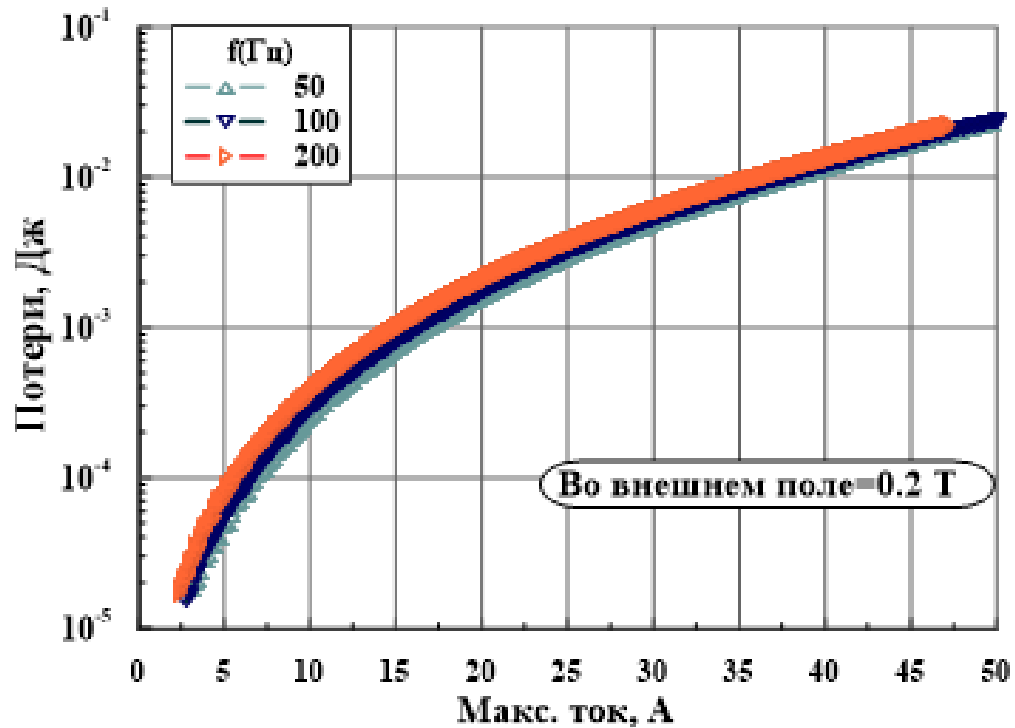


Рисунок 6.11 – Измеренные потери в одной катушке, используемой в кольцевой статорной обмотке во внешнем поле 0,2 Тл

Проведенный анализ показал, что основные потери — это гистерезисные потери в ВТСП слое лент катушек статорной обмотки.

#### 6.4 ИСПЫТАНИЯ КОЛЬЦЕВОЙ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ С УСТАНОВЛЕННЫМ РОТОРОМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

На следующем этапе исследований собранный статор был установлен в корпус с подшипниковыми щитами и ротором с постоянными магнитами (рисунок 6.12).



Рисунок 6.12 - Внешний вид сверхпроводниковой электрической машины с кольцевой обмоткой якоря

Иными словами, была осуществлена сборка сверхпроводниковой электрической машины с кольцевой обмоткой якоря. Стоит отметить, что даже при неподвижном роторе ВТСП катушки обмотки статора находятся во внешнем поле, что может в значительной степени повлиять как на критический ток фаз, так и на потери на переменном токе. Для этого на собранную машину была установлена оснастка (рисунок 6.13), позволяющая фиксировать ротор в 15 положениях от 0 до 90 градусов. Оснастка состоит из неподвижной планки (2) с перфорацией, смонтированной на корпусе (1) и закрепленной на валу стрелки (3). Вал фиксируется путем совмещения отверстия в стрелке с требуемым отверстием в планке и фиксации положения металлическим штифтом. Ввиду того, что ротор

имеет 2 пары полюсов (рисунок 6.6а), для получения полной картины изменения магнитного поля достаточно поворота ротора на угол 90 градусов.

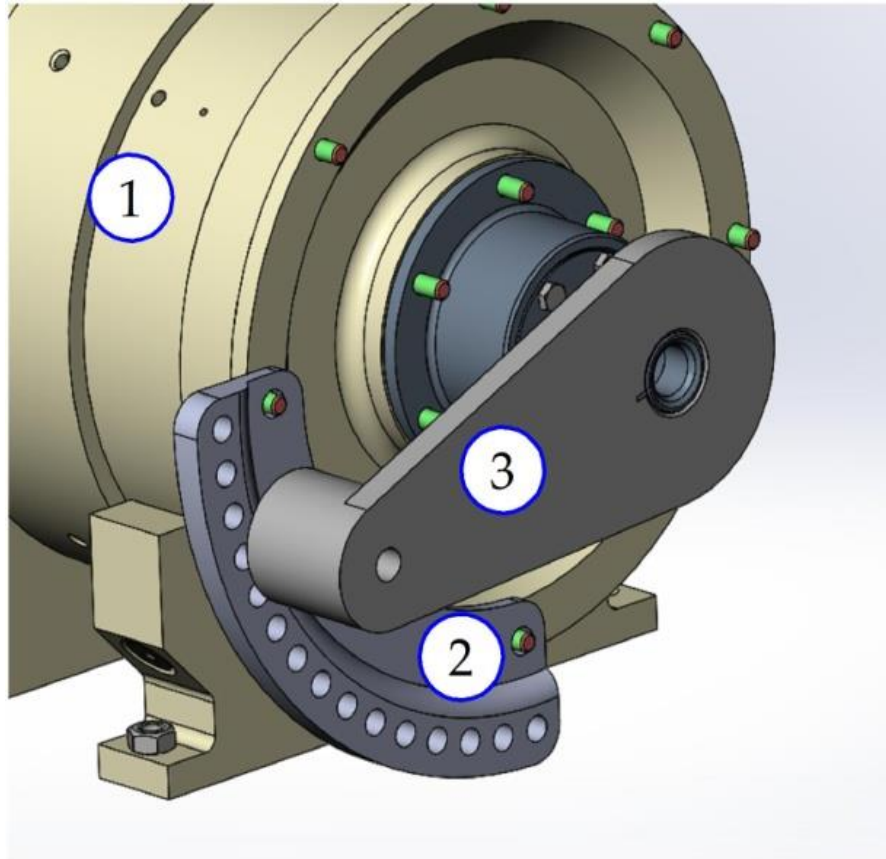


Рисунок 6.13 – Фиксирующее устройство для вала. 1 – ВТСП электрическая машина, 2 – неподвижная планка с отверстиями, 3 – стрелка, закрепленная на валу

Все последующие эксперименты проводились только на одной фазе из двух в силу их высокой идентичности.

#### 6.4.1 *Измерение критического тока с установленным ротором*

Критический ток был измерен в пяти положениях ротора: отверстиях № «0», «4», «8», «12», «15», что соответствует положениям ротора 0; 25,6; 45; 76,8 и 90

градусов. Сравнение с критическим током статора без установленного ротора (89,4 А) приведено в таблице 6.2.

Таблица 6.2. Измеренный критический ток

Угол, град.	Измеренный критический ток, А	Соотношение критического тока фазы без ротора к измеренному с ротором
0	44,4	0,5
25,6	42,8	0,48
45	45,8	0,51
76,8	47,9	0,54
90	42,2	0,47

Как следует из таблицы 6.2, влияние угла поворота ротора на критический ток не очень велико (разница между максимальным и минимальным значением составила 12%). Причина заключается в том, что большие полюсные наконечники ротора создают достаточно равномерное поле в зазоре. Однако после установки ротора критический ток упал в два раза (среднее значение по столбцу №3 таблицы 6.2), что говорит о значительном влиянии внешнего магнитного поля на критический ток использованной ВТСП ленты.

#### **6.4.2 Экспериментальные исследования макета с неподвижным ротором на переменном токе**

В отличие от измерения критического тока, в эксперименте на переменном токе были задействованы все 15 угловых положений ротора. Потери были измерены на частотах 50, 100 и 200 Гц. Для 50 Гц полученные кривые различаются по уровню потерь в зависимости от угла положения ротора (рисунок 6.14).

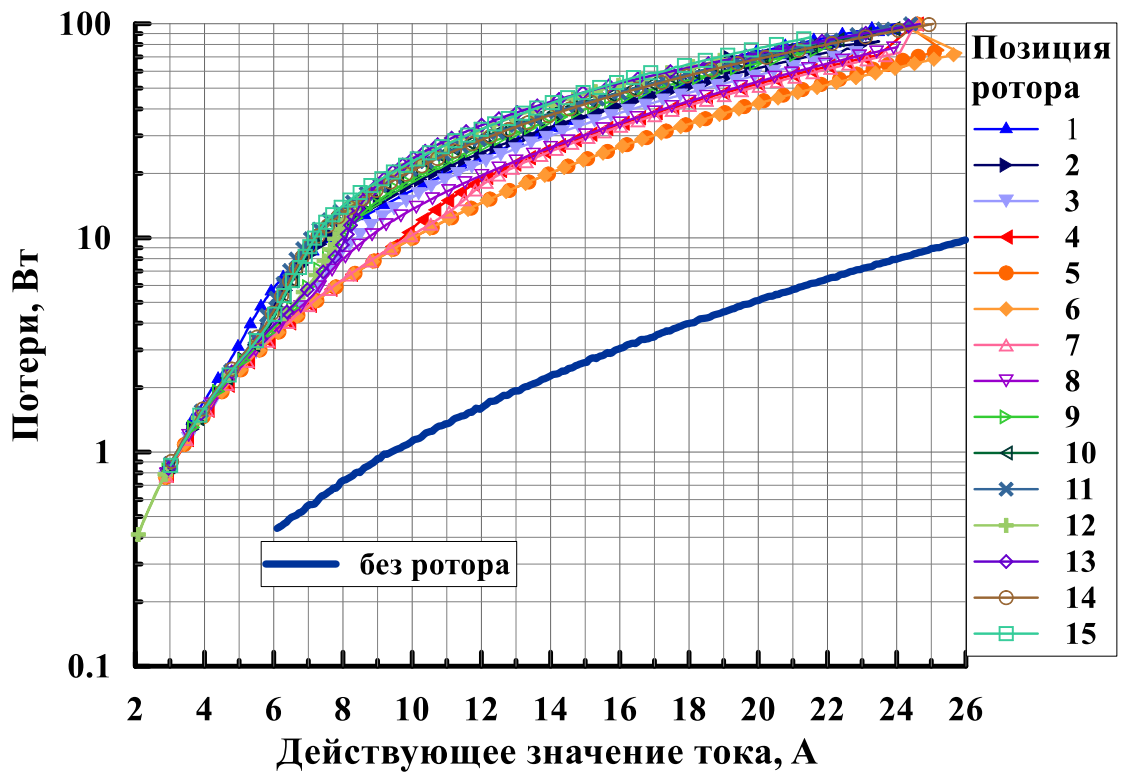


Рисунок 6.14 – Потери в статоре в зависимости от тока при различных углах установки ротора на частоте 50 Гц

Кроме того, в диапазоне от 5 до 15 А для нескольких положений ротора заметен некоторый излом зависимости потерь от тока. Одним из объяснений этого служит проявившийся во время проведения эксперимента эффект, связанный с вибрацией ротора. Переменное, но не вращающееся, магнитное поле, создаваемое испытуемой фазой, взаимодействует с ротором. При этом фиксирующая ротор оснастка (рисунок 6.13) обладает конечной жесткостью, что приводит к колебанию ротора относительно заданного положения и, следовательно, возникновению некоторых механических потерь мощности.

На частоте 100 Гц картина зависимости потерь от угла меняется, становясь менее заметной (рисунок 6.15). Во время испытаний наблюдаемые визуальные колебания ротора относительно точек фиксации значительно уменьшились.

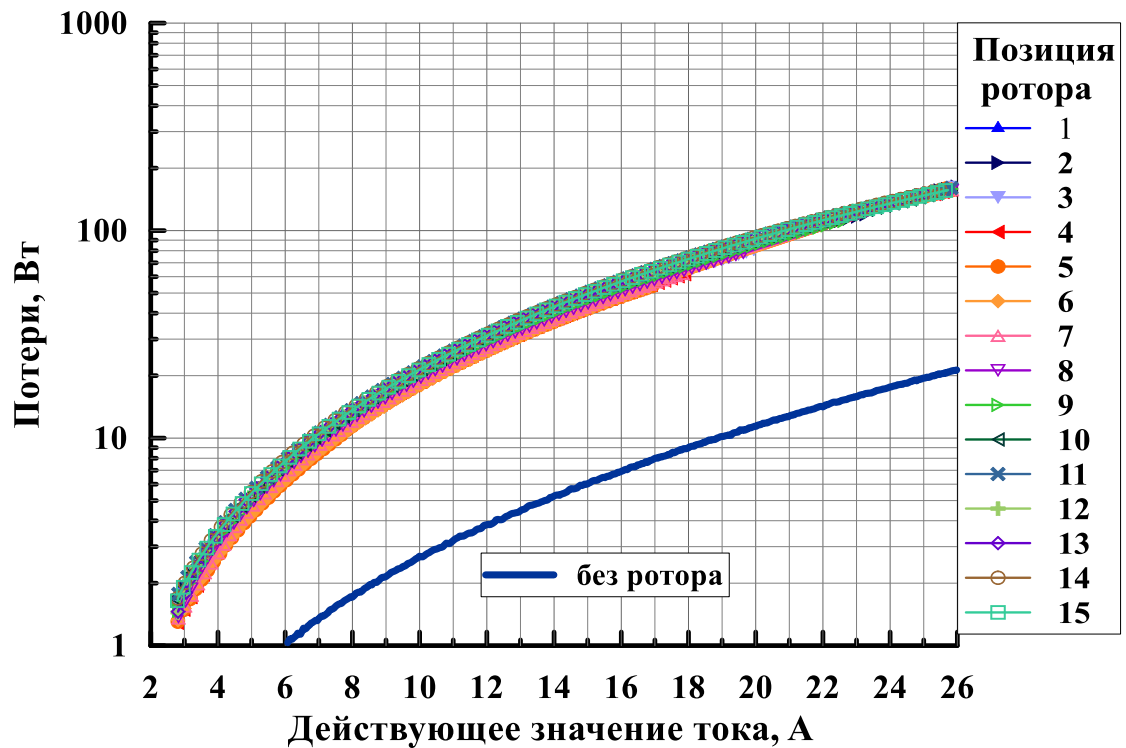


Рисунок 6.15 – Потери в статоре в зависимости от тока при различных углах установки ротора на частоте 100 Гц

Дальнейшее увеличение частоты показало ещё более слабую зависимость потерь от угла установки ротора, при этом его вибрация отсутствовала. На рисунке 6.16 показаны потери в статоре в зависимости от тока при различных углах установки ротора на частоте 200 Гц.

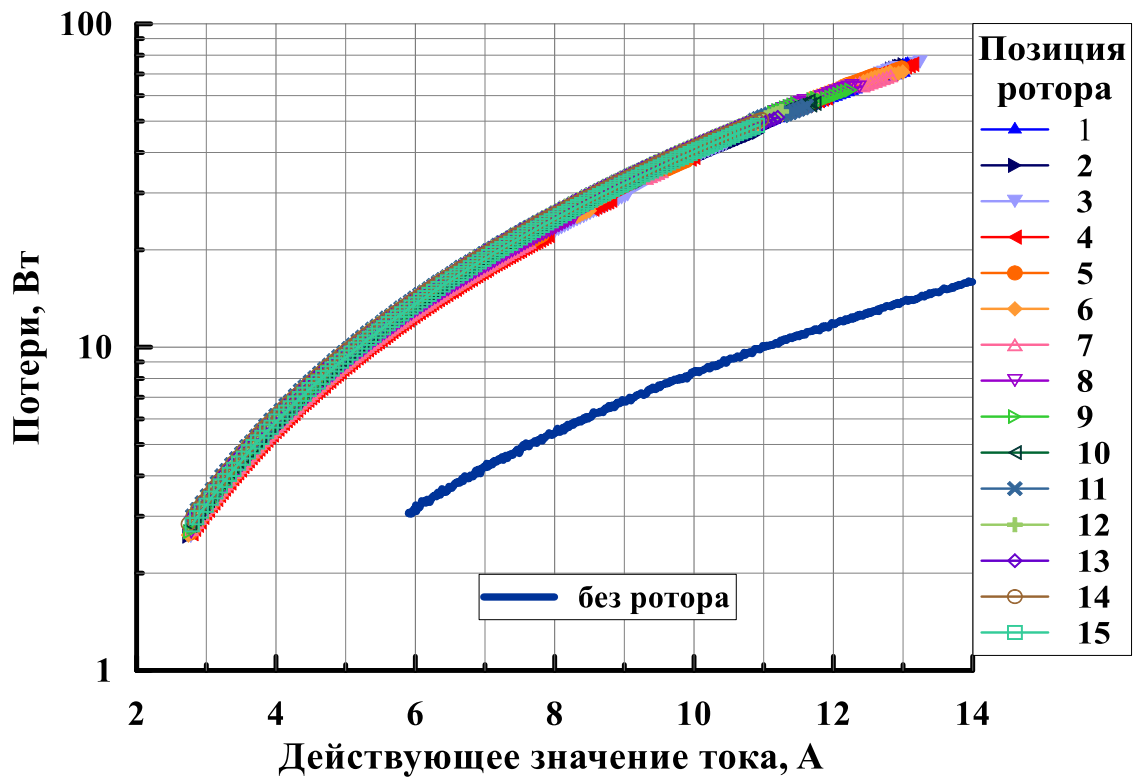


Рисунок 6.16 – Потери в статоре в зависимости от тока при различных углах установки ротора на частоте 200 Гц

Ввиду особенностей измерительного стенда на частоте 200 Гц (рисунок 6.16) не удалось ввести в фазу ток более 15 А действующего значения, однако уже при таком небольшом токе потери приблизились к значению 100 Вт.

В завершение цикла испытаний с заторможенным ротором фаза была испытана модулированными токами в нескольких положениях ротора по методике, аналогичной описанной в п. 6.2. Как и в случае с синусоидальным током, уровни потерь показали слабую зависимость от угла установки ротора, в связи с чем на графике (рисунок 6.17) показаны средние значения для каждой частоты.



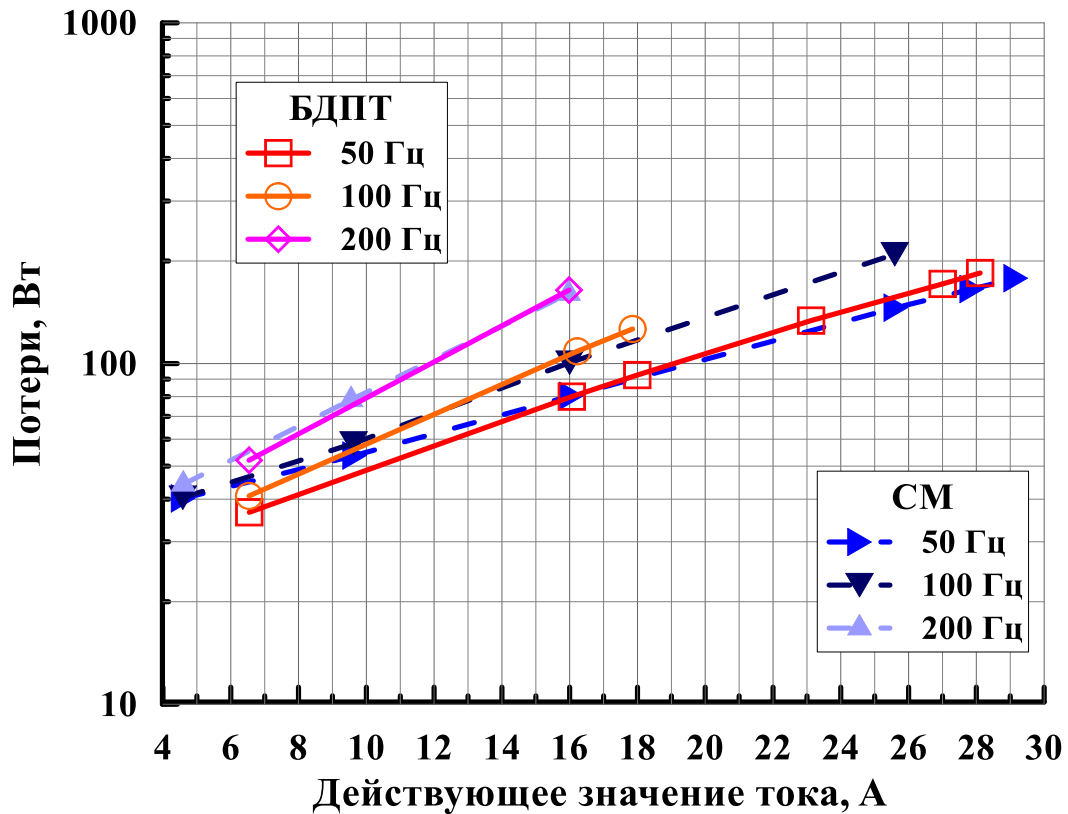


Рисунок 6.17 – Усредненные (для положений «0», «8», «15») потери в статоре для режимов «СМ» и «БДПТ»

Подобно экспериментам с одной катушкой, а также с собранным статором (без ротора), режим модулированного тока является самым тяжелым с точки зрения потерь. Было решено ограничить тепловыделение в обмотке примерно до уровня 200 Вт, чтобы избежать возможных повреждений до завершения заключительного этапа эксперимента с вращающимся ротором. Для этого входной ток при частоте 100 Гц был ограничен примерно 25 А действующего значения, а при 200 Гц он был ограничен примерно 16 А действующего значения. Разница в потерях между режимами «СМ» и «БДПТ» минимальна на каждой из частот, то есть режимы фактически идентичны.

## 6.5 ИСПЫТАНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАТОРА

Использувавшаяся ранее оснастка для измерений с неподвижным ротором была демонтирована, и испытуемый объект был установлен на стенд для испытаний электрических машин (рисунок 6.18).



Рисунок 6.18 – Стенд для испытаний электрических машин:

1 – экспериментальная ВТСП машина, 2 – датчик момента и частоты вращения,  
3 – приводной двигатель

Электромеханическая схема стенда представлена на рисунке 6.19. В качестве нагрузки для экспериментальной ВТСП машины выступают нагрузочные резисторы  $R_H$ , номиналы которых изменяются одновременно в обеих фазах. Датчики тока  $R_{Ш1}$  и  $R_{Ш2}$  специальной безындуктивной конструкции (п. 5.1) регистрируют токи в фазах. Сигналы с датчиков тока, фазные напряжения ( $U_1$  и  $U_2$ ), а также крутящий момент  $M$  на валу и угловая частота  $\omega$  регистрируются одновременно системой сбора данных с частотой не менее 500 тыс. точек в секунду для каждого канала. Данный стенд позволяет собрать все необходимые

данные для определения КПД и потерь в испытуемой машине благодаря одновременной регистрации как электрических (напряжение и ток в фазах), так и механических (крутящий момент, частота вращения вала) характеристик.

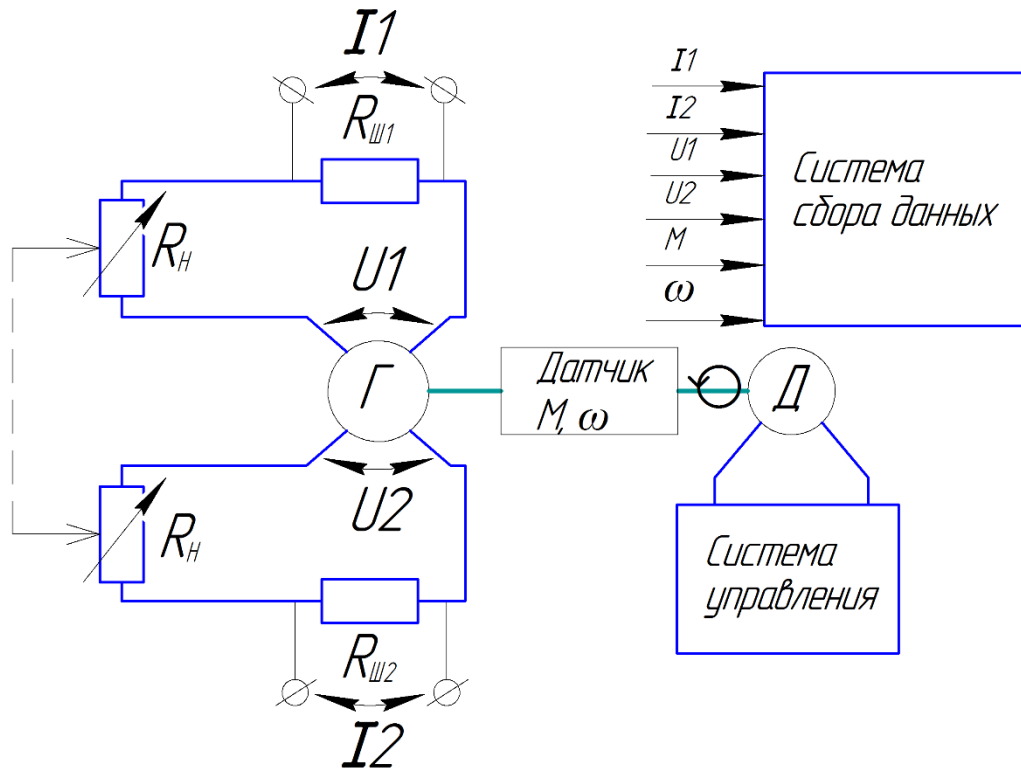


Рисунок 6.19 – Схема испытательного стенда

Для определения потерь в сверхпроводниковой обмотке можно воспользоваться следующим выражением баланса мощности:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{xx}} + P_{\text{акт}} + P_{\text{ВТСП}}, \quad (6.1)$$

При этом:

$$P_{\text{мех}} = M * \omega, \quad (6.2)$$

где  $M$  и  $\omega$  – крутящий момент и частота вращения вала соответственно, регистрируемые при помощи датчика. Для двухфазной электрической машины активную мощность можно вычислить как

$$P_{\text{акт}} = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} u_1 i_1 dt + \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} u_2 i_2 dt, \quad (6.3)$$

где  $u_1 i_1$  и  $u_2 i_2$  – мгновенные значения напряжений и токов в фазах,  $t_m$  – период интегрирования, равный периоду напряжения в фазе. Потери холостого хода  $P_{\text{хх}} = P_{\text{мех}}$  для каждой частоты вращения вала.

Нагрузкой генератора служит набор из 5 сопротивлений (одинаковых для каждой фазы), что обеспечивает, соответственно, 5 уровней мощности на каждой из четырех выбранных частот вращения ротора генератора.

На рисунке 6.20 представлены потери в фазе, приведенные на период (цикл) тока (Дж/цикл), в зависимости от усредненного действующего значения тока в фазе. Также пунктиром представлены данные по потерям в фазе с установленным неподвижным ротором. Для графика взяты углы ротора с максимальными значениями потерь.

Видно хорошее совпадение кривых при разных частотах для генераторного режима, следовательно, характер потерь гистерезисный, так как они не зависят от частоты. Уровень потерь с подвижным ротором значительно выше. Увеличение потерь связано с дополнительными гистерезисными потерями в ВТСП слоях лент обмотки, возникающими в переменном внешнем магнитном поле.

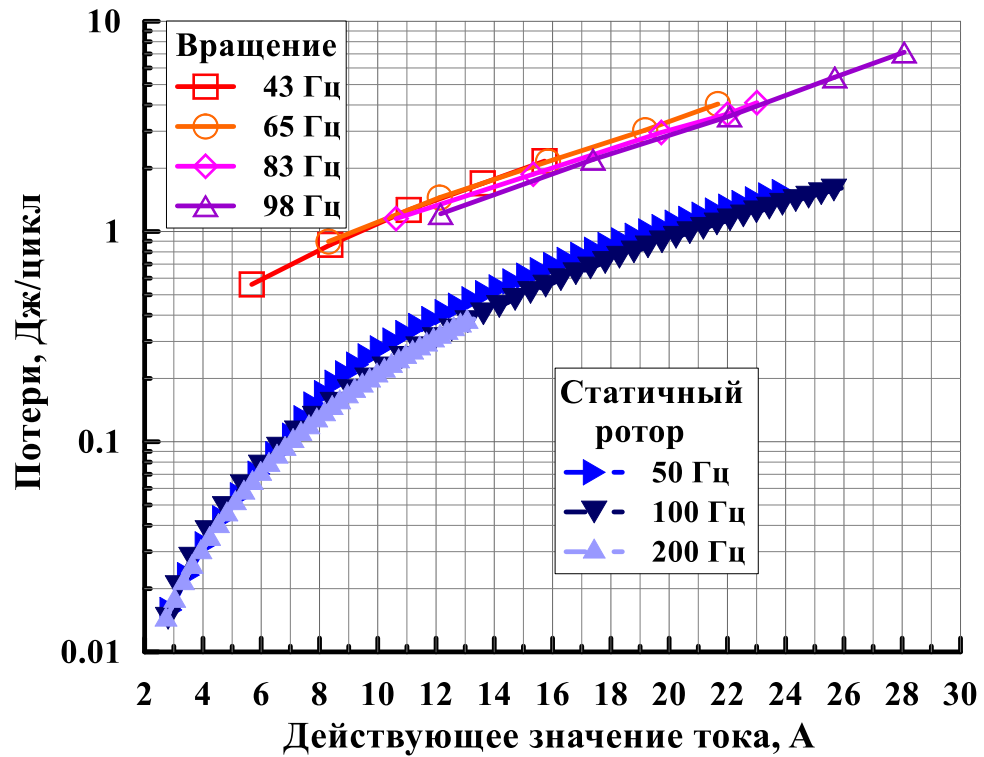


Рисунок 6.20 – Измеренные потери на синусоидальном токе в кольцевой статорной обмотке с подвижным ротором и с неподвижным ротором

Сравнение измеренных потерь приведено в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Измеренные потери (Дж/цикл) для синусоидального тока

Амплитудное значение тока, А	Одиночная катушка	Без ротора	Статичный ротор	Вращение
5	$7 \times 10^{-5}$	0,008	0,025	0,35
10	0,0003	0,13	0,1	0,7
15	0,0009	0,03	1,16	0,25
20	0,0018	0,055	0,45	1,65
25	0,0033	0,09	0,71	2,4
35	0,008	0,2	1,46	5

Проведенный анализ показал, что основными потерями будут гистерезисные потери в ВТСП слое лент катушек. Увеличение потерь в статорной обмотке с подвижным ротором связано с тем, что ВТСП катушки работают во внешнем переменном магнитном поле. Результаты свидетельствуют об увеличении потерь в ВТСП обмотках переменного тока, работающих в электрической машине, за счет наличия внешнего (для сверхпроводника) магнитного поля. Полученные результаты дают возможность при разработке ЭМ с ВТСП обмотками соблюсти оптимальный баланс между рабочим током, электрической частотой и плотностью магнитного потока с одной стороны и нагрузкой на криогенную систему – с другой.

## 6.6 ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 6

- Экспериментально исследованы рейстрекковые ВТСП обмотки в присутствии внешнего постоянного магнитного поля.
- Влияние высокочастотных колебаний тока на потери в присутствии внешнего постоянного магнитного поля значительно и повышает их уровень в несколько раз.
- Во внешнем магнитном поле наблюдаются различия в уровне потерь на синусоидальном и модулированном токе. В «СМ» и «БДПТ» режимах потери в поле значительно возросли. Данный негативный эффект вызван сочетанием двух факторов: снижением магнитной проницаемости материала подложки на высокой частоте, а также действием внешнего магнитного поля.
- Проведен комплекс испытаний по измерению потерь в статорных ВТСП обмотках электрической машины в различных условиях: без установленного ротора, со статичным ротором при питании

синусоидальными и несинусоидальными токами, полученными при помощи высокочастотной модуляции, а также в составе электрической машины, работающей в генераторном режиме на активную нагрузку.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решен комплекс актуальных научно-технических задач по созданию численных и экспериментальных методик для исследования потерь на переменном токе в ВСПП лентах второго поколения, стопках, а также обмотках электрических машин на их основе. Предложенные модель и методики верифицированы, что позволяет использовать их при разработке новых электрических машин, в том числе в составе систем электродвижения летательных аппаратов.

По результатам выполненных исследований можно сделать выводы:

1. Разработана двухмерная МКЭ модель для расчета потерь на переменном токе в ВСПП лентах второго поколения, стопках и обмотках на их основе, учитывающая анизотропию свойств ВТСПП ленты, неравномерность критической плотности тока по ширине ленты, а также нелинейность свойств металлических материалов ленты.

2. На основе разработанной экспериментальной методики проведено детальное исследование потерь в лентах, стопках и катушках из ВТСПП ленты второго поколения с немагнитной и магнитной подложкой. Результаты численного моделирования с высокой точностью совпадают с экспериментальными данными, подтверждая возможность использования данной модели для оценки потерь на переменном токе в катушках различной конфигурации. Также с помощью данной методики произведена верификация разработанной конечно-элементной модели.

3. В результате проведенных экспериментальных и расчетных исследований на стопках ВТСПП лент установлено, что для получения наиболее точных результатов расчета потерь необходимо правильное определение коэффициентов в функции  $J_c(B, \theta, x)$ , описывающей зависимость критической



плотности тока от величины и направления внешнего магнитного поля и координаты вдоль ширины ВТСП слоя ленты. Установлено, что гистерезисные потери в магнитной подложке ВТСП лент в обмотке пренебрежимо малы, однако ее магнитные свойства вызывают изменение картины магнитного поля.

4. Спроектирован и изготовлен специализированный намоточный станок для изготовления ВТСП катушек, в том числе типа двойной рейстрек. Произведенные с помощью данного оборудования ВТСП катушки использованы для обмоток электрических машин, разрабатываемых на кафедре 310 МАИ.

5. Для детального изучения работы ВТСП катушек и изготовленных на их основе обмоток электрических машин проведены их испытания на несинусоидальных токах в режимах, имитирующих работу двигателя с электронным преобразователем-инвертором. Разработаны и изготовлены специализированные испытательные стенды, работающие как в режиме источника напряжения, так и в режиме источника тока. Для случая с источником тока существенно доработаны методика измерения и алгоритм расчета потерь. Изготовлен токовый шунт специальной конструкции.

6. Экспериментально исследованы рейстрековые ВТСП обмотки в присутствии внешнего постоянного магнитного поля. Результаты проведенных испытаний могут быть использованы для выработки требований к оптимальным условиям работы ВТСП обмоток электрических машин.

7. С помощью предложенной методики проведен комплекс измерений потерь в статорных ВТСП обмотках электрической машины в различных условиях: без установленного ротора, со статичным ротором при питании синусоидальными и несинусоидальными токами, полученными при помощи высокочастотной модуляции, а также в составе электрической машины, работающей в генераторном режиме на активную нагрузку. Данная методика позволяет определить потери в ВТСП обмотках реальных электрических машин.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ВЭЛМА : [сайт]. – URL: <https://w-elma.com/company/articles/bolee-elektricheskiy-samolyet/> (дата обращения 02.04.2021).
2. Magnusson N. Fabrication of a Scaled MgB<sub>2</sub> Racetrack Demonstrator Pole for a 10-MW Direct-Drive Wind Turbine Generator / N. Magnusson [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2018.
3. Kovalev K.L. Brushless superconducting synchronous generator with claw-shaped poles and permanent magnets / K.L. Kovalev [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2016.
4. Haran K.S. High power density superconducting rotating machines - Development status and technology roadmap / K.S. Haran [и др.] // Supercond. Sci. Technol. – 2017. – Т. 30, № 12.
5. Weng F. Fully superconducting machine for electric aircraft propulsion: Study of AC loss for HTS stator / F. Weng [и др.] // arXiv. – 2019.
6. Grilli F. Superconducting motors for aircraft propulsion: The Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator project / F. Grilli [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. – Institute of Physics Publishing, 2020. – Т. 1590.
7. Kovalev K.L. Principal analysis of hybrid power systems with HTS electrical machines / K.L. Kovalev [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2020.
8. Занегин С. Изготовление и испытание высокотемпературной сверхпроводниковой катушки для макета двигателя беспилотного летательного аппарата / С. Занегин [и др.] // Электричество. – 2019. – Т. 7, № 7. – С. 53-58.
9. Kovalev K. Experimental research of stator with HTS ring winding / K. Kovalev [и др.] // Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. – Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020.

10. Kovalev K. Developing and testing of rotor with HTS coils for electric machine / K. Kovalev [и др.] // *Prz. Elektrotechniczny*. – 2020. – Т. 96, № 1. – С. 78-81.
11. Kovalev K. Development and testing of 10 kW fully HTS generator / K. Kovalev [и др.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020.
12. Sirois, F. Potential and limits of numerical modelling for supporting the development of HTS devices / F. Sirois, F. Grilli // *Supercond. Sci. Technol.* – 2015.
13. Grilli F. Computation of losses in HTS under the action of varying magnetic fields and currents / F. Grilli [и др.] // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2014.
14. Zhang, H. An efficient 3D finite element method model based on the T-A formulation for superconducting coated conductors / H. Zhang, M. Zhang, W. Yuan // *Supercond. Sci. Technol.* – 2017.
15. Bianchetti M. Simulation of AC losses in racetrack coils wound with striated HTS tapes / M. Bianchetti [и др.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020.
16. Зубко В. Анализ гистерезисных потерь в силовых кабелях на основе высокотемпературно-сверхпроводящих лент второго поколения / В. Зубко [и др.] // *Электричество*. – 2014, № 4. – С. 24-32.
17. Занегин, С. Анализ потерь в обмотках и стопках из ВТСП лент второго поколения / С. Занегин, В. Зубко, Н. Иванов // *Электричество*. – 2020, № 5. – С. 54-60.
18. Nguyen D.N. Electrical measurements of AC losses in high temperature superconducting coils at variable temperatures / D.N. Nguyen [и др.] // *Supercond. Sci. Technol.* – 2013.
19. Колесников, В.Г. *Электроника* / В.Г. Колесников. – Москва: Советская энциклопедия, 1991. – 688 С.
20. Zanegin S.Y. AC losses test of HTS racetrack coils for HTS motor winding / S.Y. Zanegin [и др.] // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2020. – Т. 1559, № 1.

21. Budziszewski, N. Modelling of a boundary layer ingesting propulsor / N. Budziszewski, J. Friedrichs // *Energies*. – 2018. – Т. 11, № 4.
22. Pernet, C. Electric Drives for Propulsion System of Transport Aircraft / C. Pernet // *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. – 2016.
23. Ахмедзянов, А.М. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей / А.М. Ахмедзянов. – Москва: Машиностроение, 2000. – 454 р.
24. Luongo C.A. Next generation more-electric aircraft: a potential application for HTS superconductors / C.A. Luongo [и др.] // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2009. – Т. 19, № 3. – С. 1055-1068.
25. Felder, J.L. NASA N3-X with Turboelectric Distributed Propulsion / J.L. Felder // *IMEchE Disruptive Green Propuls. Technol. Conf.* – 2014.
26. Aviation EXplorer : [сайт]. – URL: <https://www.aex.ru/news/2021/2/5/222964/> (дата обращения 02.04.2021).
27. Jansen R.H. High efficiency megawatt motor preliminary design / R.H. Jansen [и др.] // *AIAA Propuls. Energy Forum Expo. 2019.* – 2019 – С. 1-13.
28. Sivasubramaniam K. Development of a high speed HTS generator for airborne applications / K. Sivasubramaniam [и др.] // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2009.
29. Haran K.S. Actively shielded high-field air-core superconducting machines / K.S. Haran [и др.] // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2016.
30. Steckner, M. MRI Magnet and MRI System With Optimized Fringe Fields, Attractive Forces and Spatial Constraints / M. Steckner, B.C. Breneman. – 2014.
31. Dufour Aerospace : [сайт]. – URL: <https://dufour.aero/vision/> (дата обращения 02.04.2021).
32. Tomazic T. Pipistrel Taurus G4: on Creation and Evolution of the Winning Aeroplane of ...: EBSCOhost / T. Tomazic [и др.] // *J. Mech. Eng.* – 2011.

33. Rathke P. Antares DLR-H2 Flying Test Bed for Development of Aircraft Fuel Cell Systems / P. Rathke [и др.] // ECS Trans. – 2013.
34. UAV Factory : [сайт]. – URL: <https://uavfactory.com/en/penguin-be-uav> (дата обращения 02.04.2021).
35. Skyfront Perimeter 8 : [сайт]. – URL: <https://skyfront.com/perimeter-8/> (дата обращения 02.04.2021).
36. Pallo N. Power-dense multilevel inverter module using interleaved GaN-based phases for electric aircraft propulsion / N. Pallo [и др.] // Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. – 2018.
37. Wang F. Mw-class cryogenically-cooled inverter for electric-aircraft applications / F. Wang [и др.] // AIAA Propuls. Energy Forum Expo. 2019. – 2019, № August. – С. 1-9.
38. Shen B. Power Dissipation in the HTS Coated Conductor Tapes and Coils under the Action of Different Oscillating Currents and Fields / B. Shen [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2019. – Т. 29, № 5. – С. 1-5.
39. Song, W. Numerical AC Loss Analysis in HTS Stack Carrying Nonsinusoidal Transport Current / W. Song, J. Fang, Z. Jiang // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 1-5.
40. Yazdani-Asrami M. Calculation of AC Magnetizing Loss of ReBCO Superconducting Tapes Subjected to Applied Distorted Magnetic Fields / M. Yazdani-Asrami [и др.] // J. Supercond. Nov. Magn. – 2018. – Т. 31, № 12. – С. 3875-3888.
41. Yazdani-Asrami M. AC Transport Loss in Superconductors Carrying Harmonic Current with Different Phase Angles for Large-Scale Power Components / M. Yazdani-Asrami [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 1-5.
42. Larbalestier D. High-Tc superconducting materials for electric power applications. T. 414 / D. Larbalestier [и др.]. – 2001.

43. Sumitomo Electric : [сайт]. – URL: [http://global-sei.com/super/hts\\_e/](http://global-sei.com/super/hts_e/) (дата обращения 02.04.2021).
44. SuperOx : [сайт]. – URL: [http://www.superox.ru/en/zao\\_superconductivity.htm](http://www.superox.ru/en/zao_superconductivity.htm) (дата обращения 02.04.2021).
45. SuperPower : [сайт]. – URL: [www.superpower-inc.com](http://www.superpower-inc.com) (дата обращения 02.04.2021).
46. Rupich M.W. Progress on MOD/RABiTSTM 2G HTS wire / M.W. Rupich [и др.] // Phys. C Supercond. its Appl. – 2004. – Vols. 412-414, № SPEC. ISS. – С. 877-884.
47. Li X. The development of second generation hts wire at american superconductor / X. Li [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2009. – Т. 19, № 3. – С. 3231-3235.
48. Zubko V. Analysis of behaviour of HTS tapes cooled by liquid nitrogen under currents more than the critical current / V. Zubko [и др.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019.
49. Уилсон, М. Сверхпроводящие магниты / М. Уилсон. – Москва: Мир, 1985.
50. Brandt, E.H. Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field / E.H. Brandt, M. Indenbom // Phys. Rev. B. – 1993. – Т. 48, № 17. – С. 12893-12906.
51. Norris, W.T. Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: Isolated conductors and edges of thin sheets / W.T. Norris // J. Phys. D. Appl. Phys. – 1970.
52. Vellego, G. An analysis of the transport losses measured on HTSC single-phase conductor prototypes / G. Vellego, P. Metra // Supercond. Sci. Technol. – 1995.
53. Zubko, V. V. Hysteresis Losses Analysis in 2G HTS Cables / V. V. Zubko, S.S. Fetisov, V.S. Vysotsky // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2016.

54. Pardo, E. AC loss in ReBCO pancake coils and stacks of them: Modelling and measurement / E. Pardo, J. Šouc, J. Kováč // *Supercond. Sci. Technol.* – 2012.
55. Kails K. Loss characteristics of HTS coated conductors in field windings of electric aircraft propulsion motors / K. Kails [и др.] // *Supercond. Sci. Technol.* – 2020.
56. A full-range formulation for dynamic loss of high-temperature superconductor coated conductors / H. Zhang [и др.] // *Supercond. Sci. Technol.* – 2020.
57. Ashworth, S.P. Local calorimetry to measure the ac losses in structures of HTS conductors / S.P. Ashworth, M. Suenaga // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2001. – Т. 11, № 1 II. – С. 2200-2203.
58. Варжель, С.В. Волоконные Брэгговские Решетки / С.В. Варжель. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 65 с.
59. Dai J.S. A novel calorimetric method for measurement of AC losses of HTS tapes by optical fiber Bragg grating / J.S. Dai [и др.] // 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, ASEMD 2013. – 2013.
60. Murphy J.P. Experiment setup for calorimetric measurements of losses in HTS coils due to AC current and external magnetic fields / J.P. Murphy [и др.] // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2013. – Т. 23, № 3. – С. 5-10.
61. Kajikawa K. Influences of geometrical configuration on AC loss measurement with pickup-coil method / K. Kajikawa [и др.] // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 1999.
62. Fleshler S. Measurement of the ac power loss of (Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> composite tapes using the transport technique / S. Fleshler [и др.] // *Appl. Phys. Lett.* – 1995.
63. Zhu K. AC loss measurement of HTS coil under periodic current / K. Zhu [и др.] // *Phys. C Supercond. its Appl.* – 2020. – Т. 569, № October 2019. – С. 1353562.
64. Fetisov S.S. First model power cables made of Russian 2G HTS wires and their test results / S.S. Fetisov [и др.] // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2014.

65. Fetisov S.S. Numerical Simulation and Cold Test of a Compact 2G HTS Power Cable / S.S. Fetisov [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 1300.
66. Fetisov S.S. Study of the First Russian Triaxial HTS Cable Prototypes / S.S. Fetisov [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2017. – Т. 27, № 4. – С. 1-5.
67. ANSYS Multiphysics, Release 15 : [сайт]. – URL: [www.ansys.com](http://www.ansys.com) (дата обращения 02.04.2021).
68. Zubko V.V. Hysteresis loss in power cables made of 2G HTS wires with NiW alloy substrate / V. V. Zubko [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2011.
69. Zhang X. General approach for the determination of the magneto-angular dependence of the critical current of YBCO coated conductors / X. Zhang [и др.] // Supercond. Sci. Technol. – 2017. – Т. 30, № 2.
70. Gu C. AC losses in HTS tapes and devices with transport current solved through the resistivity-adaption algorithm / C. Gu [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2013.
71. Wegstein, J.H. Accelerating convergence of iterative processes / J.H. Wegstein // Commun. ACM. – 1958. – Т. 1, № 6. – С. 9-13.
72. Zanežin S. Manufacturing and Testing of AC HTS-2 Coil for Small Electrical Motor / S. Zanežin [и др.] // J. Supercond. Nov. Magn. – 2020.
73. Pardo, E. Electromagnetic modelling of superconductors with a smooth current-voltage relation: Variational principle and coils from a few turns to large magnets / E. Pardo, J. Šouc, L. Frolek // Supercond. Sci. Technol. – 2015.
74. Bykovsky N. Design of the HTS Fusion Conductors for TF and CS Coils / N. Bykovsky [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2016.
75. Ogawa J. Experimental investigation of AC loss characteristics in HTS tape with rotating magnetic field / J. Ogawa [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2017.



76. Казовский, Е.Я. Сверхпроводящие магнитные системы / Е.Я. Казовский, В.П. Карцев, В.Н. Шахтарин. – Ленинград: Наука, 1967. – 323с. р.

77. LOCTITE® STYCAST 2850FT : [сайт]. – URL: [https://www.henkel-adhesives.com/us/en/product/potting\\_compounds/loctite\\_stycast\\_2850ftbl.html](https://www.henkel-adhesives.com/us/en/product/potting_compounds/loctite_stycast_2850ftbl.html) (дата обращения 02.04.2021).

78. Zubko V.V. Optimization of 2G HTS current leads working at external magnetic field / V. V. Zubko [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2018.

79. Vysotsky V.S. Development and Test Results of HTS Windings for Superconducting Transformer with 1 MVA Rated Power / V.S. Vysotsky [и др.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2017.

80. Bruyn, B.J.H. De. AC losses in HTS coils for high-frequency and non-sinusoidal currents / B.J.H. De Bruyn, J.W. Jansen, E.A. Lomonova // Supercond. Sci. Technol. – 2017.

81. Matlab 2017 : [сайт]. – URL: <https://www.mathworks.com/company/newsroom/press-releases/2017.html> (дата обращения 02.04.2021).

82. LEM LT-1000 Current sensor : [сайт]. – URL: <https://www.lem.com/ru/file/4417/download> (дата обращения 02.04.2021).

83. Vishay current sensing resistors : [сайт]. – URL: <https://www.vishay.com/docs/30206/lvr.pdf> (дата обращения 02.04.2021).

84. Prakash, A. Benefits of a Low Inductive Shunt for Current Sensing in PWM Applications / A. Prakash // TI Tech Notes 1-3.

85. Nguyen-Van, T. A digital hysteresis current control for half-bridge inverters with constrained switching frequency / T. Nguyen-Van, R. Abe, K. Tanaka // Energies. – 2017.

86. Flier model : [сайт]. – URL: <http://www.fliermodel.com/en/aircraft-electrical-adjustment.html> (дата обращения 02.04.2021).

87. Michal, V. Three-Level PWM Floating H-Bridge Sinewave Power Inverter for High-Voltage and High-Efficiency Applications / V. Michal // IEEE Trans. Power Electron. – 2016. – Т. 31, № 6. – С. 4065-4074.

88. Zhou, P. Transition frequency of transport ac losses in high temperature superconducting coated conductors / P. Zhou, G. Ma, L. Quéval // J. Appl. Phys. – 2019.

89. Zanegin S. Measurements and analysis of ac losses in hts windings of electrical machine for different operation modes / S. Zanegin [и др.] // Appl. Sci. – 2021. – Т. 11, № 6.

90. Zanegin S. Losses analysis of HTS racetrack coil operating in an external magnetic field / S. Zanegin [и др.] // 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – IEEE, 2020. – С. 1-4.

91. Zubko V. V. AC Losses Analysis in stack of 2G HTS tapes in a coil / V. V. Zubko [и др.] // J. Phys. Conf. Ser. – 2020. – Т. 1559, № 1.