

Study of Electromagnetic and Thermal Transients in a High-temperature Superconducting Transformer during a Short Circuit

Manusov V.Z., Ivanov D.M.

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. Today, high-temperature superconducting (HTS) current limiters and transformers allow to limit the surge short circuit current during failure without negatively affecting on the power grid complex at the normal operation mode. However, the transition of a superconductor to a resistive state at the moment of current limitation can cause significant heat generation, which can destroy the transformer windings. The research goal is to provide optimal technical characteristics of the HTS transformer to achieve effective short circuit current limitation and prevent thermal breakdown of its windings. To achieve this goal, a mathematical model of a HTS transformer was developed. The presented method considers the material type and geometry of the superconducting tape, the critical parameters of the superconductor (current and temperature), the parameters of the cryogenic liquid, dependence of the resistance and heat capacity of the HTS tape layers on temperature. The simulation model was created in the Matlab/Simulink software. The most important result is the possibility of obtaining optimal electrical and thermal parameters of the HTS transformer windings during the short circuit current limitation, as well as ensuring the thermal stability of the superconducting tape at the quench moment. The obtained results are significant in the design and operation of HTS transformers. For efficient and safe operation in the current-limiting mode, it is necessary to take into account heat generation on the transformer windings. It is important for the superconductor returning to the superconducting state without causing significant overheating of the windings.

Keywords: HTS transformer, high-temperature superconductivity, short-circuit current limitation, transient process, mathematical modeling, Matlab/Simulink, energy efficiency, liquid nitrogen.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58.01>

UDC: 621.314

Cercetarea proceselor tranzitorii electromagnetice și termice într-un transformator supraconductor la temperaturi ridicate în timpul unui scurtcircuit

Manusov V.Z., Ivanov D.M.

Universitatea Tehnică de Stat din Novosibirsk, Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. Benzile supraconductoare la temperatură ridicată (SCTR) bazate pe ceramică de ytriu YBa₂Cu₃O₇ sunt capabile să mențină supraconductivitatea la o temperatură de 77 K. Aceste mașini sunt capabile să limiteze curentul de supratensiune al unui scurtcircuit (SC) în caz de accidente, fără a afecta negativ complexul rețelei electrice în funcționare normală. Cu toate acestea, trecerea unui supraconductor la o stare rezistivă în momentul limitării curentului poate provoca fluxuri de căldură semnificative care pot perturba integritatea înfășurărilor transformatorului. Scopul lucrării este de a oferi caracteristici tehnice optime ale transformatorului SCTR pentru a obține o limitare eficientă a curentului de scurtcircuit și pentru a preveni defalcarea termică a înfășurărilor sale. Pentru a atinge acest obiectiv, a fost elaborat un model matematic al unui transformator SCTR, implementat în software-ul și sistemul de calcul Matlab/Simulink. Modelul ia în considerare materialul și geometria benzii supraconductoare, parametrii critici ai supraconductorului (curent și temperatură), caracteristicile lichidului criogenic și dependențele de temperatură ale rezistențelor specifice și capacităților termice ale straturilor de bandă SCTR. Cel mai important rezultat este posibilitatea de a obține parametrii electrice și termici optimi ai înfășurărilor transformatorului SCTR în momentul limitării curentului de scurtcircuit, precum și asigurarea stabilității termice a benzii supraconductoare în cazul pierderii și revenirii supraconductivității. S-a realizat modelarea numerică a pornirii unui transformator SCTR cu o înfășurare secundară scurtcircuitată pentru un interval de tensiune de la 40 V la 120 V. Ca rezultat al lucrării, se obțin oscilोगrame ale curenților și temperaturilor în înfășurărilor SCTR în timpul unui scurtcircuit, care descriu procesul tranzitoriu cu suficientă acuratețe. Rezultatele obținute sunt semnificative în proiectarea și funcționarea transformatoarelor SCTR.

Cuvinte-cheie: transformator SCTR, supraconductivitate la temperatură ridicată, limitarea curentului de scurtcircuit, tranzitoriu, modelare matematică, Matlab/Simulink, eficiență energetică, azot lichid.

Исследование электромагнитных и тепловых переходных процессов в высокотемпературном сверхпроводящем трансформаторе при коротком замыкании

Манусов В.З., Иванов Д.М.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. Высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) ленты, созданные на основе иттриевой керамики $YBa_2Cu_3O_7$, способны сохранять сверхпроводимость при температуре 77 К. Благодаря свойству этого материала резко повышать свое активное сопротивление при потере сверхпроводимости, создаются ВТСП токоограничители и трансформаторы. Эти машины способны ограничивать ударный ток короткого замыкания (КЗ) при авариях, не оказывая негативного влияния на электросетевой комплекс в нормальном режиме работы. Однако, переход сверхпроводника в резистивное состояние в момент токоограничения может вызвать существенные тепловые потоки, способные нарушить целостность обмоток трансформатора. Целью работы является обеспечение оптимальных технических характеристик ВТСП трансформатора для достижения эффективного ограничения тока КЗ и предотвращения теплового срыва его обмоток. Для достижения поставленной цели была разработана математическая модель ВТСП трансформатора, реализованная в программно-вычислительном комплексе Matlab/Simulink. Модель учитывает материал и геометрию сверхпроводящей ленты, критические параметры сверхпроводника (ток и температуру), особенности криогенной жидкости, зависимости удельных сопротивлений и теплоемкостей слоев ВТСП ленты от температуры. Наиболее важным результатом является возможность получения оптимальных электрических и тепловых параметров обмоток ВТСП трансформатора в момент ограничения тока КЗ, а также обеспечение тепловой устойчивости сверхпроводящей ленты при потере и возврате сверхпроводимости. Проведено численное моделирование включения ВТСП трансформатора с закороченной вторичной обмоткой на диапазон напряжений от 40 В до 120 В. В результате работы получены осциллограммы токов и температур в ВТСП обмотках при коротком замыкании, с достаточной точностью описывающие переходный процесс. Полученные результаты являются значимыми при проектировании и эксплуатации ВТСП трансформаторов. Для эффективной и безопасной работы в режиме токоограничения необходимо учитывать тепловыделения на обмотках трансформатора, чтобы сверхпроводник успел вернуться в сверхпроводящее состояние, не вызывая значительный перегрев обмоток.

Ключевые слова: ВТСП трансформатор, высокотемпературная сверхпроводимость, ограничение токов короткого замыкания, переходный процесс, математическое моделирование, Matlab/Simulink, энергоэффективность, жидкий азот.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие электросетевого комплекса, обусловленное постоянно растущим спросом на электроэнергию, приводит к повышению ожидаемых уровней токов КЗ в электрических сетях классов напряжений 35 – 220 кВ. В будущем уровни расчетных токов КЗ могут превысить предельную отключающую способность коммутационного электрооборудования, что может привести к разрушению обмоток генераторов, трансформаторов, синхронных компенсаторов и других электрических машин. За последнее десятилетие учеными ведущих мировых институтов создаются сверхпроводящие токоограничители следующих видов: резистивные, индуктивные (трансформаторного типа, выпрямительный и т.д.) [1-5]. Однако, процесс ограничения тока происходит благодаря уникальному свойству высокотемпературных сверхпроводников скачкообразно увеличивать свое активное сопротивление при потере сверхпроводимости [1, 2, 5-7]. Применение

сверхпроводников в качестве материала для обмоток позволяет совместить функцию ограничения токов КЗ и трансформацию напряжения в одном устройстве - ВТСП трансформаторе. Токоограничивающая функция снижает температурное и электродинамическое воздействие тока КЗ непосредственно на трансформатор, что говорит о пользе применения этого эффекта непосредственно в этих электрических машинах [6-9].

Следует отметить огромный интерес научного сообщества к разработке и исследованию ВТСП трансформаторов. Были разработаны как имитационные математические модели, так и физические прототипы ВТСП трансформаторов в диапазоне мощностей от 8 до 5000 кВА [10-14]. В работах [15-17] проведено исследование природы потерь в ВТСП трансформаторах и кабелях на переменном токе методом конечных элементов. Разработаны модели, позволяющие оценить переходный процесс при включении ВТСП трансформатора [18, 19]. Однако, научным сообществом мало

внимания уделяется исследованию электротепловых переходных процессов и времени возврата сверхпроводимости после ограничения тока КЗ.

В настоящей работе представлена электротермическая модель поведения ВТСП обмоток в момент КЗ, позволяющая адекватно моделировать электромагнитный и тепловой переходный процесс при потере сверхпроводимости. Модель позволяет выявить основные критерии и требования к обмоткам ВТСП трансформаторов с учетом критических и геометрических параметров сверхпроводника, параметров криогенной жидкости и условий возврата сверхпроводящего состояния обмоток после устранения КЗ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДНОФАЗНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА

Чтобы успешно внедрить ВТСП трансформаторы в электрическую сеть, необходим способ удобного прогнозирования токоограничивающих характеристик. На поведение сверхпроводящих обмоток в момент КЗ влияет ряд параметров, таких как полное сопротивление смежной линии электропередачи, сопротивление КЗ, продолжительность КЗ. Ключевым моментом, является поведение ВТСП обмотки при потере сверхпроводимости (при превышении одного из критических параметров) и ее беспрепятственном возврате после устранения аварии.

Для построения адекватной модели поведения ВТСП обмоток необходимо учитывать слоистую структуру сверхпроводника. В модели будет рассматриваться трансформатор с обмотками из $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO). Структура ВТСП ленты второго поколения производства компании «SuperOx» представлена на рис. 4 [20, 21].

До начала переходного процесса ток течет по сверхпроводнику с нулевым сопротивлением (рис. 2а). После начала КЗ величина тока, текущего по ВТСП обмоткам, превышает критическую величину тока св^{1,2} Appendix 1 что вызывает потерю св и скачкообразное повышение активного сопротивления. В этот

момент аварийный ток протекает сразу по всем слоям ВТСП провода (рис. 2б).

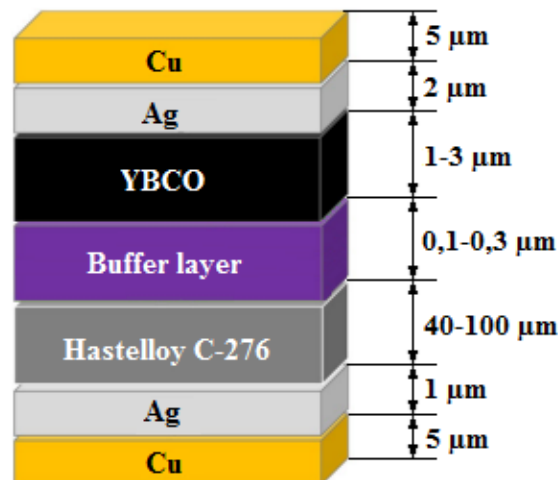


Рис.1. Структура ВТСП лент второго поколения компании «SuperOx».¹

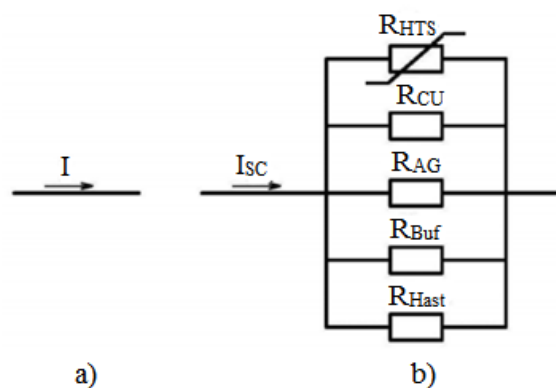


Рис.2. Схема замещения ВТСП провода.²

Отметим, что для корректного исследования теплового поведения ВТСП обмоток стоит учитывать зависимости активных сопротивлений несверхпроводящих слоев ВТСП ленты от температуры:

$$R_{NS}(T) = \frac{1}{\frac{1}{R_{cu}(T)} + \frac{1}{R_{ag}(T)} + \frac{1}{R_{buf}(T)} + \frac{1}{R_{hast}(T)}}, \quad (1)$$

где T – температура ВТСП ленты, R_{cu} – активное сопротивление меди, R_{ag} – активное сопротивление серебра, R_{buf} – активное сопротивление буферного слоя, R_{hast} – активное сопротивление хастеллоя.

Активное сопротивление ВТСП провода можно оценить по вольт-амперной

характеристике сверхпроводника YBCO, использованного в модели (рис. 3).

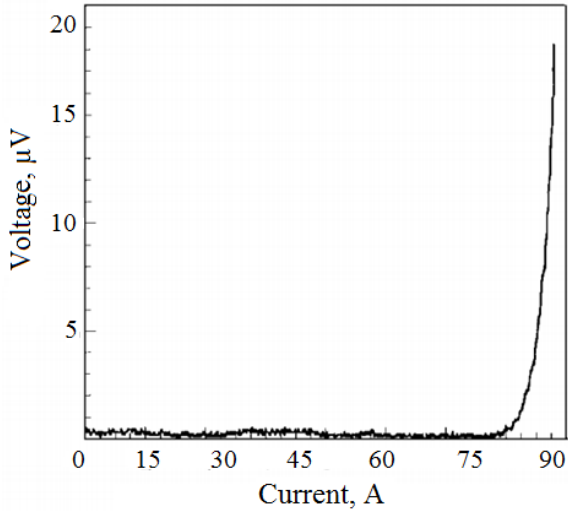


Рис.3. Вольт-амперная характеристика сверхпроводника YBCO.³

Аппроксимируя вольт-амперную характеристику, можно с достаточной степенью точности выразить нелинейное сопротивление ВТСП ленты, в зависимости от тока, протекающего по сверхпроводнику и температуры ленты. В качестве допущения примем однородность свойств ВТСП ленты на всей обмотке.

$$R_{HTS}(I, T) = \frac{E_0}{I} \left(\frac{I}{I_K(T)} \right)^n \cdot l, \quad (2)$$

где I – ток протекающий по обмотке, $I_K(T)$ – критический ток сверхпроводника в зависимости от температуры; E_0 – напряженность электрического поля; n – степень вольтамперной характеристики, зависит от параметров ВТСП ленты; l – длина ВТСП ленты в обмотке.

Критический ток сверхпроводника $I_K(T)$ найдем из выражения, подробно описанного в [22]:

$$I_K(T) = -\frac{I_{K0}}{0,1848} \ln\left(\frac{T}{93}\right), \quad (3)$$

где I_{K0} – критический ток при температуре 77 К. ³ Appendix 1 зависит от типа ВТСП и критических параметров.

Эквивалентное активное сопротивление ВТСП обмотки для сверхпроводящего и резистивного состояния представим следующим выражением:

$$R_E(I, T) = \frac{R_{NS}(T) \cdot R_{HTS}(I, T)}{R_{NS}(T) + R_{HTS}(I, T)}. \quad (4)$$

Для анализа времени возврата ВТСП обмотки трансформатора в сверхпроводящее состояние после устранения КЗ необходимо учитывать тепловой процесс, происходящий в ВТСП проводе. Принимая что температура по всей длине обмотки равномерна, найдем количество теплоты, выделяющееся на обмотке во время переходного процесса:

$$Q(I, T) = \int_0^t I^2 R_E(I, T) dt. \quad (5)$$

Составим уравнение теплового баланса, которое позволяет оценить изменение температуры обмотки при переходном процессе, в зависимости от тока протекающего по обмотке тока и времени:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q(I, T) - Aq(\Delta T)}{C_{\Sigma}(T)}, \quad (6)$$

где $Q(I, T)$ – количество теплоты, выделяющееся на обмотке, A – площадь поверхности ВТСП ленты, $C_{\Sigma}(T)$ – общая теплоемкость ВТСП обмотки, $q(\Delta T)$ – плотность теплового потока в зависимости от разности температур (рис. 4).

Стоит пояснить, что используемая в уравнении (6) величина теплового потока q зависит от разницы температур между поверхностью ВТСП ленты и охлаждающей ее жидким азотом (рис. 4).

При существенном повышении температуры обмотки (при $\Delta T > 30$ К) режим охлаждения перейдет в стадию пленочного кипения жидкого азота, которая вызовет неэффективное охлаждение обмотки. Рассмотренный режим вызовет дальнейшее повышение температуры ВТСП ленты, что может привести к термическому разрушению обмотки.

Поэтому во избежание нарушения работы ВТСП трансформатора при ограничении тока КЗ следует не допускать больших тепловыделений, способных перегреть обмотки выше температуры кризиса кипения жидкого азота ≈ 107 К [23-25].

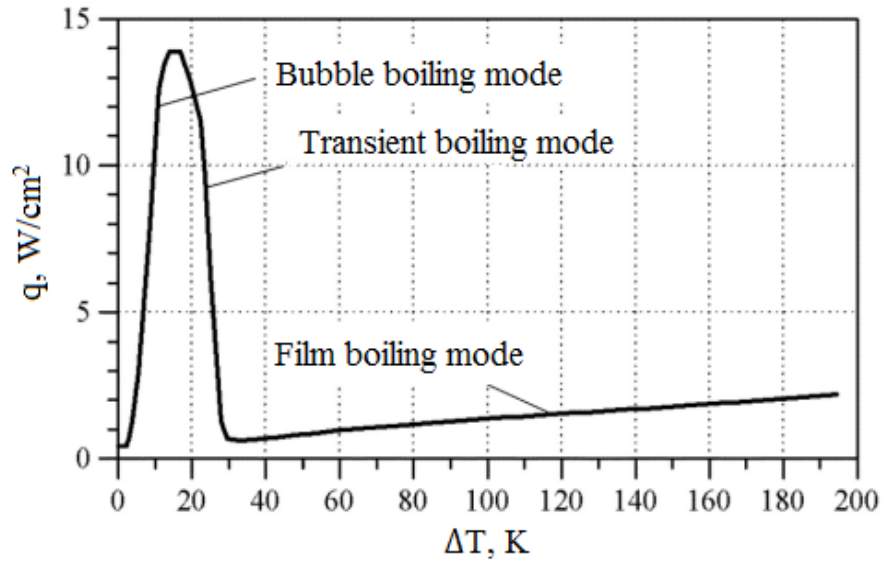


Рис. 4. Зависимость плотности теплового потока от разности температур.⁴

Для анализа переходных процессов составим схему замещения моделируемого ВТСП трансформатора с закороченной вторичной обмоткой (рис 5.).

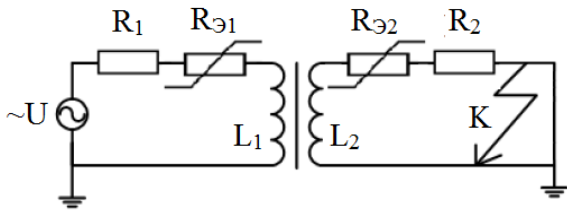


Рис. 5. Схема замещения моделируемого ВТСП трансформатора.⁵

Согласно схеме замещения трансформатора, составим дифференциальные уравнения, которые позволят описать электромагнитный переходный процесс. За допущения принимается отсутствие потерь и насыщения в магнитопроводе трансформатора.

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1(R_{E1}(i, T) + R_1) + M \frac{di_2}{dt}, \quad (7)$$

$$0 = L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2(R_{E2}(i, T) + R_2) + M \frac{di_1}{dt}, \quad (8)$$

где L_1 , L_2 – индуктивности первичной и вторичной обмоток ВТСП трансформатора; i_1 , i_2 – токи в первичной и вторичной

обмотках; M – взаимная индуктивность обмоток ВТСП трансформатора; R_1 , R_2 – активные сопротивления токовводов и отходящих от них внешних цепей; U_m – амплитудное значение питающего напряжения; ω – циклическая частота; R_{E1} , R_{E2} – эквивалентное нелинейное активное сопротивление обмоток ВТСП трансформатора.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОФАЗНОМ ВТСП ТРАНСФОРМАТОРЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Объектом моделирования является разработанная экспериментальная модель однофазного ВТСП трансформатора мощностью 2,5 кВА с закороченной вторичной обмоткой (рис. 6).



Рис. 6. Однофазный ВТСП трансформатор и его обмотки.⁶

Численное решение представленной выше математической модели (уравнения (1-8)) было реализовано в программно-вычислительном комплексе Matlab/Simulink (рис. 7). Основные параметры обмоток моделируемого трансформатора представлены в таблице 1. На рис. 8 и рис. 9 представлена зависимость удельного активного сопротивления и теплоемкости от температуры для каждого слоя ВТСП ленты.

Для анализа электротеплового поведения ВТСП обмоток был смоделирован ряд экспериментов с включением ВТСП трансформатора с закороченной обмоткой низкого напряжения НН (трансформатор понижающий, 100/50 В) на питающее напряжение сети в диапазоне от 20 до 120 В (рис. 10-13).

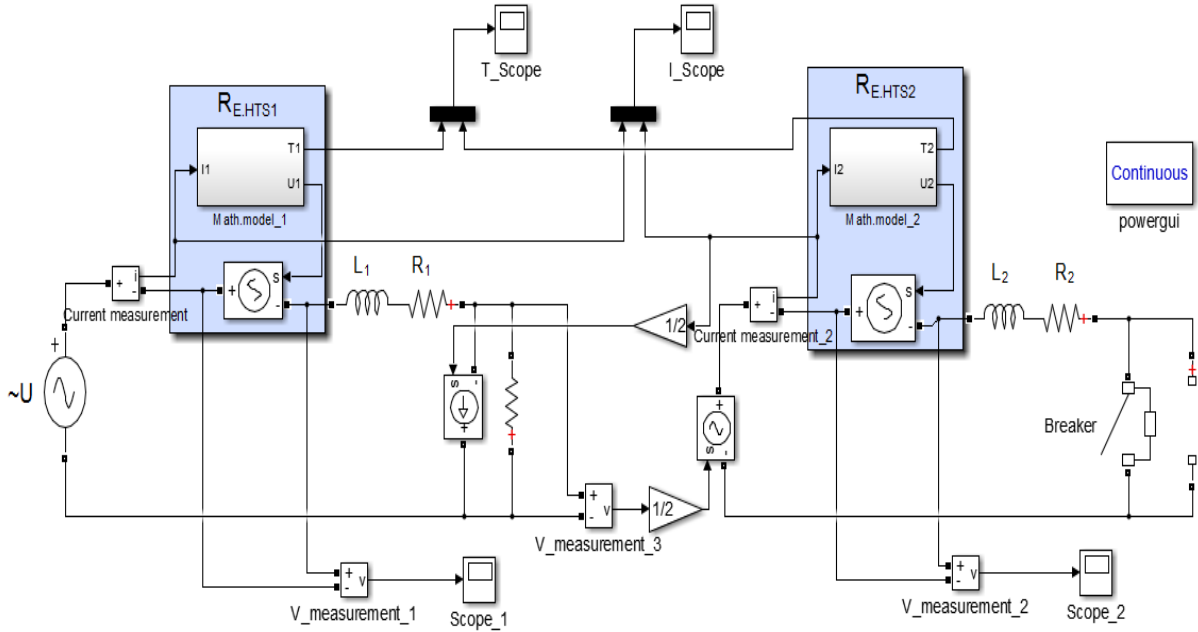


Рис. 7. Модель ВТСП трансформатора при КЗ в Matlab/Simulink.⁷

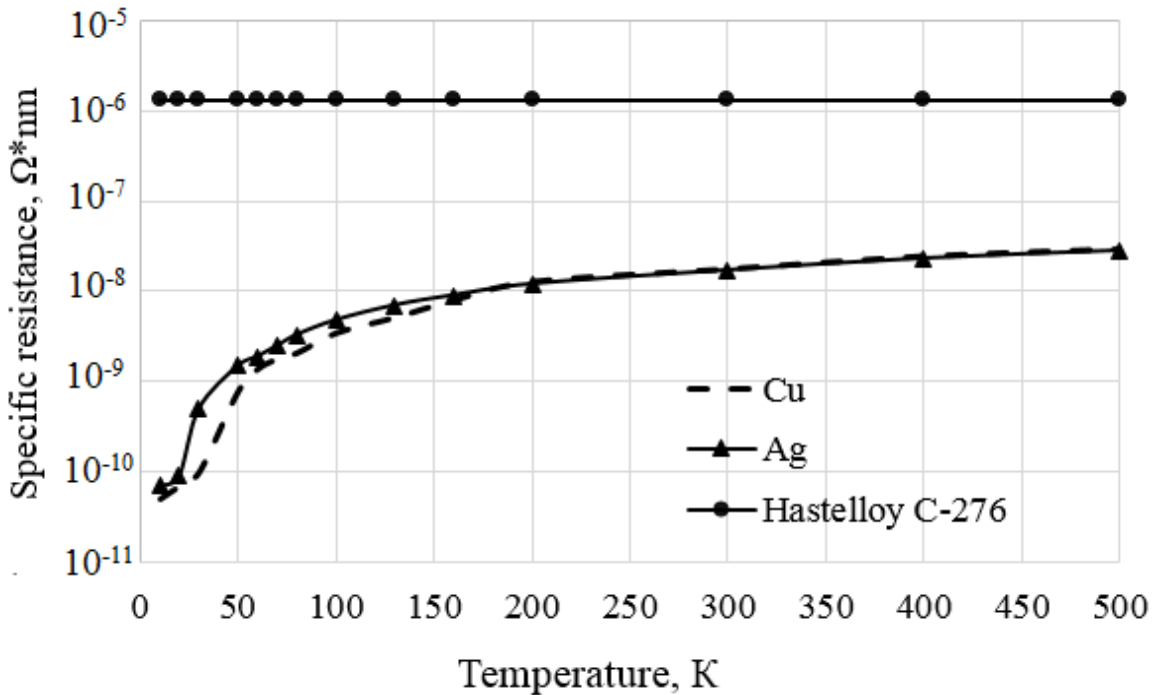


Рис. 8. Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры.⁸

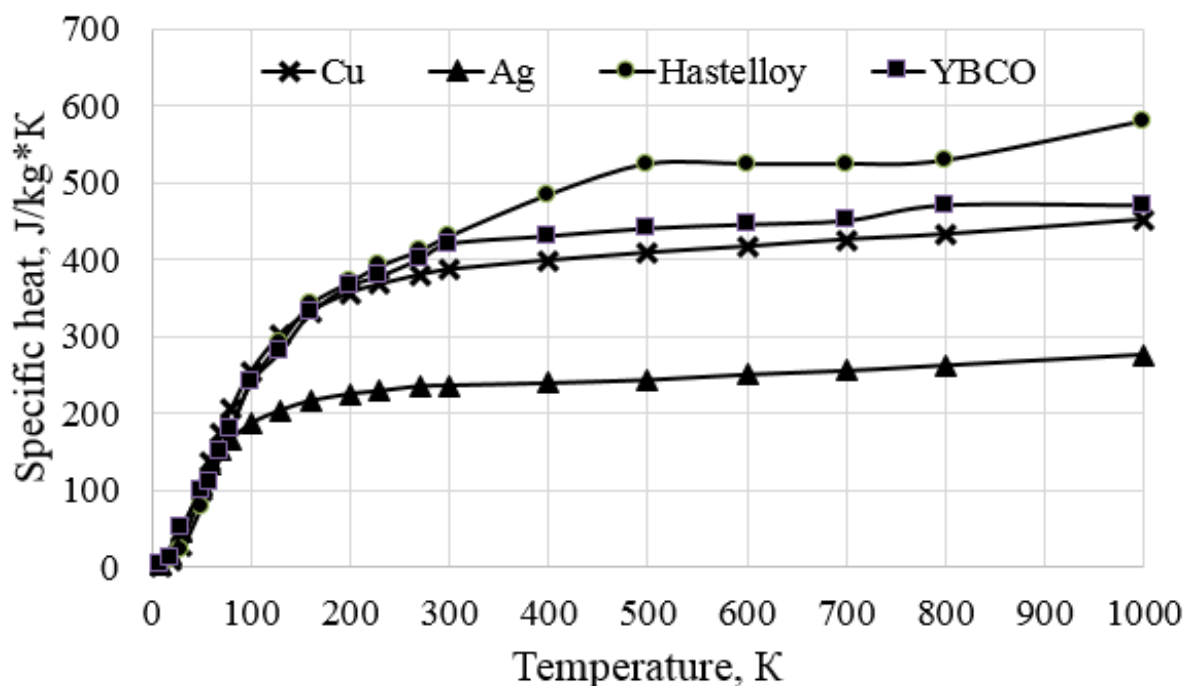


Рис. 9. Зависимость удельной теплоемкости металлов от температуры.⁹

Таблица 1¹⁰.

Параметры обмоток опытного образца однофазного ВТСП трансформатора мощностью 2,5 кВА¹¹.

Параметр (Parameter)	Первичная обмотка (Primary winding)	Вторичная обмотка (Secondary winding)
Материал ВТСП ленты (HTS tape material)	Y ₁ Ba ₂ Cu ₃ O ₇	
Ширина ВТСП ленты (HTS tape width), mm	4	
Критическая температура ленты (Critical temperature of tape), K	93	
Предел прочности ленты (Tensile strength of tape), MPa	500	
Критический ток ленты (Critical current), A	80	
Показатель степени вольт-амперной характеристики (Current-voltage characteristic exponent)	15	
Рабочая температура (Operating temperature), K	77	
Длина ВТСП ленты YBCO (HTS tape length), m	16,5	8,1
Напряжение (Voltage), V	100	50
Номинальный ток (Rated current), A	25	50
Число витков (Number of turns)	46	23
Индуктивность (Inductance), μH	162,09	34,4
Высота обмоток (Winding height), mm	210	135
Диаметр обмоток (Winding diameter), mm	130	110
Изоляция (Insulation)	Каптон (Kapton)	
Диэлектрическая среда (Dielectric medium)	Жидкий азот (Liquid nitrogen)	

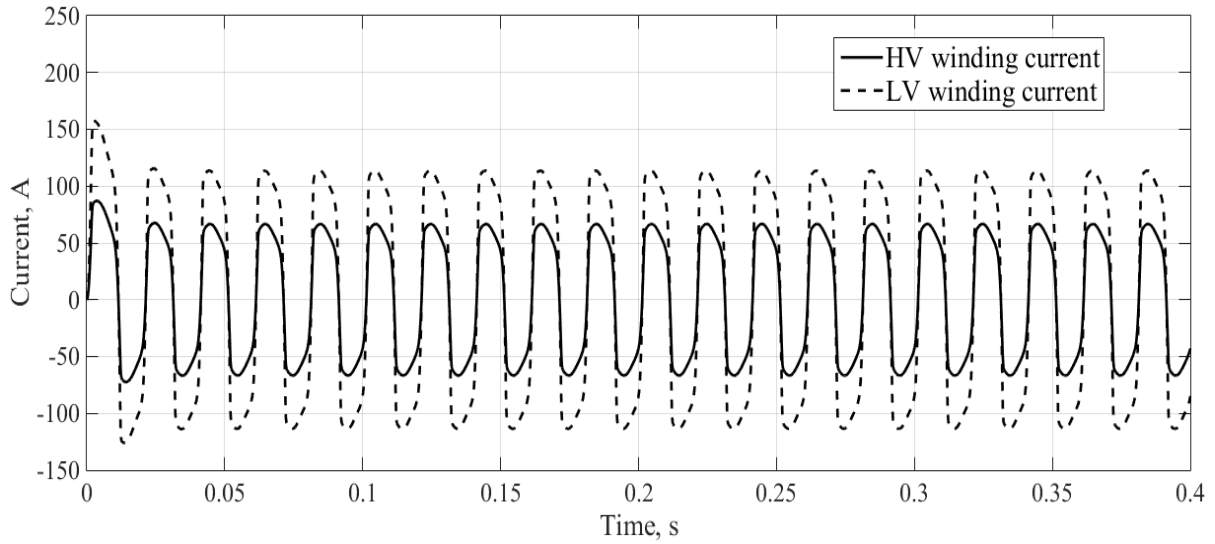


Рис. 10. Токи в ВТСП обмотках при питающем напряжении 40 В.¹²

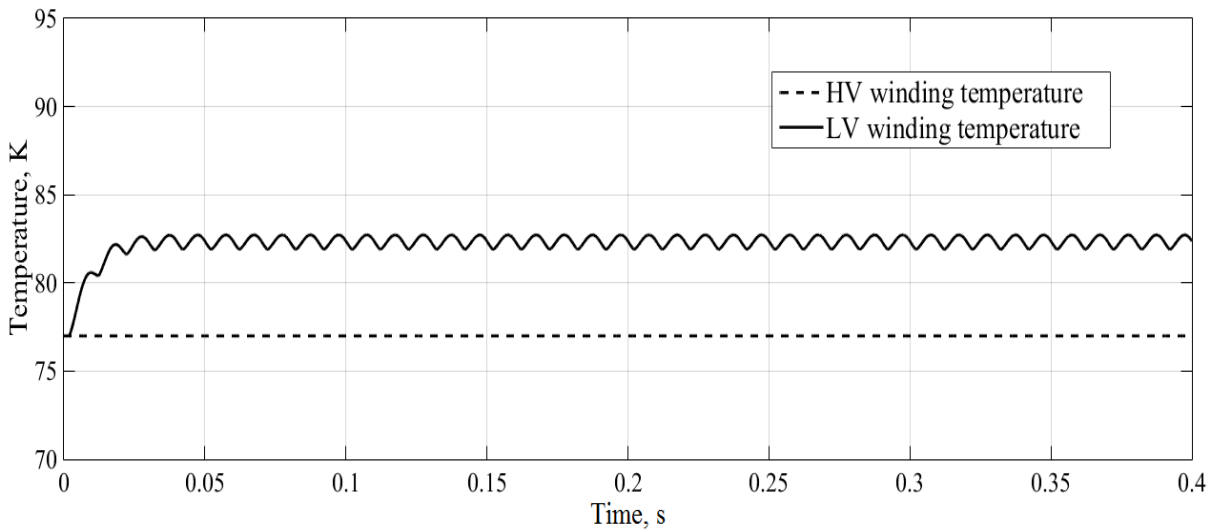


Рис. 11. Температура ВТСП обмоток при питающем напряжении 40 В.¹³

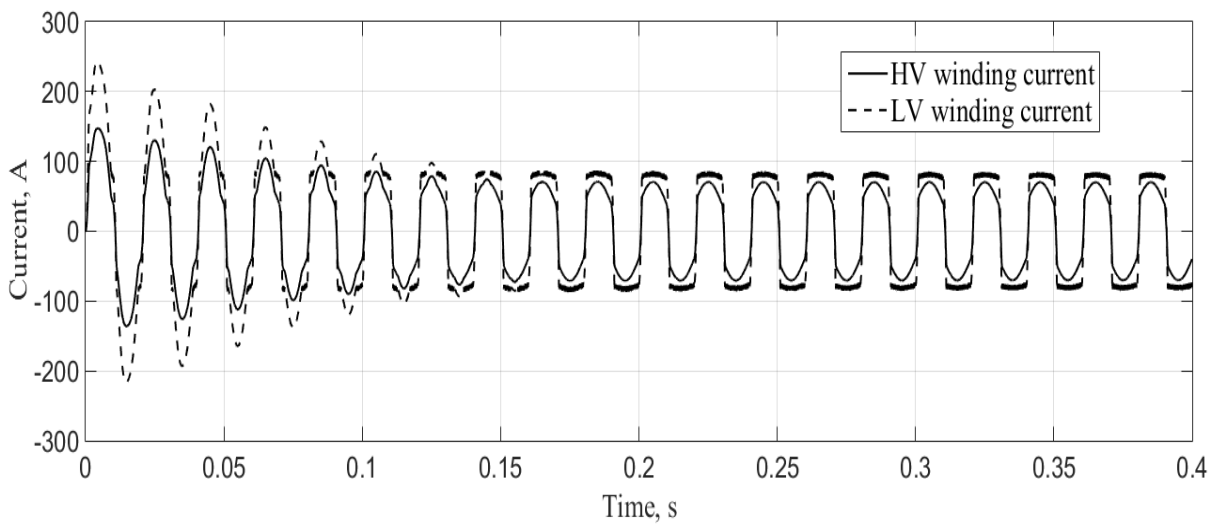


Рис. 12. Токи в ВТСП обмотках при питающем напряжении 120 В.¹⁴

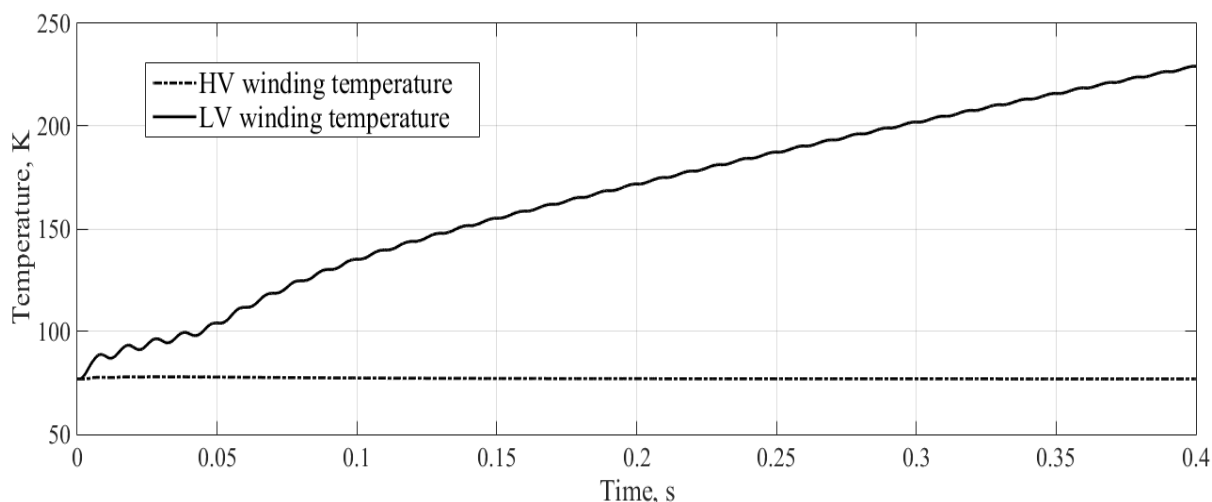


Рис. 13. Температура ВТСП обмоток при питающем напряжении 120 В.¹⁵

Форма кривых тока при подаче на трансформатор 40 В (рис. 10) и 120 В (рис. 12) свидетельствует об успешном ограничении тока в момент КЗ и хорошо коррелируется с результатами других авторов [26, 27] и проведенными натурными экспериментами авторами настоящей работы. Анализируя температурную зависимость, отметим что в первом случае (рис. 11) в обмотке ВН наблюдается незначительное изменение температуры, тогда как в обмотке НН происходит тепловая стабилизация (охлаждение провода происходит эффективно, так как система охлаждения находится в режиме пузырькового кипения жидкого азота), которая является безопасной для ВТСП обмотки. Однако во втором случае (рис. 13) наблюдается тепловой срыв, что часто приводит к необратимому перегреву провода и его дальнейшему повреждению.

Для оценки возврата сверхпроводимости обмотки был смоделирован эксперимент, при котором ВТСП трансформатор включается на питающее напряжение 120 В в режиме холостого хода и через 0.05 с происходит КЗ на вторичной обмотке НН, которое отключается через 0.1 с. Полученные осциллограммы токов и температур в обмотках (рис. 14, 15) свидетельствуют, что в момент КЗ происходит резкое повышение температуры, которое может вызвать тепловой срыв и термическое повреждение обмоток.

Как показал эксперимент, при быстром отключении КЗ, обмотки способны вернуться в сверхпроводящее состояние достаточно быстро (меньше 1 сек), не вызывая тепловой срыв и принудительное отключение трансформатора.

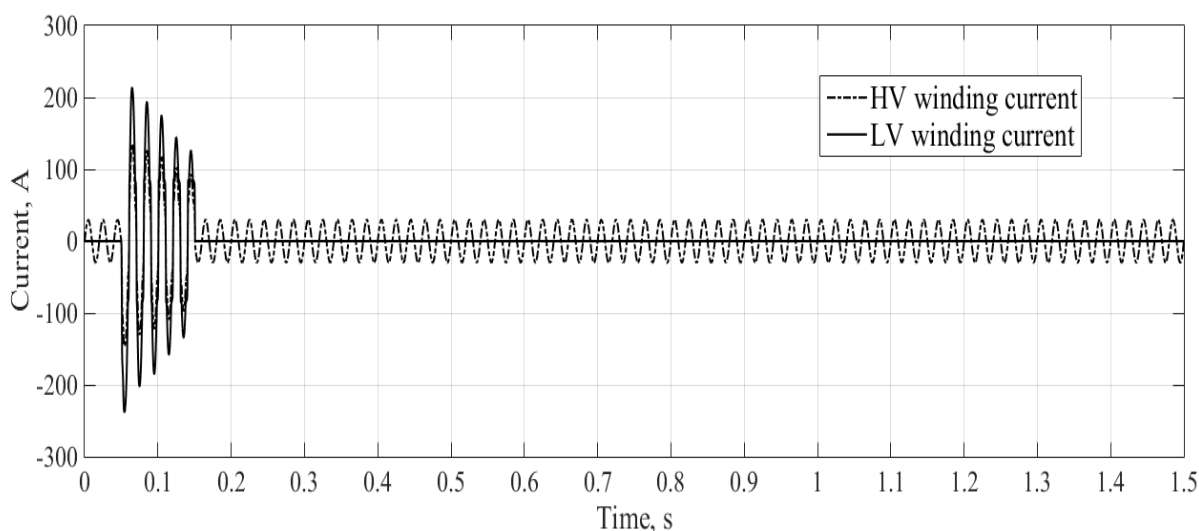


Рисунок 14. Токи в ВТСП обмотках при отключении КЗ при питающем напряжении 120 В.¹⁶

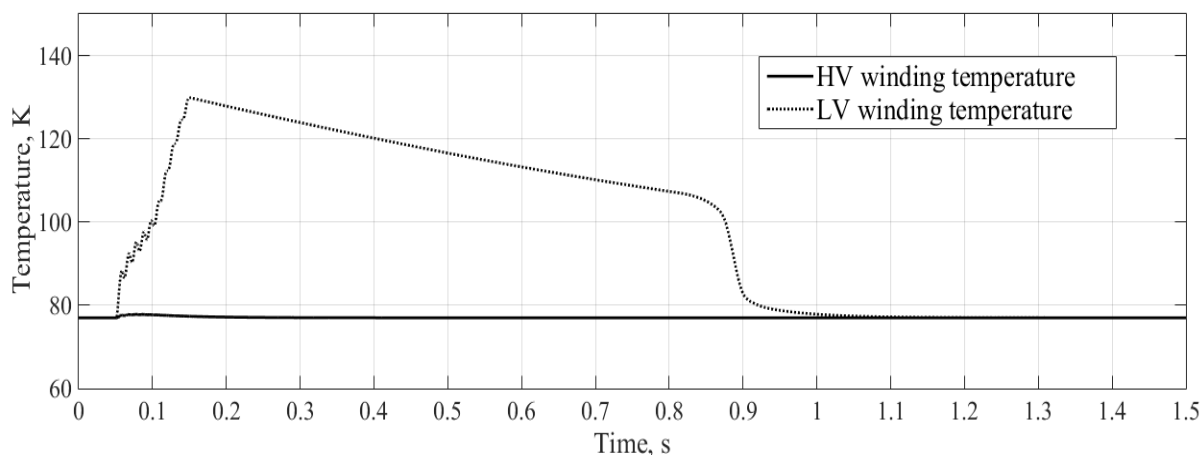


Рисунок 15. Температура ВТСП обмоток при отключении КЗ при питающем напряжении 120 В.¹⁷

Для стабилизации работы ВТСП трансформатора в момент КЗ предлагается использование ВТСП лент с большим сечением и критическим током в обмотке НН, так как по результатам экспериментов видно, что главную роль в ограничении тока играет именно обмотка НН. Сегодня ВТСП ленты изготавливают шириной 12 мм, с критическим током 500-600 А. Использование этих лент позволит существенно повысить токоограничивающую способность ВТСП трансформатора и тепловой запас его обмоток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель ВТСП трансформатора, позволяющая оценить переходные электромагнитный и тепловой процессы в его обмотках при КЗ. Проведено численное моделирование включения ВТСП трансформатора с закороченной вторичной обмоткой на диапазон напряжений от 40 до 120 В. Полученные осциллограммы тока показывают, что ВТСП трансформатор способен эффективно ограничивать ток КЗ. Однако, тепловыделения, возникающие при токоограничении, способны вызвать значительный перегрев обмоток, что приведет к тепловому срыву сверхпроводника и дальнейшему превышению температуры кризиса кипения жидкого азота. Рассмотренный режим может привести к термическому повреждению обмоток и их невозврату в сверхпроводящее состояние. Поэтому следует повышать термическую стойкость обмоток трансформатора путем использования ВТСП лент с большим сечением и большим критическим током во вторичной обмотке. Также возможно

покрытие ВТСП лент дополнительным материалом-сопротивлением.

Разработанная модель может быть использована при проектировании ВТСП трансформаторов для определения оптимальных геометрических параметров его обмоток. Также модель позволяет оценить время возврата ВТСП провода в сверхпроводящее состояние после устранения КЗ. Численные эксперименты показали, что следует проектировать обмотки таким образом, чтобы за время бестоковой паузы (например, во время действия автоматического повторного включения) ВТСП провод успевал вернуться в сверхпроводящее состояние, не вызывая тепловой срыв обмоток.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Structure of the second-generation HTS tapes by «SuperOx» company

²**Fig. 2.** Equivalent circuit of HTS wire

³**Fig. 3.** Current-voltage curve of YBCO superconductor

⁴**Fig. 4.** Dependence of heat flux density on temperature

⁵**Fig. 5.** Equivalent circuit of a simulated HTS transformer

⁶**Fig. 6.** Single-phase HTS transformer and its windings

⁷**Fig. 7.** Matlab/Simulink model of HTS transformer during short circuit

⁸**Fig. 8.** The dependence of the specific resistance of metals on temperature

⁹**Fig. 9.** The dependence of the specific heat capacity of metals on temperature

^{10,11}**Table 1.** Parameters of the windings of a single-phase HTS transformer prototype with a rated power of 2.5 kVA

¹²**Fig. 10.** Currents in HTS windings at a supply voltage of 40 V

¹³Fig. 11. Temperature of HTS windings at a supply voltage of 40 V

¹⁴Fig. 12. Currents in HTS windings at a supply voltage of 120 V

¹⁵Fig. 13. Temperature of HTS windings at a supply voltage of 40 V

¹⁶Fig. 14. Currents in HTS windings when a short circuit is switched off, supply voltage is 120 V

¹⁷Fig. 15. Temperature of HTS windings when a short circuit is switched off, supply voltage is 120 V

Литература (References)

- [1] Mouzykh M., Gorbunova D., Ustyuzhanin P., Sotnikov D., Baburin K. First Russian 220 kV Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) For Application in City Grid. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, vol. 31, no. 5, pp. 1-7, Art no. 5601707
- [2] Chen X., Gou H., Chen Y., Jiang C., Zhang M., Pang Z., Shen B. Superconducting fault current limiter (SFCL) for a power electronic circuit: experiment and numerical modelling. *Superconductor Science and Technology*, 2022, vol. 35, no. 4, Art no. 045010.
- [3] Koziel J., Gnat D., Majka M., Turgynbekov Y. The latest superconducting short current limiters - review of selected solutions. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2022 vol. 98, no. 2, pp. 156-159.
- [4] Fisher L.M., Alferov D.F., Akhmetgareev M.R., Budovskii A.I., Evsin D.V., Voloshin I.F., Kalinov A.V. Superconducting fault current limiter for railway transport. *Physics of Atomic Nuclei*, 2015, vol. 78, no. 14, pp. 1654-1657.
- [5] Ruiz H.S., Zhang X., Coombs T.A. Resistive-type superconducting fault current limiters: concepts, materials, and numerical modeling. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2015, vol. 25, no. 3, pp. 1-5.
- [6] Berger A., Noe M., Kudymow A. Test results of 60 kVA current limiting transformer with full recovery under load. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2011, vol. 21, no. 3, pp. 1384-1387.
- [7] Kondratowicz-Kucewicz B., Wojtasiewicz G. The Proposal of a Transformer Model With Winding Made of Parallel 2G HTS Tapes With Transpositioners and its Contact Cooling System. *IEEE Transactions Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 4., Art. no. 5500405.
- [8] Moradnouri A., Ardeshiri A., Vakilian M., Hekmati A., Fardmanesh M. Survey on High-Temperature Superconducting Transformer Windings Design. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2020, vol. 33, no. 9, pp. 2581-2599.
- [9] Hellmann S., Abplanalp M., Elschner S., Noe M. Current Limitation Experiments on a 1 MVA-Class Superconducting Current Limiting Transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 5, pp. 1-7, Art. no. 5501706.
- [10] Dai S., Ma T., Qiu Q., Zhu Z., Teng Y., Hu L. Development of a 1250-kVA Superconducting Transformer and Its Demonstration at the Superconducting Substation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, vol. 26, no. 1, pp. 1-7, Art. no. 5500107.
- [11] Hellmann S., Abplanalp M., Hofstetter L., Noe M. Manufacturing of a 1-MVA-Class superconducting fault current limiting transformer with recovery-under-load capabilities. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, vol. 27, no. 4, pp.1-6, Art. no. 5500305.
- [12] Hu D., Li Z., Hong Z., Jin Z. Development of a single-phase 330kVA HTS transformer using GdBCO tapes. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 2017, vol. 539, pp. 8-12.
- [13] Liu G., Zhang G., Liu G., Wang H., Jing L. Experimental and numerical study of high frequency superconducting air-core transformer. *Superconducting Science Technology*, 2021, vol. 34, no. 8, Art. no. 85011.
- [14] Vysotsky V.S., Fetisov S.S., Zubko V.V., Zanegin S., Nosov A.A., Ryabov S.M., Bykovsky N.V. Development and test results of HTS windings for superconducting transformer with 1 MVA rated power. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, vol. 27, no. 4, pp. 1-5., Art. no. 5500105.
- [15] Shen B., Grilli F., Coombs T. Review of the AC loss computation for HTS using H formulation. *Superconductor Science and Technology*, 2020 vol. 33, no. 3, Art. no. 033002.
- [16] Song W., Jiang Z., Zhang X., Staines M., Fang J., Sogabe Y., Amemiya N. AC loss simulation in a HTS 3-Phase 1 MVA transformer using H formulation. *Cryogenics*, 2018, vol. 94, pp. 14-21.
- [17] Grilli F., Ashworth S. Measuring transport AC losses in YBCO-coated conductor coils. *Superconductor Science and Technology*, 2007, vol. 20, pp. 794-799.
- [18] Surdacki P., Wozniak Ł. Influence of the HTS Winding Tape on Limiting the Transient Currents in Superconducting Transformers. *Energies*, 2022, vol. 15., no. 5., pp. 1-16., Art no. 1688.
- [19] Nemdili S., Belkhiat S. Electrothermal Modeling of Coated Conductor for a Resistive Superconducting Fault-Current Limiter. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2013, vol. 26, no. 8., pp. 2713-2720.
- [20] Samoilenkov S., Molodyk A., Lee S., Petrykin V., Kalitka V., Martynova I., Makarevich A., Markelov A., Moyzykh M., Blednov A. Customised 2G HTS wire for applications. *Superconductor Science and Technology*, 2016, vol. 29, pp. 1-10.

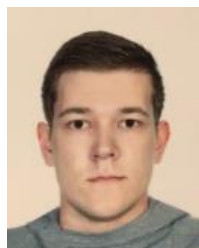
- [21] Molodyk A., Samoilenkov S., Markelov A., Lee S., Petrykin V., Gaifullin M., Kesler L., Vasiliev A. Development and large volume production of extremely high current density $YBa_2Cu_3O_7$ superconducting wires for fusion. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, pp. 1-11., Art. no. 2084.
- [22] Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilenkov S., Kaul A., Vavilov A., Vysotsky V., Fetisov S. Development and production of second generation high T_c superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. *Superconductor Science and Technology*, 2014, vol. 27, no. 4, Art. no. 044022.
- [23] Lei W., Jiaojiao W., Tian Y., Xiaoning H., Fushou X., Yanzhong L. Film boiling heat transfer prediction of liquid nitrogen from different geometry heaters. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, vol. 129, Art. no. 103294.
- [24] Hu M., Zhou Q.B., Wang X., Tang F.P., Sheng J., Bian X.Y., Jin Z.J. Study of Liquid Nitrogen Insulation Characteristics for Superconducting Transformers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2022, vol. 32, no. 4, pp. 1-5, Art. no. 5500305.
- [25] Zhou J., Chan W., Schwartz J. Quench Detection Criteria for $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Coils Monitored via a Distributed Temperature Sensor for 77 K Cases. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 5, Art. no. 4703012.
- [26] Elshiekh M., Zhang M., Ravindra H., Chen X., Venuturumilli S., Huang X., Schoder K., Steurer M., Yuan W. Effectiveness of Superconducting Fault Limiting Transformers in Power Systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 3, Art. no. 5601607.
- [27] Wojtasiewicz G. Fault current limitation by 2G HTS superconducting transformer - experimental investigation. *Acta Physica Polonica A*, 2016, vol. 130, no. 2, pp. 516–520.

Сведения об авторах.



**Манусов
Вадим
Зиновьевич**

д.т.н., профессор кафедры «СЭСП» Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: применение методов искусственного интеллекта для планирования и оптимизации режимов электроэнергетических систем
E-mail:
manusov36@mail.ru



**Иванов Дмитрий
Михайлович**

Аспирант кафедры «СЭСП» Новосибирский государственный технический университет. Исследование и разработка высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов
E-mail:
mrdemasi123@gmail.com