

Modeling and Experimental Study of the Inrush Current of a High-Temperature Superconducting Transformer

Manusov V.Z.¹, Ivanov D.M.¹, Ivanova E.V.²

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

²Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. Inrush current in high-temperature superconducting (HTS) transformers is a little-studied phenomenon. After connecting to the power grid, a current flow through the windings which exceeding the critical current value of the superconducting tape. It may cause significant overheating and thermal damage of winding. The purpose of the study is to develop a mathematical model for calculating inrush current pulses in a HTS transformer and its verification by physical experiments. To achieve the goal of the study, a mathematical model has been developed that accurately represents the electromagnetic and thermal transient processes after HTS transformer is turned on at idling or under load. The model considers the critical parameters of the HTS tapes, the process of heating and cooling of the windings, quench characteristics, and the electrical and magnetic parameters of the transformer. Good compliance of the experimental results and mathematical modeling with a deviation of 1.99 % allowed us to verify the model. The most important result is the creation of a mathematical model of the HTS transformer at the moment of connecting to power grid. This model represents the temperature changing of the windings during the loss of superconductivity. The developed model can be used in the analysis and modeling of inrush current in designed and operating HTS transformers for any power. The obtained results are significant for determine the optimal starting characteristics, geometric and electrical parameters of HTS transformers. The proposed methods for reducing the inrush current ensure safe and reliable operation of the HTS transformer when switched on at idling or under load.

Keywords: HTS transformer, inrush current, experimental research, Matlab/Simulink, energy efficiency, power transformer, liquid nitrogen, HTS tape.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.05>

UDC: 621.314.21

Modelarea și studiul experimental al curentului de pornire al transformatorului supraconductor de temperatură înaltă

Manusov V.Z.¹, Ivanov D.M.¹, Ivanova E.V.²

¹Universitatea Tehnică de Stat din Novosibirsk, Novosibirsk, Federația Rusă

²Universitatea de Stat din Siberia de Transport pe Apă, Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. Curentul de pornire în transformatoarele supraconductoare de temperatură înaltă (STÎ) este un fenomen puțin studiat. După conectarea la rețeaua electrică, prin înfășurări curge un curent care depășește valoarea critică a curentului benzii supraconductoare. Poate provoca supraîncălzire semnificativă și deteriorare termică a înfășurării. Scopul studiului este de a elabora un model matematic pentru calcularea impulsurilor de curent de pornire într-un transformator STÎ și verificarea acestuia prin experimente fizice. Pentru a atinge scopul studiului, a fost elaborat un model matematic care reprezintă cu acuratețe procesele tranzitorii electromagnetice și termice după ce transformatorul STÎ este pornit la ralanti sau sub sarcină. Modelul ia în considerare parametrii critici ai benzilor STÎ, procesul de încălzire și răcire a înfășurărilor, caracteristicile de stingere și parametrii electrici și magnetici ai transformatorului. O bună conformitate a rezultatelor experimentale și modelarea matematică cu o abatere de 1,99 % ne-a permis să verificăm modelul. Cel mai important rezultat este crearea unui model matematic al transformatorului STÎ în momentul conectării la rețeaua electrică. Acest model reprezintă schimbarea temperaturii înfășurărilor în timpul pierderii supraconductivității. Modelul elaborat poate fi utilizat în analiza și modelarea curentului de pornire în transformatoarele STÎ proiectate și în exploatare pentru orice putere. Rezultatele obținute sunt semnificative pentru determinarea caracteristicilor optime de pornire, a parametrilor geometrici și electrici ai transformatoarelor STÎ. Metodele propuse pentru reducerea curentului de pornire asigură funcționarea sigură și fiabilă a transformatorului STÎ atunci când este pornit la ralanti sau sub sarcină.

Cuvinte-cheie: transformator STÎ, curent de pornire, cercetare experimentală, Matlab/Simulink, eficiență energetică, transformator de putere, azot lichid, bandă STÎ.

Моделирование и экспериментальное исследование пускового тока высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора

Манусов В.З.¹, Иванов Д.М.¹, Иванова Е.В.²

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация

²Сибирский Государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. Бросок пускового тока в высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) трансформаторах – явление малоизученное. Протекающий при включении ток способен во много раз превысить критическое значение тока сверхпроводящей ленты, вызывая при этом значительный перегрев обмотки и дальнейшее термическое повреждение. Целью работы является разработка математической модели электромагнитного и теплового переходных процессов при коммутации ВТСП трансформатора с электрической сетью. Для достижения цели исследования разработана математическая модель, описывающая электромагнитный и тепловой переходные процессы при включении ВТСП трансформатора на холостой ход и под нагрузкой. Представленная в работе модель учитывает критические параметры сверхпроводника (ток и температуру), процесс нагрева и охлаждения обмоток в момент потери и возврата сверхпроводящего состояния, электрические и магнитные параметры исследуемого трансформатора. При сравнении результатов численного моделирования с натурными экспериментами среднее отклонение между максимумами первых пяти периодов тока в обмотках трансформатора составило 1,99 %, что позволило верифицировать математическую модель. Наиболее важным результатом является создание математической модели переходных электромагнитных и тепловых процессов при включении ВТСП в электрическую сеть, которая в отличие от существующих моделей учитывает изменение температуры обмоток при потере сверхпроводимости. Разработанная модель может быть использована при анализе и моделировании броска пускового тока в проектируемых и существующих ВТСП трансформаторах любой мощности. Показано, что высокие значения пускового тока способны повредить обмотки и привести к аварийному отключению. Значимость полученных результатов заключается в определении пусковых характеристик с точностью до 98.01 %, которые могут быть использованы для определения оптимальных геометрических и электрических параметров обмоток при проектировании и эксплуатации ВТСП трансформаторов. Предложенные методы снижения пускового тока, обеспечивают безопасную и надежную работу ВТСП трансформатора при включении на холостой ход и под нагрузкой.

Ключевые слова: ВТСП трансформатор, пусковой ток, экспериментальные исследования, Matlab/Simulink, энергоэффективность, жидкий азот, силовой трансформатор, ВТСП лента.

ВВЕДЕНИЕ

Каждое включение трансформатора на холостой ход или под нагрузкой сопровождается резким изменением напряжения на выводах его обмоток. Это переходное состояние приводит к возникновению броска пускового тока, который может превышать номинальный ток трансформатора в 10-20 раз [1,2]. Время затухания пускового тока для трансформаторов большой мощности может достигать нескольких тысяч периодов, что приводит к возникновению эксплуатационных проблем при включении трансформаторов.

Явление броска тока намагничивания классических трансформаторов с медными обмотками достаточно хорошо исследовано, как посредством теоретического анализа, так и проведением экспериментов на реальных электрических машинах [3,4]. Выражения для аппроксимации формы пускового тока предложены в [5,6], однако, в случае ВТСП трансформаторов это явление остается

недостаточно исследованным [7-10]. Литература по пусковому току сверхпроводящих трансформаторов относительно немногочисленна и описывает формы кривых, полученных экспериментально для существующих лабораторных образцов [11-13]. Разработанная авторами статьи [3] математическая модель броска тока намагничивания ВТСП трансформатора с достаточной точностью описывает электромагнитный переходный процесс при коммутации трансформатора с сетью, однако в ней не учитывается процесс нагрева обмотки и процесс возврата сверхпроводящего состояния после затухания броска тока.

Пусковой ток большой величины и времени затухания способен привести к непредвиденной потере сверхпроводимости ВТСП обмоток, что может не только затруднить коммутацию ВТСП трансформатора к сети, но и вызвать термическое повреждение [3, 12, 13]. Поэтому, важно выработать ряд мер,

обеспечивающих безопасное и надежное включение ВТСП трансформатора в сеть. Для этого необходимо определить механизм развития пускового тока в сверхпроводящих трансформаторах с учетом критических параметров сверхпроводника (тока и температуры), нагрева ВТСП обмоток трансформатора в момент включения, зависимости удельных сопротивлений и теплоемкостей слоев ВТСП ленты от температуры. Это позволит разработать новые, и адаптировать существующие методы ограничения пускового тока обычных трансформаторов на сверхпроводящие [14, 15].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ТЕПЛОВОГО ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПУСКЕ ВТСП ТРАНСФОРМАТОРА

Задача исследования переходных процессов, возникающих при включении ВТСП трансформатора в электрическую сеть, сводится к определению электрических, магнитных и тепловых параметров режима работы исследуемой электрической машины с учетом начальных условий переходного процесса. В качестве исходных данных принимаются электрические и магнитные параметры рассматриваемой сети, геометрические размеры ВТСП обмоток, тепловые и критические параметры ВТСП ленты. Результатом моделирования станут кривые изменения токов и температур обмоток высшего напряжения (ВН) и изменение магнитных потоков в трансформаторе.

Схемы замещения ВТСП и классического трансформатора в режиме холостого хода во многом схожи. Разница сводится к наличию нелинейного активного сопротивления обмотки ВН RBTСП, величина которого зависит от состояния сверхпроводящего провода [16, 17]. Правильным рабочим состоянием обмоток ВТСП трансформатора является сверхпроводящее состояние. В этом состоянии реальное активное сопротивление ВТСП ленты составляет менее 10^{-21} Ом, что на 18 порядков меньше сопротивления меди при комнатной температуре. Можно предположить, что в сверхпроводящем состоянии

¹Appendix 1

сопротивление обмотки ВН равно

нулю.

Обмотки трансформатора переходят в резистивное состояние, когда пусковой ток превышает критический ток ВТСП ленты ИК или при нагреве обмотки выше ее критической температуры ТК. В этом состоянии RBTСП резко возрастает и на обмотке выделяется большое количество тепла. С учетом всего вышесказанного представим схему замещения ВТСП трансформатора в режиме холостого хода на рис. 1.

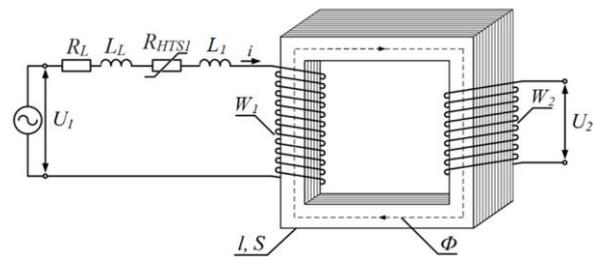


Рис.1. Принципиальная схема однофазной сети с ВТСП трансформатором в режиме холостого хода.¹

Для моделирования процесса намагничивания магнитной системы ВТСП трансформатора принято использовать упрощенную форму кривой намагничивания [18]. Также, в расчетах пренебрегаем влиянием емкостных токов, возникающих между обмотками и сердечником, ввиду их малых значений.

Запишем дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс для схемы на рисунке 1:

$$U_1 = i(R_L + R_{HTS1}(i, T)) + (L_L + L_1) \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

где U_1 – питающее сеть переменное напряжение; i – ток намагничивания; Ψ – потокосцепление первичной ВТСП обмотки; R_L – активное сопротивление отходящей от ВТСП трансформатора линии; L_L – индуктивность отходящей линии; T – температура ВТСП обмотки; $R_{HTS1}(i, T)$ – активное нелинейное сопротивление первичной обмотки ВТСП трансформатора, зависящее от протекающего тока и температуры обмотки; L_1 – индуктивность рассеяния первичной обмотки.

Скорость изменения потокосцепления запишем в следующей форме:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{di} \cdot \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

где $\frac{d\Psi}{di}$ – дифференциальная индуктивность L_d [19].

Кривую намагничивания стали обычно представляют в виде зависимости:

$$B = f(H), \quad (3)$$

где B – магнитная индукция в сердечнике, H – напряженность магнитного поля.

Потокосцепление запишем в виде:

$$\Psi = BSW_1, \quad (4)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитопровода, W_1 – число витков первичной обмотки.

Принимая во внимание закон полного тока для рассматриваемой сети и учитывая уравнения (3) и (4), представим дифференциальную индуктивность в следующем виде:

$$L_d = \frac{d\Psi}{di} = \frac{W_1^2 S}{l_m} \cdot \frac{dB}{dH}. \quad (5)$$

где l_m – длина средней линии магнитопровода.

Подставим уравнение (2) и (5) в (1) и преобразуем в форму Коши, получим:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_1 - i(R_L + R_{HTS1}(i, T))}{L_L + L_1 + L_d}. \quad (6)$$

Для адекватного моделирования процесса нагрева обмотки при потере сверхпроводящего состояния необходимо учитывать слоистую структуру ВТСП ленты [20]. Принимая в качестве допущения, что нагрев обмотки по всей длине сверхпроводящей ленты происходит равномерно, найдем количество теплоты, выделяющейся во время нахождения обмотки в резистивном состоянии:

$$Q(I, T) = \int_0^t I^2 R_{HTS1}(I, T) dt. \quad (7)$$

Изменение температуры в момент нагрева и охлаждения ВТСП ленты при потере и возврате сверхпроводящего состояния выразим, используя нестационарное уравнение теплопроводности:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q(I, T) - Aq(\Delta T)}{C_\Sigma(T)}, \quad (8)$$

где $Q(I, T)$ – количество теплоты, выделяющееся на обмотке, A – площадь поверхности ВТСП обмотки, $C_\Sigma(T)$ – общая теплоемкость ВТСП обмотки, в зависимости от температуры, $q(\Delta T)$ – плотность теплового потока в зависимости от разности температур между криогенной жидкостью и поверхностью обмотки [21, 22].

Учитывая закон полного тока и известную характеристику намагничивания для магнитной системы из известной марки электротехнической стали, искомая математическая модель будет представлять собой систему дифференциальных уравнений (6) и (8):

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{U_1 - i(R_L + R_{ВТСП}(i, T))}{L_L + L_1 + L_d} \\ \frac{dT}{dt} = \frac{Q(I, T) - Aq(\Delta T)}{C_\Sigma(T)} \end{cases}. \quad (9)$$

Решение представленной математической модели было реализовано методом численного интегрирования в программно-вычислительном комплексе Matlab/Simulink для известных исходных данных.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПУСКЕ ВТСП ТРАНСФОРМАТОРА

Для проведения экспериментальных исследований по определению броска тока намагничивания и оценки адекватности представленной выше математической модели, был разработан и сконструирован однофазный прототип силового понижающего ВТСП трансформатора с токоограничивающей функцией, мощностью 9 кВА и коэффициентом трансформации напряжения равным трем (рис. 2).



Рис. 2. Экспериментальная модель ВТСП трансформатора с функцией ограничения тока.²

В качестве материала для обмоток экспериментальной модели использовались ВТСП ленты второго поколения на основе иттриевой керамики ($Y_1Ba_2Cu_3O_7$), производства компании «SuperOx». Обмотка

высокого напряжения (ВН) изготовлена из

ленты, толщиной 4 мм и имеет 33 витка. Обмотка низкого напряжения выполнена из ленты толщиной 12 мм и имеет 11 витков.

В качестве материала для обмоток экспериментальной модели использовались ВТСП ленты второго поколения на основе иттриевой керамики ($Y_1Ba_2Cu_3O_7$), производства компании «SuperOx». Обмотка высокого напряжения (ВН) изготовлена из ленты, толщиной 4 мм и имеет 33 витка. Обмотка низкого напряжения выполнена из ленты толщиной 12 мм и имеет 11 витков.

Магнитопровод изготовлен в «теплом» исполнении (рабочая температура магнитной системы близка к комнатной) из электротехнической стали марки 3408 по технологии производства «Unicope» с лаковой изоляцией. Криостат изготовлен из непластифицированного поливинилхлорида, для теплоизоляции использовался аэрогель. Основные параметры представленного силового ВТСП трансформатора приведены в таблице 1.

Таблица 1³.

Параметры прототипа силового ВТСП трансформатора⁴.

Параметры обмоток (Winding parameters)		
Параметр (Parameter)	Обмотка ВН (HV winding)	Обмотка НН (LV winding)
Материал обмотки (Winding material)	$Y_1Ba_2Cu_3O_7$	
Ширина ВТСП ленты (HTS tape width), mm	4	12
Критический ток ВТСП ленты (Critical current of HTS tape), A	129	439
Критическая температура ВТСП ленты (Critical temperature of HTS tape), K	148	589
Показатель степени вольт-амперной характеристики (Current-voltage characteristic exponent)	35	
Рабочая температура (Operating temperature), K	77	
Номинальное напряжение (Rated Voltage), V	220	73,3
Номинальный ток (Rated current), A	40	120
Число витков (Number of turns)	33	11
Индуктивность (Inductance), μH	271	27
Изоляция (Insulation)	Каптон (Kapton)	
Диэлектрическая среда (Dielectric medium)	Жидкий азот (Liquid nitrogen)	
Параметры магнитной системы (Magnetic core parameters)		
Материал (Material)	Электротехническая сталь марки 3408 (3408 electrical steel)	
Толщина стали (Steel thickness), mm	0.3	
Изоляция (Insulation)	Лаковая (Varnish)	
Длина средней магнитной линии (Average magnetic line length), m	2	
Поперечное сечение магнитопровода (Cross section of the magnetic core), m^2	0.025	

Для фиксации броска тока осуществлялся пуск ВТСП трансформатора на холостой ход при подаче на обмотку ВН намагничивания,

^{2,3,4} Appendix 1

напряжения 220 В. Схема и фотография экспериментальной сети представлены на рис. 3 и 4. В качестве источника питания использовался лабораторный автотрансформатор с возможностью регулировки напряжения от 0 до 600 В. Все соединения силовых элементов исследуемой сети выполнены медными

проводниками сечением 16 мм². Измерения тока и напряжения в обмотках трансформатора осуществлялись высокоточным анализатором Fluke 435-II в режиме регистрации переходных процессов. Экспериментальные данные обрабатывались в программе Power Log на персональном компьютере.

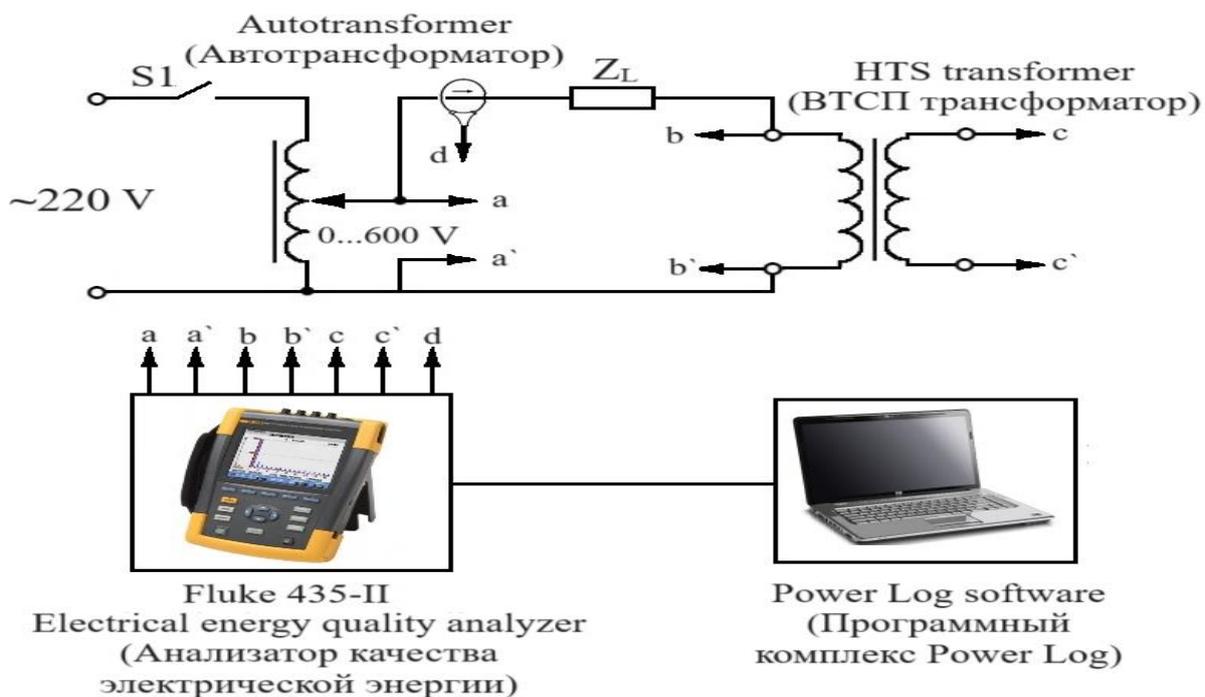


Рис. 3. Схема экспериментальной сети.⁵



Рис. 4. Внешний вид экспериментальной сети с измерительными приборами.⁶

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эксперимент проводился при наихудших условиях включения трансформатора в

^{5,6} Appendix 1

энергосеть - при переходе напряжения через ноль. В результате получены кривые изменения тока и напряжения в обмотке ВН при пуске ВТСП трансформатора на

холостом ходу (рис.5). Найденная кривая напряжения (выделена красным цветом) опережает кривую тока намагничивания (выделена черным цветом) на 90° .

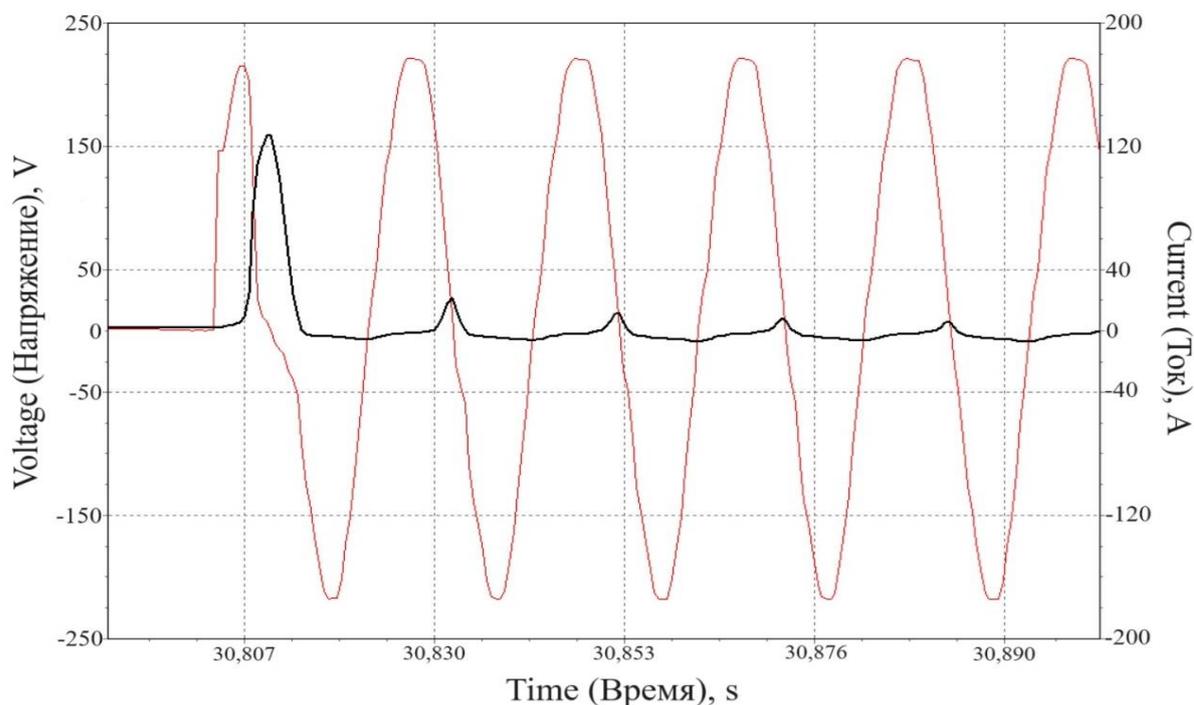


Рис. 5. Ток и напряжение в обмотке ВН, полученные экспериментально.⁷

Эксперимент был смоделирован с помощью разработанной математической модели (9) в ПК Matlab/Simulink. На рис. 6 приводится сравнение результатов математического моделирования (9) с осциллограммой, полученной экспериментально. В таблице 2 представлено сравнение рассчитанных и найденных экспериментально максимальных значений токов в обмотке ВН за первые пять периодов после пуска трансформатора. Отклонение между найденными максимумами первого пика тока составило 0,72 %, а среднее отклонение за первые 5 периодов – 1,99 %. Полученные значения погрешности при определении максимума токов и совпадение формы кривых токов позволяют считать, что

разработанная математическая модель позволяет адекватно оценить электромагнитный и тепловой переходные процессы, возникающие при включении ВТСП трансформатора.

Для определения способности ВТСП обмоток самостоятельно возвращаться в сверхпроводящее состояние после подключения трансформатора к сети было смоделировано включение ВТСП трансформатора под активно-индуктивной нагрузкой 9 кВА с остаточной намагниченностью в магнитной системе в 1 Тл. На рис. 7-10 приведены смоделированные в Matlab/Simulink кривые тока и температуры в обмотке ВН.

Таблица 2⁸.

Сравнение максимальных значений пускового тока⁹.

№ Периода (Period number)	1	2	3	4	5
I_{max} (Эксперимент (Experiment)), А	124.35	18.93	9.21	8.01	6.15
I_{max} (Мат. модель (Math. model)), А	125.25	19.55	8,87	7.78	5.93
Отклонение (Deviation), %	0.72	3.29	3.69	2.93	3.62

^{7,8,9} Appendix 1

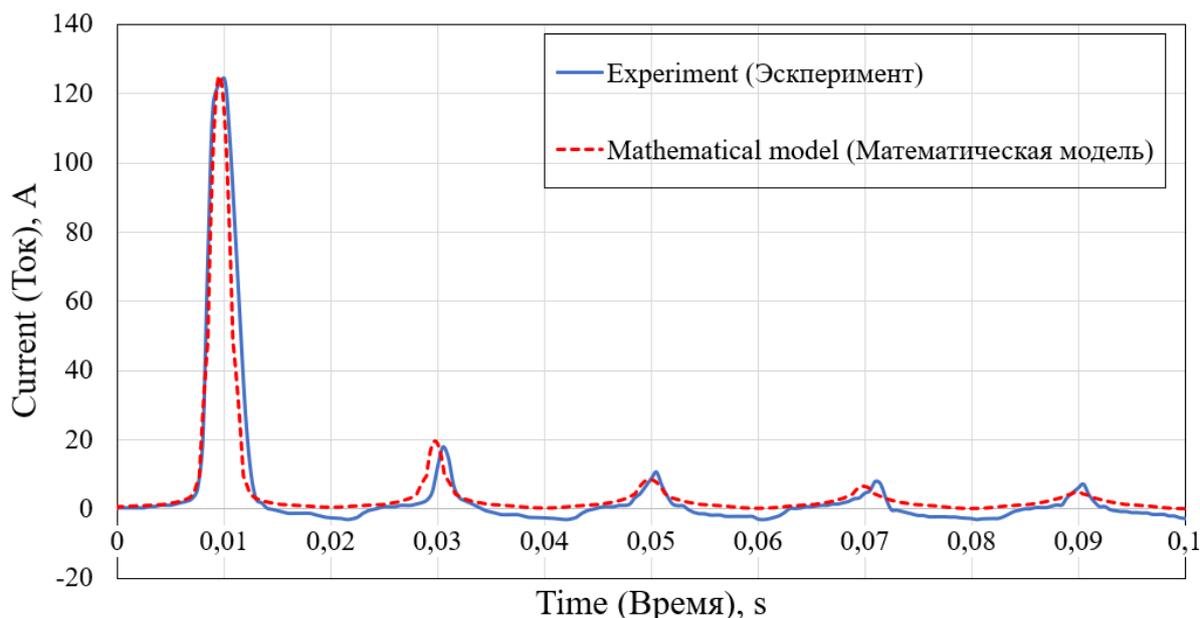


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных и численного моделирования первых пяти периодов броска тока намагничивания.¹⁰

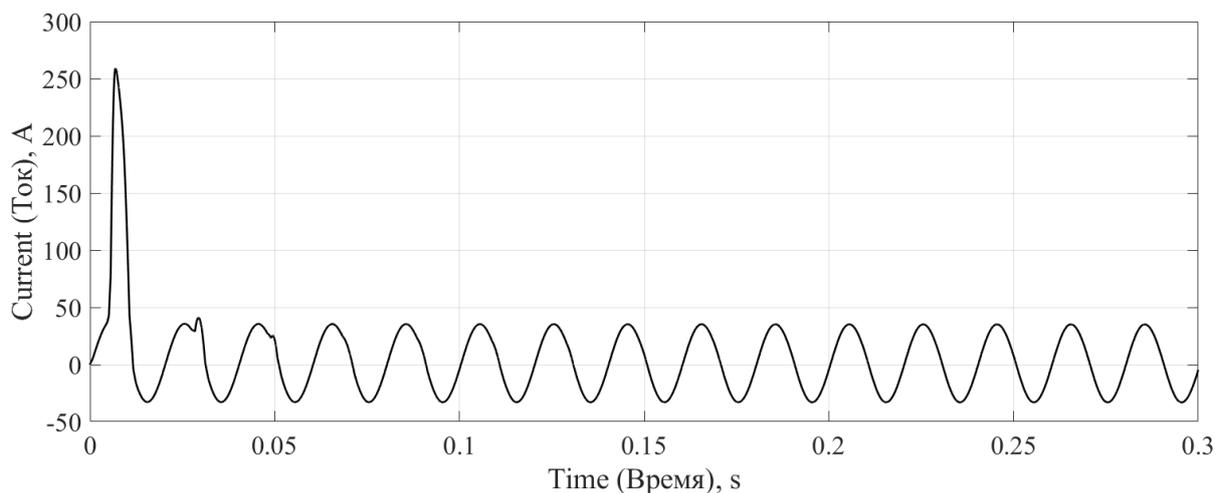


Рис. 7. Ток в обмотке ВН при включении под нагрузкой: питающее напряжение 220 В, остаточная намагниченность 1 Тл.¹¹

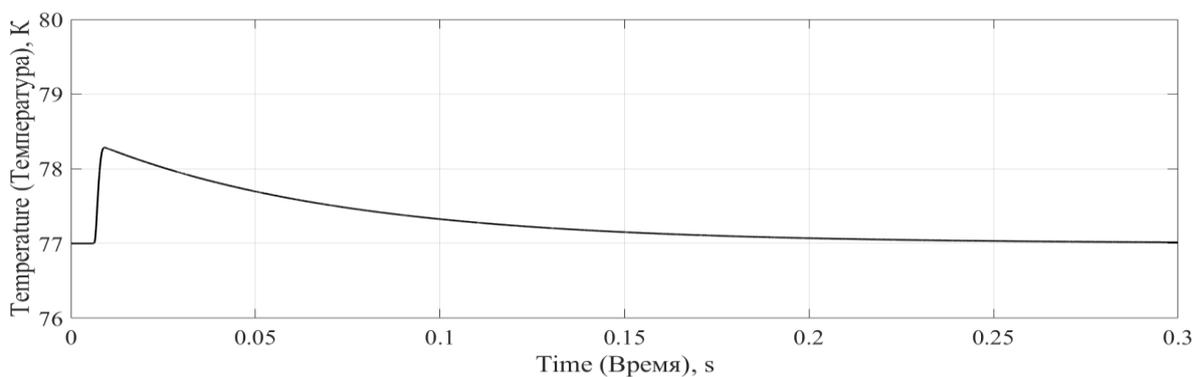


Рис. 8. Температура обмотки ВН при включении под нагрузкой: питающее напряжение 220 В, остаточная намагниченность 1 Тл.¹²

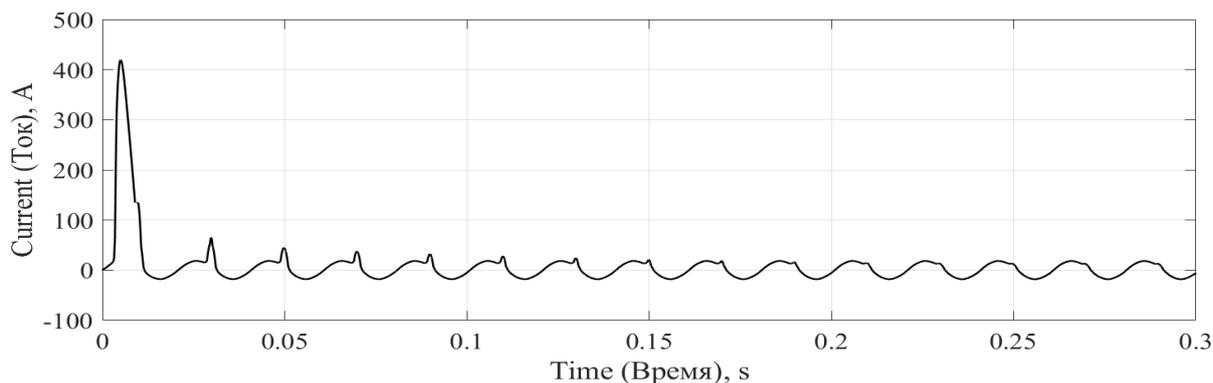


Рис. 9. Ток в обмотке ВН при включении под нагрузкой: питающее напряжение 450 В, остаточная намагниченность 1 Тл.¹³

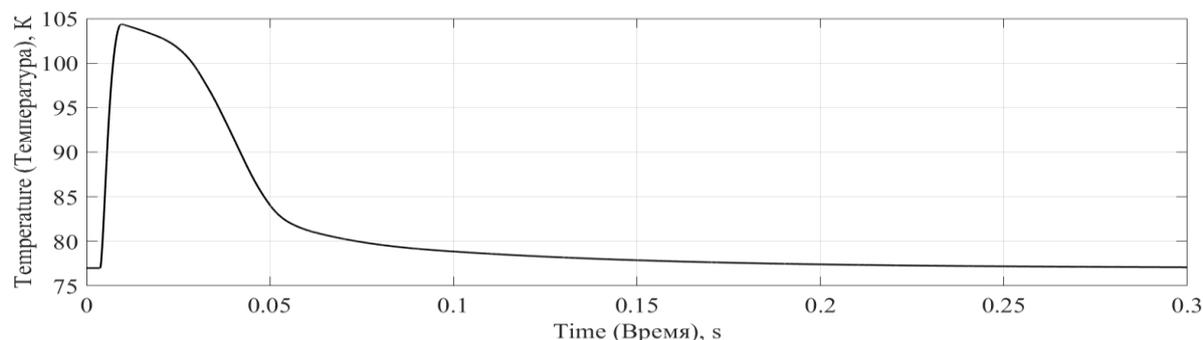


Рис. 10. Температура обмотки ВН при включении под нагрузкой: питающее напряжение 450 В, остаточная намагниченность 1 Тл.¹⁴

По результатам исследования установлено, что пусковой ток ВТСП трансформатора при включении под нагрузкой превысил критическое значение тока сверхпроводящей ленты, что спровоцировало переход сверхпроводника в резистивное состояние. По форме полученной кривой тока видно, что пусковой ток затухает медленнее (рис. 7 и рис. 9), чем в классических трансформаторах с медными обмотками. Это связано с процессом охлаждения обмотки и временем возврата сверхпроводящего состояния, которое зависит от электрических параметров смежной сети, к которой подключается трансформатор.

При включении трансформатора под нагрузкой на номинальное напряжение наблюдается незначительный перегрев обмотки и возврат сверхпроводящего состояния происходит достаточно быстро и стабильно (рис. 8). Однако, при включении трансформатора на повышенном питающем напряжении, бросок тока существенно возрастает. При этом обмотка существенно нагревается (рис. 10) и ее температура способна превысить температуру кризиса

кипения жидкого азота и существенно снизить эффективность системы охлаждения. Длительное нахождение обмотки в резистивном состоянии под нагрузкой способно нарушить целостность ВТСП обмотки в результате ее термического повреждения.

Проведенные исследования показали, что бросок тока намагничивания в ВТСП трансформаторах намного опаснее, чем в машинах традиционного исполнения. Для избежания перегрева обмоток и, как следствие, возникновения аварийного режима следует разработать ряд мер по снижению пускового тока. Этого можно добиться контролем времени включения трансформатора, в этом случае бросок составляет всего 5-10% от номинального. Другой метод подразумевает использование в первичной обмотке ВТСП лент с большим поперечным сечением и высоким значением критического тока (до 600 А), что позволит до минимума сократить возможность потери сверхпроводящего состояния при включении ВТСП трансформатора под нагрузкой и обеспечить бесперебойную и надежную работу устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель позволяет определять пусковой ток ВТСП трансформаторов с учетом критических параметров сверхпроводника, нагрева ВТСП провода, природы потери сверхпроводящего состояния, основных электрических величин (сопротивления, индуктивности, напряжения). Модель может быть использована для расчета пускового тока как новых, так и существующих ВТСП трансформаторов. Приведенную модель можно использовать не только для определения максимального и последующих импульсов пускового тока, но и для определения возможности возврата сверхпроводящего состояния после потери сверхпроводимости.

Экспериментальные исследования включения ВТСП трансформатора мощностью 9 кВА на холостой ход позволили верифицировать разработанную математическую модель. Достаточно точное совпадение формы кривой тока в обмотке ВН позволяет считать, что разработанная математическая модель позволяет адекватно оценить бросок пускового тока и возникающие при этом электромагнитный и тепловой переходные процессы при включении ВТСП трансформатора.

В результате проведенных исследований установлено, что возникающие при потере сверхпроводящего состояния тепловыделения способны привести к перегреву обмоток выше температуры кризиса кипения жидкого азота, что грозит термическим повреждением обмоток и нарушению нормальной работы ВТСП трансформатора. Для уменьшения значений пускового тока предлагается контролировать время включения трансформатора (при фазном угле близком к 90°). Также повышению термической стойкости обмоток способствует использование ВТСП лент с большими значениями критического тока.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Principal scheme of a single-phase grid with a HTS transformer in idling mode.

²**Fig. 2.** Experimental model of a HTS transformer with a current limiting function.

^{3,4}**Table 1.** Parameters of a HTS power HTS transformer prototype.

⁵**Fig. 3.** Experimental circuit.

⁶**Fig. 4.** Photography of the experimental circuit with measuring equipment.

⁷**Fig. 5.** Current and voltage in the high voltage winding obtained experimentally.

^{8,9}**Table 2.** Comparison of the maximum values of the inrush current.

¹⁰**Fig. 6.** Comparison of experimental data and numerical simulation of the first five periods of inrush current.

¹¹**Fig. 7.** Current in the high voltage winding when switched on under load: supply voltage is 220 V, residual magnetism induction is 1 T.

¹²**Fig. 8.** Temperature of the high voltage winding when switched on under load: supply voltage is 220 V, residual magnetism induction is 1 T.

¹³**Fig. 9.** Current in the high voltage winding when switched on under load: supply voltage is 450 V, residual magnetism induction is 1 T.

¹⁴**Fig. 10.** Temperature of the high voltage winding when switched on under load: supply voltage is 450 V, residual magnetism induction is 1 T.

Литература (References)

- [1] Turner R.A., Smith K.S. Transformer Inrush Current. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2010, Vol. 16, no. 5, pp. 14–19.
- [2] Steurer M., Frohlich K. The Impact of Inrush Current on the mechanical stress on high voltage power transformer coils. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2002, Vol.17, no.1, pp.155–160.
- [3] Komarzyniec G. Calculating the Inrush Current of Superconducting Transformers. *Energies*, 2021, Vol. 14, pp. 1-19.
- [4] Abdul Rahman M.A., Lie T.T., Prasad, K. The Effects of Short-Circuit and Inrush Currents on HTS Transformer Windings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, Vol.22, no. 2, art. no. 5500108.
- [5] Yacamini R., Abu-Nasser A. Numerical calculation of inrush current in single-phase transformers. *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, 1981, Vol. 128, no. 6, pp. 327–334.
- [6] Vanti M.G., Bertoli S.L., Cabrai S.H.L., Gerent A.G., Kuo-Peng P. Semianalytic solution for a simple model of inrush currents in transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, Vol. 44, no. 6, pp. 1270–1273.
- [7] Irannezhad F., Heydari H. Conducting a Survey of Researches on High Temperature Superconducting Transformers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, Vol. 30, no. 6, pp. 1-13.
- [8] Alade I.O., Rahaman M.S., Qahtan T.F. A Comprehensive Review of Superconductivity Research Productivity. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2022, Vol. 35, no. 10, pp. 1-17.
- [9] Morandi A., Trevisani L., Ribani P.L., Fabbri M., Martini L., Bocchi M. Superconducting transformers: key design aspects for power applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, Vol. 97, pp. 1-10.

- [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] Wojtasiewicz G., Komarzyniec G., Janowski T., Kozak S., Kozak J., Majka M., Kondratowicz-Kucewicz B. Inrush Current of Superconducting Transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, Vol. 23, no. 3, Art. no. 5500304.
- [12] Nishimiya S., Ishigohka T., Ninomiya A., Arai K. Quench Characteristic of Superconducting Transformer by Inrush Current. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, Vol. 17, pp. 1931–1934.
- [13] Komarzyniec G. Impact of the voltage phase angle at the time of switching on the HTS transformer on the loss of winding superconductivity. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2020, Vol. 96, no. 2, pp. 48-51.
- [14] Chiesa N., Hoidalén H.K., Novel approach for reducing transformer inrush currents: Laboratory measurements, analytical interpretation and simulation studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, Vol. 25, no. 4, pp. 2609–2616.
- [15] Taylor D.I., Law J.D., Johnson B.K., Fischer N. Single-phase transformer inrush current reduction using pre-fluxing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, Vol. 27, no. 1, pp. 245–253.
- [16] Ren L., Guo S., Chen G., Su L., Xu Y., Shi J., Chen L. Experimental Research on Critical Current Behavior of Various Commercial HTS Tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, Vol. 30, no. 4, pp. 1-6.
- [17] Zhu J., Chen S., Jin, Z. Progress on Second-Generation High-Temperature Superconductor Tape Targeting Resistive Fault Current Limiter Application. *Electronics*, 2022, Vol. 297 no 11, pp. 1-20.
- [18] Leytes L.V. Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov (Electromagnetic calculations of transformers and reactors). M.: *Energiya*, Moscow 1981, 392 p.
- [19] Vasyutinskiy S.B. Voprosy teorii i rascheta transformatorov (Questions of theory and calculation of transformers). L.: *Energiya*, 1970, 432 p.
- [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 applications. *Superconductor Science and Technology*, 2016, vol. 29, pp. 1-10.
- [21] 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.
- [22] Lei W., Jiaojiao W., Tian Y., Xiaoning H., Fushou X., Yanzhong Li. Film boiling heat transfer prediction of liquid nitrogen from different geometry heaters. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, Vol. 129, Art. no. 103294.

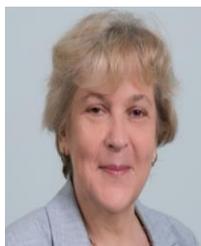
Сведения об авторах.



Манусов Вадим Зиновьевич
д.т.н., профессор кафедры «СЭСП» Новосибирского государственного технического университета. 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» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: Исследование и разработка высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов
E-mail: mrdemasi123@gmail.com



Иванова Елена Васильевна
д.т.н., профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» Сибирского государственного университета водного транспорта. Область научных интересов: вопросы электромагнитной совместимости технических средств на объектах электроэнергетики
E-mail: evasilevnaese@mail.ru