05

Нагрузочная способность обмотки переменного тока из стабилизированного высокотемпературного сверхпроводника

© *В.А. Мальгинов*[1], *Л.С. Флейшман*[2]

[1] Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
[2] Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия
E-mail: malginovva@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 28 мая 2026 г.
В окончательной редакции 13 июля 2026 г.
Принято к публикации 13 июля 2026 г.

Выработана и обоснована концепция повышения нагрузочной способности сверхпроводниковой обмотки для силового трансформатора энергетического назначения. Предложена новая конструкция многослойной цилиндрической обмотки рулонного типа, в которой каждый слой является одним витком многожильной обмотки из ленточного стабилизированного высокотемпературного сверхпроводника. Изготовлен и исследован макет трансформатора с такой обмоткой. Результаты экспериментов на макете подтверждают перспективность технического применения подобной конструкции сверхпроводниковой обмотки с нагрузочной способностью в десятки килоампер.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, стабилизирующий слой, трансформатор, обмотка, нагрузочная способность.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.21.63657.20790

В исследованиях и разработках сверхпроводникового электрооборудования большое значение придается созданию силовых трансформаторов, обмотки которых выполнены из токонесущих элементов (ТНЭ) на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [1]. Нагрузочная способность трансформатора определяется способностью его обмоток работать при определенной токовой нагрузке (как номинальной, так и при допустимой перегрузке), причем главным образом это относится к обмотке низшего напряжения (НН), нагрузочная способность которой в силовых трансформаторах энергетического назначения должна составлять от единиц до десятков килоампер [2].

Поскольку критический ток современных ленточных ВТСП-проводов не превышает нескольких сотен ампер, требуемые для силовых трансформаторов ТНЭ должны иметь многожильное исполнение. При использовании ВТСП ТНЭ в силовых трансформаторах обязательно требуется решение проблемы равномерного распределения переменного тока по жилам в многожильном обмоточном проводе. Такая задача возникла еще в традиционной электротехнике задолго до зарождения технической сверхпроводимости и имеет разнообразные решения, описанные в руководствах и справочной литературе по электрическим машинам. В основе этих решений лежит транспонирование жил/проводов в многожильной обмотке [2].

В ленточных ВТСП-проводах сверхпроводящие слои/жилы не обладают пластичностью (напротив, являются весьма хрупкими), что не позволяет выполнять их транспозицию посредством перегибов. Помимо хрупкости ВТСП-провода в отличие от традиционных проводников обладают дополнительным электрическим параметром — критическим током. Его значение и равномерность распределения как по единичной ленте [3], так и по всему ТНЭ определяют предел работоспособности обмотки. Оба указанных обстоятельства — хрупкость ВТСП и требование равномерности критической плотности тока — обусловливают постановку задачи создания сильноточной ВТСП-обмотки переменного тока на стыке электротехники и технической сверхпроводимости, что выводит данную задачу в сферу технической физики.

В обзоре [1] приведены сведения о состоянии разработок ВТСП-трансформаторов, причем описаны как маломощные лабораторные макеты, так и опытные образцы с номинальными мощностями, характерными для распределительных электрических сетей. В этих трансформаторах применяются различные конструкции обмоток, хорошо известные в традиционном трансформаторостроении [2]. Однако ни одна из описанных в [1] конструкций не решает проблемы создания ВТСП-обмоток с нагрузочной способностью в десятки килоампер: это непосредственно следует из приведенных в обзоре значений номинальной мощности и НН для каждого конкретного трансформатора.

Следует отметить, что для трансформатора не имеет принципиального значения, выполнено ли транспонирование непосредственно в обмоточном проводе или реализуется посредством специальной конструкции обмотки. Важно только достичь по возможности наиболее равномерного распределения токов по жилам. Подобная задача ранее решалась при создании силового ВТСП-кабеля переменного тока [4]. На основании предварительных исследований в этом кабеле с токопроводя-

щей жилой из десятков параллельных ВТСП-лент была применена наиболее благоприятная для равномерности токов двухповивная конструкция.

В области разработки ВТСП-трансформаторов существенный вклад в создание обмотки НН на токи порядка 1 kA внесли работы [5,6]. В этих работах для ВТСП-трансформатора напряжением 10/0.4 kV и номинальной мощностью 1000 kV · A предложена конструкция обмотки НН, которая позволила достичь требуемых технических параметров, что было подтверждено результатами испытаний. В основе конструкции лежит концепция многожильной цилиндрической обмотки, витки которой состоят из параллельных ВТСП-лент и наматываются на цилиндрический каркас. При этом каждая лента размещена вдоль отдельной винтовой линии на поверхности стеклопластикового цилиндра таким образом, чтобы ленты не накладывались друг на друга. Подобное расположение лент обеспечивает идентичность диаметров витков и соответственно длин всех ВТСП-лент на одном цилиндре, что равносильно слою транспонированной многожильной обмотки.

Пример конкретной реализации этой конструкции содержится в [5,6]: 14 витков в обмотке НН, 19 параллельных ВТСП-лент в одном витке. При намотке каждого витка по винтовой линии переход к следующему слою сопровождался изменением угла намотки на противоположный. С хрупкими ВТСП-лентами этот переход невозможно осуществить иначе, чем сделать транспонирование с помощью паяного соединения с соответствующей лентой следующего слоя. По этой причине обмотка НН состояла из четырех слоев на стеклопластиковых цилиндрических каркасах, концентрически вставленных один в другой. При этом появилась проблема, свойственная большинству существующих трансформаторных ВТСП-обмоток [1]: сверхпроводящие слои соединяются друг с другом с помощью резистивных контактов. Количество контактов было равно количеству сверхпроводящих слоев, а минимизация их сопротивления была осуществлена с помощью паяных соединений по всему периметру цилиндров. Описанным способом задача создания ВТСП-трансформатора напряжением 10/0.4 kV и номинальной мощностью 1000 kV · A была решена. Однако указанная мощность относится к нижней границе диапазона номинальных мощностей трансформаторов класса напряжения 10 kV. Чтобы перекрыть весь диапазон, потребуется увеличить нагрузочную способность (т. е. номинальный длительный ток и допустимую перегрузку) обмотки НН на порядок. Если попытаться применить для этого описанную выше конструкцию, то количество цилиндров со слоями обмотки и количество паяных соединений вдоль длины ВТСП-ленты достигнет нескольких десятков. Фактически мощность трехфазного ВТСП-трансформатора 1000 kV · A (10/0.4 kV) представляет собой предельно достижимое значение для описанной выше конструкции обмотки НН. Чтобы перейти к трансформаторам большей мощности, необходимо принципиально изменить конструкцию обмотки. Для дополнительной возможности повышения нагрузочной способности обмотки также необходимо выяснить роль медного стабилизатора в конструкции обмоточной ВТСП-ленты. Дело в том, что для изготовления обмоток трансформатора в [5,6] была выбрана 2G-ВТСП-лента, ламинированная нержавеющей сталью, не имевшая медного стабилизирующего слоя. Такой выбор авторы аргументировали намерением использовать высокое удельное сопротивление стали для ограничения тока короткого замыкания [5]. Однако в режиме токовой перегрузки это может непредсказуемым образом привести к деградации ВТСП-провода вследствие недопустимого нагрева после превышения тока теплового срыва. Наличие стабилизатора существенно повышает ток теплового срыва [7]; тем самым массово производимая „стандартная“ ВТСП-лента с медным стабилизатором может быть наиболее пригодной для использования в трансформаторах. Для подтверждения этого предположения было проведено экспериментальное исследование токонесущей способности стабилизированной ВТСП-ленты в переменных магнитных полях.

Целью настоящей работы является повышение тепловой устойчивости ВТСП-обмотки посредством использования стабилизированных проводов, а также разработка такой конструкции ВТСП-обмотки переменного тока, которая обладала бы нагрузочной способностью не ниже 10 kA и имела перспективу технического применения. Для этого требуется решить задачи выработки работоспособного технического решения, его экспериментальной проверки на лабораторном макете ВТСП-трансформатора, обоснования возможности масштабирования до параметров силовых трансформаторов энергетического назначения.

В работе предлагается и исследуется концепция многожильной ВТСП-обмотки, которую далее будем называть обмоткой „рулонного“ типа. Принцип рулонной обмотки заключается в том, что в ней каждый цилиндрический слой содержит ровно один многожильный виток, а процесс ее изготовления понятен из рис. 1. Это позволит, во-первых, приблизить к сотне число параллельных ВТСП-лент в каждом витке, тем самым расширить диапазон допустимых нагрузок по току до десятков килоампер. Во-вторых, это дает возможность переходить от одного слоя обмотки к следующему без разрыва ВТСП-лент благодаря нулевому углу намотки (т. е. рулон из параллельных лент наматывается перпендикулярно образующей цилиндра). Таким образом, отсутствует соединение сверхпроводящих слоев и соответствующее вредоносное контактное сопротивление. В-третьих, все одновитковые слои располагаются на одном общем цилиндрическом каркасе: отсутствие множества каркасов позволяет поднять эффективность заполнения кольцевого зазора азотной полости криостата сверхпроводником и повысить предельную мощность трансформатора.

С целью экспериментальной проверки концепции рулонной ВТСП-обмотки был изготовлен однофазный ла-

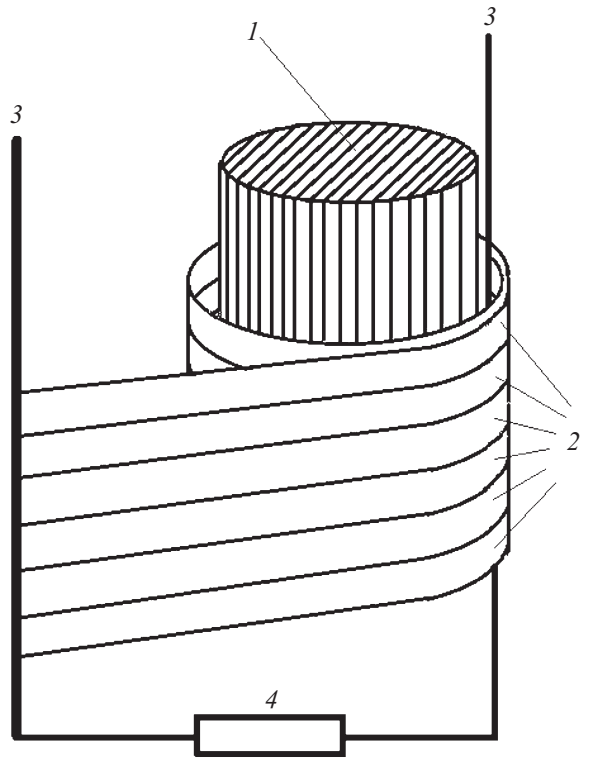


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной вторичной обмотки рулонного типа из ВТСП-лент. *1* — стержень магнитопровода, *2* — ВТСП-ленты, *3* — медные токовводы (контактные пластины), *4* — шунт.

бораторный макет понижающего трансформатора. В целом макет выполнен как электротехническое устройство традиционной конструкции [2], поэтому его подробное описание здесь не приводится. Наиболее существенным является то, что на двух разных стержнях замкнутого О-образного магнитопровода размещались две обмотки: первичная медная обмотка высшего напряжения (ВН) и вторичная ВТСП-обмотка НН (рис. 1), выполненная рулонным способом из 2G-ВТСП-проводов. Ленточные ВТСП-провода производства компании „СуперОкс“ [8] шириной 0.012 m имели двухстороннее стабилизирующее медное покрытие толщиной 20 μm. Использовались только ленты с указанной толщиной стандартного стабилизирующего слоя, которая принята большинством производителей, поскольку она обеспечивает надежную работу ВТСП-лент при токовой перегрузке [7]. Критический ток прямолинейного отрезка ленты составлял 390 A при $T = 77$ K. Высота стержня магнитопровода позволяла расположить до шести параллельных лент в одном витке/слое. Обмотка НН содержала 3.5 слоя/витка со средним диаметром 0.08 m с сетчатой электрической изоляцией между слоями [9]. Концы обмотки НН закорачивались низкоомным шунтом (резистором), с помощью которого измерялся ток вторичной обмотки. Вся конструкция погружалась в криостат с жидким азотом. Первичная обмотка ВН запитывалась от регулируемого источника переменного напряжения до 415 V промышленной частоты (50 Hz).

Система измерения осуществляла сбор и хранение полного объема данных о мгновенных значениях токов, напряжений и продольной магнитной индукции в магнитопроводе и вблизи витков обмотки НН как при вводе/выводе тока, так и в установившемся режиме.

Магнитопровод был выполнен с двумя зазорами между стержнем и ярмом. Суммарная толщина зазоров составляла около 0.001 m. Назначение зазора — увеличить полное магнитное сопротивление магнитопровода. Как известно из электротехники [2], это позволяет уменьшить крутизну кривой намагничивания и сместить рабочую область от намагниченности насыщения. Тем самым была устранена нелинейность связанных с намагничиванием характеристик макета трансформатора, создана площадка для размещения датчика Холла и, главное, в области размещения обмотки НН достигнуты значения магнитного поля рассеяния (несколько десятков миллитесла) более высокие, чем в реальном силовом ВТСП-трансформаторе [6]. Увеличению поля в области обмотки (поле рассеяния [2]) за счет краевых эффектов также способствовало размещение обмоток ВН и НН на двух отдельных стержнях магнитопровода.

Предваряя описание результатов измерений, отметим, что оно не будет опираться на понятие о критическом токе. Это объясняется тем, что ВТСП-провода находятся в значительном переменном магнитном поле, в котором в жестком сверхпроводнике второго рода происходят потери энергии: гистерезисные (на перемагничивание) и другие, в том числе вихревые потери в стабилизирующем слое [10,11]. При этом никакой резкой границы, отделяющей бездиссипативную область „чисто“ сверхпроводящего состояния от резистивной области, в переменном поле не существует. Описание данной ситуации можно построить по аналогии с электротехническим описанием магнитных потерь в сердечнике трансформатора посредством некоторого эквивалентного активного сопротивления [2]. В случае технических сверхпроводников такое сопротивление возрастает при увеличении тока [11]. Это приводит к нелинейной зависимости между амплитудой вторичного тока и амплитудой магнитной индукции в магнитопроводе. Зависимость отражает связь между потокосцеплением обмотки НН и индуцируемым током во вторичной цепи (рис. 2), причем амплитуда вторичного тока I_{20} возрастает медленнее, чем магнитное поле B_0, как раз вследствие роста эквивалентного сопротивления. Возникновение на зависимости „обратного“ участка (на котором ток уменьшается) соответствует переходу витков (или отдельных их областей) в нормальное состояние (кривая *2* на рис. 2). Кривые на этом рисунке также иллюстрируют тот факт, что при большем числе параллельных ВТСП-лент их эквивалентное активное сопротивление меньше, поэтому амплитуда тока в них выше при каждой величине магнитного поля.

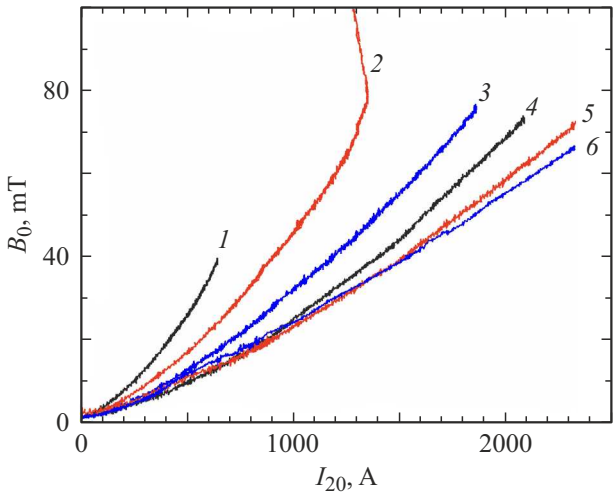


Рис. 2. Взаимозависимость между амплитудой вторичного тока I_{20} и амплитудой магнитного поля в магнитопроводе B_0. Номера кривых соответствуют числу параллельных ВТСП-лент в одном витке/слое обмотки НН.

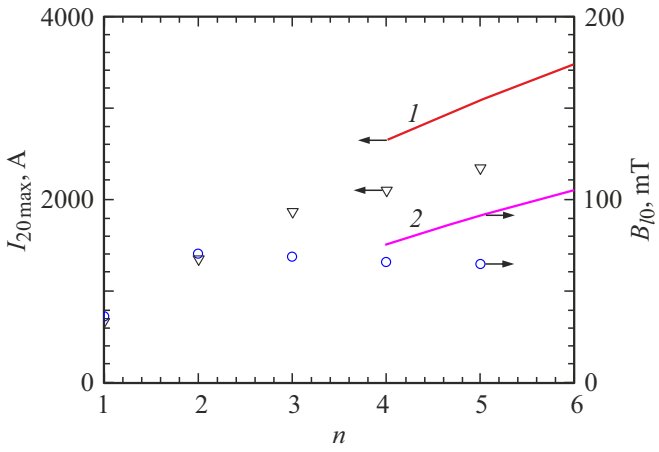


Рис. 3. Амплитуды вторичного тока $I_{20\,max}$ (треугольники), при которых измерения были остановлены, при числе параллельных ВТСП-лент n в витке/слое и соответствующие значения амплитуд магнитного поля рассеяния B_{l0} (кружки) в области слоев обмотки. Эмпирические экстраполяции: *1* — ток теплового срыва, *2* — соответствующая амплитуда магнитного поля.

Критерием выполнения поставленной цели — достижение высокой нагрузочной способности ВТСП-обмотки НН — служили значения максимально достигнутых токов (по амплитуде) по мере увеличения числа параллельных жил в слоях обмотки. При проведении измерений ввод тока прекращался каждый раз при наблюдении интенсивного пузырькового кипения азота во избежание перегорания ВТСП-обмотки. На рис. 3 приведены значения амплитуд токов, до которых были доведены измерения, при числе параллельных ВТСП-лент в слоях обмотки от 1 до 6. В сборке из двух лент в слое ток был доведен до тока теплового срыва I_q („перегиб“ кривой *2* на рис. 2), при котором произошло необратимое разрушение одного из проводов (это был последний эксперимент в серии). При шести лентах достигаемая амплитуда тока НН 2330 A ограничена предельным напряжением (415 V) использованного источника питания трансформатора. Даже ограниченное значение тока достигает шестикратного критического тока ВТСП-ленты, что свидетельствует в пользу равномерного участия всех лент в переносе тока.

На рис. 3 также нанесены значения амплитуд магнитного поля в области слоев обмотки, соответствующие максимально достигнутым токам. Эти поля мало различаются при сборках из нескольких параллельных лент, поскольку число витков (слоев) одно и то же, а отношение максимального тока к числу лент (а следовательно, и к высоте обмотки) изменяется не очень существенно. Эмпирическая кривая *1* для I_q и кривая *2* для соответствующего магнитного поля получены экстраполяцией данных по I_q для одной ленты в нулевом поле и для слоя из двух лент в поле 70 mT с применением зависимости $B_0(I_{20})$ (рис. 2).

Из данных рис. 3 также следует, что достигнутые максимальные токи в сборках с числом лент $n = 1-5$ заведомо превышают n-кратный критический ток одной ленты, т. е. применение в обмотке стабилизированной ВТСП-ленты в переменных полях до 70 mT является более эффективным, чем нестабилизированной ленты, в которой рабочий ток также ограничен током теплового срыва, но он значительно меньше по величине, так как близок к критическому [7].

В целом результаты экспериментов на макете трансформатора с предлагаемой конструкцией обмотки НН из ленточного ВТСП-провода подтверждают ее пригодность для протекания переменного тока в несколько килоампер. Масштабирование ВТСП-обмотки НН рулонного типа, способной нести ток в десятки килоампер, для силовых ВТСП-трансформаторов класса напряжения 10 kV не имеет принципиальных препятствий, поскольку в макете магнитное поле в области обмотки было не ниже поля в опытном образце силового трансформатора [6].

Главный вывод настоящей работы заключается в том, что в ней разработана и испытана конструкция обмотки переменного тока из ленточного стабилизированного ВТСП-провода, позволяющая повысить нагрузочную способность обмотки, что создает перспективу ее технического применения в силовых сверхпроводниковых трансформаторах.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания с использованием оборудования ЦКП ФИАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Moradnouri, A. Ardeshiri, M. Vakilian, A. Hekmati, M. Fardmanesh, J. Supercond. Nov. Magn., **33**, 2581 (2020). DOI: 10.1007/s10948-020-05539-6

[2] А.В. Иванов-Смоленский, *Электрические машины* (Энергия, М., 1980), с. 316–317. [A. Ivanov-Smolensky, *Electrical machines* (Mir, M., 1982), vol. 1.].

[3] S.S. Fetisov, D.V. Sotnikov, S.Yu. Zanegin, N.V. Bykovsky, I.P. Radchenko, V.V. Zubko, V.S. Vysotsky, Phys. Procedia, **67**, 931 (2015). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.157

[4] Э.П. Волков, Л.С. Флейшман, В.С. Высоцкий, А.А. Носов, В.В. Костюк, В.П. Фирсов, С.Ф. Осетров, А.Н. Киселев, в сб. *Инновационные технические решения в программе НИОКР ПАО „ФСК ЕЭС“*, под ред. А.Е. Мурова (НТЦ ФСК ЕЭС, М., 2016), с. 32–49.

[5] V.S. Vysotsky, S.S. Fetisov, V.V. Zubko, S.Yu. Zanegin, A.A. Nosov, S.M. Ryabov, N.V. Bykovsky, G.G. Svalov, E.P. Volkov, L.S. Fleishman, E.A. Dzhafarov, IEEE Trans. Appl. Supercond., **27** (4), 5500105 (2017). DOI: 10.1109/TASC.2016.2639011

[6] Э.П. Волков, Э.А. Джафаров, Л.С. Флейшман, В.С. Высоцкий, В.В. Суконкин, Изв. РАН. Энергетика, № 5, 45 (2016). [E.P. Volkov, E.A. Dzhafarov, L.S. Fleishman, V.S. Vysotsky, V.V. Sukonkin, Therm. Eng., **63** (13), 909 (2016). DOI: 10.1134/S0040601516130085].

[7] V.A. Malginov, L.S. Fleishman, D.A. Gorbunova, Supercond. Sci. Technol., **33** (4), 045008 (2020). DOI: 10.1088/1361-6668/ab7470

[8] S. Samoilenkov, A. Molodyk, S. Lee, V. Petrykin, V. Kalitka, I. Martynova, A. Makarevich, A. Markelov, M. Moyzykh, A. Blednov, Supercond. Sci. Technol., **29** (2), 024001 (2016). DOI: 10.1088/0953-2048/29/2/024001

[9] В.А. Мальгинов, Л.С. Флейшман, Письма в ЖТФ, **49** (12), 13 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.12.55567.19579 [V.A. Malginov, L.S. Fleishman, Tech. Phys. Lett., **49** (6), 50 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.06.56380.19579].

[10] А.Вл. Гуревич, Р.Г. Минц, А.Л. Рахманов, *Физика композитных сверхпроводников* (Наука, М., 1987), с. 59–100. [A.V. Gurevich, R.G. Mints, A.L. Rakhmanov, *The physics of composite superconductors* (Begell House, Inc., N.Y., 1997).].

[11] W.J. Carr, Jr., *AC loss and macroscopic theory of superconductors* (Taylor & Francis, London, 2001), p. 64.