

Анализ потерь в обмотках и стопках из ВТСП лент второго поколения

ЗАНЕГИН С.Ю., ЗУБКО В.В., ИВАНОВ Н.С.

Изготовлены опытные образцы рейстрекковых обмоток из высокотемпературных сверхпроводящих (ВСП) лент 2-го поколения (2G) для применения в электрических машинах, работающих на переменном токе. В данных устройствах основными потерями являются гистерезисные потери в сверхпроводнике, и задача их определения – одна из важнейших при проектировании устройств данного типа. Она может быть успешно решена расчетным путем только с помощью численных методов. Ранее во ВНИИКП была создана модель на основе метода конечных элементов (МКЭ) для расчета потерь в кабелях на основе высокотемпературных сверхпроводящих лент. Так как структура намотки рейстрекковых обмоток в поперечном сечении представляет собой стопку лент, модель на основе МКЭ была адаптирована для расчета потерь в стопках ВСП лент. В статье приведено описание модели, стенда для измерения потерь, а также дано сравнение расчетных потерь с экспериментально измеренными.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, электрические машины, потери в ВТСП обмотках на переменном токе

Проекты различных устройств как переменного, так и постоянного тока с применением ВТСП материалов активно разрабатываются во всем мире. Применение ВТСП лент в обмотках электрических машин значительно улучшает их характеристики за счет повышения плотности тока и, следовательно, улучшения удельных показателей.

Математическое моделирование является ключевой составляющей при проектировании и оптимизации ВТСП устройств, особенно в электромагнитной области [1, 2]. В случае переменного транспортного тока в устройстве одной из главнейших задач при проектировании является определение и минимизация потерь. Для объектов со сложными магнитными системами подобная задача может быть решена только численными методами. В последние годы разработано большое количество численных моделей для расчета потерь в повивах кабелей и обмотках магнитов на основе ВТСП лент [3]. В большинстве случаев для получения достоверных результатов достаточно 2D моделирования, переход к 3D моделям затруднен из-за значительного увеличения времени расчета. Для расчета потерь в обмотках магнитов или стопках ВТСП лент, как правило, используются: метод конечных элементов (МКЭ) [4–6] или интегральные методы [7–9].

Создание адекватной модели для компьютерного моделирования потерь в обмотках магнитов или стопках из 2G ВТСП-лент представляет собой сложную задачу. Должны быть учтены следующие

факторы: высокое значение соотношения длины и толщины сверхпроводящего слоя, значительная нелинейность 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 слоя. гистерезисные явления магнитной подложки; критическая плотность тока на краях ВТСП-слоя при отсутствии внешнего поля может быть значительно ниже, чем в ее середине. Если подложка 2G ВТСП-ленты магнитная, то дополнительно необходимо учесть ее нелинейных магнитных свойств.

Данная работа посвящена созданию численной модели с использованием МКЭ для расчета потерь в обмотках из ВТСП-лент, учитывающей все вышеперечисленные особенности. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными.

Концепция математической модели для расчета потерь на переменном токе. Конечно-элементная модель для расчета потерь в 2G ВТСП-кабелях, основанная на МКЭ, с использованием программного комплекса ANSYS [10], была разработана ранее и представлена в работах [11–12]. Однако для расчета потерь в стопке 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 электромагнитный временной анализ (анализ переходных процессов). Разработанная модель использует параметрический язык APDL (Parametric Design Language) – эффективный инструмент для инженерных расчетов двух- и трехмерных моделей переходных электромагнитных процессов в различных устройствах. Для таких задач в ANSYS реализовано представление векторного магнитного потенциала с тремя степенями свободы в непроводящих зонах. Разложение на компоненты добавляет еще одну степень свободы: интегрируемый по времени электрический потенциал в проводящих зонах. 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; 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 [13].

Для точного моделирования гистерезисных потерь в ВТСП слое 2G ленты необходимо учитывать сильную нелинейность его сопротивления, для чего требуется большое количество итераций. Кроме того, очень высокое соотношение длины к ширине 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 можно описать следующим степенным законом:

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

где $E_0 = 1$ мВ/см; n – переходный индекс. Для определения зависимости критической плотности тока от магнитного поля $J_c(\vec{B})$ использовано выражение из работы [14]. Зависимость $J_{c0}(x)$ для определения

неравномерности критической плотности тока по ширине ленты в собственном магнитном поле использована кусочно-линейная функция [3]. Таким образом, зависимость критической плотности тока по ширине ленты можно определить следующим выражением:

$$J_c(\vec{B}, x) = J_c(B, \theta, x) = J_c(B, \theta) J_{c0}(x) = \frac{\alpha J_{c0}(x)}{\left(1 + (k^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)^{0,5} \frac{B}{B_0} \right)^\beta}, \quad (2)$$

где θ – угол ориентации магнитного поля относительно нормали ВТСП-ленты; k , B_0 и β – параметры для аппроксимации $J_c(B, \theta)$; параметр α – учитывает, что критический ток (I_c) ленты отличается от измерений образца ленты в собственном поле.

Зависимость $J_{c0}(x)$ симметрична относительно середины ленты:

$$J_{c0}(x) = J_{c0c} \begin{cases} 1, & \text{если } |x| < h_w w / 2; \\ \left(1 - \frac{2|x|}{w} \right) \frac{1 - h_J}{1 - h_w} + h_J, & \text{если } |x| \geq h_w w / 2, \end{cases} \quad (3)$$

где $0 < h_J < 1$, $0 < h_w < 1$ являются входными параметрами; J_{c0c} – зависимость плотности критического тока, отсчитываемая от центра ВТСП-слоя до $h_w w / 2$, если был измерен только критический ток ленты I_c , в таком случае J_{c0c} может быть получен из выражения $\int_0^w J_{c0}(x) dx = I_c / \delta_{hts}$, в котором w и δ_{hts} – ширина и толщина ВТСП-слоя ленты.

Для реализации алгоритма расчета потерь необходимо включить в МКЭ модель вышеупомянутые зависимости. 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 [4].

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

$$\rho_i^0, \rho_i^{k+1} = f(\rho_i^k) = \frac{E_0}{J_{c,i}} \left(\frac{J_i^k}{J_{c,i}} \right)^{n-1}. \quad (4)$$

Остановочный критерий сопротивления каждого элемента $\frac{\rho_i^{k+1} - \rho_i^k}{\rho_i^k} < \zeta$.

Для ВТСП слоя сверхпроводящей ленты 2-го поколения минимальными начальными значениями для ρ_i^0 и ζ является 10^{-17} Ом·м и 10^{-4} соответственно.

В процессе расчета резистивности ρ_i^{k+1} на $k+1$ -й итерации по закону (4) удобно пользоваться релаксационным фактором $\alpha=0.1$:

$$\rho_i^{k+1} = \rho_i^k + \alpha(\rho_i^{k+1} - \rho_i^k). \quad (5)$$

Для решения уравнений в виде $\rho = f(\rho)$ следует использовать метод итераций, 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:

$$Q = 4 \sum_{i_1}^{N_1} \Delta\tau \sum_i^N J_i \rho_i, \quad (6)$$

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

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

1. «Метод Бина», когда при порядковом номере итерации $n \rightarrow \infty$ для резистивности на $k+1$ итерации для каждого i -го элемента сетки используется выражение:

$$\rho_i^{k+1} = \rho_i^k \frac{J_i^k}{J_{c,i}}. \quad (7)$$

2. Для ускорения сходимости выражений вида $\rho = f(\rho)$ можно использовать метод Вегштейна, который и был использован в нашей модели:

$$\rho_i^0, \rho_i^1 = f(\rho_i^0);$$

$$\rho_i^{k+1} = f(\rho_i^k) + \frac{(f(\rho_i^k) - f(\rho_i^{k-1})) (f(\rho_i^k) - \rho_i^{k-1})}{(f(\rho_i^k) - f(\rho_i^{k-1})) - (\rho_i^k - \rho_i^{k-1})}, \quad (8)$$

$k \geq 2$.

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

3. Так как потери в ВТСП слоях являются гистерезисными, следовательно, они 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 амплитудного значения тока I_m или, иными словами, на $\Delta\tau=1/4$ полного периода. Для расчета гистерезисных потерь возможно использовать векторный потенциал. Основой данного метода является наличие «электрического центра» или «ядра», т.е. 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:

$$Q = 4 \sum_i^N (A_{z,i} - A_{z,0}) s_i, \quad (9)$$

где $A_{z,i}$ – магнитный векторный потенциал в узле i каждого из элементов сетки, а $A_{z,0}$ – 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 ζ , равном 10^{-4}).

Если подложка в 2G ВТСП-ленте магнитная, то в ней, как и в любом магнитном материале, возникают гистерезисные потери из-за нелинейного характера и различий при намагничивании и размагничивании. Когда кривая намагниченности совершает законченный цикл, ее площадь в координатах $B(H)$ представляет гистерезисные потери энергии в единице объема, за время цикла T

$$W_h = \int_T H dB. \quad (10)$$

Испытательный стенд для измерения потерь в стопках ВТСП лент. Для измерений потерь в стопках и обмотках ВТСП лент был разработан специализированный испытательный стенд [16]. На нем проведены эксперименты по измерению потерь в стопке лент, имитирующей прямой участок ВТСП-катушки типа рейстрек. Ленты сложены в стопку либо в несколько стопок рядом; электрическая схема изображена на рис. 1. Программируемый источник (I) 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 (I) записываются системой сбора данных с частотой 1 млн выборок в секунду. Затем записанные сигналы обрабатывают-

ся на ПК, электрические потери вычисляются по формуле:

$$P = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} u i dt, \quad (11)$$

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

Ленты от 1 до N_l (число зависит от эксперимента) с расстоянием в 200 мм между потенциальными контактами изолированы друг от друга полиэфирной изоляцией, соединены параллельно и собраны в пакет. В реальной катушке ленты в таком пакете 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 пакете 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 параллельных ВТСП лент, используются балансирующие резисторы ($Rb_1 \dots Rb_n$), подобранные с 2%-ной погрешностью сопротивления и па-

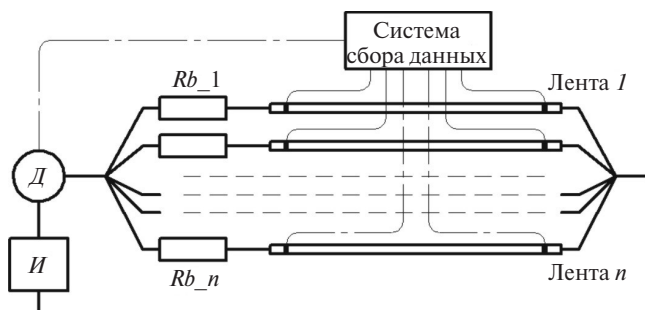


Рис. 1. Электрическая схема измерительного стенда

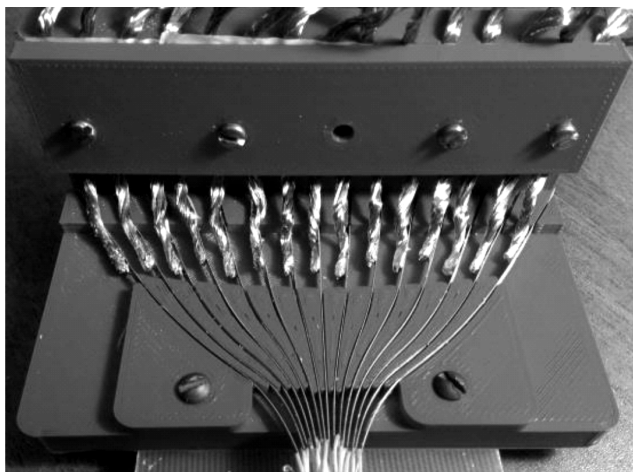


Рис. 2. Индивидуальные токоподводы для ВТСП лент

разитной индуктивности. На рис. 2 показаны разведенные на конце стопки концы лент с индивидуальными токоподводами.

Сравнение результатов измерения и моделирования потерь. 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 $4 \cdot 0,1 \text{ мм}^2$, критический ток I_c (1 мВ/см , $77,4 \text{ К}$) около 110 А, при этом параметр нарастания $n \sim 26$.

Для большей полноты дополнительно проведено сравнение с аналитическими моделями Норриса, которые позволяют рассчитать потери для одной ленты для случая $J_c = \text{const}$ [15], а также с результатами моделирования потерь численным методом, приведенным в работах [8, 9], который позволяет рассчитать потери в стопке ВТСП лент также только для случая $J_c = \text{const}$.

Была снята зависимость измеренных потерь при температуре кипящего азота от амплитуды тока.

Измерения проводились на разных частотах (35, 50 и 100 Гц). Расчеты для единичной ленты как разработанной МКЭ моделью с $J_c = \text{const}$, так и по модели Норриса для прямоугольного сечения сверхпроводника и по модели из работ [8, 9], показали хорошее совпадение между собой. Также демонстрировали совпадение друг с другом расчеты по модели из [8, 9], и разработанной МКЭ модели с $J_c = \text{const}$, для стопки из пяти лент. Результаты полученные расчетной моделью совпадают с экспериментами данными только в том случае если учтена зависимость $J_c(B, \theta, x)$.

Для достоверного расчета потерь в ВТСП слоях лент, собранных в стопку, очень важно правильно определить коэффициенты в зависимости $J_c(B, \theta, x)$. 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 $J_c(x)$ использованы параметры $h_j=0,6$ и $h_w=0,85$, а для резистивности ρ_i^{k+1} коэффициент $\alpha=1,05$.

Анализ потерь в различных конфигурациях стопок ВТСП лент. Для дальнейшего подтверждения правильности разработанной модели были проведены эксперименты с 15 лентами, собранными в одну стопку или в три стопки, расположенными рядом по 5 лент в каждой. Использовалась 2G ВТСП лента компании SuperOx со следующими характеристиками: поперечное сечение $3 \cdot 0,1 \text{ мм}^2$, критический ток I_c (1 мВ/см , $77,4 \text{ К}$) около 150 А при зна-

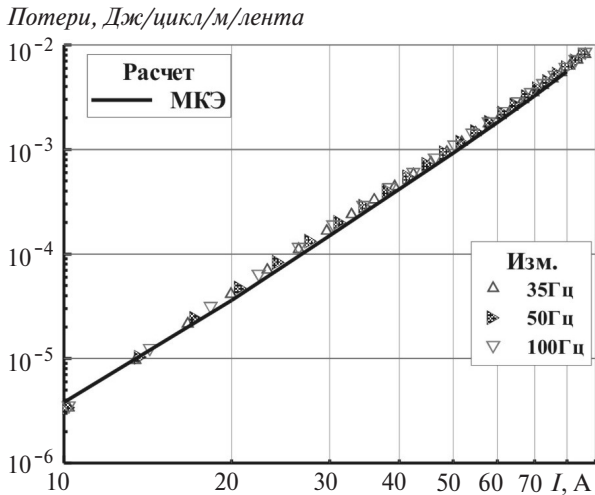


Рис. 3. Сравнение эксперимента и моделирования потерь для конфигурации лент 3×5

чении параметра нарастания $n \sim 36$. Толщина изоляции между лентами составила 60 мкм.

Аналогично предыдущим экспериментам 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 модели были заложены те же параметры функции $J_c(B, \theta)$, что и в предыдущем разделе. В зависимости $J_{c0}(x)$ использовались значения $h_J = 0,9$ и $h_w = 0,85$.

На рис. 3 для конфигурации из трех стопок по пять лент, приведено сравнение измеренных и рассчитанных потерь (в пересчете на метр длины) в зависимости от значения амплитуды тока. В таком же виде на рис. 4 представлены потери для одной стопки из 15 лент. Для обоих случаев характерно очень хорошее совпадение между разработанной моделью и результатами эксперимента, что объясняется введением в модель $J_c(B, \theta, x)$ зависимости плотности критического тока от вектора магнитного поля и её неравномерности по ширине ленты.

На рис. 5 и 6 изображено распределение магнитного поля для обеих конфигураций лент в момент времени, когда амплитудное значение протекающего через них синусоидального тока равно 80 А

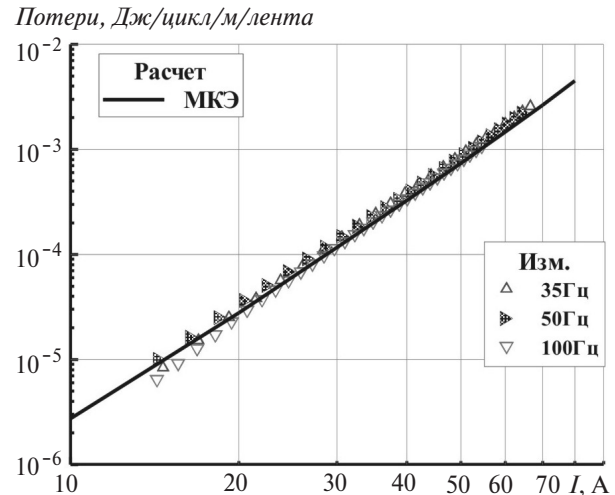


Рис. 4. Сравнение эксперимента и моделирования потерь для 15 лент, сложенных в одну стопку

кающего через них синусоидального тока равно 80 А.

Для аналогичного момента времени на рис. 7 показано распределение плотности тока в ВТСП слоях стопки из 15 лент.

Анализ потерь в катушках на основе 2G ВТСП лент. Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета потерь было проведено для двух двойных рейстрек катушек [16]. 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 и AMERICAN Superconductor (AMSC).

Катушка типа двойной рейстрек из ленты SuperOx. Используемая при изготовлении 2G ВТСП лента имеет следующие параметры: поперечное сечение $4,2 \times 0,1 \text{ мм}^2$, критический ток I_c (1 мВ/см , $77,4 \text{ К}$) около 150 А при значении параметра нарастания $n \sim 30$. Толщина изоляции составляет 15 мкм.

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 (рас-

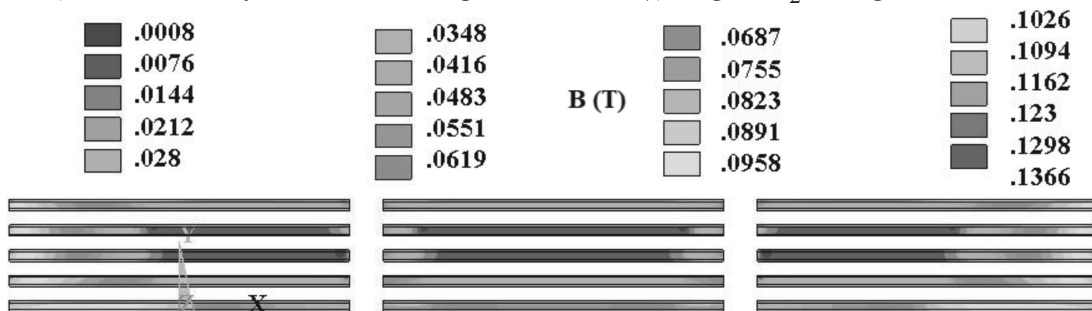


Рис. 5. Распределение магнитного поля в лентах конфигурации 3×5 в момент, когда амплитудное значение протекающего через них синусоидального тока равно 80 А

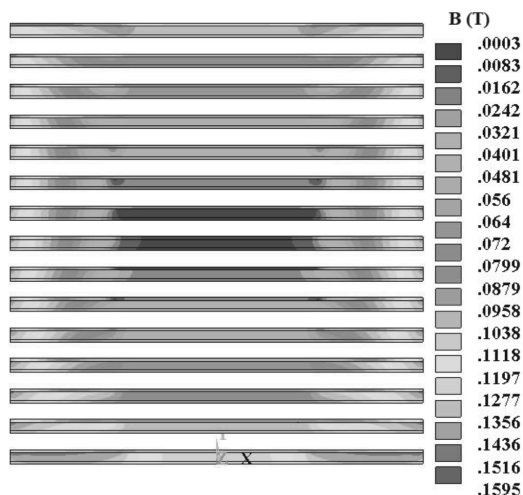


Рис. 6. Распределение магнитного поля в стопке из 15 ВТСП лент для момента времени, когда амплитуда тока составляет 80 А

чет велся в цилиндрической системе координат). В таком случае потери можно представить в виде суммы $W_{coil} = L_1 W_1 + L_2 W_2$, где L_1 и L_2 – длины пакетов лент линейной и лобовой частей катушки. Для зависимости $J_c(B, \theta)$ были использованы те же параметры, что и выше. Для функции $J_{c0}(x)$ были применены коэффициенты $h_J = 0,8$ и $h_w = 0,85$.

Результаты измерений потерь для трех частот, а также результаты моделирования гистерезисных потерь в прямой и лобовой частях обмотки приведены на рис. 8: показаны вышерассмотренные сечения. Аналогично предыдущим экспериментам со стопкой лент, видно хорошее совпадение результатов моделирования и измерений.

На рис. 9 показано распределение магнитного поля в двух указанных выше поперечных сечениях для момента времени, когда амплитуда тока в ленте достигает 80 А.

Катушка типа двойной рейстрек из ленты AMSC. Лента 2G ВТСП от AMSC имеет следующие параметры: поперечное сечение по проводнику $4,8 \times 0,21$ мм², с изоляцией: $4,95 \times 0,36$ мм², критический ток I_c (1мВ/см, 77,4 К) 105 А, параметр нарастания $n \sim 28$. Данный проводник изготовлен по технологии MOD/RABiTS™ с использованием никель-вольфрамовой подложки, обладающей слабыми ферромагнитными свойствами. Их наличие оказывает влияние на потери в ВТСП ленте двумя способами: наличие гистерезиса у подложки вызывает потери на перемагничивание в ней, а также за счет изменения картины распределения магнитного поля вокруг ВТСП слоя, что изменяет потери в ВТСП слое.

При расчете потерь в катушке были учтены магнитные свойства подложки также учтено, что для данной ленты коэффициенты в зависимости

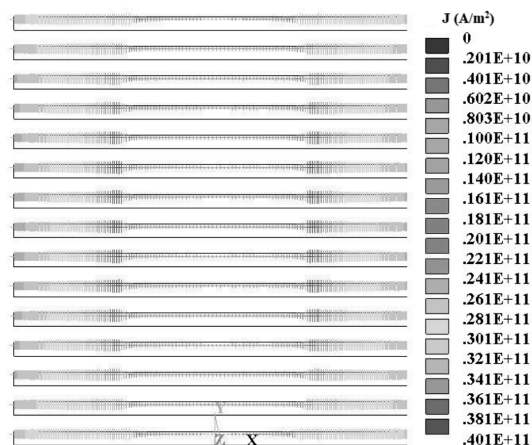


Рис. 7. Распределение плотности тока в ВТСП слоях стопки из 15 лент для момента времени, когда амплитуда тока составляет 80 А

$J_c(B, \theta, x)$ иные: $\alpha = 1,02$, $k = 0,6$, $B_0 = 0,45$, $\beta = 0,65$, $h_J = 1$ и $h_w = 1$.

На рис. 10 показано сравнение измеренных потерь для трех частот (символы), а также расчетных гистерезисных потерь в ВТСП слое и в подложке ленты (линии). Гистерезисные потери в подложке пренебрежимо малы, однако её магнитные свойства вызвали изменение картины магнитного поля в ВТСП слоях (увеличивается перпендикулярная компонента поля к широкой поверхности ленты), что привело к повышению потерь в них. Распределение магнитного поля на прямом участке катушки в момент времени, когда амплитуда тока достигает 80 А, показано на рис. 11.

Заключение. Описана 2D МКЭ модель для расчета потерь в 2G ВТСП обмотках, работающих на переменном токе. Результаты расчета потерь сравнены как с другими известными методиками расчета потерь, так и с собственными экспериментальными данными для стопок лент различной конфигурации. Для получения наиболее точных результатов расчета необходимо точное определе-

Потери, Дж/цикл

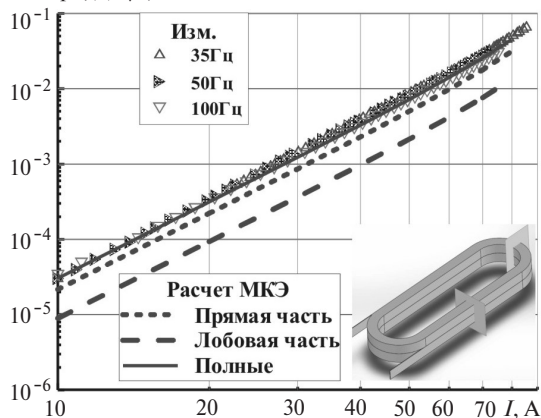


Рис. 8. Рассчитанные потери в прямой и лобовой частях обмотки, а также сравнение их суммы с данными эксперимента. Обмотка намотана лентой SuperOx

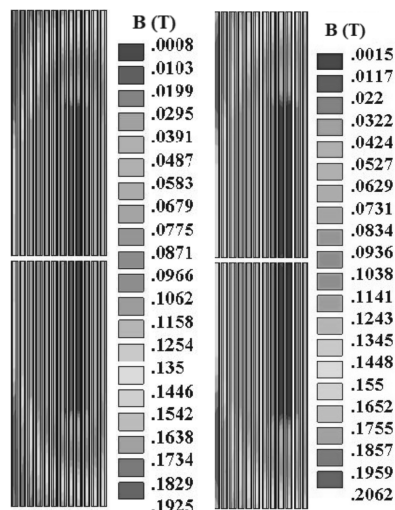


Рис. 9. Распределение магнитного поля в срединном сечении прямой части катушки (слева) и в срединном сечении лобовой части (справа) для амплитудного значения тока 80 А

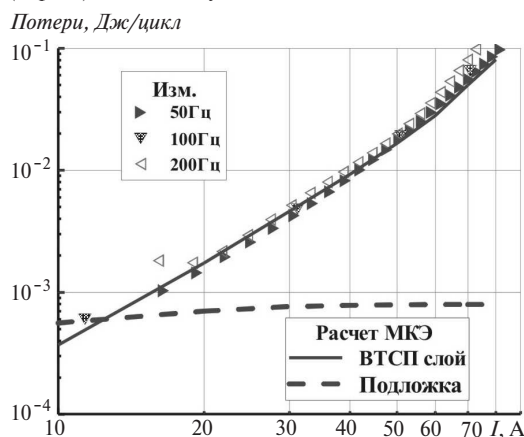


Рис. 10. Сравнение измеренных потерь и расчетных гистерезисных потерь в ВТСП слое и магнитной подложке ленты AMSC

ние коэффициентов в функции $J_c(B, \varphi, x)$ описывающей зависимость плотности критического тока от вектора магнитного поля и его неравномерность по ширине ленты,

Осуществлено моделирование потерь в катушках типа «рейстрек», изготовленных из ленты с немагнитной (SuperOx) и магнитной (AMSC) подложкой, работающих при температуре кипящего жидкого азота (77К). В обоих случаях результаты с высокой точностью совпадают с экспериментальными данными, подтверждая возможность использования данной модели для прогнозирования потерь на переменном токе в катушках любой конфигурации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках научного проекта № 17-29-10011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sirois F., Grilli F. Potential and limits of numerical modelling for supporting the development of HTS devices, *Supercond. Sci. and Technol.*, 2015, vol. 28, No. 4, p. 043002.



Рис. 11. Распределение магнитного поля в срединном сечении прямой части катушки, намотанной лентой AMSC при амплитудном значении тока 80 А

2. Grilli F. Numerical Modelling of HTS Applications – *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* 2016, vol. 26, No. 3, p. 0500408.

3. Grilli F., Pardo E., Stenvall A., Nguyen D., Yuan W., Gömöry F. Computation of Losses in HTS Under the Action of Varying Magnetic Fields and Currents – *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 2014, vol. 24, No. 1, p. 8200433.

4. Gu C., Qu T., Li X., Han Z. AC Losses in HTS Tapes and Devices With Transport Current Solved Through the Resistivity-Adaption Algorithm, – *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2013, vol. 23, No. 2, p. 8201708.

5. Hong Z., Yuan W., Ainslie M., Yan Y., Pei R., Coombs T. AC losses of superconducting racetrack coil in various magnetic conditions, – *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2011, vol. 21, No. 3, p. 2466.

6. Quéval L., Zermeco V., Grilli F. Numerical models for ac loss calculation in large-scale applications of HTS coated conductors, *Supercond. Sci. Technol.*, 2016, vol. 29, No. 2, p. 24007.

7. Prigozhin L., Sokolovsky V. Computing AC losses in stacks of high-temperature superconducting tapes, *Supercond. Sci. Technol.*, 2011, vol. 24, No. 7, p. 075012.

8. Pardo E., Souc J., Frolek L. Electromagnetic modelling of superconductors with a smooth current–voltage relation: variational principle and coils from a few turns to large magnets, *Supercond. Sci. Technol.*, 2015, vol. 28, p. 044003.

9. Bykovsky N., Uglietti D., Wesche R., Bruzzone P. Design of the HTS fusion conductors for TF and CS coils – *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2015, vol. 25, p. 4800304.

10. ANSYS Multiphysics, Release 15, ANSYS Inc.

11. Zubko V., Fetisov S., Vysotsky V. Hysteresis Losses Analysis in 2G HTS cables – *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, vol. 26, No 3, p. 8202005.

12. Зубко В., Высоцкий В., Фетисов С., Носов А., Занегин С. Анализ гистерезисных потерь в силовых кабелях на основе высокотемпературно-сверхпроводящих лент второго поколения. – *Электричество*. 2014. № 4, с. 24-32.

13. Zubko V., Nosov A., Polyakova N., Fetisov S., Vysotsky V. Hysteresis Loss in Power Cables Made of 2G HTS Wires with NiW Alloy Substrate – *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 988–990.

14. Zhang X., Zhong Z., Ruiz H., Geng J., Coombs T. General approach for the determination of the magneto-angular dependence of the critical current of YBCO coated conductors, *Supercond. Sci. Technol.*, 2017, vol. 30, p. 025010.

15. Norris W. Calculation of hysteresis loss in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheet – *Journal of Physics D.*, 1970, vol. 3, pp. 489–495.

16. **Zanegin S., Ivanov N., Shishov D., Shishov I., Kovalev K., Zubko V.** Manufacturing and Testing of AC HTS-2 Coil for Small Electrical Motor – Journal of Supercond. Novel Magnet, 2019, DOI: 10.1007/s10948-019-05226-1.

Авторы: **Занегин Сергей Юрьевич** – инженер ОАО «ВНИИКИП», аспирант НИУ «Московский Авиационный институт» – НИУ «МАИ».

[15.04.2020]

Зубко Василий Васильевич – доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник ОАО «ВНИИКИП», диссертацию защитил в 2017 г.

Иванов Николай Сергеевич – кандидат техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» НИУ «МАИ», диссертацию защитил в 2014 г.

Electrichestvo, 2020, No. 5, pp. 61–68

DOI:10.24160/0013-5380-2020-5-61-68

AC loss analysis in 2G HTS coils and their parts

ZANEGIN Sergey Ju. (JSC «All-Russian Research Institute of Cable Industry» – ARICI, Moscow, Russia) – Engineer, Postgraduate Student of NRU «MAI»

ZUBKO Vasily V. (JSC «ARICI», Moscow, Russia) – Leading Scientist, Dr. Sci. (Eng.)

IVANOV Nikolay S. (NRU «MAI», Moscow, Russia) – Senior Scientist of Electric Power, Electromechanical and Biotchnological Systems Dept., Cand. Sci. (Eng.)

The model coil with the racetrack geometry based on second generation High Temperature Superconducting tapes has been developed for an electrical machine where a winding pack is a stack of 2G HTS tapes. It is important to evaluate transport current AC losses and possible methods to reduce them in a winding. In a device made of 2G HTS tapes, the main the AC losses are the hysteresis ones. Only numerical simulation permits to predict them in full. The FEM model for calculation of the hysteresis losses developed before for 2G HTS power cables was modified for a stack of the 2G HTS tapes in a coil. In this paper the methods to increase a computational speed are presented. Possible ways to reduce AC losses are discussed also. The details of the model and comparisons of calculations with measurements of the AC loss are presented.

Key words: high temperature superconductors, electrical machine, AC losses in HTS coils

REFERENS

1. **Sirois F., Grilli F.** Potential and limits of numerical modelling for supporting the development of HTS devices, Supercond. Sci. and Technol., 2015, vol. 28, No. 4, p. 043002.
2. **Grilli F.** Numerical Modelling of HTS Applications – IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2016, vol. 26, No. 3, p. 0500408.
3. **Grilli F., Pardo E., Stenvall A., Nguyen D., Yuan W., Gómory F.** Computation of Losses in HTS Under the Action of Varying Magnetic Fields and Currents – IEEE Trans. on Appl. Supercond., 2014, vol. 24, No. 1, p. 8200433.
4. **Gu C., Qu T., Li X., Han Z.** AC Losses in HTS Tapes and Devices With Transport Current Solved Through the Resistivity-Adaption Algorithm. – IEEE Trans. Appl. Supercond., 2013, vol. 23, No. 2, p. 8201708.
5. **Hong Z., Yuan W., Ainslie M., Yan Y., Pei R., Coombs T.** AC losses of superconducting racetrack coil in various magnetic conditions. – IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, vol. 21, No. 3, p. 2466.
6. **Quéval L., Zermeco V., Grilli F.** Numerical models for ac loss calculation in large-scale applications of HTS coated conductors, Supercond. Sci. Technol., 2016, vol. 29, No. 2, p. 24007.
7. **Prigozhin L., Sokolovsky V.** Computing AC losses in stacks of high-temperature superconducting tapes, Supercond. Sci. Technol., 2011, vol. 24, No. 7, p. 075012.
8. **Pardo E., Souc J., Frolek L.** Electromagnetic modelling of superconductors with a smooth current– voltage relation: variational principle and coils from a few turns to large magnets, Supercond. Sci. Technol., 2015, vol. 28, p. 044003.

9. **Bykovsky N., Uglietti D., Wesche R., Bruzzone P.** Design of the HTS fusion conductors for TF and CS coils – IEEE Trans. Appl. Supercond., 2015, vol. 25, p. 4800304.

10. **ANSYS Multiphysics**, Release 15, ANSYS Inc.

11. **Zubko V., Fetisov S., Vysotsky V.** Hysteresis Losses Analysis in 2G HTS cables – IEEE Trans. Appl. Supercond., 2016, vol. 26, No. 3, p. 8202005.

12. **Zubko V., Vysotsky V., Fetisov S., Nosov A., Zanegin S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 4, pp. 24–32.

13. **Zubko V., Nosov A., Polyakova N., Fetisov S., Vysotsky V.** Hysteresis Loss in Power Cables Made of 2G HTS Wires with NiW Alloy Substrate – IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, vol. 21, No. 3, pp. 988–990.

14. **Zhang X., Zhong Z., Ruiz H., Geng J., Coombs T.** General approach for the determination of the magneto-angular dependence of the critical current of YBCO coated conductors, Supercond. Sci. Technol., 2017, vol. 30, p. 025010.

15. **Norris W.** Calculation of hysteresis loss in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheet – Journal of Physics D., 1970, vol. 3, pp. 489–495.

16. **Zanegin S., Ivanov N., Shishov D., Shishov I., Kovalev K., Zubko V.** Manufacturing and Testing of AC HTS-2 Coil for Small Electrical Motor – Journal of Supercond. Novel Magnet, 2019, DOI: 10.1007/s10948-019-05226-1.

[15.04.2020]