

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 538.955

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ CORC-КАБЕЛЕ

© 2023 г. И. В. Мартиросян^а, И. К. Михайлова^а,
С. В. Покровский^а, М. С. Новиков^б, И. А. Руднев^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^бОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

*E-mail: mephizic@gmail.com

Поступила в редакцию 20.07.2022 г.

После доработки 20.07.2022 г.

Принята к публикации 25.07.2022 г.

Представлены результаты численного моделирования характеристик сверхпроводящего CORC-кабеля в условиях циклической синхронной нагрузки электрическим током и магнитным полем при охлаждении жидким неоном. Проведен расчет распределений магнитного поля и токов в системе, механических напряжений и деформаций, энергетических потерь, возникающих при перемагничивании магнитным полем и электрическим током. Показаны особенности электродинамических и теплофизических процессов, происходящих в системе при синхронной токовой и магнитопольевой нагрузке при различных углах намотки ВТСП лент. Моделирование выполнено методом конечных элементов в пакете программного обеспечения Comsol Multiphysics. Модель ориентирована на расчет магнитной системы сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии в составе коллайдера протонов и тяжелых ионов NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility), строящегося на базе Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ).

Ключевые слова: ВТСП, CORC-кабель, метод конечных элементов, Comsol Multiphysics, H-формализм

DOI: 10.56304/S2079562922050293

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о наиболее эффективном переносе электроэнергии, заключающемся в увеличении мощности и уменьшение потерь энергии, получил новые вызовы с момента открытия высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) соединений типа $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (REBCO), где RE — редкоземельный элемент, как правило, Y или Gd. Разумеется, возможные перспективы с точки зрения инженерной плотности тока (до 10^9 А/см² в промышленных сверхпроводящих лентах) и создания высоких магнитных полей (несколько десятков Тесла) сталкиваются с рядом ограничений, как минимум, с точки зрения эффективности систем охлаждения. С момента создания ВТСП лент встал вопрос о проектировании кабелей на их основе для широкого спектра практических применений [1–5]. Одним из перспективных типов ВТСП кабелей является так называемый ВТСП CORC-кабель [6]. Такой кабель не уступает стандартным силовым ВТСП кабелям по токонесущей способности, но имеет гораздо меньшие размеры, обладает преимуществами с точки зрения гибкости и компактности.

CORC — (conductor on round core — проводник на круглом сердечнике) был представлен в 2011 г., а его концепция была предложена Ван дер Лааном в 2009 г. [6]. Его идея заключается в спиральной или геликоидальной намотке ленты проводника на полый цилиндрический формер, за счет чего получается асимметричное продольное сечение проводника. При этом охлаждение проводника осуществляется, как правило, за счет потока холодного газа или жидкого хладагента внутри формера, что позволяет обеспечить компактность кабеля. Разработкой CORC-кабелей занимаются различные коммерческие компании [7]. Главным преимуществом таких кабелей является высокая плотность тока и гибкость, поэтому наиболее часто их используют для намотки высокополевых магнитов, применяемых в ускорителях частиц и накопителях энергии. Также было предложено их использование в составе больших термоядерных установок и для детектирования частиц [8]. Наиболее современная конструкция ВТСП CORC-кабеля [6, 9] представляется многослойной, что увеличивает инженерную плотность тока кабеля. При этом в основном рассматриваются два типа конструкции кабеля — со встречной намоткой

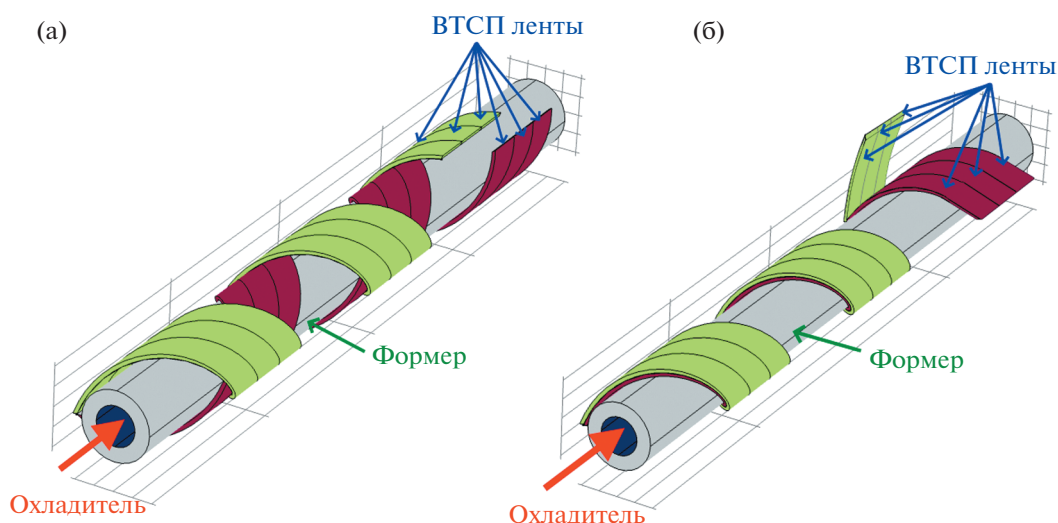


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции многослойного CORC-кабеля: (а) конструкция кабеля со встречной намоткой ВТСП лент, (б) конструкция кабеля с параллельной намоткой ВТСП лент.

ВТСП лент и параллельной намоткой (рис. 1). Структуру такого проводника можно описать следующим образом. Имеется круглая сердцевина, которая может служить в качестве охлаждающего канала (опционально). На эту сердцевину производится намотка нескольких слоев композитной сверхпроводящей ленты. Впервые при рассмотрении такого кабеля в разработке компании Advanced Conductor Technologies LLC был предложен угол намотки ВТСП лент 45° [9], но в дальнейшем были проведены работы, в которых рассматривались и другие углы намотки ленты [10]. Основная сложность при использовании многослойных CORC-кабелей связана с возможностью возникновения локального перегрева [11]. Активные работы по повышению инженерной плотности тока CORC-кабеля за счет улучшения характеристик ВТСП-лент проводятся многими компаниями-производителями [12]. Для оптимизации конструкции кабеля возможно уменьшение толщины подложки до 30 мкм, создание дополнительных центров пиннинга или использование ленты с более тонким ВТСП слоем.

Поскольку экспериментальное испытание всех возможных конфигураций при оптимизации конструкции представляется довольно затратным и практически невозможным, необходима разработка универсальной физической модели с варьируемыми геометрическими (количество и архитектура ВТСП лент, угол намотки, длина кабеля) и физическими (температура, усилие намотки, транспортный ток, внешнее поле и т.д.) параметрами. В данной работе представлены результаты численного моделирования ВТСП CORC-кабеля с параллельной намоткой ВТСП лент в различных условиях охлаждения и нагрузки. Показаны осо-

бенности электродинамических и теплофизических процессов, происходящих в системе при синхронной нагрузке электрическим током и магнитным полем. Расчет выполнен с учетом механических деформаций. Разработанная модель ориентирована на расчет CORC-кабелей, предназначенных для использования в магнитной системе сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии в составе коллайдера протонов и тяжелых ионов NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility), строящегося на базе Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Геометрия моделируемого CORC-кабеля представлена на рис. 2. Форма представляет собой мельхиоровую трубку, внешний радиус которой составляет 8 мм, а внутренний — 6 мм. ВТСП обмотка формера выполнена из десяти композитных сверхпроводящих лент ширины 4 мм, уложенных в два слоя друг над другом по пять лент в каждом. Угол намотки ВТСП лент варьировался от 20° до 40° . Перечень указанных параметров определен в качестве глобальных переменных расчетной модели в программном пакете COMSOL Multiphysics. Охлаждение системы осуществляется по внутреннему диаметру мельхиоровой трубки за счет проточного жидкого неона ($T = 27$ К).

Функциональные временные зависимости для транспортного тока и внешнего магнитного поля качественно совпадают и заданы в виде временного закона, показанного на рис. 3. При охлаждении с использованием жидкого неона было ис-

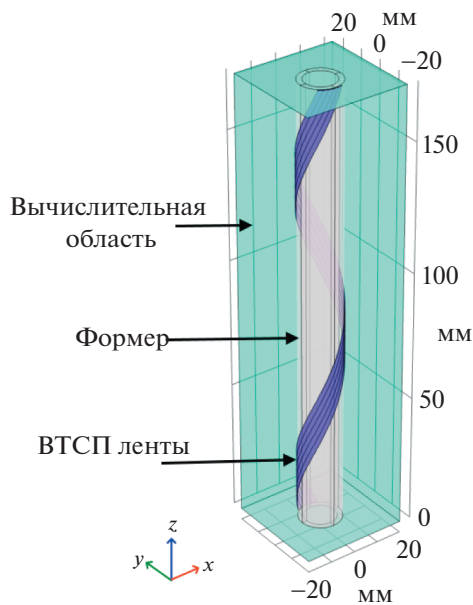


Рис. 2. Геометрия расчетной системы.

следовано два режима ввода токовой и полевой нагрузки. В первом режиме (режим грубого ввода нагрузки) в кабель $5 \cdot 2$ лент (4 мм) за 2 с вводится максимальная нагрузка 10 кА, которая затем снижается на 75% и циклично повторяется с периодом 4 с. Во втором режиме (режим мягкого ввода нагрузки) величина транспортного тока, заводимого в кабель, поднималась за 2 с до 2500 А, затем ток поддерживался постоянным в течении 2 с, а после этого к ВСП кабелю прикладывалась цик-

лическая нагрузка с максимальной амплитудой. Максимальная амплитуда электрического тока составляла 10 кА, а амплитуда синхронного магнитного поля — 2 Тл. Вид нагрузки был выбран исходя из рабочих характеристик, которые планируется реализовать в индукционном накопителе энергии для ускорительного комплекса NICA.

В качестве ВТСП ленты для использования в CORC кабеле в работе рассматривалась ВТСП лента компании СуперОкс (Россия), которая представляет композитную ленту на подложке сплава Hastelloy, покрытую с обеих сторон шунтирующим слоем меди (см. рис. 4). В рамках модели рассматривались лишь основные слои ВТСП ленты, а именно слой подложки, ВТСП слой, а также слои меди и серебра. Перечень основных геометрических параметров модели приведен в табл. 1. Буферные слои в явном виде не задаются при моделировании, однако ввиду диэлектрических свойств этих слоев на границе ВТСП слоя и подложки задается граничное условие электрической изоляции. Общая толщина буферных и защитных слоев составляет порядка 120 нм, что пренебрежимо мало в масштабах моделируемой системы и не оказывает влияния на результаты расчета.

Критический ток используемой в CORC-кабеле ВТСП ленты по различным версиям технических спецификаций составлял 120–160 А, что отражает известный уровень неоднородности критического тока в промышленных ВТСП лентах по длине. Поэтому, в качестве входного параметра модели нами была выбрана средняя величина критического тока в 140 А (77 К, собственное поле). При температуре кипения жидкого неона (27 К), критический ток, согласно спецификации произ-

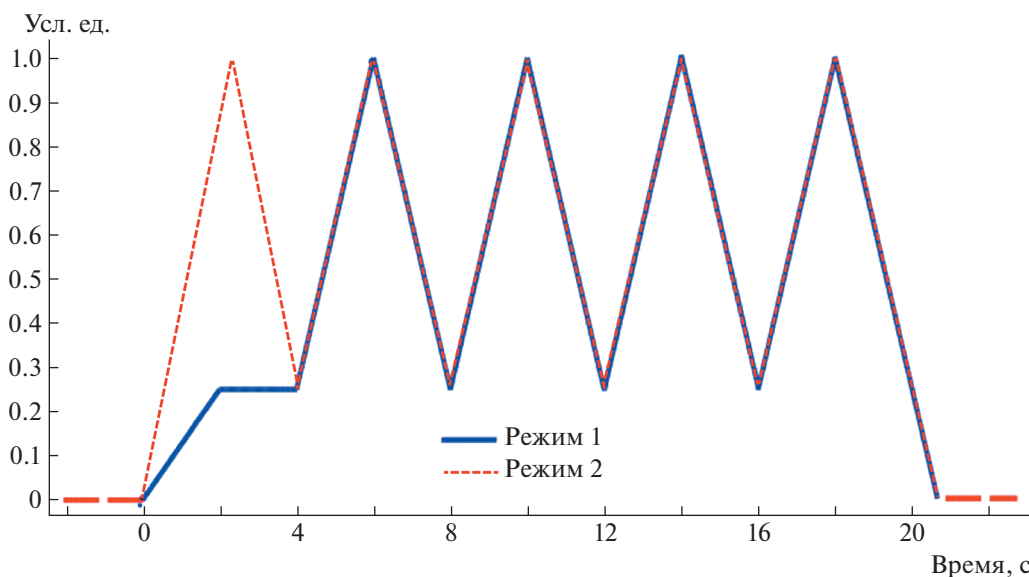


Рис. 3. Функциональная зависимость приложенной магнитной и токовой нагрузки от времени. Режим 1 — режим мягкого ввода нагрузки, Режим 2 — режим резкого ввода нагрузки.

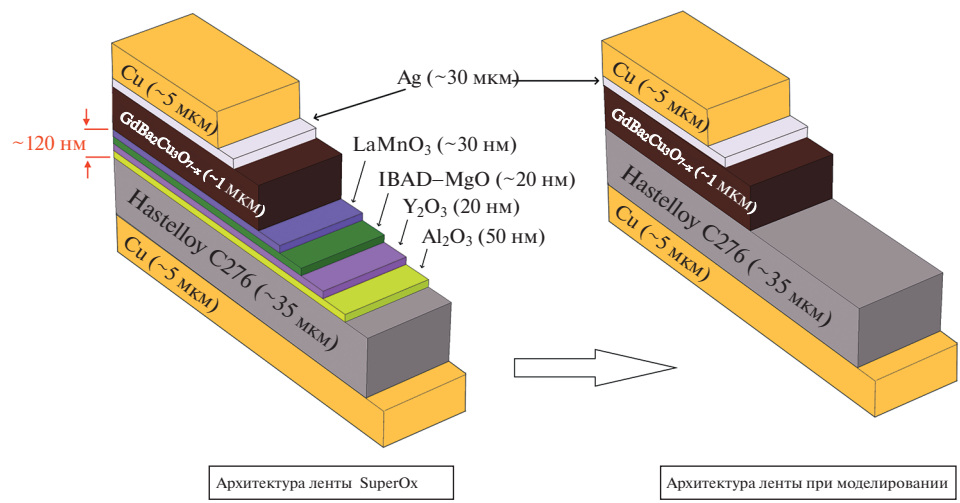


Рис. 4. Архитектура ВТСП лент фирмы SuperOx. (а) Реальная структура слоев ленты, (б) иллюстрация упрощения структуры, применяемой при моделировании.

водителей, увеличивается в восемь раз (так называемый лифт-фактор).

Для расчета характеристик ВТСП CORC-кабеля с током во внешнем магнитном поле применяется метод конечных элементов (МКЭ), реализованный с использованием общей формы дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В среде Comsol Multiphysics общая форма PDE задается уравнением:

Таблица 1. Перечень геометрических входных параметров модели

Параметр	Значение	Описание
h_{hast}	35 мкм	Толщина подложки Hastelloy
h_{HTS}	1 мкм	Толщина ВТСП слоя
h_{Ag}	3 мкм	Толщина слоя серебра
h_{Cu}	5 мкм	Толщина слоя меди
W	4 мм	Ширина ВТСП ленты
R	8 мм	Внешний радиус мельхиоровой трубки
r	6 мм	Внутренний радиус мельхиоровой трубки
α	20°	Угол намотки
N_1	2	Число слоев
N_2	5	Число рядов
N_3	1.5	Число витков

$$e_a \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{\Gamma} = \mathbf{F}, \tag{1}$$

где во всем пространстве в качестве зависимой переменной $\mathbf{u}$ при моделировании выбирается напряженность магнитного поля $\mathbf{H}(x,y,z)$ [13, 14]. Параметры уравнения (1) задаются формулами (2)–(6):

$$\mathbf{u} = \mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$e_a = 0, \tag{3}$$

$$d_a = \begin{bmatrix} \mu & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$\mathbf{F} = 0, \tag{5}$$

$$\mathbf{\Gamma} = \rho \cdot \mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Компоненты тока определяются из соотношений (7):

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} = \begin{cases} J_x = \frac{dH_z}{dy} - \frac{dH_y}{dz}, \\ J_y = -\frac{dH_z}{dx} + \frac{dH_x}{dz}, \\ J_z = \frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy}. \end{cases} \tag{7}$$

Параметры уравнения (1) подобраны таким образом, что уравнение (1) преобразуется в уравнение Фарадея:

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{d\mathbf{B}}{dt} = \nabla \times \mathbf{E} + \frac{d(\mu_0 \mu_r \mathbf{H})}{dt} = 0, \quad (8)$$

где $\mathbf{E}$ — электрическое поле, $\mathbf{B}$ — индукция магнитного поля, $\mathbf{H}$ — напряженность магнитного поля, μ_0 — магнитная постоянная, μ_r — относительная магнитная проницаемость среды, которая принимается равной 1.

Нелинейная зависимость сопротивления от тока задается с помощью степенного закона для вольт-амперной характеристики:

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c} \right)^{(n-1)}, \quad (9)$$

где E_c — критическое электрическое поле, равное 1 мкВ/см, J_c — критический ток, компоненты тока $\mathbf{J}$ вычисляются на основе закона Ампера (7), n — показатель степени, который определяется экспериментально для конкретных лент и обычно находится в диапазоне $n = 25-29$. Для учета зависимости критического тока от магнитного поля в рамках модели вводится критическая поверхность для лифт-фактора ВТСП ленты в широком интервале магнитных полей и температур [15]. Температура критического перехода T_c для ВТСП лент $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ производства SuperOx, измеренная экспериментально, составляет 92 К.

Начальное условие:

$$\mathbf{H}|_{t=0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

В отсутствии магнитного поля используются граничные условия Неймана, а в его присутствии — граничные условия Дирихле. Магнитное поле вычисляется как суперпозиция внешних и внутренних вкладов. Внутренний вклад $\mathbf{H}_s = [H_{sx}, H_{sy}, H_{sz}]$ вычисляется на основе закона Ампера. Тогда как внешний вклад можно записать как $\mathbf{H}_e = [H_{ex}, H_{ey}, H_{ez}]$. Граничные условия принимают вид:

$$\mathbf{H}|_{\partial\Omega} = \begin{bmatrix} H_{sx} + H_{ex} \\ H_{sy} + H_{ey} \\ H_{sz} + H_{ez} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

В основе описания физики тепловых процессов заложено выражение:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q + \rho C_p \mathbf{w} \nabla T, \quad (12)$$

где C_p — теплоемкость при постоянном давлении, ρ — плотность, k — коэффициент теплопроводности, $\mathbf{w}$ — поле скорости температур, Q — все источники тепла, включая термоэлектрические. Зависимости теплопроводностей, теплоемкостей и плотностей всех слоев вводится в рамках модели в виде интерполяции экспериментальных данных [16–19].

Тепловыделение в системе рассчитывается по формуле:

$$Q = E \cdot J. \quad (13)$$

Распределение токов $\mathbf{J}$ в сверхпроводнике определяется параметрами магнитной и токовой нагрузки и вычисляется при решении уравнений PDE. Тепловые, электрические и механические контакты в рамках модели приняты идеальными.

В МКЭ решения задач в программных пакетах строится сетка модели, от качества построения которой зависит точность и время решения задачи. Особенно это важно в случае сложных геометрий в силу резко-нелинейного изменения значений функции от одного домена к другому.

Сетка конечных элементов полностью настроена вручную и прописана в узле Mesh. Пример конечно-элементной сетки и статистика качества ее элементов приведены на рис. 5.

Сетка содержит 929927 элементов тетраэдрической формы. Качество наихудшего элемента составило 0.44 по шкале от 0 до 1, где 0 — это плоский или инверсный элемент (абсолютно неудовлетворительное качество), а 1 — равносторонний элемент (идеальное качество). Минимальное допустимое качество элементов сетки, необходимое для сходимости решателя и обеспечения релевантного решения по этой шкале составляет 0.15–0.2. Таким образом, разработанная сетка конечных элементов соответствует заданным требованиям и обеспечивает корректный расчет. В области ВТСП лент для всех слоев использованы инструменты многомасштабного структурирования, в области мельхиоровой трубки и остального расчетного домена — свободная тетраэдрическая сетка с контролируемым максимальным размером элемента и степенью роста при переходе к соседнему элементу. Для ВТСП слоя задана поверхностная треугольная сетка элементов и использованы инструменты протяжки конечно-элементной сетки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При синхронной нагрузке электрическим током и магнитным полем в условиях охлаждения жидким неоном был выполнен расчет многослойного ВТСП CORC-кабеля (см. рис. 2). Распределение магнитного поля в системе и двух плоскостях после ввода нагрузки в первом режиме (см. рис. 3) представлено на рис. 6. Наблюдается неоднородность в распределении магнитного поля, которая связана со спиральной формой намотки ВТСП-лент на цилиндрическую трубку. Хорошо видны эффекты экранировки, а также неоднородность распределения компонент магнитного поля в различных горизонтальных плоскостях сечения. В вертикальной плоскости YZ соседние витки демонстрируют схожее распределение индукции магнитного поля (рис. 7).

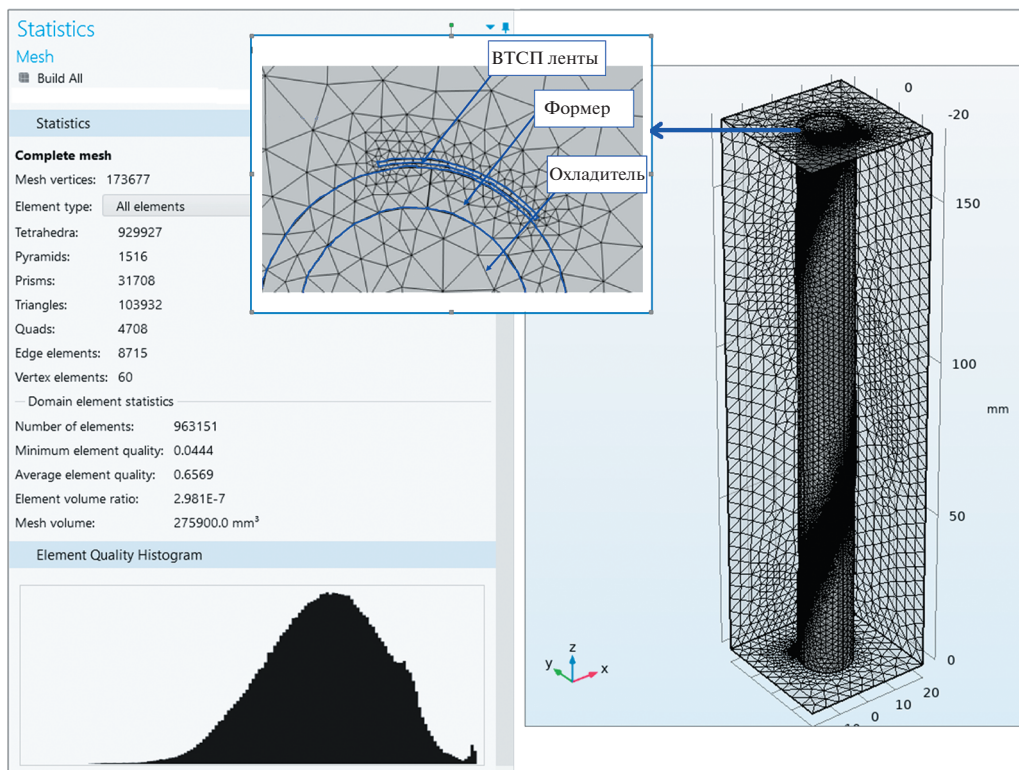


Рис. 5. Сетка модели CORC-кабеля, на вставке — увеличенный вид сверху.

При отсутствии постепенного ввода нагрузки (режим резкого ввода нагрузки, см. рис. 3), наибольшие потери наблюдаются в первом цикле нагрузки (рис. 8). Это обусловлено резким тепловыделением в системе и возникновением устойчивой тепловой неустойчивости. Критический ток ВТСП лент снижается в связи с повышением температуры, что приводит к росту потерь. Затем тепло отводится через мельхиоровую трубку, и система стабилизируется. Поэтому последующие циклы нагрузки становятся более стабильными. При постепенном синхронном вводе транспортного тока и магнитного поля (режим мягкого ввода нагрузки, рис. 3), имеет место быть задержка возникновения напряжения на образце и, как следствие, задержка возникновения потерь (рис. 9). В то время, как нарастание фронта воздействия происходило 2 с, возникновение потерь наблюдалось лишь по прошествии не менее 0.2 с. Затем приложенная нагрузка оставалась постоянной в течении следующих 2 с. Однако ввиду того, что тепло, выделившееся в образце в процессе ввода нагрузки отводится криосистемой, напряжение на образце не только не увеличивается, но и начинает спадать, а значит, начинают и уменьшаться общие потери CORC-кабеля. Таким образом, постепенный ввод тока и поля позволяет стабилизировать сверхпроводник до начала приложения циклической нагрузки.

Аналогичные тенденции задержки возникновения и спада потерь наблюдаются и при расчете циклических нагрузок как для потерь на переменном (во времени) токе, так и для потерь на перемещение во внешнем магнитном поле (рис. 10). Поскольку первый цикл нагрузки может быть отличным от последующих, то для того, чтобы показать потери кабеля, вышедшего на стабильный рабочий режим, графики приводятся для третьего и последующих циклов нагрузки, то есть начиная с 12 с. Расчет был выполнен для системы CORC-кабеля 5×2 лент с углом намотки 20° при транспортном токе 80% от критического и синхронном магнитном поле, не превышающем 2Т при охлаждении жидким неоном.

Еще одна характерная особенность рассмотренного 5×2 CORC-кабеля заключается в том, что при синхронной токовой и полевой нагрузке внешние и внутренние слои ВТСП лент кабеля ведут себя по-разному: внешние ленты первыми попадают в магнитное поле и частично экранируют внутренние слои, ввиду чего величина потерь для внутренних и внешних лент будет различна. Внутренние ВТСП ленты, менее подверженные воздействию внешнего магнитного поля, имеют непосредственный контакт с мельхиоровой трубкой, по которой пропускается хладагент. Таким образом, внешние слои CORC-кабеля вносят больший вклад

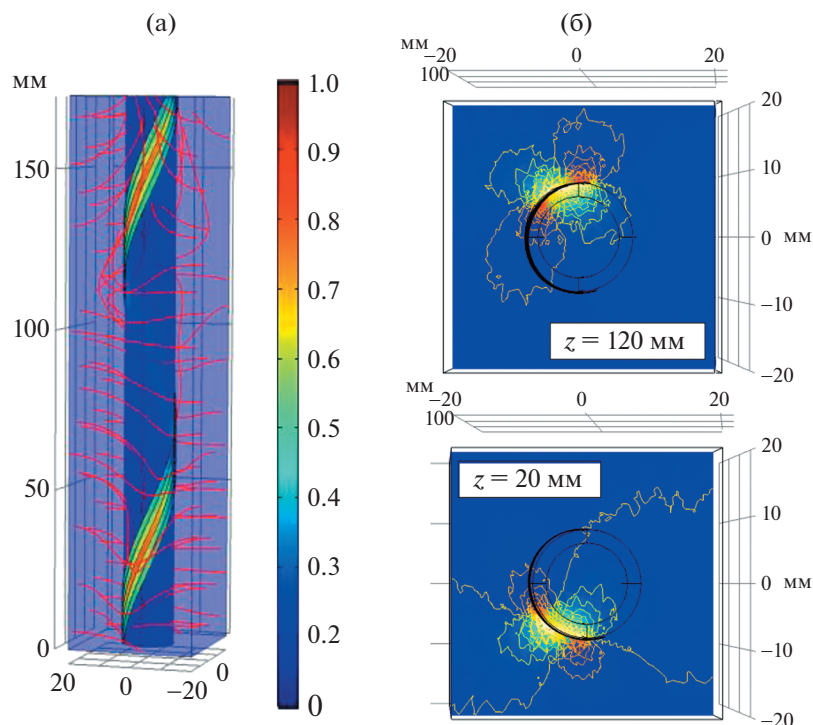


Рис. 6. Нормированное распределение магнитного поля в расчетной системе (а) и в двух плоскостях xy на различной высоте (б) в системе после ввода нагрузки в мягком режиме ($t = 2$ с) (рис. 3).

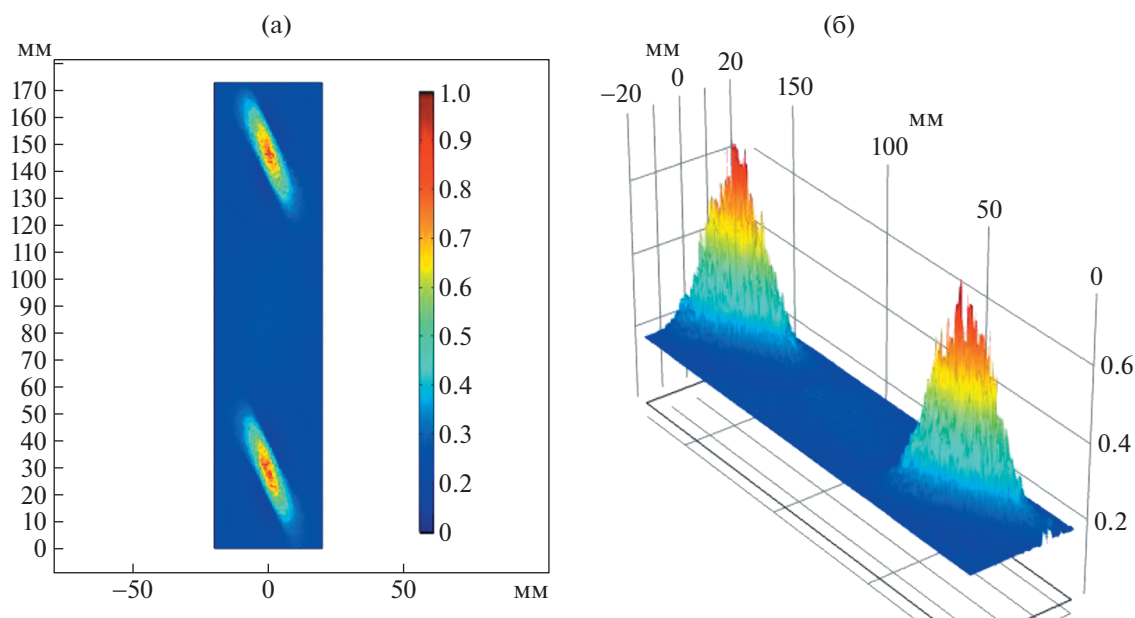


Рис. 7. Нормированное распределение индукции магнитного поля B_z на высоте 2 мм от поверхности CORC кабеля. (а) Распределение в плоскости YZ ($x = 2$ мм), (б) распределение величины B_z по высоте в той же плоскости.

в общие потери кабеля в сравнении со внутренними слоями.

Расчет потерь в CORC-кабеле при различных углах намотки ВТСП лент показал, что для менее плотной намотки потери на переменном токе

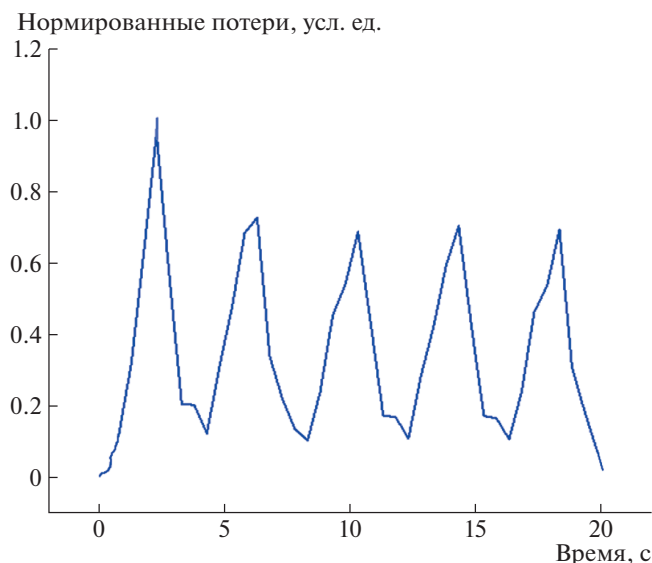


Рис. 8. Зависимость энергетических потерь в CORC кабеле от времени при циклической нагрузке без постепенного ввода магнитного поля и тока.

меньше, чем для более плотной (рис. 11). Это связано, в первую очередь со взаимовлиянием соседних витков кабеля. Магнитное поле соседних витков аддитивно складывается со внешним полем и дополнительно понижает критический ток ВТСП лент. При непосредственном контакте соседних витков также начинают действовать механизмы теплопередачи за счет теплопроводности твердого тела.

Что касается механических напряжений, расчет показал, что ВТСП ленты сжимаются и ввиду разницы коэффициентов теплового расширения материалов ленты и мельхиоровой трубки и еще плотнее обхватывают формер, что по идее должно улучшить тепловой контакт. Но поскольку в рамках представленной на данном этапе модели тепловой контакт и так идеальный, то этот аспект не оказывает влияния на результаты теплофизических расчетов. На рис. 12 приведено распределение механических деформаций в ВТСП ленте с учетом натяжения намотки, которое на данном этапе аддитивно прибавляется к механическим напряжениям, возникающим при протекании транспортного тока в синхронном магнитном поле. Понятие *scale factor* на рис. 12 обозначает коэффициент, на который умножаются реальные деформации ВТСП ленты и вводится для более наглядной визуализации смещения лент.

Общая сила реакции опоры вдоль оси z практически отсутствует, а максимальна она вдоль оси x , по которой приложено внешнее магнитное поле (рис. 13). Это означает, что вдоль осей x и y ВТСП

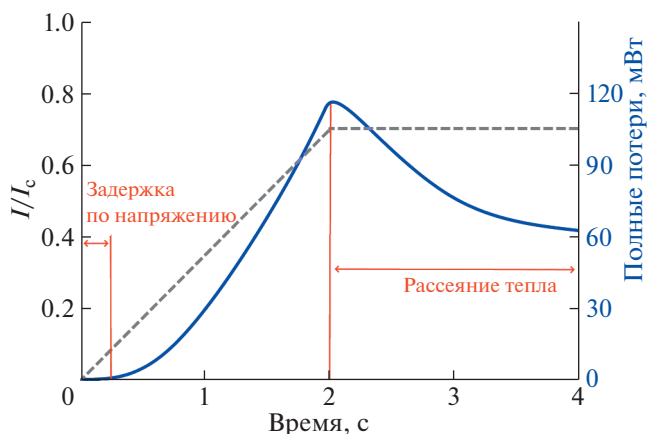


Рис. 9. Зависимость потерь от времени при постепенном вводе токовой нагрузки различной амплитуды для отрезка CORC-кабеля длины 1 м.

ленты прижимаются в формеру с различным усилием и деформация ленты вдоль этих направлений также будет неодинакова.

Стоит отметить, что контактное сопротивление зависит от структуры поверхности и от механического давления в зоне контакта. В областях более плотного прилегания ленты к формеру тепловые и электрические контакты ввиду механических свойств системы, могут существенно отличаться от прочих областей. Это следует учесть при проведении дальнейших расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием метода конечных элементов была разработана трехмерная модель ВТСП CORC-кабеля на основе Н-формализма. Модель была реализована в пакете программного обеспечения Comsol Multiphysics.

С использованием представленного подхода был выполнен расчет распределения токов и поля в ВТСП CORC-кабеле при охлаждении жидким неоном. Получены зависимости потерь на перемагничивание внешним магнитным полем и электрическим током в кабеле от времени для различных режимов ввода синхронной токовой и полевой нагрузки. Показано наличие задержки возникновения потерь при нарастании фронта воздействия, а также спад общих потерь в системе при поддерживаемой постоянной нагрузке. Эти процессы также оказались характерными и для циклических нагрузок CORC-кабеля. Получены зависимости потерь от приложенной нагрузки для различных углов намотки кабеля. Для более плотной намотки ВТСП лент величина потерь оказалась

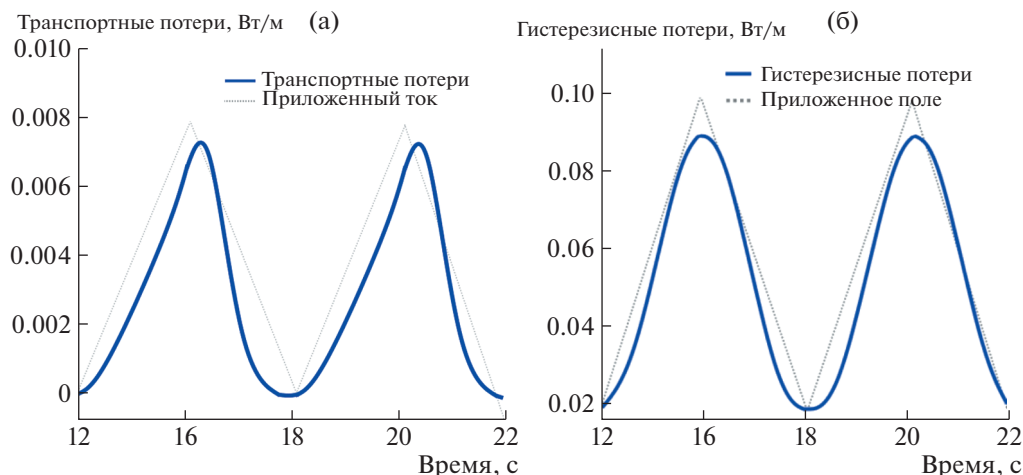


Рис. 10. Зависимости транспортных потерь (а) и гистерезисных потерь (б) от времени для третьего и четвертого циклов нагрузки CORC-кабеля.

больше, что обусловлено особенностями взаимодействия соседних витков кабеля.

Показано, что распределения индукции магнитного поля в различных сечениях плоскостях CORC-кабеля различаются, а потери в каждой точке кабеля определяются не только внешним приложенным полем, но и полем соседних витков CORC кабеля. Кроме того, были установлены особенности поведения внешних и внутренних ВТСП лент многослойного CORC-кабеля. Показано, что для внешних слоев, частично экранирующих внутренние при вводе магнитного поля, характерны большие потери, в то время, как основ-

ное охлаждение приходится на внутренние ВТСП слои, прилегающие к мельхиоровой трубке, по которой пропускается хладагент.

Деформация ВТСП слоя при исследованных параметрах нагрузки составила менее 1%, а сама лента ввиду разницы свойств подложки и мельхиора в течении нагрузки плотнее прилегает к формеру, при этом более сильное прилегание ВТСП лент к формеру наблюдается по оси, вдоль которой приложено внешнее магнитное поле.

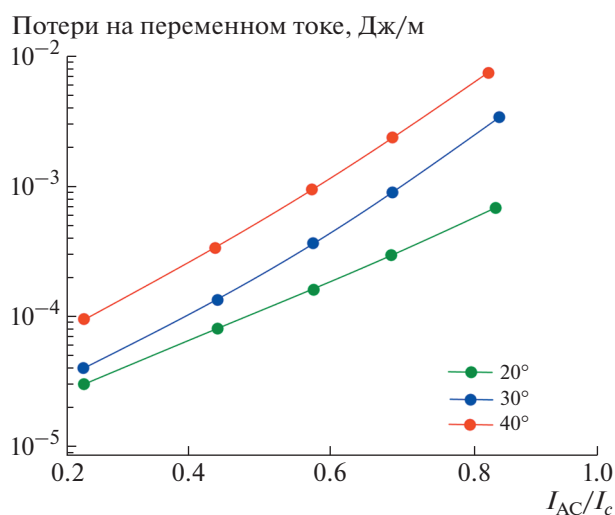


Рис. 11. Зависимость потерь на переменном токе от приложенной токовой нагрузки для различных углов намотки CORC-кабеля.

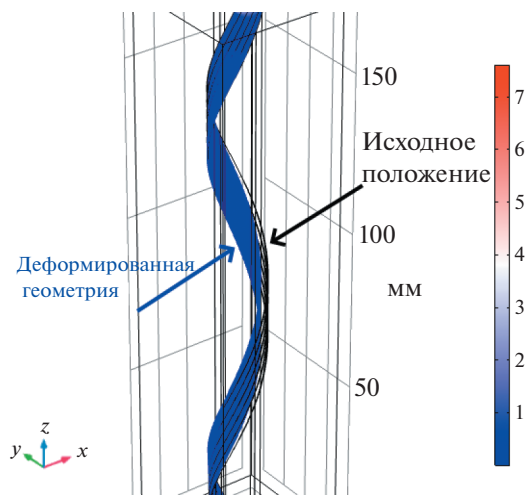


Рис. 12. Распределение механических напряжений по мизасу [Па] в CORC кабеле после пятого цикла нагрузки (scale factor = 5). Максимальные деформации, соответствующие более теплым оттенкам цветовой шкалы, характерны для тонкого ВТСП слоя, ввиду чего трудноразличимы на распределении.

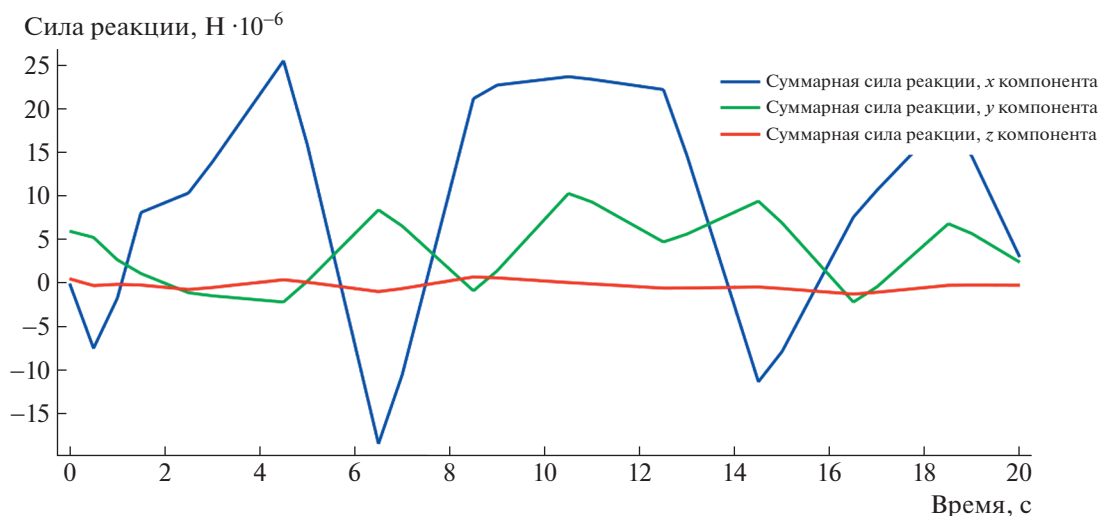


Рис. 13. Компоненты общей силы реакции опоры мельхиоровой трубки от времени для трех соседних витков CORC кабеля.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-1352 (А.В. Мартиросян, С.В. Покровский, И.А. Руднев).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Wang X. *et al.* // Supercond. Sci. Technol. 2018. V. 31 (4). P. 045007.
2. Jin H. *et al.* // Nucl. Fusion. 2020. V. 60 (9). P. 096028.
3. Сытников В.Е. // Энергия единой сети. Т. 1. С. 16–29.
4. Van der Laan D.C., Weiss J.D., McRae D.M. // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 32 (3). P. 033001.
5. Фетисов С.С. // Кабели и провода. 2014. Т. 3. С. 22–29.
6. Van der Laan D.C. // Supercond. Sci. Technol. 2009. V. 22 (6). P. 065013.
7. Van der Laan D.C., Lu X.F., Goodrich L.F. // Supercond. Sci. Technol. 2011. V. 24 (4). P. 042001.
8. Mulder T. *et al.* // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2017. V. 279 (1). P. 012033.
9. Barth C. High Temperature Superconductor Cable Concepts for Fusion Magnets. 2013. Karlsruhe: KIT Sci.
10. Ashok K.B. *et al.* // Phys. C (Amsterdam, Neth.). 2021. V. 582. P. 1353828.
11. Wang Y. *et al.* // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 32 (2). P. 025003.
12. Fietz W.H. *et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26. (4). P. 1–5.
13. Anischenko I., Pokrovskii S., Rudnev I., Osipov M. // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 32 (10). P. 105001.
14. Anischenko, Pokrovskii S.V., Rudnev I.A., Osipov M.A., Abin D.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1293. P. 012064.
15. <https://www.superox.ru/documents/>.
16. Wesche R. // Proc. HTS Fusion Conductor Workshop. Karlsruhe, May 26–27, 2011.
17. Jang S. *et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2003. V. 13 (2). P. 2956–2959.
18. Lua J., Choi E.S., Zhou H.D. // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 064908.
19. Zeisberger M. *et al.* // Supercond. Sci. Technol. 2005. V. 18 (2). P. S202.

Simulation of Current Distribution and Energy Losses in a Superconducting CORC Cable

I. V. Martirosyan^{1, *}, I. K. Mikhailova¹, S. V. Pokrovskii¹, M. S. Novikov², and I. A. Rudnev¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

*e-mail: mephizic@gmail.com

Received July 20, 2022; revised July 20, 2022; accepted July 25, 2022

Abstract—The results of numerical simulation of the characteristics of a superconducting CORC cable under synchronous cyclic loading by electric current and magnetic field under liquid neon cooling are presented. Distributions of the magnetic field and currents in the system, mechanical stresses and deformations, and en-

ergy losses occurring during remagnetization by the magnetic field and electric current are calculated. The features of electrodynamic and thermophysical processes occurring in the system under synchronous current and magnetic-field loading at different winding angles of HTS tapes are shown. The simulation was performed by the finite element method in the Comsol Multiphysics software. The model is designed for calculating the magnetic system of a superconducting inductive energy storage system as part of the Nuclotron based Ion Collider fAcility (NICA), which is under construction at the Laboratory of High Energy Physics (HEPL) of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR).

Keywords: HTS, CORC cable, finite element method, Comsol Multiphysics, H-formalism