

К.А. БОРОДАКО, И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АБИН, М.А. ОСИПОВ,
С.В. ВЕСЕЛОВА, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКОНЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Исследуются характеристики CORC кабеля в качестве токонесущего элемента сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии. Намотаны CORC кабели на основе промышленных ВТСП лент второго поколения (RE) $Ba_2Cu_3O_{7-x}$ производства компании «С-Инновации» с одним и двумя слоями ВТСП ленты. Измерены значения критического тока кабелей в исходном состоянии и после деформации изгиба на различных диаметрах. Проведена разработка численных моделей CORC кабелей и анализ их транспортных и тепловых характеристик. Определены подкритические режимы работы, места возникновения возможных тепловых нестабильностей системы, даны рекомендации по работе элементов в конструкции сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии.

K.A. BORODAKO, I.V. MARTIROSIAN, D.A. ABIN, M.A. OSIPOV,
S.V. VESELOVA, D.A. ALEKSANDROV, S.V. POKROVSKII
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

CHARACTERISTICS OF CURRENT-CARRYING ELEMENTS OF SUPERCONDUCTING INDUCTIVE ENERGY STORAGE DEVICE

The characteristics of a CORC cable as a current-carrying element of a superconducting inductive energy storage device are being investigated. CORC cables based on second-generation industrial HTS tapes (RE) $Ba_2Cu_3O_{7-x}$ produced by S-Innovations with one and two layers of HTS tape. The values of the critical current of cables in the initial state and after bending deformation at various diameters are measured. Numerical models of CORC cables have been developed and their transport and thermal characteristics analyzed. Subcritical operating modes, locations of possible thermal instabilities of the system are determined, and recommendations are given on the operation of elements in the design of a superconducting inductive energy storage device.

Сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии (СПИН) служит для хранения энергии в виде магнитного поля, создаваемого электрическим током, протекающим по замкнутой электрической цепи. Перспективным материалом для изготовления токонесущих элементов индуктивных накопителей энергии является высокотемпературная сверхпроводящая (ВТСП) лента 2-ого поколения. Одним из главных конструктивных элементов такого накопителя является сверхпроводящая катушка [1]. Для формирования сверхпроводящих катушек в форме соленоида, как правило, используется сверхпроводящий кабель. В качестве основного конструктивного СПИН в рамках настоящей работы исследуется CORC (conductor on round core – проводник на круглом сердечнике) кабель [2-4], который изготавливается путём намотки нескольких ВТСП лент на цилиндрическую полую трубку.

Для прогнозирования режимов работы СПИН и расчета характеристик всей системы проведено численное моделирование потерь в различных режимах охлаждения (полное погружения кабеля в жидкий хладагент и прокачка жидкого хладагента по внутреннему диаметру мельхиоровой трубки) и электрической нагрузки, а также расчет параметров перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное. Независимо от типа конструкции СПИН (тороидальная катушка, соленоид или другая конфигурация) необходимо знать предельные режимы работы кабеля и его критические характеристики в реальных эксплуатационных условиях. Это включает в себя исследование характеристик при изгибе, анализ потерь в кабеле при циклической токовой и магнитной нагрузке, а также моделирование температурных распределений системы при различных условиях охлаждения. Для этого разработаны модели для CORC кабелей и проведены расчеты характеристик системы при циклической нагрузке.

Показано, что охлаждение кабеля посредством полного погружения в хладагент приводит к потерям на порядки меньшим, нежели при охлаждении за счет пропускания хладагентов по внутреннему диаметру формера. Были исследованы элементы индуктивного накопителя – образцы CORC кабелей с различным числом лент в повиве. Выполнены измерения критического радиуса изгиба кабелей. Намотка ВТСП лент под углом 22 градуса относительно оси трубки и усилия 1 кг не приводит к возникновению резистивной составляющей на ВАХ кабеля. Минимальный диаметр изгиба кабеля, полученного при намотке ВТСП ленты на трубку диаметром 5 мм, составил не более 15 см. Полученные результаты будут в дальнейшем применены для численного анализа и проектирования СПИН.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00278, <https://rscf.ru/project/24-79-00278/>.

Список литературы

1. Lieurance D., Kimball F., Rix C. and others // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1995. Vol. 5, № 2. P. 350-353.
2. Uglietti D. // Supercon. Sci. Technol. 2019. Vol. 32, № 5. 053001.
3. Van Der Laan D.C., McRae D.M., Weiss J.D. // Supercon. Sci. Technol. 2018. Vol. 32, № 1. 015002.
4. Wang X., Sheng J., Li X. F. and others // J. Energy Storage. 2023. Vol. 58. 106386.