REFERENCES

- 1. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V. *Teoreticheskie* osnovy elektrotekhniki (Theoretical bases of electrical engineering). Saint Petersburg, Piter, 2009. 1, 512 p.
- Nosov G.V. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013. 322, 4, pp. 65–69.
- Nosov G.V. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013. 322, 4, pp. 70–74.
- Gerasimov V.G. Elektrotekhnicheskiy spravochnik. Obshhie voprosy. Elektrotekhnicheskie materialy (Electrical engineering reference. General questions. Electric engineering materials). Moscow, Energoatomizdat, 1985. 1, 488 p.
- Yavorskiy B.M., Seleznev Yu.A. *Fizika* (Physics). Moscow, Fizmatlit, 2004. 592 p.

УДК 621.311.001.57

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ ОБМОТКАМИ

В.З. Манусов, Н.В. Александров

Новосибирский Государственный Технический Университет E-mail: alexandrov-88@mail.ru

Актуальность работы обусловлена перспективой широкого использования явления сверхпроводимости в электроэнергетических устройствах, в том числе в трансформаторах с целью снижения потерь в них.

Цель работы: исследование влияния сверхпроводниковых трансформаторов на электромагнитные переходные процессы, определение возможности ограничения токов короткого замыкания с помощью сверхпроводниковых трансформаторов, выявление особенностей при токоограничении с помощью сверхпроводниковых трансформаторов.

Методы исследования: расчеты с использованием программного комплекса MatLab, ATP EMTP, использование теории сверхпроводимости, аппарата математического моделирования в электроэнергетике.

Результаты: разработана математическая модель электромагнитных и тепловых переходных процессов при ограничении токов короткого замыкания, проведено моделирование процессов перехода сверхпроводникового трансформатора в нормальное состояние (несверхпроводящее) и последующего возврата в сверхпроводящее после устранения короткого замыкания, определен критерий возврата сверхпроводникового трансформатора в сверхпроводящее состояние после устранения короткого замыкания, определен критерий возврата сверхпроводникового трансформатора в сверхпроводящее состояние после устранения короткого замыкания, определен критерий возврата сверхпроводникового трансформатора в сверхпроводящее состояние после устранения короткого замыкания под нагрузкой, определена возможность ограничения токов короткого замыкания с позиции обеспечения требуемого активного сопротивления.

Ключевые слова:

Сверхпроводящие трансформаторы, электроэнергетические системы, переходные процессы, возврат в сверхпроводящее состояние, математическое моделирование в электроэнергетике.

Открытие в 80-х гг. XX в. материалов, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью (ВТСП) позволило преодолеть главное препятствие использования сверхпроводимости (СП) – громоздкие криогенные системы получения жидкого гелия были заменены более простыми установками жидкого азота при атмосферном давлении. Это открыло новые перспективы создания трансформаторов со сниженными потерями.

Трансформаторы с ВТСП обмотками обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными силовыми трансформаторами: низкие нагрузочные потери, большая перегрузочная способность, нестареющая высококачественная изоляция, меньшие массогабаритные показатели, меньшие уровни шумов, экологическая безопасность [1]. Сверхпроводящие трансформаторы (СПТ) также способны ограничивать токи короткого замыкания (КЗ), что является одним из основных преимуществ таких трансформаторов, т. к. проблема координации токов короткого замыкания является чрезвычайно важной в любой электроэнергетической системе (ЭЭС). Уровень токов КЗ определяет требования при выборе оборудования, а следовательно, позволяет оценить экономичность и надёжность ЭЭС.

Как известно, сверхпроводимость ограничивается тремя параметрами: критическая температура, критический ток, критическое поле. При выходе одного из параметров за пределы, в которых существует сверхпроводимость, сверхпроводник переходит в нормальное, непроводящее состояние. Во избежание повреждения сверхпроводящего материала, при производстве ВТСП проводов используют так называемый стабилизатор, в который вытесняется ток в случае временной потери или ослабления токонесущих свойств сверхпроводника. Структура ВТСП провода второго поколения, выпускаемого фирмой SuperPower (США), представлена на рис. 1. Ширина провода составляет 4...12 мм.



Рис. 1. Структура ВТСП провода второго поколения (2G)

Критический ток $I_{c}(T)$ определяет максимально допустимый ток, который может протекать по сверхпроводящему элементу без разрушения сверхпроводящего состояния. В ВТСП изделиях рабочий ток, как правило, составляет $0.5-0.9_{lc}(T)$ в зависимости от условий эксплуатации [2]. Когда протекающий по обмотке ток превышает критический ток $I_c(T)$ ВТСП провода, обмотка переходит из сверхпроводящего в нормальное состояние. При этом сопротивление СП слоя в проводе значительно увеличивается, и протекающий ток вытесняется в несверхпроводящие слои ВТСП провода. Последние в силу небольшого поперечного сечения провода ограничивают ток КЗ. Стоит отметить, что плотность тока в СП проводе составляет примерно 100 A/мм², поэтому в СП обмотках используется гораздо меньший объем провода, по сравнению с медной обмоткой.

Основными параметрами токоограничивающей обмотки являются величина ограничиваемого тока и длительность тока КЗ, в течение которого не происходит разрушения обмотки. Рассмотрим ограничение токов КЗ с помощью трансформатора с ВТСП обмотками, основываясь на следующих предположениях: ВТСП провод переходит из сверхпроводящего состояния в нормальное равномерно по всей длине; все элементы сети, кроме ограничивающего сопротивления являются линейными.

Высокотемпературные сверхпроводники являются неидеальными сверхпроводниками второго рода, т. е. переход из сверхпроводящего состояния в нормальное происходит не сразу, а имеется промежуточное смешанное состояние, при котором магнитное поле еще не полностью проникает в тело сверхпроводника. Смешанное состояние существует в пределах от первого критического тока I_{c1} до второго I_{c2} . В этом состоянии ток протекает как по сверхпроводящему слою, так и по несверхпроводящим слоям, тогда активное сопротивление (удельное) ВТСП провода определяется эквивалентным сопротивлением СП слоя и несверхпроводящих слоев

$$R_{\mathfrak{g}}(I,T) = \frac{R_{\mathfrak{hc}}(T) \cdot R_{\mathfrak{cn}}(T)}{R_{\mathfrak{hc}}(T) + R_{\mathfrak{cn}}(T)},$$

где $R_{\rm He}$ – сопротивление несверхпроводящих слоев; $R_{\rm cn}$ – сопротивление СП слоя; I – ток, протекающий по проводнику; T – температура провода.

Вольт-амперная характеристика ВТСП провода имеет вид, приведенный на рис. 2. Считается, что

сверхпроводник перешел в нормальное состояние, если на проводе длиной 1 см появилось напряжение величиной 1 мкВ [3].



Рис. 2. Вольт-амперная характеристика ВТСП провода

Величина сопротивления СП слоя может быть найдена из вольт-амперной характеристики ВТСП материала [3]

$$R_{\rm cn}(I,T) = \frac{10^{-6}}{I} \left(\frac{I}{I_c(T)}\right)^N,$$
$$I_c(T) = -\frac{I_{c0}}{0.1848} \ln\left(\frac{T}{77}\right),$$

где N – показатель степени вольт-амперной характеристики ВТСП провода, определяющий качество сверхпроводника; $I_c(T)$ – критический ток ВТСП провода при температуре T (при температурах свыше 90 К $I_c(T)$ равно нулю); I_{c0} – критический ток в собственном поле при 77 К.

Тогда активное сопротивление несверхпроводящих слоев определяется как

$$R_{\rm Hc} = \frac{1}{1 / R_{\rm BC}(T) + 1 / R_{\rm Ag}(T) + 1 / R_{\rm M}(T) + 1 / R_{\rm Xacr}(T)},$$

где $R_{\rm EC}$ – сопротивление буферных слоев; $R_{\rm Ag}$ – сопротивление слоя серебра; $R_{\rm M}$ – сопротивление медного слоя; $R_{\rm Xarr}$ – сопротивление хастеллоя.

Уравнение цепи, представленной на рис. 3, при возникновении КЗ описывается дифференциальным уравнением [4]

$$U_{m}\sin(\omega t + \alpha) = (L_{c} + L_{T})\frac{di(t)}{dt} + i(t)(R_{c} + R_{T}(T)),$$
(1)

где R_c и L_c – активное сопротивление и индуктивность системы; R_r и L_r – активное сопротивление и индуктивность трансформатора.



Рис. 3. Схема замещения для расчета переходного процесса

Решение уравнения (1) имеет следующий вид

$$i(t) = \frac{U_m}{Z_{\kappa}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\kappa}) + \left[\frac{U_m}{Z_{\mu}} \sin(\alpha - \varphi_{\mu}) - \frac{U_m}{Z_{\kappa}} \sin(\alpha - \varphi_{\kappa})\right] e^{\frac{-t}{T_a}}, \quad (2)$$

здесь Z_{κ} – полное сопротивление короткозам
кнутого участка.

+

Для определения условия возврата в сверхпроводящее состояние во время бестоковой паузы необходимо определить количество тепла, выделившегося во время КЗ

$$Q(I,T) = \int_{0}^{1} I^{2} R(T) dt.$$
 (3)

Увеличение температуры провода вследствие тепловыделения определяется выражением

$$C\frac{dT(I,T)}{dt} = Q(I,T) - Aq(T), \tag{4}$$

где C – полная теплоемкость провода; A – площадь поверхности охлаждения; q – плотность теплового потока, отводимого в жидкий азот с поверхности обмотки.

$$C = V_{\text{BTCII}} c_{\text{BTCII}}(T) + V_{\text{Xacr}} c_{\text{Xacr}}(T) + V_{\text{bc}} c_{\text{bc}}(T) + V_{\text{Ag}} c_{\text{Ag}}(T) + V_{\text{M}} c_{\text{M}}(T),$$

где $V_{\rm BTCII}$ и $c_{\rm BTCII}$ – объем и удельная объемная теплоемкость BTCII; $V_{\rm Xacr}$ и $c_{\rm Xacr}$ – объем и удельная объемная теплоемкость хастеллоя; $V_{\rm BC}$ и $c_{\rm BC}$ – объем и удельная объемная теплоемкость буферного слоя; $V_{\rm Ag}$ и $c_{\rm Ag}$ – объем и удельная объемная теплоемкость серебра; $V_{\rm M}$ и $c_{\rm M}$ – объем и удельная объемная теплоемкость меди.

На рис. 4 приведена зависимость плотности теплового потока жидкого азота от разницы температур между охлаждаемой поверхностью (провод) и жидким азотом. Из рис. 4 видно, что наилучшие условия охлаждения имеют место в средних зонах пузырькового и переходного кипений, однако эти зоны характеризуются узким диапазоном разниц температур. В режиме пленочного кипения процесс охлаждения обмотки затягивается и может привести к неуспешному возврату трансформатора в сверхпроводящее состояние.



Рис. 4. Плотность теплового потока в зависимости от разницы температуры между охлаждаемой поверхностью и охлаждающей жидкостью [5]

Уравнения (2)-(4) должны решаться совместно. В итоге получаем нестационарное уравнение теплопроводности, которое описывает изменение температуры обмотки в зависимости от тока, протекающего по цепи, и времени

$$T(t) = T_0 + \Delta T(t) = T_0 + \frac{Q(I,T) - Aq(T)}{C(T)},$$
(5)

где T_0 – начальная температура (77 К).

Из всего вышеописанного вытекает общая математическая модель ограничения тока КЗ с помощью трансформатора с ВТСП обмотками, основанная на решении нестационарного уравнения теплопроводности (5) и дифференциального уравнения изменения тока короткого замыкания (1).

$$\begin{cases} R_{\rm T} = 0 & I < I_c \\ R_{\rm T} = \frac{R_{\rm Hc}(T) \cdot R_{\rm CII}(T)}{R_{\rm Hc}(T) + R_{\rm CII}(T)} & I_{c1} < I < I_{c2} \\ R_{\rm T} = R_{\rm Hc}(T) & I > I_{c2} \\ R_{\rm T} = f(T) \text{ после отключения K3} & I = 0 \end{cases}$$
 (6)

В программном комплексе MatLab был разработан программный код для расчета процессов нагрева и охлаждения сверхпроводящего провода с учетом того, что условия охлаждения ухудшаются в случае обмотки. В ходе расчетов был определен критерий возврата ВТСП провода в СП состояние после устранения КЗ при протекании нагрузочного тока (рис. 5).



Рис. 5. Критерий возврата обмотки в СП состояние после устранения КЗ

При расчете предполагалось, что КЗ происходит на одном из отходящих присоединений. Данный критерий основан на соотношении величин тока КЗ и нагрузочного тока, т. е. соотношение рабочего тока и тока КЗ с учетом ограничения должно быть таким, чтобы тепло, выделившееся во время КЗ, не превысило некоторого критического значения, свыше которого для возврата в СП состояние необходимо отключать трансформатор. Для возврата в СП состояние обмотка трансформатора должна успеть охладиться до температуры, при которой происходит переход в СП состояние. Или другими словами, для быстрого возврата в СП состояние электрически подведенная мощность к оставшемуся активному сопротивлению должна быть меньше мощности, которая отводится термически тепловым потоком.

Также в программе рассчитывалась величина активного сопротивления. На рис. 6 показано изменение сопротивления трансформатора при возникновении КЗ и после его устранения, где момент времени 0,1 с соответствует началу КЗ, 0,2 с – его устранению.



Рис. 6. Активное сопротивление во время и после устранения КЗ

В начальный момент перехода из СП состояния в нормальное состояние ударный ток КЗ ограничивается сопротивлением несверхпроводящих слоев, соответствующих температуре 77 К. В дальнейшем в течение КЗ провод обмотки разогревается соответственно температуре, увеличивается активное сопротивление. После устранения КЗ при достаточном охлаждении обмотка начинает охлаждаться. Однако из-за большой разницы температур между обмоткой и жидким азотом плотность теплового потока, соответствующая пленочному кипению (рис. 4), невелика и охлаждение обмотки занимает некоторое время. На рис. 6 резкое снижение сопротивления в момент времени 1,6 с соответствует переходу от пленочного кипения к переходному кипению и далее к пузырьковому кипению. В режиме пузырькового кипения отвод тепла от нагретой обмотки максимален. Для быстрого возврата трансформатора в СП состояние возможно потребуется принудительная циркуляция жидкого азота для срыва пленки из пузырьков в режиме пленочного кипения.

В целях упрощения возрастание активного сопротивления в течение КЗ можно описывать элементарной функцией, например экспоненциальной

$$R_{\rm T} = R_{\rm T.K3} (1 - e^{\frac{t}{\tau_1}}),$$

где R_{τ,κ_3} – активное сопротивление трансформатора на момент устранения КЗ; τ_1 – постоянная времени. τ_1 в основном зависит от величины тока КЗ, по-

перечного сечения провода и $\tau_1 \approx 0.05 - 0.1$ с.

Также активное сопротивление во время возврата обмотки выражается как

$$R_{\rm T} = R_{\rm T.K3} e^{\frac{-i}{\tau_2}},$$

где $R_{\rm \tiny T,R3}$ — активное сопротивление на момент отключения короткого замыкания; τ_2 — постоянная времени.

Постоянная времени τ_2 зависит от режима кипения, величины послеаварийного тока и $\tau_2 \approx 1-2$ с для случая возврата СП обмотки в СП состояние.

Величину требуемого активного сопротивления можно подобрать с достаточной степенью точности, путем частичного задействования обмотки в ограничении тока КЗ. Этого можно достичь использованием разных проводов с различными критическими параметрами, при которых токоограничивающая часть обладает достаточным сопротивлением для ограничения тока КЗ, а нетокоограничивающая часть обладает незначительным сопротивлением. Такое исполнение позволяет добиться не только требуемого значения активного сопротивления, но также быстрого возврата трансформатора в сверхпроводящее состояние во время бестоковой паузы или после отключения КЗ на отходящем присоединении. На рис. 7 показан схематичный вид токоограничивающей части сверхпроводящей обмотки.



Рис. 7. Схематичный вид обмотки трансформатора с токоограничивающей частью

При известном $R_{\rm s}(I,T)$ может быть найдена необходимая длина кабеля в ограничивающем слое обмотки

$$l_{\rm mp} = \frac{R_{\rm rpef} n_{\rm B} n_{\rm m}}{R_{\rm g}(I,T)},$$

где $R_{\rm тре6}$ – требуемое сопротивление для ограничения тока КЗ; $n_{\rm B}$ и $n_{\rm m}$ – число слоев в обмотке по высоте и ширине соответственно.

Число витков, задействованных в ограничении тока КЗ,

$$W_{\rm orp} = \frac{l_{\rm np}}{2pr_{\rm o}}$$

где $r_{\rm B}$ – средний радиус витка.

Таким образом, комбинируя параметры ВТСП проводов или сами ВТСП провода, можно обеспечить необходимую величину активного сопротивления, тем самым обеспечивая эффективное токоограничение и возврат трансформатора в сверхпроводящее состояние.

На рис. 8 приведены кривые токов КЗ для случаев использования традиционных и сверхпроводящих проводов, рассчитанные в программном комплексе АТР ЕМТР, с нелинейно изменяющимся активным сопротивлением, с характерным видом, приведенным на рис. 6.



Рис. 8. Кривые изменения токов КЗ и нагрузочного тока после устранения КЗ для случаев использования СП и обычного проводов

В начальный момент КЗ, как было сказано выше, ударный ток КЗ ограничивается эквивалентным активным сопротивлением обмотки, соответствующим начальной температуре (77 К), затем сопротивление вследствие роста температуры возрастает. Как следствие апериодическая составляющая тока КЗ в случае со сверхпроводящим трансформатором затухает быстрее, чем в случае традиционного трансформатора с медными обмотками. Оставшееся активное сопротивление после устранения КЗ ограничивает тока нагрузки. В момент возврата трансформатора устраняющееся скачком активное сопротивление вызывает всплеск тока из-за изменения конфигурации сети. Следовательно, момент возврата в сверхпроводяшее состояние должен происходить в момент времени, неблизкий к моменту автоматического повторного включения линии.

Определим возможность ограничения тока короткого замыкания с точки зрения обеспечения необходимого сопротивления. В качестве примера производился расчет СПТ мощностью 40 MBA, напряжением 115/11 кВ при разных ВТСП проводах. В табл. 1 приведены параметры ВТСП проводов второго поколения, провода SF12050, SCS12050, SCS4050 производятся фирмой Super-Power, провода 344С, 344S – фирмой American Superconductor. На данный момент эти фирмы являются лидерами в области производства ВТСП второго поколения. Приближенный расчет трансформаторов производился для приведенных проводов, и ввиду большого объема расчетов в табл. 2 приводятся только конечные результаты.

Из табл. 1 и 2 видно, что непосредственное влияние на величину активного сопротивления оказывает толщина слоя стабилизатора, и, следо-

вательно, необходимое сопротивление может быть обеспечено подбором толщины стабилизатора ВТСП провода.

Таблица 1. Параметры ВТСП проводов второго поколения [6, 7]

Тип провода	SF12050	SCS12050	SCS4050	344C	344S
Ширина/тол- щина, мм	12/0,1	12/0,1	4/0,1	4,4/0,2	4,3/0,3
Критический ток, А	250	250	90	75	80
Толщина слоя Аg, мм	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001
Толщина под- ложки, мм	0,05	0,05	0,05	0,075	0,075
Толщина стаби- лизатора, мм	0,009	0,04	0,04	0,12(Cu)	0,22(Fe)
Rнс, Ом/м	0,0736	0,00605	0,0181	0,0057	0,266

Необходимо отметить, что оставшийся импеданс трансформатора не должен нарушать устойчивую работу нагрузки после устранения КЗ.

Выводы

Ток КЗ может быть существенно ограничен с помощью сверхпроводникового трансформатора. В первом полупериоде ток КЗ ограничивается в менышей степени, по сравнению с последующими полупериодами. В последующих периодах ток КЗ ограничивается в большей степени из-за быстрого затухания апериодической составляющей и роста температуры СП провода. Возврат трансформатора в сверхпроводящее состояние после ограничения зависит от величины тока КЗ, от тока нагрузки после устранения КЗ и от параметров СП провода, в частности от толщины слоя стабилизатора. Толщина стабилизатора также оказывает влияние и на время возврата ВТСП провода в сверхпроводящее состояние.

Применение сверхпроводящих трансформаторов позволит снизить потери в электрических сетях, а использование функции ограничения в сверхпроводниковых трансформаторах позволит повысить надежность электроснабжения, улучшить технико-экономические показатели по сравнению со случаем использования отдельного устройства для ограничения тока короткого замыкания.

Таблица 2. Параметры СПТ при различных параметрах СП провода

Параметры	SF12050	SCS12050	SCS4050	344C	344S			
Число витков BH/HH	760/126	760/126	760/126	760/126	760/126			
Длина кабеля в обмотке BH/HH, м	1876,7/287,3	1876,7/287,3	1883,8/287,7	1948,3/291,3	1988,9/294,5			
Число жил в кабеле BH/HH	4/24	4/24	12/68	14/80	12/76			
<i>R</i> обмотки BH/HH	34/0,89	2,83/0,07	2,84/0,07	0,8/0,02	44/1,03			
и _{кз} в СП состоянии, %/ и _{кз} в норм. состоянии, %	4,32/20,78	4,32/4,63	5,35/5,61	6,12/6,13	6,96/25,7			
Z _т в норм. состоянии, Ом	68,7	15,3	18,5	20,3	85			
Ток КЗ, А	966,1	4334	3574	3270	780			

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А. Сверхпроводящие трансформаторы. – М.: Научтехлитиздат, 2002. – 206 с.
- Анненков Ю.М., Ивашутенко А.С. Перспективные материалы и технологии в электроизоляционной и кабельной технике. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 212 с.
- Kalsi S.S. Applications of high temperature superconductors to electric power equipment. – New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2011. – 312 p.
- Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970. 520 с.
- Merte H., Clark J.A. Boiling heat transfer data for liquid nitrogen at standard and near-zero gravity // Advanced Cryogenic Engineering. – 1962. – V. 7. – P. 546–550.
- 6. SuperPower Inc. URL: http://www.superpower-inc.com/content/wire-specification (дата обращения: 01.04.2013).
- 7. AMSC. URL: http://www.amsc.com/solutions-products/hts_wire.html (дата обращения: 01.04.2013).

Поступила 05.04.2013 г.

UDC 621.311.001.57

CURRENT LIMITATION BY TRANSFORMERS WITH HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING WINDINGS

V.Z. Manusov, N.V. Aleksandrov

Novosibirsk State Technical University

The urgency of the discussed issue is caused by the widespread use prospect of superconductivity phenomenon in power devices including transformer for losses reduction.

The main aim of the study is to investigate the influence of superconducting transformers on electromagnetic transients, to define the current limiting possibility by the superconducting transformers, to reveal the features of current limitation using superconducting transformers.

The methods used in the study: calculations using the software package MatLab, ATP EMTP, the use of the superconductivity theory, mathematical modeling in power.

The results: the mathematical model of electromagnetic and thermal transients during short-circuit current limiting is developed; the processes of superconducting transformer transition in the normal (nonsuperconducting) state and recovery to the superconducting state after the fault current clearance is simulated; the criterion of superconducting transformer recovery in the superconducting state after fault clearance under load is defined; the possibility of short-circuit current limiting from the viewpoint of providing the required resistance is determined.

Key words:

Superconducting transformers, power systems, transients, recovery to superconducting state, mathematical modeling in electric power industry.

REFERENCES

- Lutidze Sh.I., Dzhafarov E.A. Sverkhprovodyashchie transformatory [Superconducting transformers]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., 2002. 206 p.
- Annenkov Yu.M., Ivashutenko A.S. Perspektivnye materialy I tekhnologii v elektroizolyatsionnoi i kabelnoi tekhnike [Prospective materials and technologies in electrical insulation and cable technology]. Tomsk, TPU Publ., 2011. 212 p.
- Kalsi S.S. Applications of high temperature superconductors to electric power equipment. New Jersey, John Wiley & Sons Inc, 2011. 312 p.
- 4. Ulyanov S.A. Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh [Electromagnetic transients in power systems]. Moscow, Energiya Publ., 1970. 520 p.
- Merte H., Clark J.A. Boiling heat transfer data for liquid nitrogen at standard and near-zero gravity. Advanced Cryogenic Engineering, 1962. V. 7, pp. 546-550.
- SuperPower Inc. Available at: http://www.superpowerinc.com/content/wire-specification (accessed 1 April 2013).
- AMSC. Available at: http://www.amsc.com/solutions-products/hts_wire.html (accessed 1 April 2013).