

Analysis of the Processes of Short-Currents Limiting by Transformer with High-Temperature Superconducting Windings

Manusov V.Z., Pavlyuchenko D.A., Ahyoev J.S.

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. An important advantage of transformers with high-temperature superconducting winding is their ability to limit the short-circuit currents. The article discusses a physico-mathematical model that analyses transient processes at short-circuit currents in electrical networks containing transformers with a high-temperature superconducting winding. One of the main ideas and objectives of this work is to investigate the process of short-circuit currents limiting by means of a transformer with a high-temperature superconductor winding, which makes it possible to combine two series-connected elements in one device: transformer and a reactor. The effectiveness of this method is due to the fact that when the short-circuit currents exceed the critical value of the temperature of the superconductor winding, it goes to the normal state with high winding resistance for short-circuit currents. It is important to know when a superconductor should go over to a normal state with the loss of superconductivity. For this purpose, a program was developed to determine the amount of heat generated by a short-circuit current flowing before it is disconnected. For a transformer with high-temperature superconducting winding with a capacity of 40 MVA, a short circuit must be eliminated after 0.1 seconds, without switching off the transformer. To limit the short-circuit current; it is intended to use a hybrid winding. The performed assessment showed that the return of the winding to the superconducting state, first, depends on the ratio of the short-circuit currents to the operating current. This is the criterion for the return/non-return to the superconducting state.

Keywords: transformer, superconductor winding, energy efficiency, reactor, pre-emergency mode, power loss, limitation, short-circuit currents.

Analiza proceselor de limitare a curenților de scurtcircuit ale transformatorului cu înfășurări supraconductive de temperatură înaltă

Manusov V.Z., Pavliucenco D.A., Ahyoev J.S.

Universitatea Națională Tehnică de Stat din Novosibirsk
Novosibirsk Federația Rusă

Rezumat. Un avantaj semnificativ al transformatoarelor cu înfășurările supraconductive la temperaturi înalte constă în capacitatea lor de a limita curenții de scurtcircuit în regimurile de avarie din rețelele electrice. În lucrare se prezintă modelul fizico-mătematic al transformatorului cu înfășurări supraconductive apt pentru analiza proceselor tranzitorii în regimuri de scurtcircuit ale rețelelor electrice. Ideea și scopul fundamental al acestei lucrări constă în cercetarea procesului de limitare a curentului de scurtcircuit de către înfășurarea transformatorului cu supraconductivitate. Aceasta permite cumularea într-o singură instalație a două componente funcționale – a transformatorului și reactorului. Eficiența soluției propuse constă în faptul, că sub acțiunea curentului de scurtcircuit are loc creșterea temperaturii și depășirea valorii critice a temperaturii pentru zona de supraconductivitate. Ca rezultat, rezistența activă a înfășurării transformatorului crește, ceea ce conduce la limitarea curentului de scurtcircuit. Pentru acest regim este important de cunoscut în ce moment se modifică starea de la supraconductivitate la starea normală a înfășurării. Cu acest scop a fost elaborat un soft pentru a calcula cantitatea de căldură care se emană la scurgerea curentului de scurtcircuit prin înfășurare până la momentul deconectării circuitului avariat. În cazul transformatoarelor cu înfășurarea în stare de supraconductivitate cu putere 40 MVA regimul de scurtcircuit trebuie exclus peste 0.1 s în caz că transformatorul nu se deconectează de la rețea. Pentru a limita curentul de scurtcircuit se preconizează utilizarea unei înfășurări hibride. Investigațiile realizate au indicat la faptul, că readucerea înfășurării transformatorului în starea de supraconductivitate depinde în primul rând de valoarea raportului curenților de scurtcircuit și a curentului de lucru. Acest raport se prezintă ca criteriu de revenire/nerevenire a înfășurării la starea de supraconductivitate.

Cuvinte-cheie: transformator, înfășurare cu supraconductivitate, reactor, eficiența energetică, condițiile de pre-defect, pierderea de putere, limitarea curenților de scurtcircuit.

Анализ процессов ограничения токов короткого замыкания трансформатором с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками
Манусов В.З., Павлюченко Д.А., Ахьёев Дж.С.

Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. Важным преимуществом трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводниковой обмоткой является способность ограничения ими тока короткого замыкания в аварийных режимах сети. В работе предложена физико-математическая модель для анализа переходных процессов при токах короткого замыкания в электрических сетях, содержащих трансформаторы с высокотемпературной сверхпроводниковой обмоткой. Одной из главных идей и целей настоящей работы является исследование процесса ограничения тока короткого замыкания при помощи трансформатора с высокотемпературной сверхпроводниковой обмоткой, что позволяет совместить в одном устройстве два последовательно включенных элемента: трансформатор и реактор. Эффективность такого способа ограничения токов короткого замыкания обусловлена тем, что при токах короткого замыкания превышает критическое значение температуры сверхпроводниковой обмотки, и она переходит в обычное состояние с высоким сопротивлением обмотки для токов короткого замыкания. Важно знать, когда сверхпроводник переходит в нормальное состояние при утрате сверхпроводимости. Для этой цели была разработана программа по определению количества тепла, выделяемого при протекании тока короткого замыкания до его отключения. Для трансформатора с высокотемпературной сверхпроводниковой обмоткой мощностью 40 МВА короткое замыкание должно быть устранено через 0,1 секунды без отключения трансформатора. Для ограничения тока короткого замыкания предполагается использовать гибридную обмотку. Выполненные исследования показали, что возвращение обмотки в сверхпроводящее состояние, прежде всего, зависит от соотношения токов короткого замыкания и рабочего тока. Это является критерием возврата/невозврата в сверхпроводящее состояние.

Ключевые слова: трансформатор, сверхпроводниковая обмотка, энергоэффективность, реактор, предаварийный режим, потери мощности, ограничение, токи короткого замыкания.

Введение

Одним из преимуществ применения ВТСП трансформаторов является возможность ограничения величины тока короткого замыкания (КЗ) в аварийном режиме. Ниже рассмотрена физико-математическая возможность ограничения токов короткого замыкания, в электрических сетях, содержащих ВТСП трансформаторы [1,2].

При превышении протекающего по обмотке ВТСП трансформатора, критического тока $I_k(T)$, который определяется типом провода, величиной радиальной составляющей электромагнитного поля, величиной протекающего тока и температурой, ВТСП провод может из сверхпроводящего состояния в нормальное состояние, соответствующее нормальной температуре. При этом сопротивление сверхпроводящего слоя в проводе значительно увеличивается, и весь протекающий ток вытесняется в другие слои ВТСП провода. Так как сечение этих слоев недостаточно для пропускания тока, то сопротивление этого сечения значительно увеличивается, что приводит к ограничению тока КЗ. Основными параметрами

токоограничивающей обмотки являются величина ограничиваемого тока, длительность тока КЗ, в течение которого не происходит разрушения обмотки и допустимое увеличение температуры.

Рассмотрим ограничение токов КЗ с помощью трансформаторов с ВТСП обмотками, при следующих допущениях [2]: ВТСП провод переходит из сверхпроводящего состояния в нормальное состояние равномерно по всей длине, все элементы сети, кроме ограничивающего сопротивления являются линейными.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Высокотемпературные сверхпроводники являются неидеальными сверхпроводниками второго рода, т.е. переход из сверхпроводящего состояния в нормальное состояние происходит не сразу, а имеется промежуточное смешанное состояние, при котором магнитное поле еще не полностью проникает в тело сверхпроводника (сверхпроводник является диамагнетиком, не пропускает внутрь магнитное поле). Смешанное состояние существует в пределах от первого критического тока I_{k1} до второго

критического тока I_{K2} . В этом состоянии ток одновременно протекает как по сверхпроводящему слою проводника, так и по несверхпроводящим слоям проводника [3-5]. Тогда активное сопротивление ВТСП провода определяется эквивалентным сопротивлением сверхпроводящего слоя и несверхпроводящих слоев как параллельных линий.

$$R_{\Sigma}(I, T) = \frac{R_{НС}(T) * R_{СП}(I, T)}{R_{НС}(T) + R_{СП}(I, T)}, \quad (1)$$

где $R_{НС}$ – сопротивление несверхпроводящих слоев проводника обмотки;

$R_{СП}$ – сопротивление сверхпроводящего слоя проводника обмотки;

I – рабочий ток, протекающий по проводнику;

T – температура провода.

Сопротивление сверхпроводящего слоя проводника может быть определено из вольт-амперной характеристики ВТСП материала.

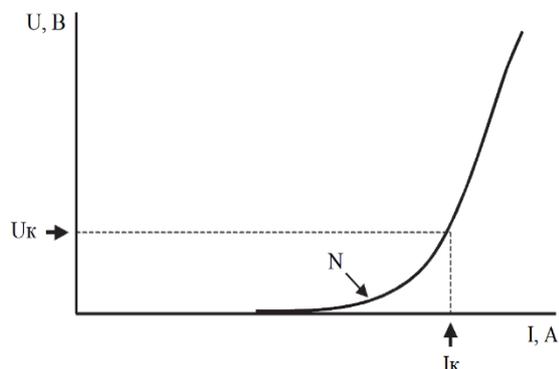


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика ВТСП

$$R_{СП}(I, T) = 10^{-6} \left(\frac{I}{I_K(T)} \right)^n * \frac{1}{I}, \quad (2)$$

$$I_K(T) = - \frac{I_{K0}}{0,1848} \ln \left(\frac{T}{77} \right), \quad (3)$$

где n – показатель степени вольт-амперной характеристики ВТСП провода, определяющий качество сверхпроводника;

$I_K(T)$ – критический ток ВТСП провода при температуре T (при температурах выше 90 К $I_K(T)$ равно нулю);

I_{K0} – критический ток в собственном поле при 77 К.

Активное сопротивление несверхпроводящих слоев определяется как эквивалентное сопротивление всех слоев, имеющих параллельное соединение в ВТСП ленте обмотки трансформатора.

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{1/R_{bc}(T) + 1/R_{Ag}(T) + 1/R_M(T) + 1/R_{хаст}(T)}, \quad (4)$$

где $R_{bc}(T)$ – сопротивление буферных слоев;

$R_{Ag}(T)$ – сопротивление слоя серебра;

$R_M(T)$ – сопротивление медного слоя;

$R_{хаст}(T)$ – сопротивление хастеллоя.

На рисунке 2 приведены зависимости удельных сопротивлений серебра, меди, стали и хастеллоя от температуры по Кельвину. При этом в расчете удельных сопротивлений несверхпроводящего слоя можно допустить линейную зависимость на участке температур, которая ниже 100К. В этом случае удельное сопротивление слоя можно рассчитать по следующей формуле

$$R(T) = \frac{\rho(T)}{ab}, \quad (5)$$

где ρ – удельное сопротивление слоя с учетом температурного коэффициента электрического сопротивления;

a и b – ширина, и толщина соответствующего слоя проводника.

Для проведения расчетов с ВТСП трансформаторами очень важно знать, когда сверхпроводник, на основе которого выполнена сверхпроводниковая обмотка, переходит в обычное (нормальное) состояние. Это возможно при длительно не отключенных токах КЗ, что ведет к избыточному нагреву проводников обмотки ВТСП трансформатора и потере им сверхпроводящего состояния и утрате достоинств и преимуществ сверхпроводимости.

Принято считать, что ВТСП проводник переходит в нормальное состояние в случае, когда на проводе длиной один сантиметр возникает напряжение один микровольт.

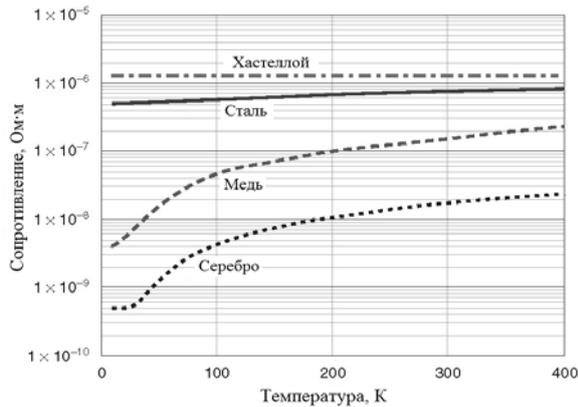


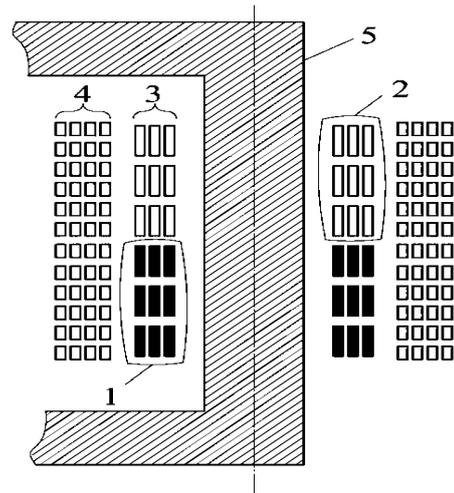
Рис. 2. Зависимость сопротивлений металлов от температуры

II. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Для улучшения условий возвращения проводника в сверхпроводящее состояние во время бестоковой паузы или под нагрузкой необходимо определить количества тепла выделившегося во время тока КЗ до его отключения. С этой целью была разработана программа в системе MATLAB в предположении, что КЗ происходит на отходящем присоединении ВТСП трансформатора мощностью 40 МВА, которое устраняется через 0.1 секунды, не отключая трансформаторы.

В работе для ограничения тока КЗ предлагается использовать гибридную обмотку, в которой в ограничении участвует только часть витков обмотки. Этого можно достичь использованием различных проводов с различными параметрами, при которых нетокоограничивающая часть в нормальном состоянии обладает незначительным сопротивлением, а токоограничивающая часть в нормальном состоянии обладает существенным сопротивлением для ограничения тока КЗ.

Такое конструктивное исполнение обмотки ВТСП трансформатора позволяет объединить два элемента электрической сети, обычно включенных последовательно в одно устройство, с функцией трансформации и ограничения токов КЗ.



1 – токоограничивающую часть обмотки, 2 – трансформаторная часть обмотки, 3 – обмотка низкого напряжения, 4 – обмотка высокого напряжения, 5 – магнитопровод

Рис. 3. Схематичный вид СП трансформатора

При известном $R_3(I, T)$ может быть найдена длина кабеля в ограничивающем слое обмотки.

$$L_{ПП} = \frac{R_{Огр} n_B n_{Ш}}{R_3(I, T)}, \quad (6)$$

где $R_{Огр}$ – требуемое сопротивление для ограничения тока КЗ;

n_B и $n_{Ш}$ – число слоев в обмотке по высоте и ширине соответственно.

Число витков обмотки, задействованных в ограничении тока КЗ

$$w = \frac{L_{ПП}}{2\pi r_B}, \quad (7)$$

где r_B – средний радиус витка.

Для расчета переходного процесса при КЗ с участием ВТСП трансформатора выбрана следующая схема замещения (рис. 4).

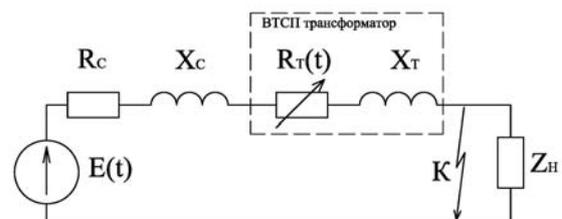


Рис. 4. Схема замещения для расчета переходного процесса

Переходный процесс для данной схемы при возникновении КЗ описывается следующим дифференциальным уравнением [6]

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = (L_C + L_T) \frac{di(t)}{dt} + i(t)(R_C + R_T(T)) \quad (8)$$

где R_C и L_C – активное сопротивление и индуктивность системы;

R_T и L_T – активное сопротивление и индуктивность трансформатора.

Короткое замыкание моделируется замыканием ключа, шунтирующим нагрузку. Решение уравнения (8) имеет следующий вид

$$i(t) = \frac{U_m}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \phi_K) + \left[\frac{U_m}{Z_K} \sin(\alpha - \phi_H) - \frac{U_m}{Z_K} \sin(\alpha - \phi_K) \right] \cdot e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (9)$$

где Z_K – полное сопротивление короткозамкнутого участка.

Кривые изменения тока КЗ без его ограничения и с ограничением приведены на рисунке 5.

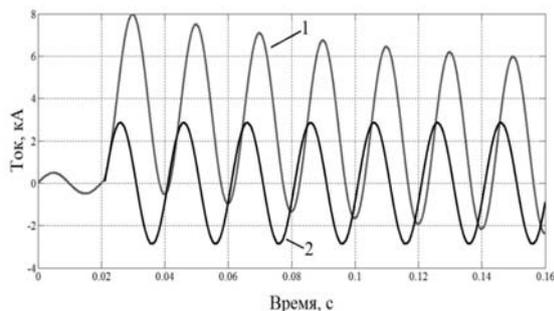


Рис. 5. Кривые изменения тока КЗ без ограничения (1) и с ограничением (2)

III. КРИТЕРИЙ ВОЗВРАТА ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА В СВЕРХПРОВОДЯЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПОСЛЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Наиболее существенным моментом при ограничении тока КЗ в электрической сети является определение времени возвращения обмотки ВТСП трансформатора в исходное состояние сверхпроводника. Для того, чтобы

определить это время необходимо вычислить количество выделяемого тепла в проводнике за время бестоковой паузы автоматического повторного включения, которая возникает до того момента когда ток КЗ будет отключен. Выделившееся количество тепла за время КЗ равно Джоулевым потерям за интервал времени dt .

$$Q(I, T) = \int_0^{t_1} I^2 R(T) dt \quad (10)$$

Повышение температуры провода обмотки ВТСП трансформатора за счет тепловыделения можно определить по следующему выражению [2,7,8]

$$C \frac{dT(I, T)}{dt} = Q(I, T) - Aq(T) \quad (11)$$

где C – полная теплоемкость провода;

A – площадь охлаждения, определяемая поверхностью обмотки;

q – плотность теплового потока, переходящего в жидкий азот с поверхности обмотки.

$$C = V_{ВТСП} c_{ВТСП}(T) + V_{Хаст} c_{Хаст}(T) + V_{БС} c_{БС}(T) + V_{Ag} c_{Ag}(T) + V_M c_M(T) \quad (12)$$

где $V_{ВТСП}$ и $c_{ВТСП}$ – объем ВТСП и удельная теплоемкость ВТСП;

$V_{Хаст}$ и $c_{Хаст}$ – объем хастеллоя и удельная теплоемкость хастеллоя;

$V_{БС}$ и $c_{БС}$ – объем буферного слоя, и его удельная теплоемкость;

V_{Ag} и c_{Ag} – объем серебра, и его удельная теплоемкость;

V_M и c_M – объем меди, и его удельная теплоемкость.

Уравнения (10) – (12) необходимо решать как совместную систему. В итоге будем иметь нестационарное уравнение теплопроводности, которое описывает изменение температуры токоограничивающей части обмотки в зависимости от протекающего по обмотке тока КЗ и времени до отключения тока КЗ релейной защитой электроэнергетической системы

$$T(t) = T_0 + \Delta T(t) = T_0 + \frac{Q(I, T) - W}{C(T)}, \quad (13)$$

где T_0 – начальная температура жидкого азота (77K).

Таким образом, может быть сформирована общая математическая модель, которая позволяет определить количества тепла и нагрев обмотки с целью определения требований к ограничению тока КЗ с помощью трансформатора с ВТСП обмотками. Критерием является решение нестационарного уравнения теплопроводности (13) и дифференциального уравнения изменения тока короткого замыкания (8)

$$\begin{cases} R_T = 0, & \text{при } I < I_{K1} \\ R_T = \frac{R_{HC}(T) \cdot R_{СП}(I, T)}{R_{HC}(T) + R_{СП}(I, T)}, & \text{при } I_{K1} < I < I_{K2} \\ R_T = R_{HC}(T), & \text{при } I > I_{K2} \\ R_T = f(T), & \text{после отключения КЗ, при } I = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Выполненные исследования показали, что возвращение обмотки в сверхпроводящее состояние при отключенном токе КЗ прежде всего зависит от соотношения величин тока КЗ и рабочего тока нагрузки. Иначе говоря, соотношение тока КЗ и рабочего тока должно быть таким, чтобы количество тепла во время КЗ не превысило критическое значение. Возможны и другие подходы. При превышении этого отношения для возврата обмотки в сверхпроводящее состояние необходимо отключать трансформатор целиком (рис. 6).

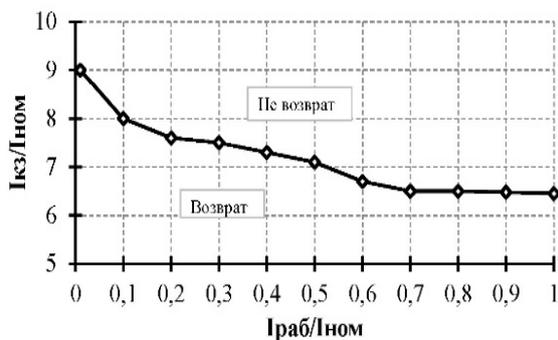


Рис. 6. Критерий возврата обмотки в ВТСП состояние после устранения КЗ

IV. ПРЕИМУЩЕСТВА ТРАНСФОРМАТОРА С ВТСП ОБМОТКОЙ

Резюмируя сказанное, можно оценить некоторые преимущества технологического и экологического порядка ВТСП трансформаторов по сравнению с параметрами традиционных трансформаторов. Они заключаются в следующем:

- снижение потерь активной мощности в обмотках трансформатора на 90% при номинальном токе нагрузки, что значительно увеличивает КПД трансформатора более чем на 99%, что существенно повышает энергоэффективность использования трансформатора;
- уменьшение габаритов трансформатора и его веса до 40%. Вследствие этого возможно применение ВТСП трансформаторов в уже существующих габаритах подстанций без их конструктивного изменения со значительным увеличением трансформируемой мощности трансформаторов;
- ограничение токов короткого замыкания, что позволяет в аварийных режимах облегчить коммутационные процессы в электрооборудовании сети.
- большая перегрузочная способность без повреждения изоляции и старения трансформатора;
- уменьшение уровня шума;
- пожаробезопасность и экологичность.

Выводы

1. Показано, что существует возможность ограничения тока короткого замыкания в электрической сети с помощью трансформатора с ВТСП обмотками, в том числе с возможной дополнительной обмоткой для этой цели. При этом в первый полупериод ограничение тока короткого замыкания не так существенно, как в последующие полупериоды за ним. Это обусловлено более быстрым затуханием аperiodической составляющей тока короткого замыкания, чем в традиционных трансформаторах с обмоткой из медного провода, а также увеличением температуры сверхпроводящей обмотки ВТСП трансформатора;

2. Возвращение в сверхпроводящее состояние обмотки ВТСП трансформатора в

значительной степени зависит от соотношения величин тока короткого замыкания и рабочего тока, а также от толщины слоя стабилизатора в сверхпроводниковом проводе;

3. Возможность ограничения различных видов токов короткого замыкания с помощью ВТСП трансформатора за счет существенного увеличения сопротивления обмоток при потере сверхпроводящего состояния позволяет отказаться от продольно включенных реакторов с высоким индуктивным и активным сопротивлением. При этом снижаются потери активной мощности в электрической сети, повышается надежность, и улучшаются технико-экономические показатели систем электроснабжения по сравнению с отдельно установленными обычными реакторами для ограничения токов короткого замыкания.

Литература (References)

- [1] Lutidze Sh.I., Dzhafarov E.A. *Sverkhprovodiashchie transformatory* [Superconducting transformers]. Moscow, Nauchtehlitizdat Publ., 2002, 206 p.
- [2] Manusov, V.Z., Aleksandrov N.V. Ogranichenie tokov korotkogo замыkaniia s pomoshch'iu transformatorov s vysokotemperaturnymi sverkhprovodiashchimi obmotkami [The limiting of short-circuit currents using transformers with high temperature superconducting windings]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, Vol. 323, no. 4, pp. 100-105. (In Russian).
- [3] Kozulin, A., Vinogradov A. Vysokotemperaturnye sverkhprovodnikovye transformatory – novoe pokolenie podstantsionnogo oborudovaniia [The high temperature superconducting transformers – a new generation of substation equipment]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont – Electrical equipment: operation and repair*, 2008, no. 12, pp. 7-9. (In Russian).
- [4] Annenkov Iu.M., Ivashutenko A.S. *Perspektivnye materialy i tekhnologii v elektroizoliatsionnoi i kabel'noi tekhnike* [The perspective materials and technologies in electrical insulation and cable technology]. Tomsk, TPU Publ., 2011, 212 p.
- [5] Kalsi S.S. [Applications of high temperature superconductors to electric power equipment]. New Jersey, John Wiley & Sons Inc., 2011, 312 p.
- [6] Ul'ianov S.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [The electromagnetic transients in electrical systems]. Moscow, Energiia Publ., 1970, 520 p.
- [7] Merte H., Clark J.A. [Boiling heat transfer data for liquid nitrogen at standard and near-zero gravity]. *Advanced Cryogenic Engineering*, 1962, Vol. 7, pp. 546-550.
- [8] [Super Power Inc]. Available at: <http://www.superpower-inc.com/content/wire-specification> (accessed 01.04.2017).

Сведения об авторах.



Манусов Вадим Зиновьевич. Новосибирский государственный технический университет, кафедра системы электроснабжения предприятий, д-р технических наук, профессор. Основное направление исследований: применение методов искусственного интеллекта для планирования и оптимизации режимов электроэнергетических систем.
E-mail: Manusov36@mail.ru



Павлюченко Дмитрий Анатольевич. Новосибирский государственный технический университет, кафедра системы электроснабжения предприятий, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой. Основное направление исследований: повышение энергоэффективности, качества функционирования и развития систем электроснабжения.
E-mail: d_pavlyuc@mail.ru



Ахъев Джавод Саламшоевич. Новосибирский государственный технический университет, кафедра системы электроснабжения предприятий, аспирант. Основное направление исследований: мониторинг и диагностика текущего технического состояния высоковольтного электрооборудования на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики.
E-mail: javod_66@mail.ru