

Mathematical Model of Electromagnetic Transient for Superconducting Short-Circuit Current Limiter

Manusov V.Z., Pavlyuchenko D.A., Miheev P.A.
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. At present on the basis of significant achievements in the field of high-temperature superconductivity more and more applications of this phenomenon appear in the electric power industry, in particular superconducting current limiters. To investigate current limitation process in electrical networks containing superconducting current limiter it is extremely important to evaluate the electrodynamic and thermal effects of the short-circuit current at any time. The existing superconducting current limiters mathematical models don't consider the inertia of the device transition from the superconducting state to the conducting one. It is necessary to develop the mathematical model for the electromagnetic transient process that can adequately simulate the superconducting current limiter at any time point, taking into account its parameters in the normal and emergency modes and also to describe these parameters dynamics during the process of current limitation. The proposed mathematical model allows to simulate the changing inertia of the superconducting current limiter inductive reactance, to analytically describe the electromagnetic transient process, and also to evaluate the electrodynamic and thermal effects of short-circuit current in networks with superconducting current limiter. The important feature of the mathematical model is the consideration of the increase rate (inertia) of the inductive reactance with respect to the external network. Also the model allows taking into account the initial and final values of the inductance of a superconducting current limiter before and after the end of the electromagnetic transient respectively.

Keywords: high-temperature superconductivity, superconducting inductive current limiter, electromagnetic transient, short circuit currents.

Modelul matematic al procesului electromagnetic tranzitoriu pentru un limitator supraconductor a curentului de scurtcircuit

Manusov V.Z., Pavlyuchenko D.A., Miheev P.A.
Universitatea Tehnică de Stat din Novosibirsk
Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. În prezent, pe baza realizărilor semnificative în domeniul supraconductibilității la temperaturi ridicate apar tot mai multe aplicații ale acestui fenomen în industria energetică, în special sub formă de limitatoare supraconductoare de curent. Pentru a studia procesul de limitare longitudinală a curentului în rețelele electrice care conțin limitatoare supraconductoare de curent, este important să se estimeze efectele electrodinamice și termice ale curentului de scurtcircuit la un moment dat. Actualele modele matematice ale limitatoarelor supraconductoare nu reflectă inerția trecerii dispozitivului de la starea supraconductoare la o stare de conducție. Pentru această problemă, este necesar să se creeze un model matematic pentru calculul procesului electromagnetic tranzitoriu capabil de a simula în mod corespunzător dispozitivul la un moment arbitrar de timp, având în vedere parametrii săi în condiții normale și de avarie, precum și pentru a descrie dinamica modificărilor acestor parametri în timpul procesului de limitare a curentului. Modelul matematic propus poate simula inerția modificării rezistenței dispozitivului supraconductor de limitare a curentului, pentru a descrie în mod analitic fenomenele tranzitorii electromagnetice, precum și pentru a evalua efectele termice și electrodinamice ale curentului de scurtcircuit în prezența unui limitator de curent supraconductor. O trăsătură distinctivă a modelului matematic constă în luarea la evidență a vitezei de creștere (inerțialitatea) a rezistenței inductive în raport cu rețeaua externă, la trecerea de la starea supraconductoare a limitatorului de curent în stare de conductivitate naturală. De asemenea, modelul permite să se ia în considerare valoarea marginală a inductanței limitatorului supraconductor până la demararea și după finalizarea procesului electromagnetic tranzitoriu.

Cuvinte-cheie: supraconductibilitate de temperatură ridicată, limitator de curent supraconductor de tip inductiv, proces electromagnetic tranzitoriu, curenți de scurtcircuit.

Математическая модель электромагнитного переходного процесса для сверхпроводникового ограничителя тока короткого замыкания

Манусов В.З., Павлюченко Д.А., Михеев П.А.

Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время на основе значительных достижений в области высокотемпературной сверхпроводимости появляется всё больше применений данного явления в электроэнергетике, в частности в виде сверхпроводниковых токоограничителей. Для исследования процесса продольного токоограничения в электрических сетях, содержащих сверхпроводниковый токоограничитель, крайне важным является оценка электродинамического и теплового воздействия тока короткого замыкания в произвольный момент времени. Существующие в настоящее время математические модели сверхпроводниковых ограничителей не отражают инерционности перехода устройства из сверхпроводящего состояния в проводящее. Для поставленной задачи необходимо создать математическую модель для расчёта электромагнитного переходного процесса, способную адекватно моделировать устройство в произвольный момент времени, учитывая его параметры в нормальном и аварийном режимах, а также, описывать динамику изменений этих параметров в ходе процесса токоограничения. Предложенная математическая модель позволяет моделировать инерционность изменения сопротивления устройства сверхпроводникового токоограничителя, аналитически описывать электромагнитный переходный процесс, а также оценить электродинамическое и тепловое воздействие тока короткого замыкания при наличии сверхпроводникового токоограничителя. Отличительной особенностью математической модели является учет скорости нарастания (инерционности) индуктивного сопротивления по отношению к внешней сети при переходе из сверхпроводящего состояния токоограничителя в естественное проводящее. Также модель позволяет учесть начальную и конечную величины индуктивности сверхпроводникового токоограничителя до начала и после окончания электромагнитного переходного процесса соответственно.

Ключевые слова: высокотемпературная сверхпроводимость, сверхпроводниковый токоограничитель индуктивного типа, электромагнитный переходный процесс, токи короткого замыкания.

Введение

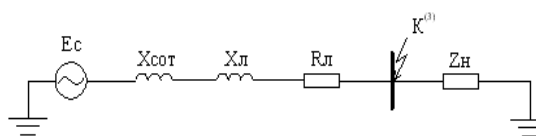
На протяжении последних нескольких десятилетий достаточно интенсивно ведутся работы по разработке и внедрению в электрические сети сверхпроводникового оборудования: генераторов, трансформаторов, кабелей, токоограничителей [1-6]. В настоящее время ведутся разработки нескольких типов сверхпроводниковых токоограничителей (СОТ), основной областью перспективного применения которых являются высоковольтные электрические сети номинальным напряжением до 35 кВ [7,8].

Наиболее эффективным с точки зрения токоограничивающего эффекта является применение СОТ индуктивного типа. СОТ имеют способность изменять в течение нескольких миллисекунд своё внешнее сопротивление. Электромагнитный процесс в сети с СОТ будет иметь свои особенности, обусловленные стремительным изменением одного из её пассивных реактивных элементов. Ранее принималось допущение о мгновенном изменении индуктивности СОТ. Необходима математическая модель данного процесса, позволяющая учитывать электрическую инерционность самого СОТ. Применение данной модели в расчётах позволяет оценить

тепловое воздействие тока короткого замыкания (КЗ) в сети с СОТ, которое является одним из условий выбора электрических элементов, таких как выключатель, воздушная и кабельная линии (КЛ) электропередачи и других.

I. ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим схему, содержащую СОТ.



E_C – электродвижущая сила (ЭДС) источника напряжения; $X_{СОТ}$ – индуктивное сопротивление СОТ; $X_{л}$ – индуктивное сопротивление КЛ; $R_{л}$ – активное сопротивление КЛ; $Z_{н}$ – комплексное сопротивление нагрузки потребителя.

Рис. 1. Однолинейная схема для построения математической модели.

По второму закону Кирхгофа имеем:

$$E(t) = \frac{d\psi_{СОТ}(t)}{dt} + \frac{d\psi_{к}(t)}{dt} + i(t) \cdot R_{к}, \quad (1)$$

где ψ_{COT} и ψ_K – потокосцепления COT и КЛ соответственно; R_K – активное сопротивление КЛ.

Потокасцепление кабеля с учётом того, что его индуктивность не зависит от протекающего тока, будет зависеть только от тока:

$$\psi_K(t) = L_K(t) \cdot i(t) = L_K \cdot i(t). \quad (2)$$

Потокасцепление же COT будет зависеть как от изменяющейся индуктивности, так и от тока:

$$\psi_{COT}(t) = L_{COT}(t) \cdot i(t). \quad (3)$$

С учётом уравнений (2) и (3) на основе выражения (1) получаем дифференциальное уравнение переходного процесса:

$$E(t) = \frac{d[L_{COT}(t) \cdot i(t)]}{dt} + \frac{d[L_K(t) \cdot i(t)]}{dt} + i(t) \cdot R_K \quad (4)$$

С учётом свойства производной произведения двух функций преобразуем дифференциальное уравнение:

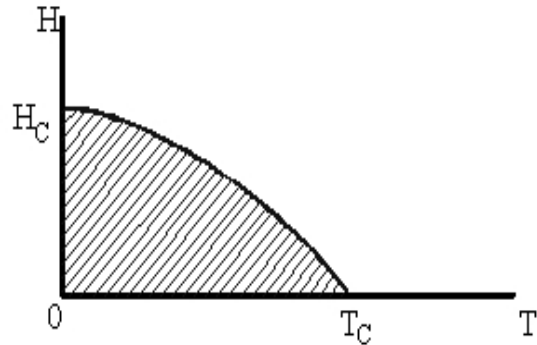
$$E(t) = \frac{d[L_{COT}(t)]}{dt} \cdot i(t) + L_{COT}(t) \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + \frac{d[L_K(t)]}{dt} \cdot i(t) + L_K(t) \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + i(t) \cdot R_K \quad (5)$$

Исходя из физической природы индуктивности, а также в виду того, что индуктивность кабеля не зависит от времени выражение (5) несколько упрощается:

$$E(t) = \frac{d[L_{COT}(t)]}{dt} \cdot i(t) + L_{COT}(t) \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + L_K \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + i(t) \cdot R_K \quad (6)$$

Как известно, для того, чтобы нарушить сверхпроводящее состояние необходимо либо увеличить температуру, либо величину воз-

действующего магнитного поля. В быстродействующих COT используется как раз увеличение магнитного поля в момент КЗ в сети.



H_c – критическая сила магнитного поля; T_c – критическая температура.

Рис. 2. Область существования сверхпроводимости.

При приближённых расчётах ранее было принято полагать, что индуктивность COT изменяется мгновенно (без инерции) как это показано на рис. 4 с помощью применения функции Хевисайда, однако, это не позволяло учитывать влияние COT на переходный процесс при токоограничении.

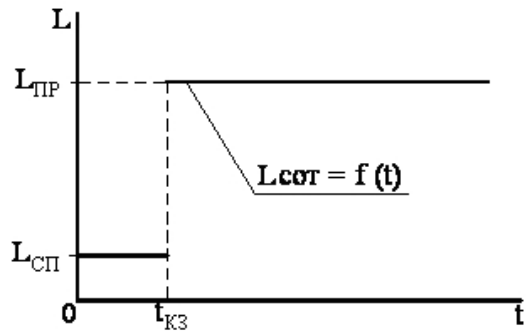


Рис. 4. Упрощённое (безинерционное) изменение индуктивности COT в момент короткого замыкания.

Что более важно, подобный подход не допускает математического описания электромагнитного переходного процесса в форме одного аналитического выражения (из-за невозможности дифференцировать скачкообразную функцию), а значит, не позволяет рассчитывать мгновенные значения тока и напряжения, результирующие величины электродинамического и теплового воздействий тока КЗ на электрооборудование, время отключения с помощью выключателя ограниченного COT аварийного тока.

В работах исследователей в области применения сверхпроводниковых токоограничителях того или иного типа [8-11] приводятся различные модели электрических параметров данных устройств. Во всех работах температура сверхпроводящего элемента в момент короткого замыкания начинает плавно и монотонно возрастать по зависимости близкой к экспоненциальной, с температурой возрастает и внешнее сопротивление СОР. Анализ зависимостей внешнего сопротивления СОР позволяет сделать вывод о целесообразности введения адекватной физическому процессу монотонной легко интегрируемой и дифференцируемой функции. В качестве такой функции может быть применена экспонента, как это изображено на рис. 5. Экспоненциальная функция выбрана как соответствующая физике процесса, а также позволяющая ввести понятие «постоянной времени реагирования» СОР.

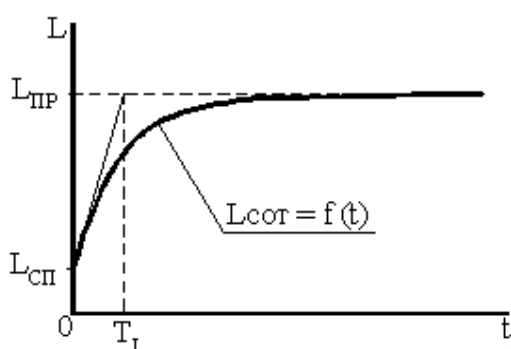


Рис. 5. Математическая модель изменения индуктивности СОР при КЗ в сети.

Тогда изменение индуктивности СОР как функции времени:

$$L_{\text{СОР}}(t) = L_{\text{ПР}} + (L_{\text{СП}} - L_{\text{ПР}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}}, \quad (7)$$

где $L_{\text{СП}}$ – индуктивность СОР в сверхпроводящем состоянии; $L_{\text{ПР}}$ – индуктивность СОР в проводящем состоянии; T_L – постоянная времени реагирования сверхпроводника.

Как следствие, возможное с математической точки зрения применение метода припасовывания для решения задачи отыскания параметров электромагнитного переходного процесса при учёте индуктивности СОР изображённой на рис. 4 функцией приведёт к погрешности в определении величин параметров переходного процесса из-за недоучёта физических особенностей изменения индук-

тивности СОР. В это же время решение поставленной задачи даже с учётом изображённой на рис. 5 модели изменения индуктивности СОР численными методами не является достаточно наглядным с точки зрения влияния динамики изменения индуктивности СОР на электромагнитный переходный процесс. Как следствие, в качестве окончательной модели, описывающей изменение индуктивности СОР, принимается экспоненциальная модель, а отыскание составляющих переходного процесса будет производиться решением дифференциального уравнения.

С учётом выражения (7) для индуктивности СОР дифференциальное уравнение переходного процесса приобретает вид:

$$E(t) = \frac{d \left[L_{\text{ПР}} + (L_{\text{СП}} - L_{\text{ПР}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right]}{dt} \cdot i(t) + \left[L_{\text{ПР}} + (L_{\text{СП}} - L_{\text{ПР}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right] \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + L_K \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + i(t) \cdot R_K \quad (8)$$

Учитывая подобные слагаемые относительно тока и его производной, получим:

$$E(t) = \left[L_K + L_{\text{ПР}} + (L_{\text{СП}} - L_{\text{ПР}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right] \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} - \left[\frac{(L_{\text{СП}} - L_{\text{ПР}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}}}{T_L} - R_K \right] \cdot i(t) \quad (9)$$

II. РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Уравнение (10) является неоднородным линейным дифференциальным уравнением.

В общем случае неоднородное линейное дифференциальное уравнение может быть записано в виде:

$$\frac{dy}{dx} + P(x) \cdot y = Q(x) \quad (10)$$

Решение такого уравнения находится в виде [12]:

$$y = e^{-\int P(x)dx} \cdot \left[\int Q(x) \cdot e^{\int P(x)dx} dx + C \right] \quad (11)$$

Преобразуем уравнение (9) к виду уравнения (11):

$$\frac{d[i(t)]}{dt} + \frac{\left[R_K - \frac{(L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}}}{T_L} \right]}{\left[L_K + L_{ПР} + (L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} \cdot i(t) = \frac{E(t)}{\left[L_K + L_{ПР} + (L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} \quad (12)$$

Таким образом, в виде общего случая неоднородного дифференциального уравнения (11) с заменой y на i и x на t :

$$P(t) = \frac{\left[R_K - \frac{(L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}}}{T_L} \right]}{\left[L_K + L_{ПР} + (L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} \quad (13)$$

$$Q(t) = \frac{E(t)}{\left[L_K + L_{ПР} + (L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} \quad (14)$$

Определим $\int P(t)$. По выражению из [10] интеграл такого вида равен:

$$\int \frac{dt}{a + b \cdot e^{pt}} = \frac{t}{a} - \frac{1}{a \cdot p} \cdot \ln |a + b \cdot e^{pt}| \quad (15)$$

Если $a = L_K + L_{ПР}$, $b = (L_{СП} - L_{ПР})$, $p = \frac{-1}{T_L}$, то

$$\int \left(\frac{1}{L_K + L_{ПР} + (L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}}} \right) \cdot dt = \frac{t}{L_K + L_{ПР}} - \frac{t}{(L_K + L_{ПР}) \cdot \frac{(-1)}{T_L}} \cdot \ln \left[L_K + L_{ПР} + (L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right] + C = \frac{t}{L_K + L_{ПР}} + \frac{T_L}{(L_K + L_{ПР})} \cdot \ln \left[L_K + L_{ПР} + (L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right] + C \quad (17)$$

Сгруппировав все константы в одну, получаем выражение для свободной составляющей тока замыкания:

$$\int P(t) dt = \frac{\left[\frac{t}{T_L} - \ln \left[L_K + L_{ПР} + (L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right] \right]}{\frac{R_K \cdot t}{L_K + L_{ПР}} - \frac{R_K \cdot T_L}{(L_K + L_{ПР})} \cdot \ln \left[L_K + L_{ПР} + (L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right] + C} \quad (18)$$

В итоге решение уравнения электромагнитного переходного процесса будет выглядеть в виде:

$$i(t) = e^{-\int P(t)dt} \cdot \left[\int Q(t) \cdot e^{\int P(t)dt} dt + C \right], \quad (19)$$

где $Q(t) = \frac{E(t)}{\left[L_K + L_{ПР} + (L_{СП} - L_{ПР}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right]}$,

C – константа после взятия интеграла (определяется путём задания начальных условий решения задачи).

Если в выражении (19) заменить неопределённое интегрирование интегрированием в пределах от 0 до t , то получится решение, принимающее значение C при $t = 0$.

Решение уравнения легче всего получить с применением численных методов.

III. ТЕСТОВЫЙ ПРИМЕР ПО УДАЛЁННОМУ КОРОТКОМУ ЗАМЫКАНИЮ

Для схемы рис.1. заданы параметры схемы замещения

Источник:

$$U_{НОМ} = 10 \text{ кВ.}$$

КЛ:

$$L_{КЛ} = 0.1 \text{ Гн; } R_{КЛ} = 1 \text{ Ом.}$$

СОТ:

$L_{СП} = 0$, $L_{ПР} = 0.5 \text{ Гн}$. Рассматривается случай для постоянных времени реагирования СОТ: $T_{L1} = 2 \text{ мс}$, $T_{L2} = 10 \text{ мс}$, $T_{L3} = 20 \text{ мс}$.

Режим: предшествующий режим – холостой ход, в момент времени $t = 0$ в сети происходит трёхфазное короткое замыкание.

Необходимо определить составляющие тока замыкания в ходе переходного процесса по построенной математической модели.

Все расчёты проводим в соответствии с моделью. Результаты расчётов иллюстрируем с помощью графических зависимостей для каждой постоянной времени COT в отдельности.

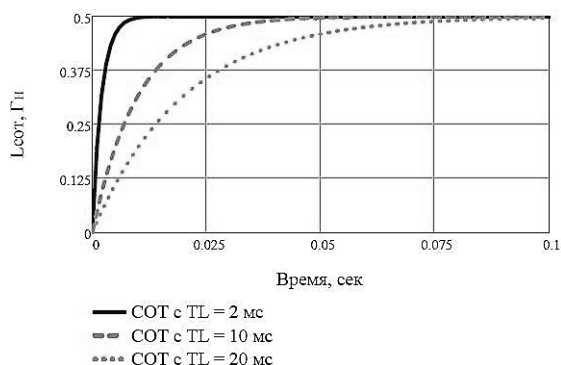


Рис. 6. Изменение индуктивности COT в тестовой задаче при различных T_L .

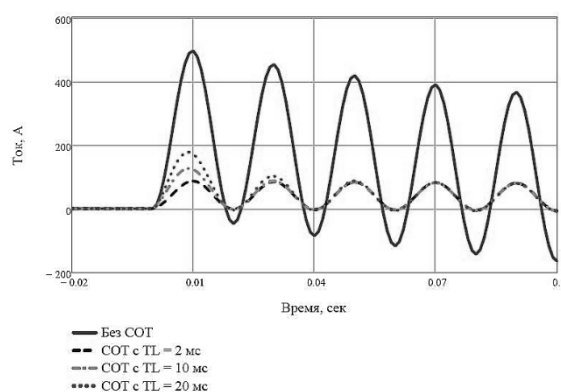


Рис. 7. Результирующий ток в цепи с токоограничением с помощью COT и без него при различных T_L .

Построенная математическая модель не претендует на абсолютную объективность, хотя и построена в строгом соответствии с законами электротехники и математическими выражениями.

В случае иных исходных условий переходного процесса (фазы начала КЗ, учёта тока в цепи до начала переходного процесса) необходимо учесть граничные условия для времени $t = 0$, с целью выполнения закона коммутации.

Выводы

Показано, что ранее принимались допущения к параметрам COT, не позволявшие аналитически описывать электромагнитный

переходный процесс в электрической сети. На основании предложенной модели можно более точно по сравнению с допущением о мгновенном изменении индуктивности сверхпроводникового токоограничителя оценить время отключения выключателем тока короткого замыкания.

Приведённая математическая модель электромагнитного переходного процесса для сверхпроводникового ограничителя тока короткого замыкания учитывает такой параметр устройства как скорость нарастания (инерционность) индуктивного сопротивления по отношению к внешней сети при переходе из сверхпроводящего состояния в естественное проводящее состояние. Одновременно с этим модель учитывает и другие параметры – начальную и конечную величины индуктивности сверхпроводникового токоограничителя до начала и после окончания электромагнитного переходного процесса соответственно.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект 8.6809.2017/8.9

Литература (References)

- [1] Kalsi S.S. [Applications of high temperature superconductors to electric power equipment]. New Jersey, John Wiley & Sons Inc., 2011, 312 p.
- [2] Lutidze Sh.I., Dzhafarov E.A. Sverkhprovodiashchie transformatory [Superconducting transformers]. Moscow, Nauchtehlitizdat Publ., 2002, 206 p. (In Russian).
- [3] Sytnikov V.E., Visotsky V.S., Rychagov A.V., Polyakova N.V., Radchenko I.P., Shutov K.A., Fetisov S.S., Nosov A.A. and Zubko V.V. 30m HTS Power Cable Development and Witness Sample Test. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, vol. 19, no. 3, p. 1702-1705.
- [4] Yuhei Ohtsubo, Masataka Iwakuma, Seiki Sato, Kizen Sakaki, Akira Tomioka, Takeji Miyayama, Masayuki Konno, Hidemi Hayashi, Hiroshi Okamoto, Yoshihiro Gosho, Tohru Eguchi, Takashi Saitoh, Teruo Izumi, Yuh Shiohara Development of REBCO Superconducting Transformers With a Current Limiting Function—Fabrication and Tests of 6.9 kV-400 kVA Transformers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, vol. 25, no. 3, Art. ID 5500305.

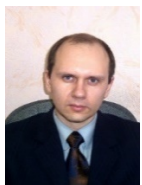
- [5] Kozulin, A., Vinogradov A. Vysokotemperaturnye sverkhprovodnikovye transformatory – novoe pokolenie podstantsionnogo oborudovaniia [The high temperature superconducting transformers – a new generation of substation equipment]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont – Electrical equipment: operation and repair*, 2008, no. 12, pp. 7-9. (In Russian).
- [6] Manusov V.Z., Pavlyuchenko D.A., Ahyoev J.S. Analiz processov ogranicheniya tokov korotkogo zamikaniya transformatorom s vysokotemperaturnymi sverhprovodyaschimi obmotkami [Analysis of the Processes of Short-Currents Limiting by Transformer with High-Temperature Superconducting Windings]. *Problemy regionalnoy energetiki – Problems of the regional energetics*, 2017, no. 1(33), pp. 1-7. (In Russian).
- [7] Manusov V.Z., Miheev P.A. Superconducting fault current limiters saving rate [Proc. 3rd International forum strategic technology (IFOST-2008)]. Russia. Novosibirsk-Tomsk, 2008. pp. 538-539.
- [8] Gluskin I.Z., Dmiyrieva G.A., Misrihanov M.Sh., Narovlyanskiy V.G., Yakimets I.V. Sverkhprovnikovye tokoogranichivayushchie ustroystva i induktivnie nakopiteli dlya elektroenergeticheskikh system [Superconducting current limiters and inductive energy storage for electric power systems]. Moscow, Energoatomizdat, 2002, 373 p.(in Russian)
- [9] Stemmler M., Steurer M., McLaren P. G., Muthumuni D., Foucher F. Transient studies of fault current limiters in ship power systems with PSCAD. *Flux Magazine*, 2005, no. 49, pp. 12-14.
- [10] Qingqing Yang, Simon Le Blond, Fei Liang, Weijia Yuan, Min Zhang, Jianwei Li Design and Application of Superconducting Fault Current Limiter in a Multiterminal HVDC System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, vol. 27, no. 4, Art. ID 3800805.
- [11] Feng Zheng, Changhong Deng, Lei Chen, Shichun Li, Yang Liu, Yuxiang Liao Transient Performance Improvement of Microgrid by a Resistive Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, vol. 27, no. 4, Art. ID 3800805.
- [12] Manusov V.Z., Miheev P.A. Matematicheskaya model elektromagnitnogo perehodnogo processa v elektricheskikh seti soderzhashey sverhprovodnikoviy tokoogranichitel induktivnogo tipa [The mathematical model of the electromagnetic transient in electrical network containing inductive type superconducting current limiter]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2008, no. 7, pp. 50-56. (In Russian).

Сведения об авторах.



Манусов Вадим Зиновьевич. Новосибирский государственный технический университет, кафедра системы электроснабжения предприятий, д-р техн. 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 техн. наук, доцент, заведующий кафедрой. Основное направление исследований: повышение энергоэффективности, качества функционирования и развития систем электроснабжения.

E-mail: d_pavluc@mail.ru



Михеев Павел Александрович. ОАО «Новосибирскэнергообл», кандидат техн. наук, начальник аналитического отдела. Основное направление исследований: продольное и поперечное токоограничение в электрических системах с помощью сверхпроводниковых устройств.

E-mail: miheevpa@rambler.ru