

УДК 621.314

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ (ОМП) В КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Иванова Елена Алексеевна¹,
eleshka.ivanova@gmail.com

Лозина Наталья Георгиевна¹,
loz2000@mail.ru

¹ ОАО «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения»,
Россия, 194223, Санкт-Петербург, ул. Курчатова, 14/А.

Предпосылки и актуальность развития технологий постоянного тока высокого напряжения для российской электроэнергетики обусловлены особенностями ее работы и условиями функционирования Единой энергетической системы (ЕЭС) России. Внедрение электроэнергетических систем постоянного тока позволит решить ряд существующих на сегодняшний день в ЕЭС России проблем, таких как энергоснабжение нефтяных платформ и территорий с доступом через водные преграды, подключение возобновляемых источников энергии к ЕЭС и к локальным энергосистемам, а также другие известные проблемы. Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью повышения точности определения места повреждения (ОМП) в линиях постоянного тока (ПТ) и отсутствием в отечественной практике устройств и средств ОМП на неоднородных линиях ПТ.

Цель работы: повышение точности алгоритма спектрального метода для решения задачи ОМП в линиях электропередачи постоянного тока; вывод формулы нахождения неизвестного расстояния до места замыкания на линии ПТ, позволяющей связать частоту переходного процесса разряда линии через место к. з., параметры линии на единицу длины, длину короткозамкнутого участка линии, а также учесть наличие неповрежденного однородного участка в схеме замещения электропередачи.

Методы исследования. Для вывода формулы, позволяющей решить задачу ОМП в линии ПТ спектральным способом, использовались аналитические методы исследования. При исследовании точности предлагаемого спектрального метода ОМП в линии постоянного тока использовались методы математического моделирования.

Результаты. Предложен спектральный метод для решения задачи нахождения длины короткозамкнутого участка линии ПТ, состоящей из кабельного и воздушного участков с учетом установленных по концам линии реакторов и фильтров высших гармоник. Предложена схема замещения однородного неповрежденного участка линии – схема искусственной линии с сосредоточенными параметрами. Получена формула, позволяющая рассчитать расстояние до места повреждения в зависимости от частоты, преобладающей в спектре напряжения на поврежденном полюсе линии, погонных параметров линии ПТ и параметров схемы замещения. Оценена погрешность предлагаемого способа ОМП, вносимая неизвестной величиной переходного сопротивления R_n в месте к.з.

Ключевые слова:

Линия электропередачи, электропередача постоянного тока, короткое замыкание, определение места повреждения, переходное сопротивление, спектральный метод, волновой метод.

В мировой практике применение передач постоянного тока (ППТ) обосновано получением определенных системных эффектов, которые на сегодняшний день могут выражаться в том числе в следующем [1]:

- повышение уровня устойчивости систем переменного тока и уменьшение объема управляющих воздействий;
- отсутствие необходимости синхронизации работы электростанций;
- большее значение предельной передаваемой мощности;
- при превышении длины линии постоянного тока (ПТ) некоторого критического значения $l_{кр}$ ($l_{кр}=450$ км [2]) затраты на передачу электроэнергии по линии ПТ оказываются существенно ниже, чем при передаче электроэнергии по высоковольтной линии (ВЛ) переменного тока при равных условиях надежности;
- меньшая зона отчуждения земли для трассы линии – ширина ВЛ ПТ примерно в 1,5 раза меньше ширины ВЛ переменного тока той же пропускной способности, что очень важно для густонаселенных и лесных регионов.

Эти эффекты в определенной степени могут быть реализованы в Единой энергетической системе (ЕЭС) России.

Предпосылки и актуальность развития технологий постоянного тока высокого напряжения для отечественной электроэнергетики обусловлены [3] следующими внутренними объективными условиями ее функционирования, особенностями ЕЭС России как крупнейшей электроэнергетической системы, а также особенностями работы технологически изолированных электроэнергетических систем:

- проблема ограничения токов короткого замыкания в мегаполисах;
- проблема энергоснабжения нефтяных платформ и территорий с доступом через водные преграды;
- удаленность объектов генерации и потребителей;
- проблема подключения возобновляемых источников энергии к ЕЭС и к локальным энергосистемам;
- значительный износ и старение существующего сетевого оборудования;

- большие потери при передаче электроэнергии в распределительных сетях;
- проблема модернизации и развития ЭЭС, возникающая при последовательном присоединении к ЭЭС объединенной энергосистемы Востока и ряда изолированных энергосистем.

Сложности объединения на переменном токе с крупными зарубежными энергосистемами из-за различий в системах регулирования частоты и мощности, других систем автоматики, разных стандартов частоты, наличия водных преград, больших расстояний и др. являются предпосылками к использованию техники постоянного тока для связи ЭЭС России с энергосистемами других государств.

Применение технологий ППТ и эксплуатация протяженных линий ПТ делает проблему точного определения места повреждения (ОМП) при коротких замыканиях (к. з.) на таких линиях особенно актуальной.

Аварийные режимы, в частности короткие замыкания в электропередачах ПТ, требуют особого внимания, поскольку вопросы изменения схем и режимов работы сетей ПТ в аварийных условиях и алгоритмы действия защит и устройств обнаружения места к. з. являются совершенной новой задачей, необходимой для исследования и изучения. Для получения полной и достоверной информации о процессах, протекающих во всех значимых элементах электропередачи ПТ и электроэнергетической системе (ЭЭС) в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, используется метод математического моделирования энергосистем в режиме реального времени [4, 5].

На сегодняшний день наиболее широкое распространение получили методы ОМП для линий ПТ на основе анализа распространения электромагнитной волны вдоль линии (волновые методы). Алгоритм такого метода ОМП основывается на определении времени прохождения волны тока и/или напряжения короткозамкнутого участка линии. Наиболее распространенным способом обработки информативных сигналов волны тока и напряжения в мировой практике является дискретное вейвлет-преобразование (DWT), предложенное в конце 90-х гг. учеными Ф. Магнаго из аргентинского университета Universidad Nacional de Rio Cuarto и А. Абуром [6, 7] из бостонского исследовательского института Northeastern University, позволяющее проводить анализ сигналов с локализованными переходными процессами. При решении задачи ОМП на линии ПТ на основе дискретного вейвлет-преобразования основной проблемой является точность определения времени прохождения электромагнитной волной короткозамкнутого участка линии. Недостоверность определения этого параметра может быть связана с наличием искажений фронтов волн в линии ПТ.

Причиной искажения электромагнитных волн являются возникающие в них помехи, наведенные от второй полупериоды (в случае биполярной линии ПТ), а также высшие гармонические составляющие в кривой напряжения, генерируемые преобразовательными подстанциями ПТ. Выделение фронтов волн также может быть осложнено искажениями, связанными с существенным затуханием электромагнитной волны в контуре «провод-земля», а также из-за влияния неоднородностей вдоль трассы линии ПТ. Для более точной фиксации прихода волн от места к. з. на преобразовательную подстанцию расчет вейвлет-коэффициентов оптимизируют с помощью различных способов, таких как, например, разложение функции по вейвлет-пакету (WPD) с помощью радиальной базисной функции нейронной сети [8].

Несмотря на попытку решить проблему точной фиксации прихода электромагнитной волны на конечную преобразовательную подстанцию, методы ОМП на базе теории бегущих волн требуют высокой частоты дискретизации исследуемого сигнала, а их реализация оказывается существенно более дорогой, чем реализация импедансных методов ОМП.

Кроме того, существующие традиционные волновые методы ОМП на линиях ПТ имеют другие недостатки [9], например:

- при к. з. в момент времени, близкий к моменту перехода напряжения через ноль, бегущие волны, генерируемые в месте повреждения, будут малоразличимыми;
- при возникновении близкого повреждения разница во времени прихода прямой и отраженной волн будет малоразличима.

Эти факторы могут сделать практически невозможной интерпретацию информации, доступной в первые несколько миллисекунд после прихода на преобразовательную подстанцию первой волны тока или напряжения.

В [10] предложен метод ОМП для ВЛ постоянного тока, основанный на оценке сопротивления короткозамкнутой линии – импедансный метод, обычно применяемый для линий переменного тока. Однако, как и для линий переменного тока, при увеличении переходного сопротивления в месте к. з. (как правило, неизвестной величины) точность ОМП в этом случае существенно снижается.

Применяемые на сегодняшний день в линиях ПТ методы ОМП на волновом принципе являются в основном двусторонними [11, 12], т. е. анализируют информацию, поступающую на обе подстанции, расположенные по концам ВЛ. Такой метод ОМП требует обеспечения надежного канала связи для обмена информацией между подстанциями, а также максимально точной синхронизации аварийных осциллограмм.

В [13] предложен способ ОМП на линии ПТ, основанный на оценке частотного спектра аварийного напряжения линии, и выделения из этого спек-

тра частоты с максимальной амплитудой. Согласно [13], колебания напряжения линии, возникающие при разряде ЛЭП через место к. з. и сопровождающиеся резким снижением напряжения аварийной полупроводниковой цепи, можно смоделировать колебательным процессом в контуре, состоящем из включенных параллельно индуктивности L_X и емкости C_X короткозамкнутого участка линии, при учете эквивалентной индуктивности L'_Π преобразователя, которая определяется суммой индуктивностей линейного реактора и преобразовательных трансформаторов (рис. 1).

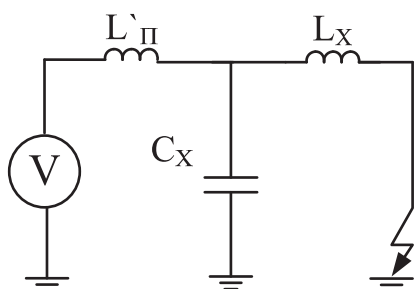


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения короткозамкнутого участка линии ПТ при к. з. с нулевым переходным сопротивлением

Fig. 1. Equivalent circuit of the short-circuited HVDC line segment with zero transient resistance

Частота колебаний в схеме рис. 1 определяется из выражения

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{экв}}C_X}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{экв}} = \frac{L'_\Pi L_X}{L'_\Pi + L_X}$ – эквивалентная индуктивность преобразователя и короткозамкнутого участка линии.

Параметры L_X и C_X короткозамкнутого участка линии зависят от длины этого участка:

$$\begin{aligned} L_X &= \frac{2}{\pi} L_{0X} l_X; \\ C_X &= \frac{2}{\pi} C_{0X} l_X, \end{aligned} \quad (2)$$

где L_{0X} , C_{0X} – погонные параметры однородного участка линии ПТ в контуре «провод-земля»; l_X – неизвестная длина замкнутого участка линии ПТ до места короткого замыкания.

В формулах (2) суммарные емкость и индуктивность эквивалентного контура рис. 1 уменьшены в $2/\pi$ раза с целью обеспечения равенства частоты колебаний при замене реальной линии с распределенными параметрами схемой замещения по рис. 1 с сосредоточенными параметрами.

Подстановка (2) в (1), последующее возведение в квадрат и решение квадратного уравнения относительно расстояния до места замыкания в линии ПТ дает следующее выражение:

$$l_X = \frac{1 + \sqrt{1 + 16\pi^2 K_1^2 K_2^2}}{16\pi K_1^2 K_2^2}, \quad (3)$$

где $K_1 = \frac{L'_\Pi}{L_{0X}}$, $K_2 = \frac{f_0}{V_0}$, $V_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ – скорость рас-

пространения электромагнитной волны в контуре «провод-земля» на частоте f_0 .

Макет устройства, реализованного на этом методе, проходил испытания на ППТ Волгоград–Донбасс (длина линии ПТ 473 км) [14]. В целом испытания подтвердили работоспособность метода ОМП, погрешность в расчете расстояния до места к. з. на линии ПТ достигала 5–8 % от длины короткозамкнутого участка. С целью повышения эксплуатационных характеристик устройства предлагается усовершенствование алгоритма ОМП для ВЛ постоянного тока на базе спектрального метода.

При определении расстояния до места повреждения в [13] не учитывается наличие переходного сопротивления R_Π в месте к. з., что соответствует, например, случаю падения провода на землю или замыкания гирлянды изоляторов на стальную заземленную опору в нормальном режиме. Также при выводе формулы (3) не учитывается наличие включенных на полюсах линии ПТ фильтров высших гармоник (ФВГ), устанавливаемых на большинстве зарубежных электропередач постоянного тока и разрабатываемых в проектах отечественных электропередач постоянного тока. Устройства фильтрации высших гармоник служат для обеспечения низкого уровня помех в близлежащих линиях связи и других коммуникациях, чувствительных к наведенным помехам. Вывод формулы (3) сделан в предположении к. з. на однородной линии ПТ, состоящей из воздушного участка, параметры которого одинаковы по всей длине линии ПТ.

В случае, когда электропередача ПТ, в соответствии с проектом, пересекает водную преграду, в мировой практике для строительства такой электропередачи применяют, прежде всего, кабельные линии ПТ. Однако стоимость 1 км кабельной линии, как правило, в несколько раз превышает стоимость 1 км воздушной линии. Поэтому после пересечения водной преграды нередко кабельные участки ППТ дополняются воздушными участками (например, ППТ между Данией и Норвегией через пролив Скагеррак – 240 км, ППТ Baltic Cable между Германией и Швецией – 250 км, связь Fenn-Skan между Финляндией и Швецией – 233 км).

В зарубежной практике вопрос разработки средств и устройств ОМП в неоднородных кабельно-воздушных линиях затронут, например, в [15, 16]. В качестве короткозамкнутой линии ПТ рассматривалась линия, состоящая из двух воздушных и одного кабельного участков. На рис. 2 приведены возможные варианты повреждения на такой линии с точки зрения места возникновения к. з.

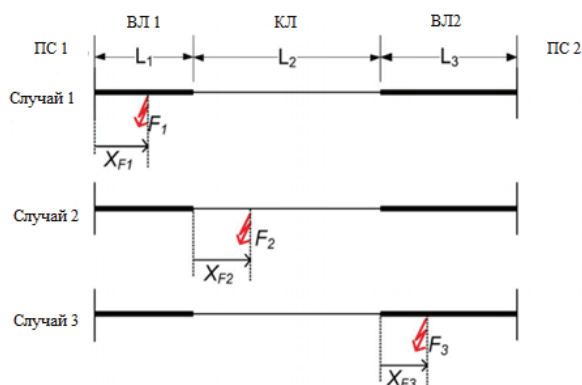


Рис. 2. Варианты к. з. в линии ПТ, состоящей из одного кабельного и двух воздушных участков

Fig. 2. Possible short-circuit cases in HVDC line, containing cable and overhead segments

Предлагаемый в [15] метод ОМП основывается на теории бегущих волн и реализуется с помощью вычисления конечных вейвлет-коэффициентов. Предлагаемые на сегодняшний день зарубежными компаниями приборы ОМП, разработанные на базе принципов, изложенных в [15, 16], являются дорогостоящими и требуют установки на каждой преобразовательной подстанции со стороны линии постоянного тока дополнительного оборудования (дифференцирующих трансформаторов, позволяющих точно зафиксировать фронт электромагнитной волны, приходящий от места к. з.).

В отечественной практике устройства ОМП для неоднородных линий ПТ, участки которых имеют неодинаковые погонные параметры и могут быть расположены несимметрично относительно выпрямительной и инверторной подстанций, отсутствуют вовсе.

В [17] предлагается рассмотреть спектральный метод ОМП для кабельно-воздушной неоднородной линии ПТ, по концам которой установлены ФВГ, включенные в среднюю точку сглаживающих реакторов. При этом схема моделирования замкнутой линии выглядит в соответствии с рис. 3.

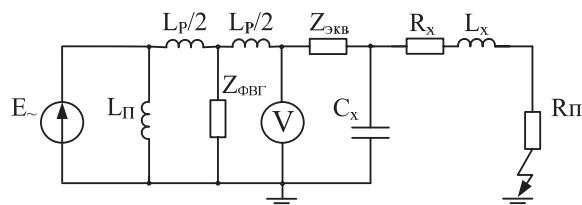


Рис. 3. Схема замещения неоднородной линии ПТ при к. з. на одном из участков

Fig. 3. Equivalent circuit of the HVDC line, containing cable and overhead segments, during short-circuit in one segment

Для решения задачи ОМП в кабельно-воздушной линии ПТ необходимо учитывать неповрежденный однородный участок линии, расположенный между участком с другими погонными параметрами и преобразовательной подстанцией, на

котором произошло к. з. При этом короткозамкнутый участок линии (рис. 3) представляется эквивалентной схемой линии с сосредоточенными параметрами. Следование данному положению требует при рассмотрении к. з. на неоднородной линии ПТ представить неповрежденный однородный участок линии также эквивалентной схемой с сосредоточенными параметрами, в отличие от схемы, предложенной в [17], где неповрежденный однородный участок определялся по формуле

$$Z_{\text{ЭКВ}}(P) = Z_c(P) \text{cth}(\gamma l), \quad (4)$$

где $Z_c(P)$ – операторное выражение волнового сопротивления неповрежденного однородного участка линии; l – длина неповрежденного однородного участка линии; γ – коэффициент распространения волны в однородном неповрежденном участке линии.

В соответствии с данными аргументами схема замещения неповрежденного однородного участка линии ПТ представляет собой схему искусственной линии с сосредоточенными параметрами [18, 19] (рис. 4).

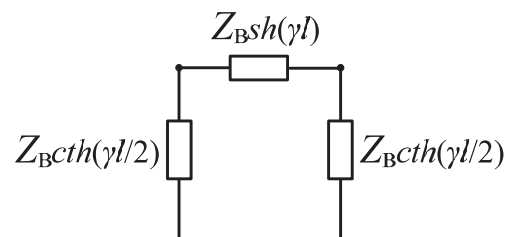


Рис. 4. Схема замещения однородного неповрежденного участка линии ПТ

Fig. 4. Equivalent circuit of the HVDC line unfaulted segment

На рис. 4 $Z_{\text{Б}}$ – волновое сопротивление однородного участка линии, l – длина однородного участка линии, γ – коэффициент распространения волны в однородном неповрежденном участке линии.

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}; \quad \gamma = j\omega \sqrt{L_0 C_0}, \quad (5)$$

где L_0 , C_0 – погонные параметры однородного участка линии; ω – круговая частота.

При выполнении условия резонанса в контуре короткозамкнутой линии эквивалентное сопротивление контура оказывается бесконечно большим. Это соответствует нулевому значению проводимости контура, в выражение для которой входят в том числе погонные параметры неповрежденного участка линии ПТ, частота переходного процесса в контуре и искомое расстояние до места замыкания. Определив выражение для проводимости контура и приравняв числитель полученного выражения к нулю, представляется возможным найти из данного уравнения длину l_x короткозамкнутого участка линии ПТ.

Для расчета длины короткозамкнутого участка неоднородной линии ПТ на основе операторного метода определяется проводимость контура рис. 5,

в котором неповрежденный однородный участок линии представлен по схеме рис. 4. На рис. 5

$$Z_1 = Z_B \operatorname{cth}\left(\frac{\gamma l}{2}\right); \quad Z_2 = Z_B \operatorname{sh}(\gamma l).$$

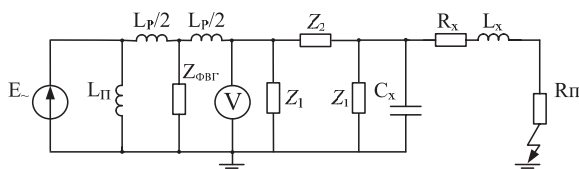


Рис. 5. Схема замещения неоднородной линии ПТ при к. з. одного из участков линии

Fig. 5. Equivalent circuit of the HVDC line, containing cable and overhead segments, at short-circuit

Схема рис. 5 преобразуется в схему в операторном виде рис. 6, где $Y_{Пс}$ – эквивалентная проводимость преобразовательной подстанции, $Z_{л}$ – эквивалентное сопротивление короткозамкнутого участка линии.

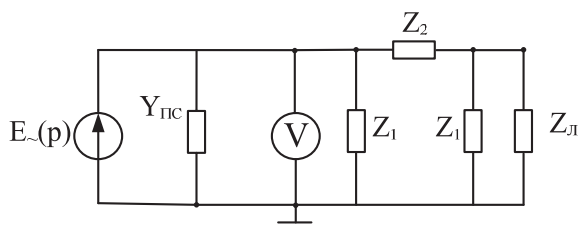


Рис. 6. Эквивалентная схема неоднородной линии ПТ, состоящей из двух участков

Fig. 6. Equivalent circuit of the HVDC line, containing one cable and one overhead segment

При усилении частоты в рассматриваемом колебательном контуре короткозамкнутой линии, т. е. возникновении резонанса в данном колебательном контуре, проводимость контура становится равной нулю: $Y_{ЭКВ} = 0$. Числитель эквивалентной проводимости $Y_{ЭКВ}$ контура замкнутой линии в этом случае представляет собой квадратное уравнение относительно расстояния l_x до места к. з.:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{\pi} p C_0 Z_1 \left[\left(R_0 + \frac{2}{\pi} p L_0 \right) (Z_2 Y_{ФП} + DF) \right] l_x^2 + \\ & + \left[\left(R_0 + \frac{2}{\pi} p L_0 \right) (Z_1 Y_{ФП} F + DE) + \right. \\ & \left. + \frac{2}{\pi} p C_0 Z_1 R_{П} (Z_1 Z_2 Y_{ФП} + DF) \right] l_x + \\ & + F (Z_1 Y_{ФП} R_{П} + D Z_1) + Y_{ФП} + D R_{П} E = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$E = 2Z_1 + Z_2; \quad F = Z_1 + Z_2.$$

Искомое расстояние l_x до места замыкания в этом случае определяется как вещественная часть корня полученного квадратного уравнения:

$$l_{хч} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad \text{км}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} a &= \frac{2}{\pi} p C_0 Z_1 \left[\left(R_0 + \frac{2}{\pi} p L_0 \right) (Z_2 Y_{ФП} + DF) \right]; \\ b &= \left(R_0 + \frac{2}{\pi} p L_0 \right) (Z_1 Y_{ФП} F + DE) + \\ &+ \frac{2}{\pi} p C_0 Z_1 R_{П} (Z_1 Z_2 Y_{ФП} + DF); \\ c &= F Z_1 (Y_{ФП} R_{П} + D) + Y_{ФП} + D R_{П} E. \end{aligned}$$

Здесь a, b, c – коэффициенты в комплексной форме; $p = -\alpha_0 + j2\pi f_0$ – оператор; f_0 – частота с максимальной амплитудой в спектре напряжения поврежденного полюса электропередачи ПТ; $D = 1 + p L_p' Y_{ВП}$; $Y_{ВП} = Y_{ФВГ} + Y_{П}$; $Y_{ФВГ}$ – проводимость ФВГ на стороне постоянного тока в операторной форме; $Y_{П}$ – проводимость преобразователя постоянного тока с учетом индуктивности реактора, включенного между преобразователем и ФВГ постоянного тока, и эквивалентной индуктивности преобразовательных трансформаторов; $R_{П}$ – величина переходного сопротивления в контуре замыкания; L_p' – индуктивность реактора, включенного между ФВГ на стороне постоянного тока и линией ПТ; L_0, C_0, R_0 – параметры на 1 км длины однородного участка линии в контуре «провод-земля» на частоте f_0 ; α_0 – параметр, определяющий затухание колебательного процесса разряда линии через место замыкания.

Для оценки величины α_0 предлагается прологарифмировать кривую напряжения поврежденного полюса линии. Поскольку затухание сигнала носит экспоненциальный характер, операция логарифмирования позволяет получить линейно убывающую функцию от времени вида

$$u = A \exp(-\alpha t). \quad (8)$$

Угловой коэффициент найденной функции, вычисленный, например, методом наименьших квадратов [20], представляет собой искомый коэффициент затухания.

В качестве прототипа модели кабельно-воздушной линии ПТ рассматривалась биполярная линия длиной 108 км (41 км – кабельный участок, 67 км – воздушный участок), напряжением ± 300 кВ и пропускной мощностью 1000 МВт с металлическим возвратом постоянного тока.

При замыканиях полюса линии ПТ на землю характер и в том числе частота переходного процесса зависят от параметров линии и параметров земли. Кабельный и воздушный участки линии ПТ моделировались в программно-вычислительном комплексе ЕМТР для расчета электромагнитных переходных процессов по цепочечной схеме [21, 22].

Для проверки предлагаемого алгоритма в модели неоднородной линии ПТ проводился опыт к. з. на воздушном участке линии на разном расстоянии $l_{к.з.}$ от стыка двух участков линии – кабельного и воздушного. При этом оценивался частотный спектр аварийного напряжения линии, осциллографируемого на конце линии со стороны кабель-

ного участка, в спектре напряжения выявлялась частота $f_{\text{модель_макс}}$ с максимальной амплитудой. Далее при подстановке частоты $f_{\text{модель_макс}}$ в формулу (7) определялось расчетное расстояние $l_{\text{расч}} = l_{\text{хч}}$ до места к. з. Частота $f_{\text{модель_макс}}$, определенная при разложении в ряд Фурье кривой напряжения на осциллограмме аварийного процесса в модели линии, сравнивалась с расчетным значением частоты $f_{\text{расч}}$. Для нахождения $f_{\text{расч}}$ в выражение (6) подставляется выражение для оператора $p = -\alpha_0 + j2\pi f_0$, а в качестве длины l_x короткозамкнутого однородного участка – задаваемое при имитации аварийного процесса на модели расстояние $l_{\text{к.з.}}$ от стыка кабельного и воздушного участков линии до места замыкания на воздушном участке. Искомое расчетное значение частоты $f_0 = f_{\text{расч}}$ определяется как вещественная часть корня квадратного уравнения:

$$f_0 = f_{\text{расч}} = \frac{-b_f + \sqrt{b_f^2 - 4a_f c_f}}{2a_f}, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} a_f &= 16pC_0L_0Z_1l_{\text{к.з.}}^2; \\ b_f &= \frac{2}{\pi} j \left[4\alpha + 2\pi l_{\text{к.з.}} \left(\tilde{N}_0 l_x Z_1 R_0 (Z_2 Y_{\text{ФП}} + DF) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + L_0 (Z_1 Y_{\text{ФП}} F + DE) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + R_l C_0 (Z_1 Z_2 Y_{\text{ФП}} + DF) \right) \right]; \\ c_f &= \frac{4}{\pi^2} \alpha^2 \tilde{N}_0 l_{\text{к.з.}} Z_1 R_0 + \\ &\quad + \frac{2}{\pi} \alpha l_{\text{к.з.}} \left(\tilde{N}_0 l_x Z_1 R_0 (Z_2 Y_{\text{ФП}} + DF) + \right. \\ &\quad \left. + L_0 (Z_1 Y_{\text{ФП}} F + DE) + \right. \\ &\quad \left. + R_l C_0 (Z_1 Z_2 Y_{\text{ФП}} + DF) \right) + \\ &\quad + FZ_1 (Y_{\text{ФП}} R_{\text{П}} + D) + Y_{\text{ФП}} + DR_{\text{П}} E. \end{aligned}$$

Полученные результаты сравнения частоты аварийного процесса и расстояния до места к. з., определенные в модели и расчетным образом, приведены в таблице.

Таблица. Сравнение частоты аварийного процесса и расстояния до места к. з., полученных в модели и расчетным образом

Table. Comparison of the transient frequency and fault distance obtained in the HVDC line model and by calculating

$l_{\text{к.з.}}$, КМ $l_{\text{ш.к.}}$, km	$f_{\text{модель_макс}}$, Гц $f_{\text{модель_макс}}$, Hz	$f_{\text{расч}}$, Гц $f_{\text{расч}}$, Hz	$l_{\text{расч}}$, КМ $l_{\text{расч}}$, km
12,41	384	382	12,25
24,82	292	296	25,6
37,22	251	250,5	37,1
49,63	221	222	50,1
62,04	204	202	60,6

Из таблицы видно, что максимальное отклонение частоты, полученной расчетным образом по формуле (9) при подстановке заданного на модели расстояния $l_{\text{к.з.}}$ до места замыкания, составляет 4 Гц. Максимальная погрешность определения по формуле (7) расстояния до места замыкания составляет $\delta = 2,1\%$ от длины короткозамкнутого однородного участка линии.

На рис. 7 и 8 приведены кривые напряжения, фиксируемого на поврежденном полюсе линии со стороны кабельного участка линии ПТ, при замыкании воздушного участка линии ПТ.

Таким образом, информация о частоте затухающих колебаний при переходном процессе разряда в короткозамкнутой линии ПТ позволяет определить расстояние до места повреждения. При этом погонные параметры линии могут быть рассчитаны по

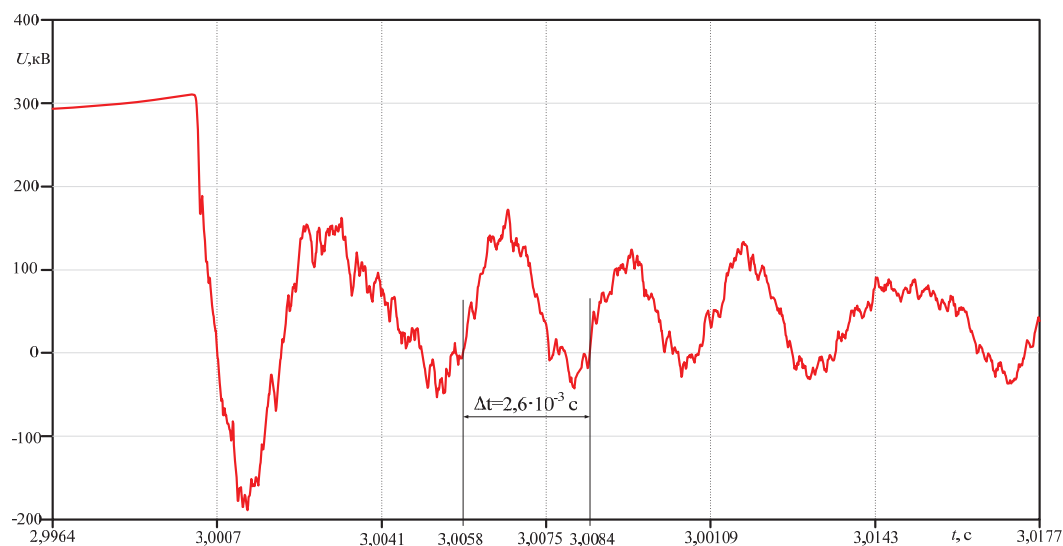


Рис. 7. Кривая аварийного напряжения со стороны кабельного участка при к. з. на воздушном участке линии ПТ на расстоянии 12,41 км от стыка кабельного и воздушных участков линии ПТ

Fig. 7. Transient voltage curve obtained from the cable segment side during the overhead segment short-circuit on the 12,41 km distance from the cable and overhead segments junction point

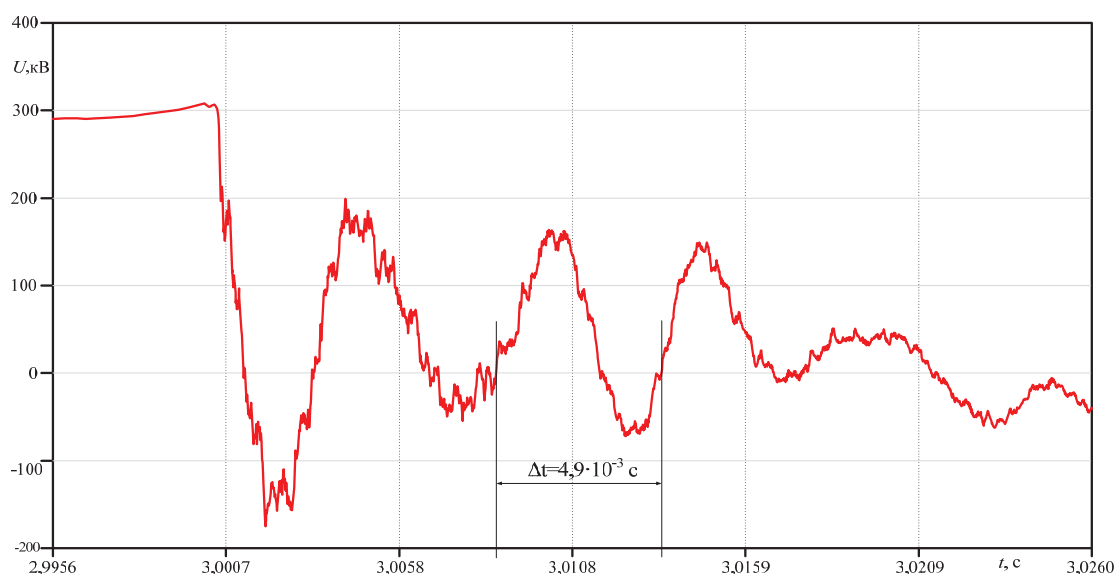


Рис. 8. Кривая аварийного напряжения со стороны кабельного участка при к. з. на воздушном участке линии ПТ на расстоянии 62,04 км от стыка кабельного и воздушного участков линии ПТ

Fig. 8. Transient voltage curve obtained from the cable segment side during the overhead segment short-circuit on the 62,04 km distance from the cable and overhead segments junction point

геометрическому расположению проводов на опоре, а частота колебаний в короткозамкнутой линии может быть определена исходя из спектрального (частотного) анализа аварийного напряжения ВЛ.

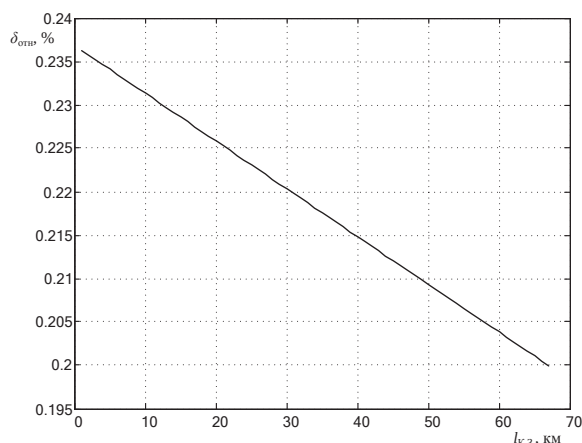


Рис. 9. Относительная погрешность предлагаемого метода ОМП при к. з. на воздушном участке линии ПТ через переходное сопротивление $R_{п}=30$ Ом

Fig. 9. Relative error of the proposed LFL method during short-circuit in the HVDC line overhead segment with the 30 Ohm transient resistance

На схемах моделирования короткозамкнутой линии ПТ (рис. 3, 5) показано переходное сопротивление $R_{п}$ в контуре замыкания. Величина $R_{п}$ может принимать как наиболее вероятное значение сопротивления заземления опоры линии – в случае возникновения перекрытия линии на опору, так и сопротивления контура протекания тока

к. з. – например, в случае возникновения перекрытия линии на деревья. В отличие от сопротивления заземления опоры ВЛ, величина которого определяется в ПУЭ и находится в пределах 10–30 Ом, сопротивление дерева является величиной неизвестной и может быть выше указанных значений.

На рис. 9 и 10 приведены относительные погрешности алгоритма ОМП на базе спектрального метода при к. з. на воздушном участке линии ПТ (рис. 9) и при к. з. на кабельном участке линии ПТ (рис. 10) через переходное сопротивление 30 Ом.

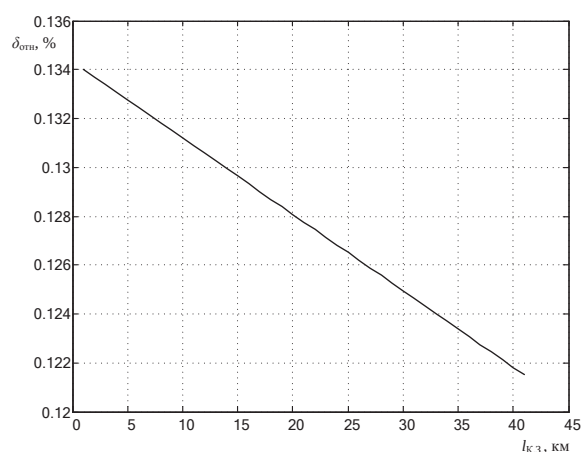


Рис. 10. Относительная погрешность предлагаемого метода ОМП при к. з. на ВЛ 110 кВ через переходное сопротивление $R_{п}=30$ Ом

Fig. 10. Relative error of the proposed LFL method during short-circuit in the HVDC line cable segment with the 30 Ohm transient resistance

На рис. 9 видно, что погрешность спектрального метода ОМП, обусловленная наличием переходного сопротивления в месте к. з. величиной порядка 30 Ом, не превышает 0,24 % от длины короткозамкнутого воздушного участка линии постоянного тока. Для кабельного участка линии постоянного тока, как показано на рис. 10, данная погрешность не превышает 0,14 %.

Выводы

Для повышения точности ОМП на ВЛ постоянного тока предлагается проводить детальный анализ частотных составляющих аварийных сигналов по концам ВЛ. В качестве информативного сигнала рассматривается напряжение поврежденного полюса электропередачи ПТ.

Расчет расстояния до места замыкания через переходное сопротивление линии ПТ производит-

ся с учетом двухчастотного фильтра высших гармоник на стороне постоянного тока, включенного в среднюю точку линейного реактора. Для этой цели определяется полная эквивалентная проводимость колебательного контура линии и преобразовательной подстанции.

Учет однородного неповрежденного участка линии при выводе формул для расчета эквивалентной проводимости колебательного контура неоднородной короткозамкнутой линии предлагается производить путем замещения его эквивалентной схемой искусственной линии с сосредоточенными параметрами.

Погрешность предлагаемого метода ОМП, обусловленная наличием переходного сопротивления неизвестной величины в месте к. з., для кабельного и воздушного участков линии не превышает 0,25 % от длины короткозамкнутого однородного участка линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суслова О.В. Современное состояние технологий электропередачи постоянным током и расширение областей их применения в мировой электроэнергетике (по материалам 45-й сессии СИГРЭ) // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2014. – № 2 (71) – С. 154–164.
2. HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems / C.-K. Kim, V.K. Sood, G.-S. Jang, S.-J. Lim, S.-J. Lee. – Singapore: Wiley-IEEE Press, 2009. – DOI: 10.1002/9780470822975.ch2
3. Бальбердин Л.Л. Развитие техники электропередачи постоянным током высокого напряжения в отечественной энергетике. Вклад НИИПТ в теорию и практику создания ППТ и ВПТ (краткий исторический очерк) // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – № 2 (69). – С. 130–148.
4. Ruban N.Yu., Gusev A.S., Pishchulin A.Yu. Application of Detailed Phase Comparison Protection Models for the Analysis of its Operation in Networks with Facts Devices // MATEC Web of Conferences 37. – Tomsk, September 28 – October 2, 2015. – P. 1–5.
5. Разработка гибридных моделей высоковольтных передач постоянного тока для задач всережимного анализа больших энергосистем / А.В. Прохоров, А.С. Васильев, Н.Ю. Рубан, Р.А. Уфа // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 123–132.
6. Abur A., Magnago F.H. Fault location using wavelets // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1998. – № 13 (4). – P. 1475–1480.
7. Abur A., Magnago F.H. Use of time delays between modal components in wavelet based fault location // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2000. – № 22 (6). – P. 397–403.
8. Cui H., Tu N. HVDC Transmission Line Fault Localization Base on RBF Neural Network with Wavelet Packet Decomposition // 12th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM). – Guangzhou, 22–24 June, 2015. – P. 1–4.
9. S-transform based pilot protection method for HVDC transmission lines / Zh. Li, G. Zou, T. Du, W. Yang // 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). – Changsha, 26–29 November 2015. – P. 1667–1672.
10. Shukr M., Thomas D.W.P., Zanchetta P. VSC-HVDC transmission line faults location using active line impedance estimation // 2nd IEEE ENERGYON Conference&Exhibition. – Florence, 9–12 September, 2012. – P. 244–248.
11. Chen P., Xu B., Li Jing. A Traveling Wave Based Fault Locating System for HVDC Transmission Lines // International Conference on Power System Technology. – Chongqing, 22–26 October, 2006. – P. 1–4.
12. Nanayakkara O.M.K.K., Rajapakse A.D., Wachal R. Traveling-wave-based line fault location in star-connected multiterminal HVDC systems // IEEE Power & Energy Society General Meeting. – Vancouver, BC, 21–25 July, 2013. – P. 1.
13. Спектральный метод определения места повреждения на линии постоянного тока / К.А. Герчик, М.И. Мазуров, С.И. Минкин, А.Х. Шлайфштейн // Сб. научных трудов «Автоматизированные системы управления технологическими процессами крупных подстанций, электропередач и вставок постоянного тока». – Л.: Изд-во Энергоатомиздат, 1991. – С. 27–34.
14. Испытания прибора для обнаружения места короткого замыкания на линии электропередачи постоянного тока Волгоград–Донбасс / К.А. Герчик, А.Г. Замятин, М.И. Мазуров, В.Т. Минин, С.И. Минкин // Электрические станции. – 1992. – № 12. – С. 45–53.
15. Nanayakkara O.M.K.K., Rajapakse A.D., Wachal R. Location of DC Line faults in conventional HVDC systems with segments of cables and overhead lines using terminal measurements // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – V. 27. – № 1. – P. 279–288.
16. Thailand-Malaysia HVDC Line Fault Locator System Upgrade / S. Mekkhachai, N.A.A. Ramon, W. Erickson, R. Wachal // HVDC Users Conference. – Shanghai, 23–25 October, 2011. – P. 1–4.
17. Иванова Е.А., Лозина Н.Г., Мазуров М.И. Определение места повреждения в линии электропередачи постоянного тока на базе спектрального метода // Энерго-Эксперт. – 2014. – № 5 (46). – С. 16–19.
18. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Часть первая. Линейные электрические цепи. – М.: Изд-во «Энергия», 1966. – 318 с.
19. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. – СПб.: Изд-во «Синтез Бук», 2011. – 286 с.
20. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – 2-е изд. – М.: Изд-во «Физматгиз», 1962. – 349 с.
21. Поссе А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока. – Л.: Изд-во «Энергия», 1973. – 302 с.
22. Левинштейн М.Л. Операционное исчисление в задачах электротехники. – 2-е изд., доп. – Л.: Изд-во «Энергия», 1972. – 360 с.

Поступила 29.06.2016 г.

Информация об авторах

Иванова Е.А., младший научный сотрудник ОАО «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения».

Лозинова Н.Г., кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора, заведующая НИО-1, ОАО «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения».

UDC 621.314

LINE FAULT LOCATION FEATURES IN THE HVDC LINES CONTAINING CABLE AND OVERHEAD SEGMENTS

Elena A. Ivanova¹,
eleshka.ivanova@gmail.com

Nataliya G. Lozinova¹,
loz2000@mail.ru

¹ JSC High voltage direct current power transmission research institute,
14/A, Kurchatov Street, Saint-Petersburg, 194223, Russia.

The background and relevance of HVDC technology development for Russian electric power system is caused by its operating features and functioning conditions of the Russian Unified Power System (UPS). Using HVDC systems can solve a number of problems, existing nowadays in Russian UPS, such as power supplement of oil platforms and territories accessed through the water barriers, the connection of renewable energy sources to the UPS and to local power grids and others known problems. The relevance of the discussed issue is caused by the need of improving the accuracy of the fault location in the HVDC transmission lines and by the absence of that line fault location (LFL) devices in Russian energy development practice.

The main aim of the study is to improve the accuracy of the spectrum method algorithm for LFL issue for the HVDC lines; to develop the formula of the unknown fault distance determination relying on the transient frequency, HVDC line parameters and the length of HVDC line faulted segment with consideration of an unfaulted segment in the equivalent circuit of the HVDC system.

The methods used in the study. The authors have used the analytical research methods for determining the formula, which allows solving the problem of LFL in DC line using spectrum method. While investigating the accuracy of the proposed LFL spectrum method the mathematical modeling techniques were used.

The results. The authors proposed the LFL spectrum method solving the issue of fault distance determination in the HVDC line containing cable and overhead segments. This method considers the HVDC line containing also smoothing reactors and high harmonic filters. The authors proposed as well the equivalent circuit of the HVDC line unfaulted segment – the equivalent line lumped model. The formula to determine LFL distance, in dependence of the main frequency in the transient voltage spectrum, line parameters and equivalent circuit parameters, was obtained. Inaccuracy of the proposed method, injected by the undetermined value of transient resistance, was estimated.

Key words:

Electrical power transmission line, HVDC transmission line, short circuit, line fault location, transient resistance, spectrum method, travelling wave method.

REFERENCES

1. Suslova O.V. State-of-the-art of HVDC power transmissions and development of their application in the global power industry (review of 45th CIGRE session reports). *STC of Unified Power System Proceedings*, 2014, no. 2 (71), pp. 154–164. In Rus.
2. Kim C.-K., Sood V. K., Jang G.-S., Lim S.-J., Lee S.-J. *HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems*. Singapore, Wiley-IEEE Press, 2009. DOI: 10.1002/9780470822975.ch2
3. Balyberdin L.L. Development of technology of an electricity transmission by HVDC in native power system. Contribution of NIPT to the theory and practice of creation of HVDC and HVDC back-to-back (short historical sketch). *STC of Unified Power System Proceedings*, 2013, no. 2 (69), pp. 130–148. In Rus.
4. Ruban N.Yu., Gusev A.S., Pishchulin A.Yu. Application of Detailed Phase Comparison Protection Models for the Analysis of its Operation in Networks with Facts Devices. *MATEC Web of Conferences*. Tomsk, 2015. pp. 1–5.
5. Prokhorov A.V., Vasilev A.S., Ruban N.Yu. Synthesis of a hybrid model of the VSC FACTS devices and HVDC technologies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 123–132. In Rus.
6. Abur A., Magnago F.H. Fault location using wavelets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, no. 13 (4), pp. 1475–1480.
7. Abur A., Magnago F.H. Use of time delays between modal components in wavelet based fault location. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2000, no. 22 (6), pp. 397–403.
8. Cui H., Tu N. HVDC Transmission Line Fault Localization Base on RBF Neural Network with Wavelet Packet Decomposition. *12th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*. Guangzhou, 2015. pp. 1–4.
9. Li Zh., Zou G., Du T., Yang W. S-transform based pilot protection method for HVDC transmission lines. *5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. Changsha, 2015. pp. 1667–1672.
10. Shukr M., Thomas D. W. P., Zanchetta P. VSC-HVDC transmission line faults location using active line impedance estimation. *2nd IEEE ENERGYON Conference&Exhibition*. Florence, 2012. pp. 244–248.
11. Chen P., Xu B., Li Jing A Traveling Wave Based Fault Locating System for HVDC Transmission Lines. *International Conference on Power System Technology*. Chongqing, 2006, pp. 1–4.
12. Nanayakkara O.M.K.K., Rajapakse A.D., Wachal R. Traveling-wave-based line fault location in star-connected multiterminal HVDC systems. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Vancouver, BC, 2013. p. 1.
13. Gertsik K.A., Mazurov M.I., Minkin C.I., Shlayfshteyn A.Kh. Spektralny metod opredeleniya mesta povrezhdeniya na linii postoyannogo toka [Spectrum line fault location method in the HVDC transmission line]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami krupnykh podstantsii, elektroperedach i ustavok postoyannogo toka* [Automated control systems of the procedures at major substations, power transmission and HVDC link]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1991, pp. 27–34.

14. Gertsik K.A., Zamyatin A.G., Mazurov M.I., Minin V.T., Minin S.I. Ispytaniya pribora dlya obnaruzheniya mesta korotkogo замыкания на линии электропередачи постоянного тока Волгоград–Донбасс [Tests of the device to detect line fault location point in the Volgograd–Donbass HVDC transmission line]. *Elektricheskie stantsii*, 1992, no. 12, pp. 45–53.
15. Nanayakkara O.M.K.K., Rajapakse A.D., Wachal R. Location of DC line faults in conventional HVDC systems with segments of cables and overhead lines using terminal measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, vol. 27, no. 1, pp. 279–288.
16. Mekkhachai S., Ramon N.A.A., Erickson W., Wachal R. Thailand-Malaysia HVDC Line Fault Locator System Upgrade. *HVDC USERS CONFERENCE*. Shanghai, 2011. pp. 1–4.
17. Ivanova E.A., Lozinova N.G., Mazurov M.I. Opredelenie mesta povrezhdeniya v linii elektroperedachi postoyannogo toka na baze spektralnogo metoda [Line fault location algorithm in the HVDC line based on the spectrum method]. *EnergoEkspert*, 2014, no. 5 (46), pp. 16–19.
18. Atabekov G.I. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Ch. 1. Lineinye elektricheskie tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering. P. 1. Linear electric circuits]. Moscow, Energiya Publ., 1966. 318 p.
19. Evdokunin G.A. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Saint-Petersburg, Sintez Buk Publ., 2011. 286 p.
20. Linnik Yu.V. *Metod naimenshikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy* [Least square method and fundamentals of the math-statistical theory of observation analysis]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 349 p.
21. Posse A.V. *Skhemy i rezhimy elektroperedach postoyannogo toka* [Schemes and operating modes of the HVDC systems]. Leningrad, Energiya Publ., 1973. 302 p.
22. Levinshteyn M.L. *Operatsionnoe ischislenie v zadachakh elektrotekhniki* [Operational calculus for electrical engineering issues]. Leningrad, Energiya Publ., 1972. 360 p.

Received: 29 June 2016.

Information about the authors

Elena A. Ivanova, junior researcher, High voltage direct current power transmission research institute.

Nataliya G. Lozinova, Cand. Sc., deputy general manager, associate professor, High voltage direct current power transmission research institute.