

УДК 621.311

DOI 10.46960/2658-6754_2023_2_78

**ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА
ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
В МЕСТЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ
НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

А.Н. Висящев

e-mail: visan@istu.edu

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия

Э.Р. Пленков

e-mail: eduard.plenkov@mail.ru

ООО «Иркутская нефтяная компания»
Иркутск, Россия

Д.С. Федосов

ORCID: [0000-0001-5989-9549](https://orcid.org/0000-0001-5989-9549) e-mail: fedosov_ds@istu.edu

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия

Представлены результаты применения математической модели линии электропередачи, учитывающей сопротивление заземляющих устройств опор линии и подстанций по ее концам, а также сопротивление грозозащитного троса и способа его заземления. Эти результаты позволили установить, что при наиболее частых однофазных коротких замыканиях переходное сопротивление имеет не только активную, но и значительную реактивную составляющую. Отмечено влияние способа заземления грозозащитного троса (напрямую или через искровые промежутки) и пробоя искрового промежутка в месте короткого замыкания на величину и характер переходного сопротивления в месте короткого замыкания. Актуальность задачи определяется тем, что неучет реактивной составляющей переходного сопротивления при однофазных коротких замыканиях приводит к появлению погрешностей до 10 % при применении наиболее простых методов определения места повреждения по замерам токов и напряжений с одной стороны воздушной линии. Подтверждено, что при междуфазных коротких замыканиях переходное сопротивление это только активное сопротивление электрической дуги. Рассмотрены результаты измерений токов и напряжений на реальной линии электропередачи 110 кВ, проведена обработка замеров для определения места повреждений с учетом и без учета реактивной составляющей переходного сопротивления. Подтверждено влияние реактивной составляющей сопротивления на точность определения места повреждения.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, грозозащитный трос, короткое замыкание, определение места повреждения, переходное сопротивление, сопротивление дуги, электрическая дуга.

Для цитирования: Висящев А.Н., Пленков Э.Р., Федосов Д.С. Оценка величины и характера переходного сопротивления в месте короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 78-89. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_78

EVALUATION OF VALUE AND TYPE OF FAULT IMPEDANCE ON HIGH VOLTAGE OVERHEAD TRANSMISSION LINES

A.N. Visyashchev

e-mail: visan@istu.edu

Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russia

E.R. Plenkov

e-mail: eduard.plenkov@mail.ru

Irkutsk Oil Company LLC

Irkutsk, Russia

D.S. Fedosov

ORCID: [0000-0001-5989-9549](https://orcid.org/0000-0001-5989-9549) e-mail: fedosov_ds@istu.edu

Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russia

Abstract. The article deals with the issue of taking into account the value and type of the transient impedance at the point of short circuit when remotely locating the fault on overhead power lines. It is traditionally believed that the transient impedance is only the resistance of the electric arc and therefore has an active type. Several methods of one-sided fault location have been implemented using this assumption. However, the mathematical model of the power line applied in this paper, taking into account the resistance of the grounding devices of the line supports and substations at its ends, as well as the resistance of the ground wire cable and the method of its grounding. This model made possible to establish the following: with the most frequent single-phase short circuits, the transient resistance has not only an active, but also a significant reactive part. The paper notes the influence of the method of grounding the ground wire cable (solidly or through spark gaps) and the breakdown of the spark gap at the place of fault on the value and type of fault impedance. Failure to take into account the reactive component of the fault impedance in single-phase faults will lead to errors of up to 10% when using the simplest methods for fault location by measuring currents and voltages on one side of the overhead line. At the same time, it has been confirmed that in case of phase-to-phase faults, the transient impedance is only the active resistance of the electric arc. The results of measurements of currents

and voltages on a real 110 kV transmission line are considered, measurements are processed to locate the fault point with and without taking into account the reactive component of the transient impedance. The influence of the reactive component of the impedance on the accuracy of fault location has been confirmed.

Keywords: arc resistance, electric arc, fault impedance, fault location, overhead ground wire, overhead transmission line, short circuit.

For citation: A.N. Visyashchev, E.R. Plenkov and D.S. Fedosov, «Evaluation of value and character of fault impedance on high voltage overhead transmission lines», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 78-89, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_78

I. Введение

Определение места повреждения (ОМП) на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения (ВЛ) является важнейшей задачей электросетевых предприятий. Точное ОМП на ВЛ позволяет существенно сократить время ликвидации аварии. На данный момент в России и за рубежом разработано множество методов и устройств ОМП, однако их погрешность все еще достаточно велика. В связи с этим, актуально развитие ОМП, чему уделяется большое внимание. Широкое распространение получили методы ОМП по параметрам аварийного режима, которые делятся на методы одностороннего и двухстороннего измерения [1-8]. В 1990-е гг. микропроцессорные устройства, реализующие методы ОМП, начали внедряться в отечественную энергетику. На тот момент наибольшее распространение получили устройства, реализующие методы ОМП по измерениям токов и напряжений с одной стороны ВЛ (односторонние методы ОМП), что связано с простотой использования устройств одностороннего ОМП.

Одним из важных факторов, влияющих на точность односторонних методов ОМП, является переходное сопротивление в месте короткого замыкания (КЗ) [1-10], поэтому внимание к этому параметру является приоритетным при разработке методов ОМП. При междуфазных КЗ на ВЛ переходное сопротивление в месте КЗ определяется только сопротивлением электрической дуги $Z_{\Gamma} = R_{\Gamma}$. При КЗ на землю переходное сопротивление определяется сопротивлением электрической дуги R_{Γ} и сопротивлением грозозащитного троса (ГТ) $Z_{\Gamma T}$, сопротивлениями контуров заземления опор $Z_{3y,оп}$, сопротивлениями контуров заземления подстанций $Z_{\Gamma C}$ по концам ВЛ. Определение параметров дуги R_{Γ} в месте КЗ рассмотрено в ряде работ [1-9], однако до сих пор отсутствует достоверная оценка величины и характера переходного сопротивления Z_{Γ} в месте КЗ. Исследования величины и характера переходного сопротивления Z_{Γ} в месте КЗ проведены на кафедре электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ.

II. Переходное сопротивление

в месте короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи

Исследования [9, 11], показывают, что сопротивление электрической дуги R_d имеет практически чисто активный характер, его величина в основном зависит от длины электрической дуги и величины тока КЗ. Сопротивления контуров заземления опор $Z_{3у.оп}$ и подстанций $Z_{ПС}$ зависят от конструкции заземляющего устройства и удельного сопротивления грунта [12-14]. Сопротивление грозозащитного троса $Z_{ГТ}$ зависит от параметров грозозащитного троса, высоты подвески и способа его заземления.

Согласно [12-16], на ВЛ 150 кВ и ниже изолированное крепление ГТ выполняется на металлических и железобетонных анкерных опорах. Для снижения потерь электроэнергии от индуктированных в ГТ токов крепление ГТ на опорах ВЛ 220-750 кВ выполняют при помощи изоляторов, снабженных шунтирующими искровыми промежутками (ИП). ГТ заземляется наглухо на каждой опоре на подходах ВЛ 110-330 кВ к подстанциям, а также на каждом анкерном участке длиной до 10 км.

При КЗ вследствие перекрытия по поверхности гирлянды изоляторов на опоре, где ГТ изолирован, ток КЗ $I_{КЗ}$ протекает через тело опоры и ее заземляющее устройство, т. е. $I_{КЗ} = I_{3у}$ (рис. 1, а).

Если ГТ на опоре заземлен наглухо, то часть тока КЗ $I_{КЗ}$ протекает через ГТ: $I_{ГТ} = I_{КЗ} - I_{3у}$ (рис. 1, б). Если ГТ на опоре заземлен через ИП, то при КЗ возможно два случая:

- 1) ИП не пробит, тогда $I_{КЗ} = I_{3у}$, что эквивалентно показанному на рис. 1, а для изолированного троса;
- 2) ИП пробит, тогда $I_{ГТ} = I_{КЗ} - I_{3у}$, что эквивалентно показанному на рис. 1, б для глухозаземленного троса.

На рис. 2 приведена эквивалентная схема замещения ВЛ с двухсторонним питанием при КЗ для случая, когда ГТ заземлен наглухо на конечных и анкерных опорах, и пробит ИП в точке КЗ. Данная схема справедлива для случая КЗ, когда ГТ по всей длине ВЛ на опорах заземлен наглухо.

На схеме (рис. 2) показаны: E'_C, E''_C и Z'_C, Z''_C – соответственно ЭДС и сопротивления систем (С1 и С2) по концам ВЛ; $I'_{КЗ}, I''_{КЗ}$ и $Z'_{КЗ}, Z''_{КЗ}$ – токи и сопротивления заземляющих устройств С1 и С2; I', I'' и $Z'_Л, Z''_Л$ – соответственно токи и сопротивления участков поврежденной ВЛ; $I'_{ГТ}, I''_{ГТ}$ и $Z'_{ГТ}, Z''_{ГТ}$ – соответственно токи и сопротивления ГТ; $I'_{3у}, I''_{3у}$ и $Z'_{3у}, Z''_{3у}$ – соответственно токи и сопротивления заземляющих устройств опор; $Z_{3у}$ – сопротивление заземляющего устройства опоры, в месте КЗ; $I_{КЗ}$ и R_d – соответственно ток КЗ и сопротивление электрической дуги в месте КЗ.

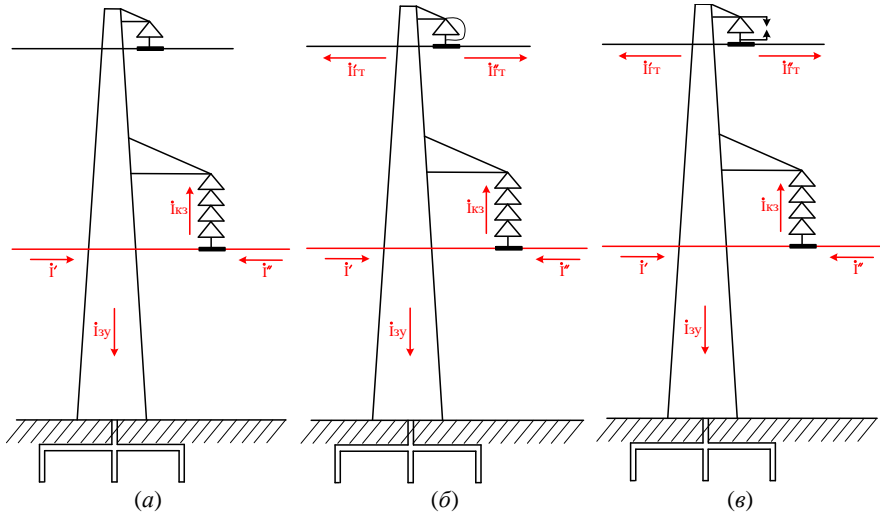


Рис. 1. Составляющие тока короткого замыкания на опоре ВЛ:

ГТ на опоре изолирован (а); ГТ на опоре заземлен наглухо (б);

ГТ на опоре заземлен через ИП (в)

Fig. 1. The components of the short-circuit current on the pole of the overhead line:
ground wire on the pole is isolated (a); ground wire on the pole is solidly grounded (б);
ground wire on the pole is grounded through a spark gap (в)

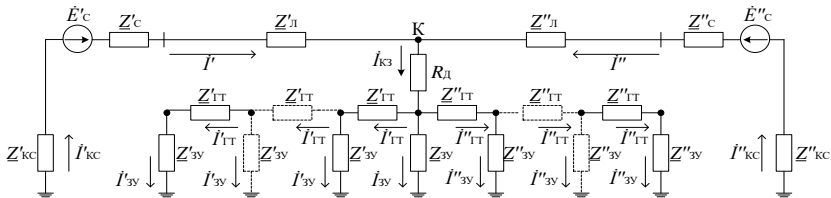


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения ВЛ с заземленным наглухо ГТ на конечных и анкерных опорах и с пробитым ИП в месте КЗ

Fig. 2. Equivalent circuit of an overhead line with a solidly grounded ground wire on the terminal and anchor poles and with a broken-down spark gap at the place of fault

Согласно рис. 2, путь протекания тока от точки КЗ до точек нулевого потенциала проходит через сопротивление электрической дуги, сопротивление контуров заземления опор и сопротивления ГТ. При этом переходное сопротивление в месте КЗ определено по выражению:

$$\underline{Z}_{\Pi} = R_{\text{д}} + \frac{\underline{Z}_{3\text{У}} \cdot \underline{Z}_{\text{ЭКВ}}}{\underline{Z}_{3\text{У}} + \underline{Z}_{\text{ЭКВ}}}, \quad (1)$$

где $\underline{Z}_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное сопротивление ГТ, заземляющих устройств опор и заземляющих устройств подстанций относительно точки КЗ.

III. Оценка величины и характера переходного сопротивления в месте короткого замыкания на воздушной линии электропередачи

Для оценки величины и характера переходного сопротивления в месте КЗ проведены исследования на модели одноцепной ВЛ 110 кВ. Модель ВЛ 110 кВ имеет данные: протяженность 100 км; марка провода АС-150/24; тип промежуточных опор ПБ-108; ГТ марки АЖС-70/39, который по всей длине на опорах заземлен через ИП, а на конечных опорах заземлен наглухо.

Модель ВЛ 110 кВ с ГТ показана на рис. 3. ВЛ 110 кВ разделена на 10 участков, соответствующих анкерным пролетам. Сопротивление системы в начале ВЛ принято чисто индуктивным $\underline{Z}'_{\text{С}} = 0 + j30$ Ом, в конце ВЛ – чисто активным $\underline{Z}''_{\text{С}} = 30 + j0$ Ом. Сопротивление электрической дуги в месте КЗ и контур заземлений опор приняты чисто активными: $R_{\text{д}} = 5$ Ом и $\underline{Z}_{3\text{У}} = 10 + j0$ Ом. Емкостные проводимости ВЛ не учитывались.

В соответствии с методикой расчета, описанной в [1, 2], получена матрица погонных продольных сопротивлений ВЛ в фазных координатах:

$$\underline{Z}_{\text{пог}} = \begin{array}{cccc} 0,254 + j0,738 & 0,05 + j0,377 & 0,05 + j0,334 & \dots \\ 0,05 + j0,377 & 0,254 + j0,738 & 0,05 + j0,359 & \dots \\ 0,05 + j0,334 & 0,05 + j0,359 & 0,254 + j0,738 & \dots \\ 0,05 + j0,392 & 0,05 + j0,365 & 0,05 + j0,369 & \dots \\ \dots & 0,05 + j0,392 & & \\ \dots & 0,05 + j0,365 & & \\ \dots & 0,05 + j0,369 & & \\ \dots & 0,559 + j0,754 & & \end{array}, \text{ Ом/км.} \quad (2)$$

Поскольку на ВЛ около 90 % КЗ являются однофазными, то на составленной модели проведена серия однофазных КЗ в разных точках ВЛ: на расстоянии 20 км, 50 км, 80 км от начала ВЛ. В каждой точке КЗ по соотношению напряжения и тока [9] определено значение переходного сопротивления для следующих вариантов заземления ГТ на ВЛ:

вариант 1 – ГТ на конечных опорах заземлен наглухо, на остальных опорах заземлен через ИП, при этом в месте КЗ не пробит ИП (что соответствует изолированному ГТ по всей длине ВЛ);

вариант 2 – ГТ на конечных опорах заземлен наглухо, на остальных опорах заземлен через ИП, при этом в месте КЗ пробит ИП;

вариант 3 – ГТ на конечных и анкерных опорах заземлен наглухо, при этом в месте КЗ пробит ИП (или КЗ на анкерной опоре). Данное состояние модели ВЛ также соответствует состоянию, где ГТ по всей длине ВЛ заземлен наглухо.

В табл. 1 представлены результаты расчетов переходного сопротивления в трех точках КЗ на ВЛ при различных исполнениях заземления ГТ, также представлены результаты расчетного расстояния до точки КЗ методом одностороннего ОМП (L -метр) [1, 2].

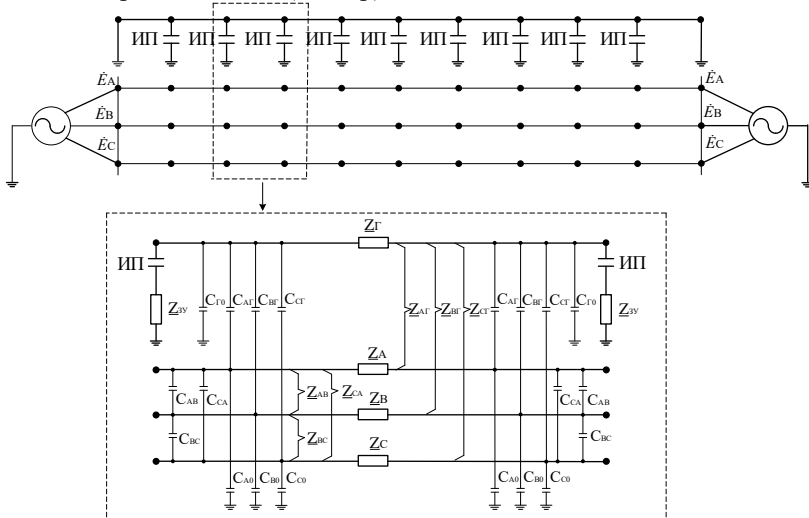


Рис. 3. Модель ВЛ 110 кВ с ГТ, заземленным наглухо на конечных опорах и через ИП на остальных опорах

Fig. 3. 110 kV overhead line model with a ground wire grounded solidly at the terminal supports and through spark gaps at the remaining supports

Представленные в табл. 1 расчеты показывают, что:

- 1) когда ток короткого замыкания $\dot{I}_{КЗ}$ протекает через тело опоры и ее заземляющее устройство согласно рис. 1, а, переходное сопротивление Z_{Π} в месте КЗ при заданных параметрах модели ВЛ имеет чисто активный характер, при этом величина переходного сопротивления Z_{Π} не зависит

от расстояния до места КЗ, а погрешность метода одностороннего ОМП составляет 0 %;

- 2) когда ток короткого замыкания $I_{кз}$ будет протекать через ГТ согласно рис. 1, б и 1, в, переходное сопротивление $Z_{п}$ в месте КЗ при заданных параметрах модели ВЛ имеет активно-индуктивный характер, при этом величина переходного сопротивления $Z_{п}$ практически не зависит от расстояния до места КЗ, а погрешность дистанционного метода одностороннего ОМП варьируется от 4 до 10 %.

Таблица 1.

Переходное сопротивление в точке КЗ при различных вариантах заземления ГТ и расчетное расстояние до точки КЗ, полученное дистанционным методом одностороннего ОМП на модели ВЛ 110 кВ

Table 1.

Fault impedance with different options for grounding the ground wire and the calculated distance to the fault point obtained by the remote one-sided fault location method on the 110 kV overhead line model

Фактическое расстояние до точки КЗ $L_{кз.факт.}$, км	Расчетные значения Переходного сопротивления $Z_{п}$, Ом	Расчетное расстояние до точки КЗ $L_{кз.расч.}$, км
<i>Вариант 1</i>		
20	$15 + j0$	20
50	$15 + j0$	50
80	$15 + j0$	80
<i>Вариант 2</i>		
20	$11,804 + j1,502$	18,96
50	$12,561 + j1,519$	47,33
80	$11,814 + j1,514$	75,52
<i>Вариант 3</i>		
20	$9,174 + j1,616$	18,66
50	$9,18 + j1,67$	47,18
80	$9,176 + j1,621$	75,12

В табл. 2 приведены результаты расчетов переходного $Z_{п}$ сопротивления в месте КЗ на реальной ВЛ 110 кВ, которая со следующими данными: длина 67,38 км; марка провода АС-150/24; тип промежуточных опор ПБ-108; ГТ марки ТК-50, который по всей длине заземлен наглухо на опорах.

Представленные в табл. 2 расчеты показывают, что:

- 1) при двухфазном КЗ (№ 1), когда в месте КЗ есть только сопротивление электрической дуги $R_{д}$, переходное сопротивление $Z_{п}$ имеет малую индуктивную составляющую. Это связано с погрешностью измерения регистрирующих приборов и принятыми допущениями в расчетах, при

этом погрешность дистанционного метода одностороннего ОМП составляет около 0,5 %;

- 2) при однофазном КЗ (№ 2-7) переходное сопротивление Z_{Π} в месте КЗ имеет активно-индуктивный характер, величина которого практически не зависит от расстояния до места КЗ, при этом погрешность дистанционного метода одностороннего ОМП варьируется от 4 до 8 %.

Таблица 2.

Переходное сопротивление в месте КЗ и расчетное расстояние до точки КЗ, полученное дистанционным методом одностороннего ОМП на ВЛ 110 кВ

Table 2.

Fault impedance and the calculated distance to the fault point, obtained by the remote one-sided fault location method on a 110 kV overhead line

№	Поврежденная фаза	Фактическое расстояние до точки КЗ $L_{КЗ.факт.}$, км	Z_{Π} , Ом	Расчетное расстояние до точки КЗ $L_{КЗ.расч.}$, км
1	AB	29,85	$3,452 + j0,167$	29,94
2	A	48,65	$6,468 + j3,569$	44,11
3	A	64,12	$5,68 + j2,534$	58,76
4	A	51,4	$6,371 + j3,525$	47,80
5	A	42,92	$6,278 + j3,942$	36,59
6	A	42,6	$8,48 + j4,031$	36,31
7	A	28,101	$6,09 + j4,02$	24,27

IV. Выводы

Применение математической модели и данных реальной линии электропередачи показало, что переходное сопротивление в месте короткого замыкания на линии электропередачи в зависимости от исполнения крепления грозозащитного троса может иметь как активный, так и активно-индуктивный характер. Неучет активно-индуктивного характера переходного сопротивления при одностороннем определении места повреждения на воздушных линиях электропередачи может привести к большим погрешностям, так как односторонние методы используются в предположении, что переходное сопротивление в месте короткого замыкания имеет чисто активный характер. Именно поэтому применение методов определения места повреждения по замерам параметров аварийного режима с одной стороны линии электропередачи обосновано только в случае невозможности использования двухсторонних методов, точность которых не зависит от величины и характера переходного сопротивления и которые следует считать основными.

© Висящев А.Н., 2023
© Пленков Э.Р., 2023
© Федосов Д.С., 2023

Поступила в редакцию 21.03.2023

Принята к публикации 14.04.2023

Received 21.03.2023

Accepted 14.04.2023

Библиографический список

- [1] Висящев А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи. Часть 1. Иркутск: ИрГТУ, 2001. – 188 с.
- [2] Висящев А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи. Часть 2. Иркутск: ИрГТУ, 2001. – 146 с.
- [3] Шилин А.А., Артюшенко Н.С. Анализ дистанционных методов определения мест повреждений линий электропередачи // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2016. № 3 (15). С. 14-18.
- [4] Куликов А.Л., Обалин М.Д. Развитие программного обеспечения для поддержки принятия решения при ликвидации повреждения на линиях электропередачи // Известия вузов. Электромеханика. 2015. № 2. С. 70-75. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-70-75
- [5] Personal E., García A., Parejo A., Larios D.F., Biscarri F., León C. A comparison of impedance-based fault location methods for power underground distribution systems // Energies. 2016. Vol. 9. No. 12. 1022. DOI: 10.3390/en9121022
- [6] Chisholm W.A., Petrache E., Bologna F. Grounding of overhead transmission lines for improved lightning protection // proc. IEEE PES T&D 2010, Apr. 19-22, 2010, New Orleans, LA, USA: IEEE, 2010. P. 1-6. DOI: 10.1109/TDC.2010.5484321
- [7] Zhou Y., Xu G., Chen Y. Fault location in power electrical traction line system // Energies. 2012. Vol. 5. No. 12. P. 5002-5018. DOI: 10.3390/en5125002
- [8] Машенков В.М. Особенности определения места повреждения на ВЛ напряжением 110-750 кВ. СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2005. – 47 с.
- [9] Подшивалин А.Н., Исмуков Г.Н. Адаптация методов определения места повреждения к современным требованиям эксплуатации линий электропередачи // IV Международ. науч.-тех. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», Июнь 3-7, 2013, Екатеринбург, Россия. С. 12-14.
- [10] Хузяшев Р.Г., Писковацкий Ю.В., Якимов О.В. Источники методической погрешности одностороннего алгоритма определения места повреждения на воздушной линии электропередачи по параметрам аварийного режима // Известия Высших Учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2008. № 11-12. С. 96-104.
- [11] Terzija V.V., Koglin H.-J. On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation // IEEE Transactions on Power Delivery. 2004. Vol. 19. No. 3. P. 1012-1017. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.829912
- [12] СТО 56947007-29.130.15.105-2011. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. Введ. 2011-10-14. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2011. – 75 с.

- [13] Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: ЭНАС, 2006. – 552 с.
- [14] РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. Введ. 1999-07-12. С.-Пб.: ПЭИПК, 1999. – 353 с.
- [15] Шевченко М.А., Большанин Г.А. Учет грозозащитного троса при моделировании передачи электрической энергии пониженного качества // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3 (31). С. 135-142. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-135-142
- [16] Дмитриев М.В., Родчихин С.В. Грозозащитные тросы ВЛ 35-750 кВ. Выбор мест заземления // Новости электротехники. 2017. № 2 (104). С. 2-5.

References

- [1] A.N. Visyashchev, *Pribory i metody opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyah elektropredachi. Chast' 1 [Devices and methods for fault location on power lines. Part 1]*. Irkutsk: ISTU, 2001 (in Russian).
- [2] A.N. Visyashchev, *Pribory i metody opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyah elektropredachi. Chast' 2 [Devices and methods for fault location on power lines. Part 2]*. Irkutsk: ISTU, 2001 (in Russian).
- [3] A.A. Shilin and N.S. Artyushenko, “Analysis of remote methods of fault location of power lines”, *Energy and Resource Saving: Industry and Transport*, vol. 3, no. 15, pp. 14-18, 2016.
- [4] A.L. Kulikov and M.D. Obalin, “Software development for decision-making in the elimination of damage on power lines”, *Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, no. 2, pp. 70-75, 2015. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-70-75
- [5] E. Personal, A. García, A. Parejo, D.F. Larios, F. Biscarri and C. León, “A comparison of impedance-based fault location methods for power underground distribution systems”, *Energies*, vol. 9, no. 12, 1022, 2016. DOI: 10.3390/en9121022
- [6] W.A. Chisholm, E. Petrache and F. Bologna, “Grounding of overhead transmission lines for improved lightning protection”, in proc. *IEEE PES T&D 2010*, Apr. 19-22, 2010, New Orleans, LA, USA, pp. 1-6. DOI: 10.1109/TDC.2010.5484321
- [7] Y. Zhou, G. Xu and Y. Chen, “Fault location in power electrical traction line system”, *Energies*, vol. 5, no. 12, pp. 5002-5018, 2012. DOI: 10.3390/en5125002
- [8] V.M. Mashenkov, *Osobennosti opredeleniya mesta povrezhdeniya na VL napryazheniem 110-750 kV [Features of determining the location of damage on overhead lines with a voltage of 110-750 kV]*. St. Petersburg: Energy Training Center, 2005 (in Russian).
- [9] A.N. Podshivalin and G.N. Ismukov, “Adaptaciya metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya k sovremennym trebovaniyam ekspluatatsii linij elektropredachi [Adaptation of methods for determining the location of damage to modern requirements for the operation of power transmission lines]”, in proc. *IV Int. sci.-tech. conf. “Sovremennye napravleniya razvitiya sistem relejnoj zashchity i avtomatiki energosistem [Modern trends in the development of relay protection systems and automation of power systems]”*, Jun. 3-7, 2013, Yekaterinburg, Russia, pp. 12-14 (in Russian).
- [10] R.G. Huzyashev, Yu.V. Piskovatskiy and O.V. Yakimov, “The sources of truncation error of fault-location inferencing one-sided algorithm on the overhead transmission

- line regarding emergency conditions characteristics”, *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, no. 11-12, pp. 96-104, 2008.
- [11] V.V. Terzija and H.-J. Koglin, “On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1012-1017, Jul. 2004. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.829912
- [12] Metodicheskie ukazaniya po kontrolyu sostoyaniya zazemlyayushchih ustrojstv elektroustanovok [Guidelines for monitoring the condition of grounding devices of electrical installations], STO 56947007-29.130.15.105-2011, Oct. 2011 (in Russian).
- [13] *Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules of electrical facilities maintenance]*. 7th ed. Moscow: ENAS, 2006 (in Russian).
- [14] Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setej 6-1150 kV ot grozovyh i vnutrennih perenapryazhenij [Guidelines for the protection of 6-1150 kV electrical networks from lightning and internal overvoltages], RD 153-34.3-35.125-99, July 1999 (in Russian).
- [15] M.A. Shevchenko and G.A. Bolshanin, “Overhead ground-wire cable taken into account while modeling the transmission of lower quality electrical power”, *Systems. Methods. Technologies*, vol. 3, no. 31, pp. 135-142, 2016. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-135-142
- [16] M.V. Dmitriev and S.V. Rodchikhin, “Grozozashhitny`e trosy` VL 35-750 kV. Vy`bor mest zazemleniya [Ground-wire cables of 35-750 kV overhead lines. Choice of grounding points]”, *Novosti e`lektrotekhniki [News of electrical engineering]*, vol. 2, no. 104, pp. 2-5, 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Висящев Александр Никандрович, кандидат технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация

Aleksandr N. Visyashchev, Cand. Sci. (Eng.), professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Пленков Эдуард Русланович, начальник центра управления сетями ООО «Иркутская нефтяная компания», соискатель Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация

Eduard R. Plenkov, head of the electrical network control center of Irkutsk Oil Company LLC, external PhD student of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Федосов Денис Сергеевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация

Denis S. Fedosov, Cand. Sci. (Eng.), head of a department of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation