



## Диагностирование однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6 – 35 кВ

Вагапов Г. В., канд. техн. наук  
Казанский государственный энергетический университет  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51  
vagapov@list.ru

Однофазные замыкания на землю — одни из преобладающих в электрических сетях 6 – 35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. Вариативность топологии сетей, непостоянный характер нагрузок и малые значения токов замыканий существенно осложняют задачу определения как самого факта замыкания, так и локализации его места появления. Математическое моделирование в различных программных средах выявило наличие универсального диагностического признака, проявляющегося в режиме однофазного замыкания на землю. В качестве такого устойчивого признака выступают высшие гармоники тока и напряжения. Теоретические положения подтверждены проведёнными натурными экспериментами. Предложена методика обнаружения однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6 – 35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали с возможностью локализации места повреждения.

**Ключевые слова:** однофазное замыкание на землю, высшие гармоники тока и напряжения, математическая модель электрической сети.

Современные технологические процессы предъявляют повышенные требования к надёжности и бесперебойности электроснабжения. Ранее диагностирование и последующая безотлагательная ликвидация повреждённых элементов сети — одна из важнейших задач электросетевых компаний. Как показывает практика (по данным эксплуатирующих электросетевых компаний) одним из основных видов повреждений в распределительных электрических сетях напряжением 6 – 35 кВ являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ).

Проблеме определения ОЗЗ посвящено большое число публикаций как в отечественных [1, 2], так и в зарубежных изданиях [3 – 7]. Среди наиболее сложных, с точки зрения возможности раннего диагностирования, видов ОЗЗ — перемежающееся дуговое замыкание. Исследователи раскрывают различные подходы к проблеме, что отражено в [1 – 22]. Однако до настоящего времени общепринятое техническое решение данной проблемы отсутствует в связи с разнообразием видов ОЗЗ и конфигураций распределительных электрических сетей напряжением 6 – 35 кВ.

Разнообразие видов ОЗЗ может варьироваться от металлического замыкания с нулевым значением сопротивления в месте замыкания до значений в несколько сотен Ом. Одновременно длительность ОЗЗ может находиться во временном диапазоне от кратковременного до длительно перемежающегося дугового замыкания. Последний вид ОЗЗ представляется как один из наиболее сложных и вместе со сложной топологией сети вызывает наибольшие трудности при локализации участка с местом ОЗЗ.

### Математическая модель

Для проведения теоретического исследования физических процессов в электрической сети напряжением 6 – 10 – 35 кВ в режиме с ОЗЗ использовались два программных продукта Matlab/Simulink и RSCAD. Применение нескольких инструментов моделирования (Matlab/Simulink и RSCAD) вызвано необходимостью снижения влияния погрешностей вследствие различия в заложенных математических моделях сети.

Моделирование дугового перемежающегося ОЗЗ осуществлялось с помощью ключа. Такой способ моделирования показал наиболее близкие значения результатов при сравнении их с экспериментальными данными. С помощью математического моделирования показано проявление высших гармоник (ВГ) токов и напряжений при различных режимах коммутации ключа. Устойчивость проявления резонансных гармоник в иных условиях, нежели в тех, которые обуславливались в имитационной модели использованием жёстко заданного закона коммутации заземляющего ключа (рис. 1), проверялась на моделях, где коммутация ключа происходила по закону случайных чисел.

На рис. 1 представлена моделируемая схема электрической сети в программном продукте RSCAD для режима с ОЗЗ со значением сопротивления в месте замыкания  $R_{\text{ОЗЗ}} = 100 \text{ Ом}$ . На рис. 2 приведена диаграмма распределений токов первой резонансной гармоники частотой 350 Гц и коэффициента гармонических искажений  $k_{\text{гарт}}$ . За базисное значение принят ток 2 А.

Диаграмма на рис. 2 иллюстрирует изменение амплитуды резонансной

гармоники тока в зависимости от удалённости места измерения от места ОЗЗ. Резонансные гармоники в токах линий, отходящих от общих шин центра питания, служат критерием распознавания фидера с ОЗЗ. Наличие в токах ВГ нескольких резонансных гармоник позволяет надёжно выделить полезный сигнал с учётом имеющегося шума и обеспечить надлежащую селективность.

Теоретическое исследование проводилось в программном пакете Matlab/Simulink на модели, схема которой представлена на рис. 3. В качестве моделируемого обозначен режим работы воздушной линии с подключённым к фазе А источником гармонического напряжения  $e(n)$  частотой кратности  $n$  к основной частоте сети. Основной частотой сети принята частота 50 Гц.

Диагностировать возникновение ОЗЗ в электрической сети можно по напряжению нулевой последовательности (НП) на измерительном трансформаторе TV (рис. 3).

На рис. 4 представлены графики изменения первой резонансной частоты: график 1 — изменение первой резонансной частоты воздушной линии длиной 30 км, выполненной проводами АС-95, с волновыми сопротивлениями для прямой (ПП) и нулевой последователь-

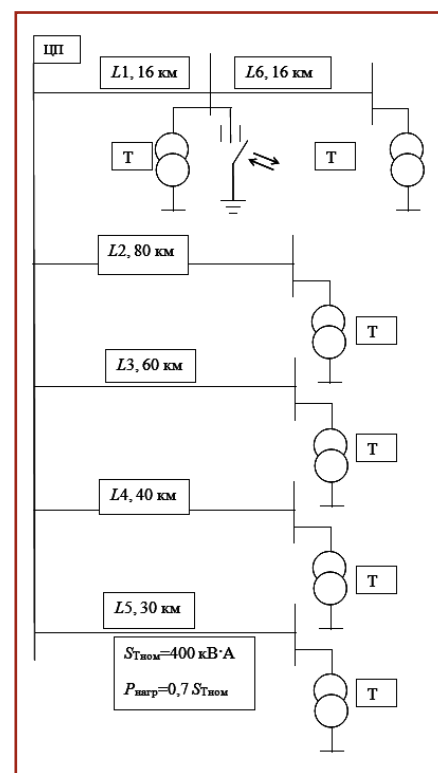


Рис. 1. Принципиальная схема электрической сети:

$L1 - L6$  — длины воздушных линий от центра питания до потребительских подстанций;  $T1 - T6$  — потребительские трансформаторные подстанции напряжением 10/0,4 кВ;  $S$  — полная мощность, кВ·А;  $P$  — активная мощность, кВт

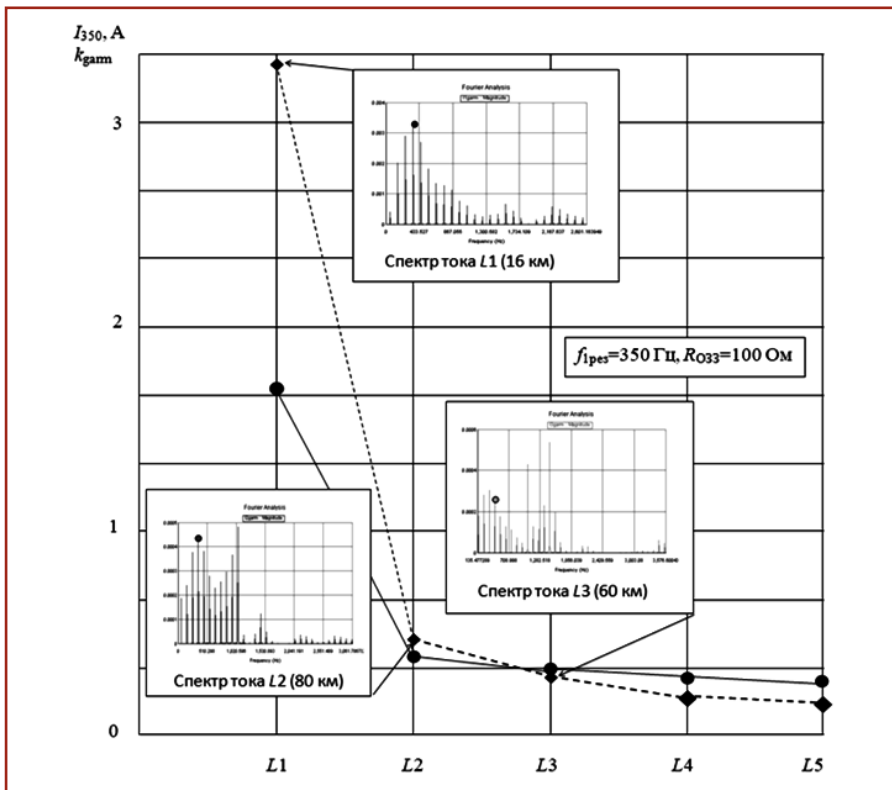


Рис. 2. Распределение токов резонансной гармоники по линиям

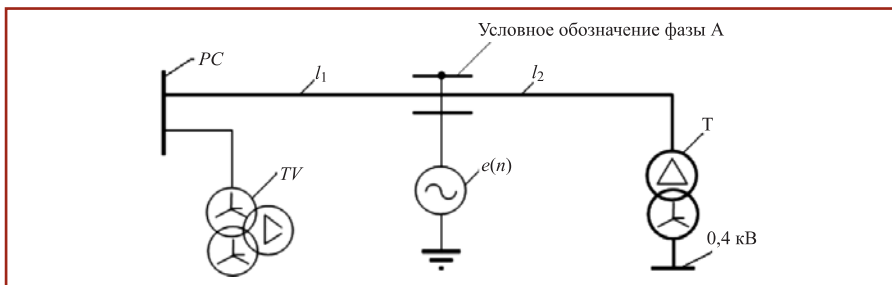


Рис. 3. Принципиальная однолинейная схема модели электропередачи РЭС:

PC — центр питания; T — трансформатор; TV — измерительный трансформатор напряжения;  $e(n)$  — источник высших гармоник;  $l_1$  — длина воздушной линии электропередачи между источником ВГ и началом линии электропередачи;  $l_2$  — длина линии электропередачи между источником ВГ и подстанцией

ности  $z_c = 347,8 \text{ Ом}$  и  $z_c^{(0)} = 974 \text{ Ом}$  ( $\zeta = 2,806$  — отношение волнового сопротивления НП к волновому сопротивлению ПП), коэффициентами изменения фазы для ПП и НП соответственно  $\beta = 0,0010659 \text{ 1/км}$  и  $\beta^{(0)} = 0,0013325 \text{ 1/км}$  в зависимости от места ОЗЗ; график 3 — изменение первой резонансной частоты воздушной линии длиной 30 км с проводами АС-95, волновыми сопротивлениями для ПП и НП  $z_c = 270,0 \text{ Ом}$  и  $z_c^{(0)} = 730,0 \text{ Ом}$  ( $\zeta = 2,703$ ), коэффициентами изменения фазы для ПП и НП соответственно  $\beta = 0,0010835 \text{ 1/км}$  и  $\beta^{(0)} = 0,0017767 \text{ 1/км}$  в зависимости от места ОЗЗ. На рис. 4 проиллюстрированы изменения второй резонансной частоты в зависимости от места возник-

новения ОЗЗ: график 2 — изменение второй резонансной частоты воздушной линии длиной 30 км с проводами АС-95, волновыми сопротивлениями для ПП и НП  $z_c = 347,8 \text{ Ом}$  и  $z_c^{(0)} = 974 \text{ Ом}$  ( $\zeta = 2,806$ ), коэффициентами изменения фазы для ПП и НП соответственно  $\beta = 0,0010659 \text{ 1/км}$  и  $\beta^{(0)} = 0,0013325 \text{ 1/км}$  в зависимости от места ОЗЗ; график 4 — изменение второй резонансной частоты воздушной линии длиной 30 км с проводами АС-95, волновыми сопротивлениями для ПП и НП  $z_c = 270,0 \text{ Ом}$  и  $z_c^{(0)} = 730,0 \text{ Ом}$  ( $\zeta = 2,703$ ), коэффициентами изменения фазы для ПП и НП соответственно  $\beta = 0,0010835 \text{ 1/км}$  и  $\beta^{(0)} = 0,0017767 \text{ 1/км}$  в зависимости от места ОЗЗ.

Номер резонансной гармоники (рис. 4) позволяет определить, на каком расстоянии от шин центра питания подключён источник высших гармоник  $e(n)$ , моделирующих ОЗЗ.

Использование представленной простейшей модели фидера (рис. 3) позволяет определять факторы, влияющие на значения резонансных частот.

На рис. 5 представлен график зависимости значения первых резонансных частот от внутреннего сопротивления источника питания и собственной длины линии.

### Натурный эксперимент

Для оценки соответствия результатов теоретических исследований фактическим процессам при ОЗЗ проведены экспериментальные исследования в действующих электрических сетях напряжением 10 кВ. В одной серии экспериментов были смоделированы перемежающиеся дуговые ОЗЗ (рис. 6), в другой — замыкания через дерево (рис. 7).

На рис. 7 представлены результаты обработки экспериментальных данных при перемежающемся дуговом ОЗЗ. В качестве примера на рис. 7 проиллю-

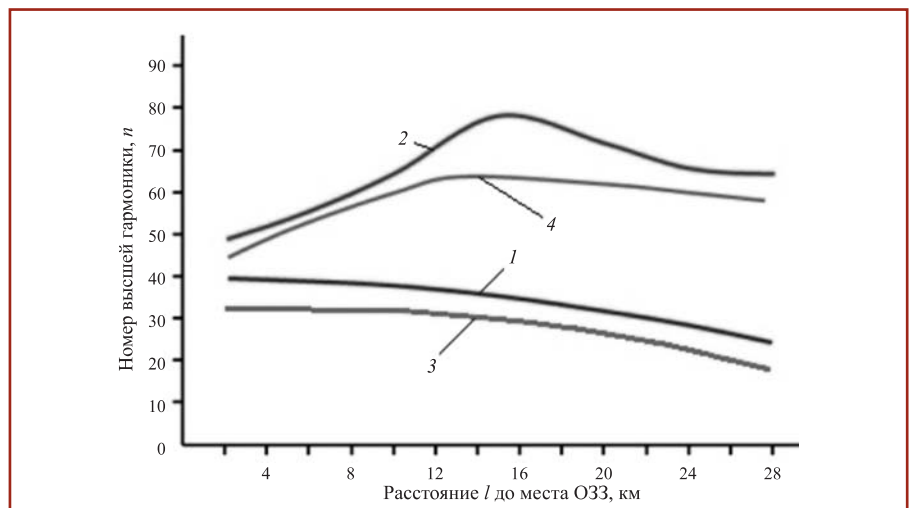


Рис. 4. Графики изменения резонансных частот ВЛ

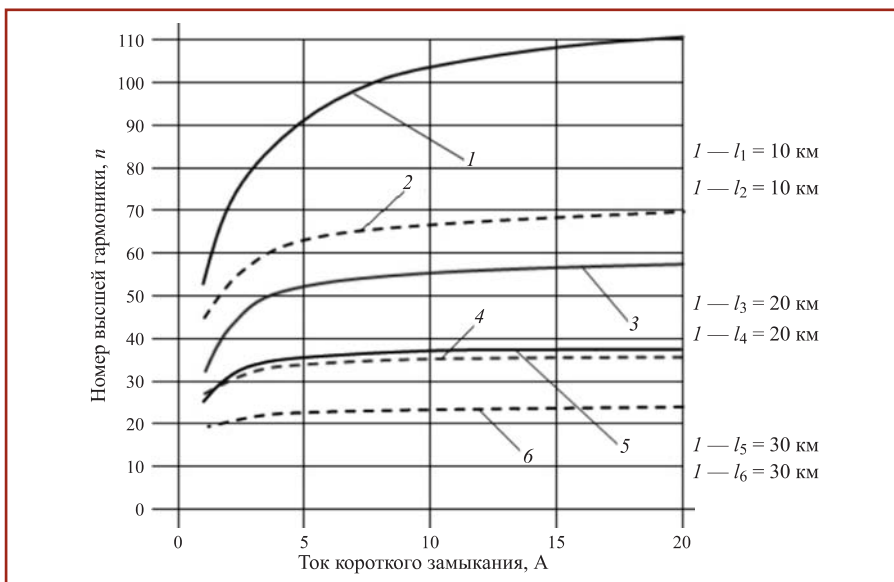


Рис. 5. Граничные значения резонансных частот при поперечном включении источника ВГ: 1, 3, 5 — источник ВГ в начале линии; 2, 4, 6 — источник ВГ в конце линии

стрировано существенное увеличение ВГ напряжения на повреждённой фазе.

### Перспективный способ построения релейной защиты

Проведённые исследования позволяют определить перспективный способ построения пофидерной релейной защиты от ОЗЗ в электрических сетях 6 – 35 кВ. Конструктивно релейная защита состоит из двух блоков. Первый

блок наблюдения осуществляет онлайн-мониторинг ВГ тока и напряжения в электрической сети. Мониторинг проводится путём измерения значений тока и напряжения с дальнейшим аналого-цифровым преобразованием и последующим разложением получаемых данных в ряд Фурье. В качестве первичного блока выступает устройство для диагностики ОЗЗ на воздушных линиях в распределительных электрических се-



Рис. 6. Экспериментальная установка дугового ОЗЗ при натурном эксперименте воспроизведения ОЗЗ на фазе С в сети напряжением

тях с изолированным режимом работы нейтрали напряжением 6 – 10 – 35 кВ [23]. В качестве альтернативного варианта первичного блока возможно использование анализаторов электрических сетей, например, CVM A1500 компании Circutor, имеющих выход RS 485.

Второй логический блок — сервер сбора и обработки данных, устанавливаемый на подстанции с отходящими фидерами. Такой блок служит для анализа частоты и амплитуды ВГ составляющих тока и напряжения по каждому фидеру.

Селективность релейной защиты определяется сопоставлением амплитуд ВГ токов и напряжений на всех отходящих фидерах в относительных единицах. Использование относительных единиц вызвано необходимостью сопоставления ВГ токов и напряжений с разными исходными значениями амплитуд в нормальном режиме на всех отходящих фидерах. Разные исходные значения амплитуд ВГ токов и напряжений обусловлены разнообразием режимов функционирования электрических сетей и потребительских нагрузок. Срабатывание защиты происходит при кратном увеличении значения амплитуд текущих значений ВГ на аварийном фидере.

Чувствительность защиты обеспечивается высокой разрешающей способностью первичных измерителей как по частоте, так и по амплитуде значений токов и напряжений.

Сигнализация о срабатывании защиты при появлении ОЗЗ на фидере осуществляется при превышении амплитуды резонансной гармоники тока на одном из фидеров относительно амплитуд гармоник тока на других фидерах, поступает сообщение на автоматизиро-

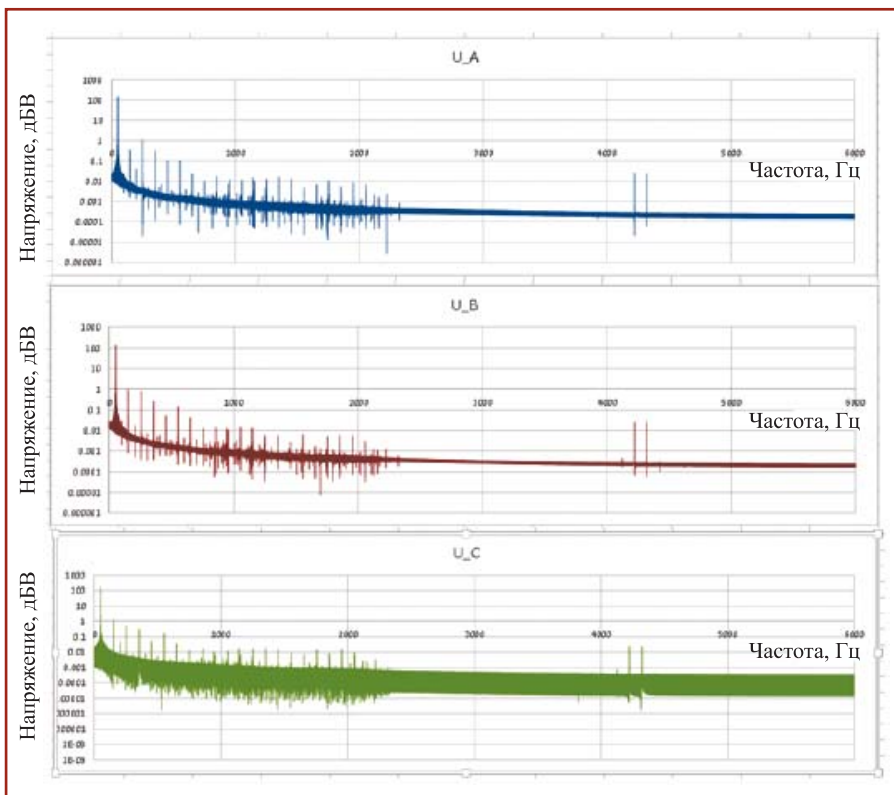


Рис. 7. Быстрое преобразование Фурье напряжения в начале ВЛ

ванное рабочее место в диспетчерский пункт.

### Выводы

Резонансные гармоники тока и напряжения в воздушных линиях электропередачи, возникающие при различных видах ОЗЗ, — надёжные индикаторы самого факта ОЗЗ, также предоставляющие возможность локализовать место ОЗЗ.

Резонансные гармоники тока отходящих от общих шин питающей подстанции служат для распознавания фидера с ОЗЗ. Наличие в токах высших гармоник нескольких резонансных гармоник позволяет надёжно выделять сигнал с учётом имеющегося шума и обеспечить надлежащую селективность защиты от ОЗЗ. Экспериментальные исследования показали, что высшие резонансные гармоники выше уровня шума проявляются и в таких режимах ОЗЗ (замыкание через дерево), когда штатные устройства релейной защиты не распознают наличие замыкания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance* / A. Fedotov, R. Abdullazyanov, G. Vagapov, L. Grackova // 57<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON — 2016). Riga, 13 – 14 October 2016. P. 214 – 219.
2. *Короткие замыкания и несимметричные режимы электроустановок* / М. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев, М. В. Пираторов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 472 с.
3. *Liu Z. Ultra-High Voltage AC / DC Grids*. China Electric Power Press. 2015, 737 pp.
4. *Ozgun O., Abur A. Development of an Arc Furnace Model for Power Quality Studies*. Power Engineering Society Summer Meeting. 1999. № 1. P. 507 – 511.
5. *Arc grounding model and simulation in non-effectively grounded system* / F. Wang, H. Gao, Y. Sun, L. Zhang // 5<sup>th</sup> International Conference on Electric Utility Deregulati-

on and Restructuring and Power Technologies (DRPT). 2015. P. 358 – 362.

6. *From Lightning to Arc Models Studying arcs in electric power systems* / M. Kavi, K. Pirapaharan, P. R. P. Hoole, S. R. H. Hoole // International Conference on Lightning Protection (ICLP). 2014. P. 427 – 434.
7. *IEEE Transactions on Power Delivery* / A. Khakpour, et al. 2016. Vol. 31. Iss. 3. P. 1335 – 1341.
8. *Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы: в 3 т.* / под общ. ред. А. Ф. Дьякова. — М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2012. Т. 1. — 696 с.
9. *Верещаго Е. Н., Костюченко В. И. Модель электрической дуги в MATLAB / SIMULINK* // *Электротехника*. 2013. № 2. С. 40 – 46.
10. *New Frequency Domain Method for the Harmonic Analysis of power system with Arc Furnace* / W. Ting, S. Wennan, Z. A. Yao // 4<sup>th</sup> international conference on advances in power system control. 1997. P. 552 – 555.
11. *The Development of AC Arc Fault Simulation Test Device with Arc Breaking Function* / Q. Zibo; G. Wei; G. Chen; X. Kaili // International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). Vol. 01. P. 224 – 227. doi: 10.1109 / CSE-EUC.2017.47
12. *Arc fault detection for AC SSPC in MEA with HHT and ANN* / W. Liu, et al. // International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS). 2016. P. 7 – 12. DOI: 10.1109/AUS.2016.7748012.
13. *Preemptive Arc Fault Detection Techniques in Switchgear – Part III: From the Laboratory to Practical Installation* / G. A. Husain, M. Shafiq, J. A. Kay, M. Lehtonen // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51. Iss. 3. P. 2615 – 2623. DOI: 10.1109/TIA.2014.2362958
14. *3-D MHD Modeling of Internal Fault Arc in a Closed Container* / M. Rong, et al. // Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32. Iss. 3. P. 1220 – 1227. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2375891
15. *A new DC arc fault detection method using DC system component modeling and analysis in low frequency range* / G. S Seo, et

al. // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2015. P. 2438 – 2444. DOI: 10.1109/APEC.2015.7104690.

16. *MHD Modeling of Fault Arc in a Closed Container* / M. Li, Y. Wu, Yi. Wu, Yi. Liu, Ya. Hu // Transactions on Plasma Science. 2014. Vol. 42. Iss.10. P. 2714 – 2715. DOI: 10.1109/TPS.2014.2329997
17. *Series Arc fault studies and modeling for a DC distribution system* / J. Li, et al. // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2013. P. 1 – 6. DOI: 10.1109/APPEEC.2013.6837250
18. *Simplified Arc-Fault Model: The Reduction Factor of the Arc Current* / G. Parise, L. Martirano, M. Laurini // Transactions on Industry Applications. 2013. Vol. 49. Iss. 4. P. 1703 – 1710. DOI: 10.1109/TIA.2013.2256452
19. *Modeling and simulation analysis of single-phase arc grounding fault based on MATLAB* / R. Yu, et al. // Proc. of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. 2011. Vol. 9. P. 4607 – 4610. DOI: 10.1109/EMEIT.2011.6024001
20. *Динамическая модель печной дуги в Matlab (Simulink)* / А. Н. Черненко, В. В. Вахнина, С. Г. Мартынова // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2. С. 58 – 63.
21. *Абдуллазянов Р. Э. Методика обнаружения места повреждения при однофазных замыканиях на землю в распределительных электрических сетях напряжением 6 – 35 кВ по их частотным характеристикам: дис. ... канд. техн. наук.* — Казань, 2013. — 184 с.
22. *Антонов В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике.* — Чебоксары: Изд-во Чувашского ун-та, 2018. 334 с.
23. *Патент РФ № 2015146316/28. Устройство для диагностики однофазных замыканий на землю на воздушных линиях в распределительных электрических сетях с изолированным режимом работы нейтрали напряжением 6 – 10 – 35 кВ* // Федотов А. И., Абдуллазянов Р. Э., Вагатов Г. В. [и др.] // Патент России № 2015146316/28. Дата заявления 27.10.2015. Дата опубликования 10.04.2016. Бюл. № 10.

## ПОДПИСКА

Цены на подписку через редакцию на второе полугодие 2019 г.

Наименование издания	Подписной индекс	Цена одного экземпляра без почтовых расходов в рублях	
		без НДС	с НДС
Энергетик	71108	1280,00	1408,00
Библиотечка электротехника	88983	790,00	869,00
Энергетика за рубежом	87261	695,00	764,50

115280, Москва,  
3-й Автозаводский проезд, 4, корп. 1.  
Тел. +7 (495) 234-74-21.  
energetick@mail.ru