

УДК 621.313

**ВЛИЯНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ФИДЕРОВ
НА «РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ» ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ
ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ**

Вагапов Г.В., Абдуллин Л.И., Чернова Н.В., Федотов Е.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
vagapov@list.ru

***Резюме:** В статье изложена методика определения значений «резонансных» частот воздушных линий электропередачи в аварийном режиме однофазного замыкания на землю. Учет наличия рабочих фидеров, подключенных к общим шинам центра питания совместно с аварийной линией, выполнен на основе введения в математическую модель дополнительной линии. Показано, что электрическая сеть оказывает влияние на значения «резонансных» частот в сторону их снижения в сравнении работой одиночной линии и уменьшает их зависимость от уровня тока короткого замыкания на шинах центра питания.*

***Ключевые слова:** электрическая сеть, воздушная линия, однофазное замыкание на землю, дополнительная линия, место повреждения, «резонансная» частота.*

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20- 1-2 -54-61

**INFLUENCE OF POWER GRID ON THE “RESONANCE HARMONICS”
OF OVERHEAD POWER LINE DURING THE SINGLE-PHASE GROUND FAULT**

G.V. Vagapov, L.I. Abdullin, N.V. Chernova, E.A. Fedotov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

***Abstract:** Paper show methodic of determine values of «resonance» frequencies on overhead power lines in single-phase ground fault mode. There are introduction of Additional power line in the mathematical model Consideration of Availability of working feeders Connected to the common buses of the power center together with the emergency line. Power grid has influence on the value of the «resonance» frequency in the lowering of the level of value in comparing of working of single line. The value of “resonance” frequency depend from the level of short circuit on the substation buses.*

***Keywords:** power grid, overhead power line, single-phase ground fault, fault place, “resonance” harmonic.*

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в воздушных электрических сетях напряжением 6–35 кВ представляют серьезную опасность как для высоковольтного электрооборудования, так и для потребителей, подключаемых к низшей стороне трансформаторных подстанций (ТП) на стороне 0,4 кВ. При горении перемежающейся дуги в режиме ОЗЗ образуются перенапряжения [1], которые могут спровоцировать дальнейшее развитие аварии в виде коротких замыканий на трансформаторах,

электродвигателях 0,4 кВ, на воздушных линиях электропередачи (ВЛ). Поиск места повреждения сопряжен с отключением фидера на продолжительное время, которое преимущественно требуется на последовательный обход присоединений (отпаек) ВЛ к магистрали с их визуальным осмотром дежурным персоналом. Актуальна задача расчетного определения места повреждения на основе параметров аварийного режима, включая использование высших гармонических составляющих [2–5].

Поскольку при дуговом ОЗЗ происходит генерация высших гармоник [1; 7; 8], применяемая методика определения места замыкания фазного провода на землю основана на использовании значений так называемых «резонансных» частот [6–9]. Это такие частоты, на которых за счет волновых свойств ВЛ (в отличие от явления резонанса для электрических цепей с сосредоточенными параметрами) резко усиливаются соответствующие гармоники тока и напряжения. В результате можно сопоставить «резонансную» частоту длине участка ВЛ от шин центра питания (ЦП) до места замыкания. При этом значения «резонансных» частот изменяются как под влиянием остальных линий электропередачи, подключенных к общей секции шин в центре питания совместно с поврежденным фидером, так и от уровня тока короткого замыкания (КЗ) на шинах ЦП, т.е. от сопротивления питающей сети.

Для построения чувствительной и селективной системы идентификации места ОЗЗ необходимо предварительно оценить диапазон возможного изменения «резонансных» частот, который целесообразно выполнять на упрощенной модели, избегая громоздких вычислений, учитывающих топологию всей распределительной электрической сети, питающейся от шин ЦП. Приблизительно влияние прилегающей электрической сети можно учесть одной дополнительной эквивалентной линией, длина которой находится на основе методики [10; 11], а результаты расчетов распространяются только на диапазон первых «резонансных» частот. В этой связи рассмотрим в качестве базовой модели электрическую сеть (рис. 1), в которой дополнительной электропередачей эквивалентируем электрически связанные с искомым фидером воздушные линии, а возмущающее воздействие электрической дуги вводится в схему однофазным полигармоническим источником $e(n)$, где n – кратность высшей гармоники по отношению к первой частотой 50 Гц.

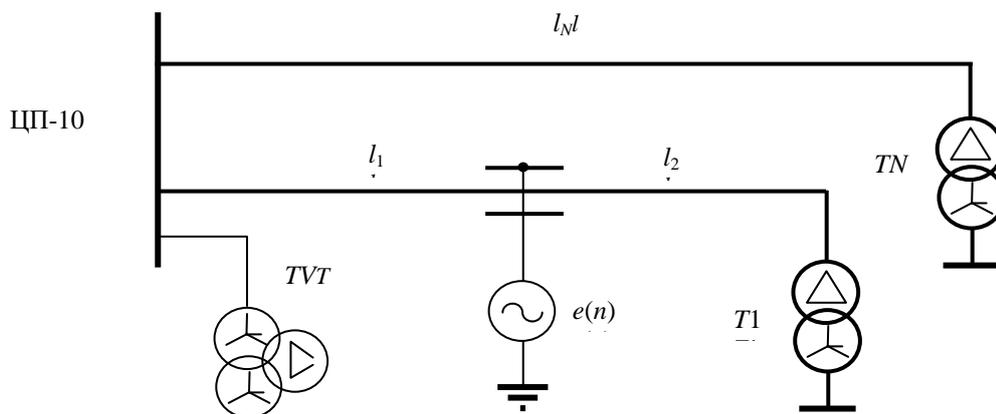


Рис. 1. Принципиальная схема электрической сети

На рис. 2 показана схема замещения электрической сети в режиме ОЗЗ, где сопротивления z представляют собой результирующие сопротивления либо начального участка аварийной линии (нижний индекс 1), либо сопротивления её конечного участка (нижний индекс 2). Верхние индексы 1, 2, 0 соответствуют параметрам прямой, обратной и нулевой последовательностей симметричных составляющих (ПП, ОП, НП).

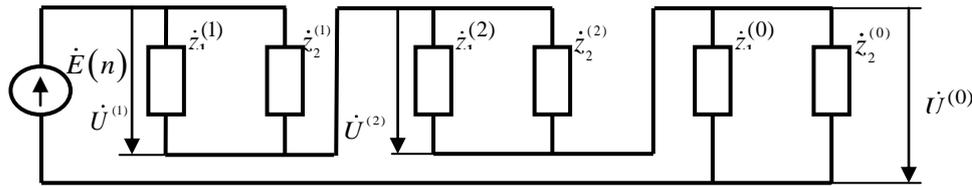


Рис. 2. Результирующая схема замещения моделируемой электрической сети

На рис. 3 в качестве примера показана схема замещения, на основе которой рассчитывается сопротивление $\dot{z}_1^{(1)}$. Через $L_N^{(1)}$ и $L_1^{(1)}$ обозначены четырехполюсники, математически описывающие участки ВЛ как линии с распределенными параметрами, а $\dot{z}_k^{(1)} \approx jn x_k^{(1)}$ – сопротивление питающей электрической сети. Для ТП мощностью 400 кВА и ниже влияние нагрузки на «резонансных» частотах не учитываем [6; 10; 11].

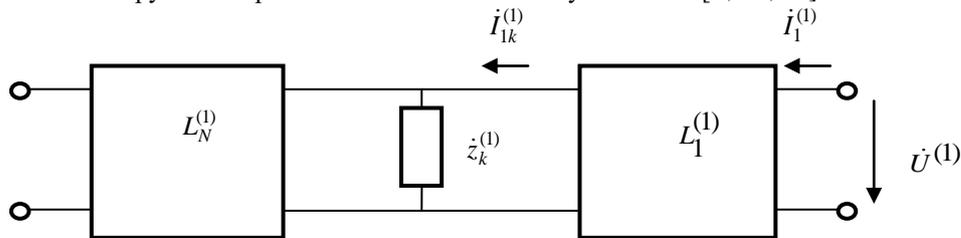


Рис. 3. Схема замещения ПП начального участка линии

Входное сопротивление четырехполюсника $L_N^{(1)}$ равно

$$\dot{z}_N = -jz_c \operatorname{ctg}(n\beta l_N),$$

где z_c – волновое сопротивление ВЛ для ПП и ОП; β – коэффициент изменения фазы волны для ПП и ОП.

Тогда

$$\dot{z}_{N\Sigma}^{(1)} = \dot{z}_N^{(1)} // \dot{z}_k^{(1)} = -jz_c \operatorname{ctg}(n\beta l_N) // jn x_k^{(1)} = \frac{-jz_c \operatorname{ctg}(n\beta l_N) n x_k^{(1)}}{-z_c \operatorname{ctg}(n\beta l_N) + n x_k^{(1)}}. \quad (1)$$

Находим результирующее сопротивление для первого участка электропередачи

$$\dot{z}_{1\Sigma}^{(1)} = z_c \frac{\rho \cos(n\beta l_1) + j \sin(n\beta l_1)}{\cos(n\beta l_1) + j\rho \sin(n\beta l_1)}, \quad (2)$$

где $\rho = \dot{z}_{N\Sigma}^{(1)} / z_c$.

Подставляя выражение (1) в формулу (2), получаем

$$\begin{aligned} \dot{z}_{1\Sigma}^{(1)} &= jz_c \frac{\frac{-\operatorname{ctg}(n\beta l_N) n x_k^{(1)}}{-z_c \operatorname{ctg}(n\beta l_N) + n x_k^{(1)}} \cos(n\beta l_1) + \sin(n\beta l_1)}{\cos(n\beta l_1) + \frac{\operatorname{ctg}(n\beta l_N) n x_k^{(1)}}{-z_c \operatorname{ctg}(n\beta l_N) + n x_k^{(1)}} \sin(n\beta l_1)} = \\ &= -jz_c \frac{n\eta \cos(n\beta l_{N1}) + \cos(n\beta l_N) \sin(n\beta l_1)}{n\eta \sin(n\beta l_{N1}) - \cos(n\beta l_1) \cos(n\beta l_N)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\eta = x_k^{(1)} / z_c$; $l_{N1} = l_1 + l_{N1}$.

Для РЭС напряжением 6–10 кВ можно принять, что $x_k^{(2)} = x_k^{(1)}$, тогда $\dot{z}_{1\Sigma}^{(1)} = \dot{z}_{1\Sigma}^{(2)}$.

Поскольку без учета нагрузки для второго участка ВЛ имеем [12]

$$\dot{z}_2^{(1)} = -jz_c \operatorname{ctg}(n\beta l_2),$$

то с учетом выражения (3) получаем

$$\dot{z}_{1\Sigma}^{(1)} // \dot{z}_2^{(1)} = -jz_c \frac{[m\eta \cos(n\beta l_{N1}) + \cos(n\beta l_N) \sin(n\beta l_1)] \cos(n\beta l_2)}{m\eta \sin(n\beta l_\Sigma) - \cos(n\beta l_N) \cos(n\beta l)}. \quad (4)$$

Сопротивления НП не зависят от внутреннего сопротивления питающей сети, т.к. токи НП в сети с изолированной нейтралью на подстанции ЦП в сеть более высокого напряжения не трансформируются. Тогда для сопротивления НП имеем

$$\dot{z}_\Sigma^{(0)} = \dot{z}_{1\Sigma}^{(0)} // \dot{z}_2^{(0)} = -jz_c^{(0)} \frac{\cos(n\beta^{(0)} l_{N1}) \cos(n\beta^{(0)} l_2)}{\sin(n\beta^{(0)} l_\Sigma)}.$$

В итоге получаем результирующее сопротивление в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{z}_\Sigma = \dot{z}_{1\Sigma}^{(1)} // \dot{z}_2^{(1)} + \dot{z}_{1\Sigma}^{(2)} // \dot{z}_2^{(2)} + \dot{z}_{1\Sigma}^{(0)} // \dot{z}_2^{(0)} = 2\dot{z}_{1\Sigma}^{(1)} // \dot{z}_2^{(1)} + \dot{z}_\Sigma^{(0)} = \\ \cos(n\beta^{(0)} l_{N1}) \cos(n\beta^{(0)} l_2) [m\eta \sin(n\beta l_\Sigma) - \cos(n\beta l_N) \cos(n\beta l)] + \\ + \frac{2}{\zeta} [m\eta \cos(n\beta l_{N1}) + \cos(n\beta l_N) \sin(n\beta l_1)] \cos(n\beta l_2) \sin(n\beta^{(0)} l_\Sigma) \\ = -jz_c^{(0)} \frac{[m\eta \cos(n\beta l_{N1}) + \cos(n\beta l_N) \sin(n\beta l_1)] \cos(n\beta l_2) \sin(n\beta^{(0)} l_\Sigma)}{[m\eta \sin(n\beta l_{N1}) - \cos(n\beta l_1) \cos(n\beta l_N)] \sin(n\beta^{(0)} l_\Sigma)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из формулы (5) получаем, что для определения полюсов частотной характеристики служит уравнение

$$\begin{aligned} \cos(n\beta^{(0)} l_{N1}) \cos(n\beta^{(0)} l_2) [m\eta \sin(n\beta l_\Sigma) - \cos(n\beta l_N) \cos(n\beta l)] + \\ + \frac{2}{\zeta} [m\eta \cos(n\beta l_{N1}) + \cos(n\beta l_N) \sin(n\beta l_1)] \cos(n\beta l_2) \sin(n\beta^{(0)} l_\Sigma) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

На рис. 4 показаны частотные характеристики ВЛ, полученные на имитационной модели сети (рис. 1), где обе ВЛ-10 кВ выполнены проводами АС-95 длиной 30 км с погонными параметрами для прямой последовательности: $L_0=1,18 \cdot 10^{-3}$ Гн/км; $C_0=9,755 \cdot 10^{-9}$ Ф/км и нулевой последовательности: $L_0^{(0)}=4,131 \cdot 10^{-3}$ Гн/км; $C_0^{(0)}=4,355 \cdot 10^{-9}$ Ф/км; активное сопротивление $R_0=0,33$ Ом/км. Источник высших гармоник смещался от шин ЦП (рис. 1), к концу ВЛ дискретно с шагом 5 км. Внутреннее сопротивление питающей сети принято равным нулю.

Расчеты «резонансных» частот для идеализированных линий по уравнению (6) показали совпадение результатов с модельными (рис. 4).

Смысл выполненных преобразований заключается в том, что, имея зависимость $n=f(l_1)$, удовлетворяющую условию (6), и зная из показаний системы мониторинга режима ВЛ «резонансную» частоту n , можно определить, на каком расстоянии l_1 от шин ЦП произошло ОЗЗ. При этом необходимо также иметь оценку влияния сопротивления питающей сети на значения «резонансных» частот в рассматриваемом случае наличия дополнительной линии, поскольку для одиночной ВЛ в работах [7; 11] была показана необходимость его учета в определенном диапазоне частот. Как правило, в электрических сетях вместо значений сопротивлений питающей сети x_k используют значения тока короткого замыкания $I_{кз}$ на шинах ЦП, которые связаны между собой следующей формулой:

$$x_k = U_{\text{НОМ}} / \sqrt{3} I_{\text{КЗ}}$$

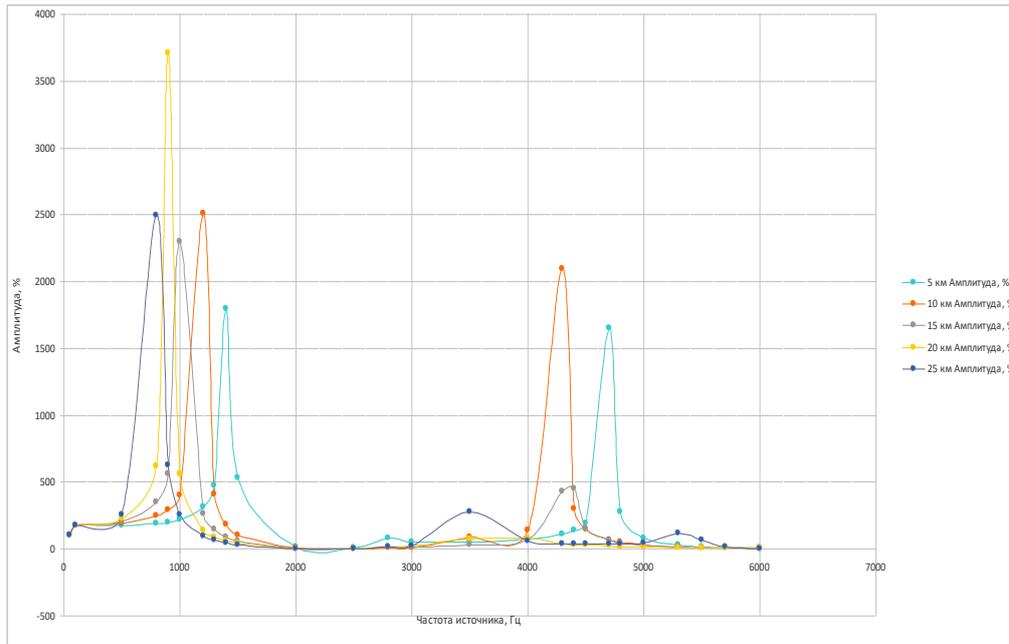


Рис. 4. Частотные характеристики электропередачи

Сформулируем задачу следующим образом: получим функции изменения «резонансных» частот от значений тока КЗ для двух крайних случаев поперечной несимметрии, а именно когда однофазный источник высших гармоник подключен в начале ВЛ, т.е. $l_1 = 0$, и в конце ВЛ, т.е. $l_1 = l$.

В первом случае, когда $l_{N1} = l_N$ и $l_2 = l$, имеем

$$y = \cos(n\beta^{(0)}l_N) \cos(n\beta^{(0)}l) [m\eta \sin(n\beta l_\Sigma) - \cos(n\beta l_N) \cos(n\beta l)] + \frac{2}{\zeta} m\eta \cos(n\beta l_N) \cos(n\beta l) \sin(n\beta^{(0)}l_\Sigma) = 0. \quad (8)$$

Во втором случае, когда $l_{N1} = l_\Sigma$ и $l_2 = 0$, имеем

$$y = \cos(n\beta^{(0)}l_\Sigma) [m\eta \sin(n\beta l_\Sigma) - \cos(n\beta l_N) \cos(n\beta l)] + \frac{2}{\zeta} [m\eta \cos(n\beta l_\Sigma) + \cos(n\beta l_N) \sin(n\beta l)] \sin(n\beta^{(0)}l_\Sigma) = 0. \quad (9)$$

В частном случае, когда $l_N = 0$, уравнения (8) и (9) сводятся к уже известным [11], соответственно при $l_1 = 0$

$$\frac{1}{m\eta} - \operatorname{tg}(n\beta l) = \frac{2}{\zeta} \operatorname{tg}(n\beta^{(0)}l)$$

и при $l_1 = l$

$$\frac{\frac{1}{m\eta} - \operatorname{tg}(n\beta l)}{1 + \frac{1}{m\eta} \operatorname{tg}(n\beta l)} = \frac{2}{\zeta} \operatorname{tg}(n\beta^{(0)}l).$$

Выполним численные расчеты по определению «резонансных» частот, используя уравнения (8) и (9), для значений $l = 30$ и $l=10$ км, $l_N = 30$ и $l_N = 60$ км, используя следующие волновые параметры ВЛ $z_c = 347,8$ и $z_c^{(0)} = 974$ Ом; $\beta = 0,0010659$ 1/км и $\beta^{(0)} = 0,0013325$ 1/км. По результатам расчетов на рис. 5 показаны графики изменения граничных значений «резонансных» частот для двух случаев: $l = 30$ и 10 км.

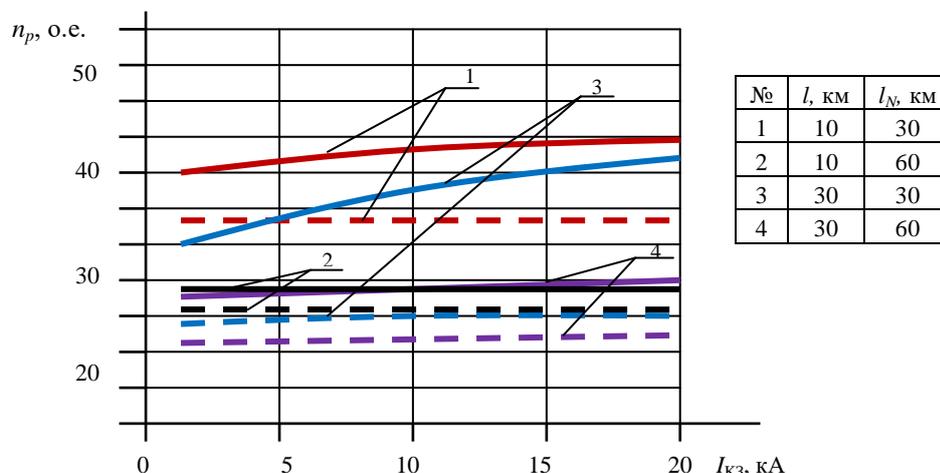


Рис. 5. Граничные значения «резонансных» частот

Сплошные линии на рис. 5 относятся к режиму поперечного однофазного включения источника ВГ в начале ВЛ; пунктирные линии соответствуют режиму подключения однофазного источника ВГ в конце ВЛ.

Анализ полученных графиков и их сравнение с графиками, полученными для одиночной линии [11], показывает, что дополнительная линия влияет в целом на снижение уровня значений граничных «резонансных» частот при ОЗЗ в начале электропередачи. Для короткой линии существенно уменьшается диапазон частот при ОЗЗ по концам электропередачи за счет наличия дополнительной линии. Нижние граничные «резонансные» частоты становятся нечувствительными к уровню токов КЗ на шинах ЦП.

Выводы

«Резонансные» частоты воздушных линий электропередачи, обусловленные ОЗЗ в виде перемежающейся дуги, зависят от прилегающей электрической сети, получающей питание от общих шин подстанции. Чем длиннее прилегающая электрическая сеть, тем ниже становятся «резонансные» частоты в сравнении с одиночной линией.

При удалении источника высших гармоник от шин центра питания «резонансная» частота снижается; с увеличением тока КЗ на шинах центра питания «резонансная» частота растет. Чем больше длина электропередачи и чем выше ток КЗ, тем менее чувствительна «резонансная» частота к этим параметрам. Чем ближе источник высших гармоник к шинам центра, тем менее проявляются резонансные свойства частотной характеристики на передающем конце.

Уровень токов КЗ на шинах ЦП оказывает тем меньшее влияние на «резонансные» частоты, чем длиннее прилегающая электрическая сеть. Нижние значения «резонансных» частот практически не зависят от сопротивления питающей сети.

Литература

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М: Энергия, 1971. 152 с.
2. Yanzhe Li, Xuwei Dong, Duowang Fan. The Analysis and Application of Practical Criterion for Single-Phase-Ground Fault in Ungrounded Power System DOI Bookmark: <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/IHMSC.2009.124>.
3. Seppo Hänninen. Single phase earth faults in high impedance grounded networks. Characteristics, indication and location. VTT Energy. Dissertation for the degree of Doctor of Technology. Technical Research Centre of Finland. Espoo, Finland. (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>).
4. Weixing Xu, Jianjun Zhao, Yandong Hou, Xin Li, Hongliang Tian. The Application of Improved D-S Evidence Theory to Single-Phase Fault Line Selection. Computational Intelligence and Design, International Symposium on, vol. 02, no. , pp. 193-196, 2009, doi:10.1109/ISCID.2009.196.
5. Xin Lu, Guping Zheng, Xueying Liu, "Graphical-Based Modeling Simulation System of Small Current Grounding Fault Location", 2012 Fourth International Conference on Computational and Information Sciences, vol. 00, no. , pp. 1015–1018, 2011, doi:10.1109/ICCIS.2011.159.
6. Зарипова С.Н., Федотов А.И., Абдуллазянов Р.Э. Работа электропередачи распределительной электрической сети напряжением 6-10 кВ в режиме длинной линии // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. № 1–2. С. 75–81.
7. Федотов А.И., Солюянов Ю.И., Абдуллазянов Р.Э. Частотные характеристики электропередачи распределительной электрической сети // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 9–10. С. 176–181.
8. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Роженцова Н.В., Абдуллазянов Р.Э., Курт Ш. Определение мест обрыва и однофазных замыканий на землю в распределительных электрических сетях по параметрам режима на стороне 0,4 кВ понижающих подстанций // Промышленная энергетика. 2016. № 4. С. 34–40.
9. Fedotov A.I., Fedotov E.A., Chernova N.V., Vagapov G.V. Sensors and Methods of the Diagnosis of Higher Harmonics in Overhead Power Lines / The 8th International Scientific Symposium Elektroenergetika 2015. PP. 50–52. Stara Lesna, Slovak Rep.
10. Абдуллазянов Р.Э. Особенности моделирования режимов однофазных замыканий на землю // Materiály VIII mezinárodní vědecko – praktická konference «Vznik moderní vědecké 2012». Díl 18. Technické vědy. Moderní informační technologie: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o - 112 stran. С. 56–61.
11. Абдуллазянов Р.Э. Методика обнаружения места повреждения при однофазных замыканиях на землю в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ по их частотным характеристикам / Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Казань: 2013. 24 с.
12. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 488 с.

Авторы публикации

Абдуллин Линар Ильфатович – аспирант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Вагапов Георгий Валерьянович – канд. техн. наук, доцент, научный сотрудник Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Чернова Наталья Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Федотов Евгений Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Likhachev F.A. Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu i s kompensatsiei emkostnykh tokov. M: Energiya, 1971. 152 p.
2. Yanzhe Li, Xuwei Dong, Duowang Fan. The Analysis and Application of Practical Criterion for Single-Phase-Ground Fault in Ungrounded Power System DOI Bookmark: <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/IHMSC.2009.124>.
3. Seppo Hänninen. Single phase earth faults in high impedance grounded networks. Characteristics, indication and location. VTT Energy. Dissertation for the degree of Doctor of Technology. Technical Research Centre of Finland. Espoo, Finland. (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>).
4. Weixing Xu, Jianjun Zhao, Yandong Hou, Xin Li, Hongliang Tian. The Application of Improved D-S Evidence Theory to Single-Phase Fault Line Selection. Computational Intelligence and Design, International Symposium on, vol. 02, no., pp. 193–196, 2009, doi:10.1109/ISCID.2009.196.
5. Xin Lu, Guping Zheng, Xueying Liu, "Graphical-Based Modeling Simulation System of Small Current Grounding Fault Location", 2012 Fourth International Conference on Computational and Information Sciences, vol. 00, no., pp. 1015–1018, 2011, doi:10.1109/ICCIS.2011.159.
6. Zaripova S.N., Fedotov A.I., Abdullazyanov R.E. Rabota elektroperedachi raspreditel'noi elektricheskoi seti napryazheniem 6–10 kV v rezhime dlinnoi linii // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2012. No. 1–2. P. 75–81.
7. Fedotov A.I., Soluyanov Yu.I., Abdullazyanov R.E. Chastotnye kharakteristiki elektroperedachi raspreditel'noi elektricheskoi seti // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. № 9–10, 2011. P. 176–181.
8. Fedotov A.I., Vagapov G.V., Rozhentsova N.V., Abdullazyanov R.E., Kurt Sh. Opredelenie mest obryva i odnofaznykh zamykanii na zemlyu v raspreditel'nykh elektricheskikh setyakh po parametram rezhima na storone 0,4 kV ponizhayushchikh podstantsii / Promyshlennaya energetika. 2016. № 4. S. 34–40.
9. Fedotov A.I., Fedotov E.A., Chernova N.V., Vagapov G.V. Sensors and Methods of the Diagnosis of Higher Harmonics in Overhead Power Lines / The 8th International Scientific Symposium Elektroenergetika 2015. PP. 50–52. Stara Lesna, Slovak. Rep.
10. Abdullazyanov R.E. Osobennosti modelirovaniya rezhimov odnofaznykh zamykanii na zemlyu // Materiály VIII mez inárovniúvèdecko – praktická konferencie «Vznikmoderníúvèdecké-2012». Díl 18. Technickéúvèdy. Moderní informační technologie: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o 112 stran. P. 56–61.
11. Abdullazyanov R.E. Metodika obnaruzheniya mesta povrezhdeniya pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu v raspreditel'nykh elektricheskikh setyakh napryazheniem 6–35 kV po ikh chastotnym kharakteristikam: avtoref. dis. na soiskanie uch. st. kand. tekhn. nauk. Kazan': 2013. 24 p.
12. Ryzhov Yu.P. Dal'nie elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya. M.: Izdatel'skii dom MEI, 2007. 488 p.

Authors of the publication

Linar Abdullin – post-graduate student of the department "Electric power systems and grids", KSPEU.

Georgii Vagapov – candidate of technical science, associate professor, researcher, KSPEU

Natalia Chernova – candidate of technical science, associate professor of the department "Electric power systems and grids", KSPEU

Evgeny Fedotov – candidate of technical science, associate professor of the department "Power station", KSPEU.