

УДК 621.313

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ВДОЛЬ  
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 6 – 35 кВ НА  
«РЕЗОНАНСНЫХ» ЧАСТОТАХ ПРИ ОЗЗ**

**Федотов А.И., Вагапов Г.В., Чернова Н.В.**

**Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия**  
*fed.ai@mail.ru*

**Резюме:** В статье изложена методика определения места повреждения воздушных линий электропередачи при однофазных замыканиях на землю, сопровождающихся перемежающейся дугой. В качестве информативного признака места замыкания приняты значения напряжений на «резонансных» частотах нулевой последовательности при диагностировании сенсорами, установленными на линии, и напряжения прямой и обратной последовательностей при установке сенсоров на стороне 0,4 кВ понижающих подстанций. Показано, что по известным значениям напряжений «резонансных» гармоник, измеряемых на подстанциях потребителей, можно рассчитать место замыкания. При измерении токов точность расчетов ограничивается участком линии между подключенными потребительскими подстанциями.

**Ключевые слова:** воздушная линия, однофазное замыкание на землю, трансформаторная подстанция, место повреждения, «резонансная» частота.

**DISTRIBUTION OF CURRENTS AND VOLTAGES OF THE "RESONANT"  
FREQUENCIES ALONG THE OVERHEAD POWER LINES OF 6 - 35 KV LEVEL  
VOLTAGE IN SINGLE-PHASE GROUND FAULT MODE**

**A.I Fedotov, G.V. Vagapov, N.V. Chernova**

**Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia**

**Abstract:** Paper show methodic of determine of place of single-phase ground fault with intermittent arc on the overhead power line. The informative signs of single-phase ground fault place are determine by values of voltage of the «resonance» frequencies of zero sequence with measuring by sensors install on the overhead power line and by values of voltage of direct and inverse sequences measuring by sensors install on 0.4 kV side of consumers substations. Place of fault can be calculate by determined values of the voltages of the "resonant" harmonics, measured on consumers substations. Calculation accuracy is limited by parts of power line between consumers substations.

**Keywords:** overhead power line, single-phase ground fault, transformer substation,

В воздушных распределительных электрических сетях напряжением 6 – 35 кВ, отличающихся древовидной топологией, актуальна задача выделения в параметрах режима такого информативного признака, который бы не только выявил на сам факт появления однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), но и однозначно указал на место повреждения. Параметрами, зависящим от расстояния от места ОЗЗ, могут являться значения «резонансных» частот высших гармоник [1 – 8], которые инициирует перемежающаяся дуга. Эта методика основана на волновом эффекте «резонансного» усиления тока в начале

линии, работающей на холостом ходу, если её длина совпадает с четвертью длины волны. В режиме ОЗЗ процессы распространения волны по фазным проводам носят более сложный характер, но и в этих случаях на определенных высших гармониках проявляется тот же эффект: «резонансное» увеличение тока в начале линии и напряжения в конце линии [1,2].

Для одиночных линий значение «резонансной» частоты определяется точкой приложения к линии источника высших гармоник единственным образом. В электрической сети древовидной структуры таких точек может быть несколько. При этом следует учитывать, что и для одиночной линии точность определения места ОЗЗ находится в пределах 20% [5]. Отсюда следует, что повышение точности методики определения расстояния до места ОЗЗ должно быть связано с другим информативным признаком, нежели только номер «резонансной» гармоники. В качестве такового предлагается использование значений напряжений и токов «резонансных» гармоник, измеряемых в различных точках электрической сети.

Отличительной особенностью построения системы определения места ОЗЗ является, во-первых, использование в качестве реперных точек информационных возможностей подключенных к рассматриваемой сети трансформаторных подстанций (ТП), которые оснащаются интеллектуальными сенсорами и приборами учета электроэнергии с системами передачи данных; во-вторых, выделение аварийных параметров режима на стороне 0,4 кВ этих подстанций; в-третьих, обработка результатов измерений непосредственно на месте и их последующая пересылка в центр питания (ЦП), где и реализуется расчет места повреждения.

Рассмотрим электропередачу длиной  $l$ , представленную на рис. 1, на которой установлен однофазный источник напряжения высших гармоник  $e(n)$ , подключенный на расстоянии  $l_1$  от центра питания ЦП. Схема замещения линии электропередачи показана на рис. 2.

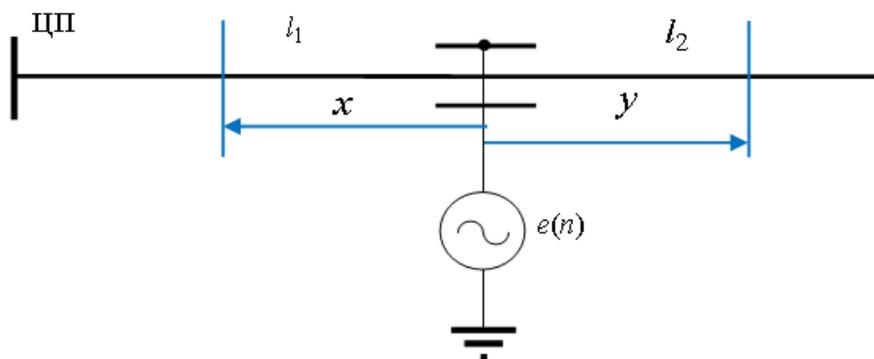


Рис. 1. Принципиальная схема модели электропередачи РЭС

В идеализированной модели примем, что на электропередаче отсутствуют какие-либо дополнительные подключения в виде линейных отпаек. Одновременно предполагаем, что вдоль линии могут быть подключены ТП, на которых могут быть выполнены измерения параметров аварийного режима. Задача состоит в том, чтобы установить, какие именно информативные признаки ОЗЗ зависят от места наблюдения. После чего уже можно будет сделать выводы, доступны ли эти признаки для наблюдения на стороне 0,4 кВ понижающих подстанций или же необходима установка высоковольтных сенсоров на линии электропередачи [3, 8]. На высших «резонансных» гармониках пренебрегаем влиянием маломощных трансформаторных подстанций (400 кВА и ниже), которые проявляют себя как заградительные фильтры [1, 7, 8].

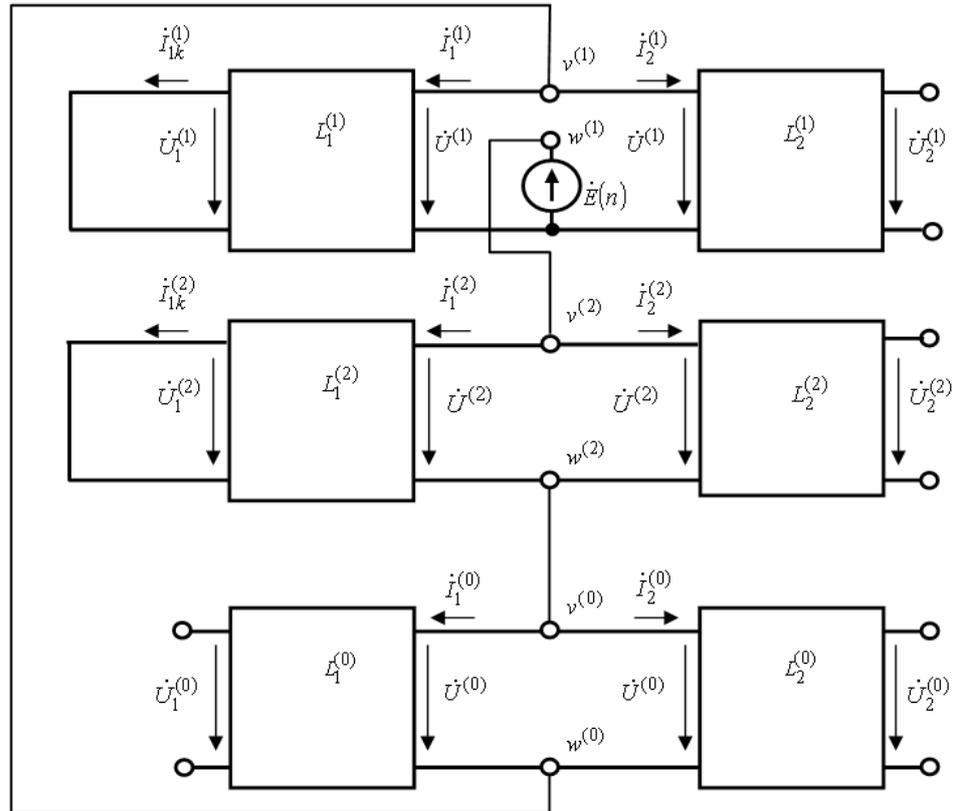


Рис. 2. Схема замещения линии электропередачи

Это означает, что на рис. 2, где последовательно соединяются схемы замещения отдельных последовательностей [9], воздушная линия по отношению источнику высших гармоник работает на холостом ходу. Заметим, что принятое допущение не является принципиальным, а только позволяет явно выделить особенности метода определения места повреждения. При учете влияния нагрузки на высших гармониках необходимо контролировать не только напряжение, но ток «резонансной» гармоники на стороне 0,4 кВ ТП, после чего в соответствующие уравнения, приведенные ниже, вводится дополнительно ток нагрузки, приведенный к стороне высшего напряжения ТП.

Принимаем, что внутренне сопротивление источника в центре питания равно нулю. Данное допущение также не принципиальное, оно позволяет ограничиться более простыми аналитическими соотношениями при изложении предлагаемой методики, и в то же время утяжеляет условия использования информативных признаков ОЗЗ по напряжениям высших гармоник прямой и обратной последовательностей (ПП и ОП) в начале линии, получаемых от трансформаторов напряжения, устанавливаемых на шинах ЦП.

Обозначения на рис. 2 приняты следующие: верхние индексы указывают на номер последовательности симметричных составляющих; нижние индексы – на номер участка линии; через «L» обозначены четырехполюсники, соответствующие схемам замещения в волновых параметрах участков линии. Комплексная схема замещения, рис. 3, в общем виде представляет сопротивления каждой симметричной последовательности для каждого участка электропередачи.

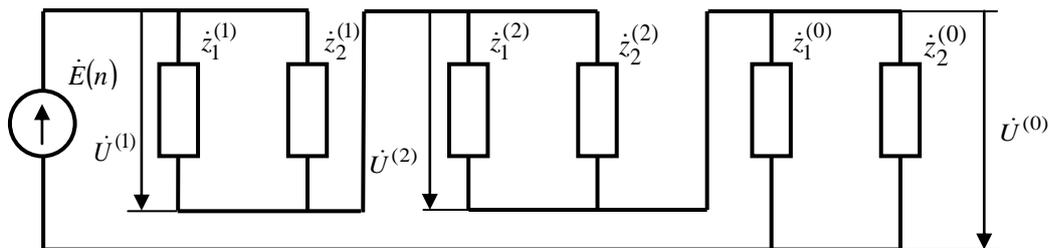


Рис. 3. Комплексная схема замещения электропередачи

Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей имеют следующий вид:

$$\dot{z}_1^{(1)} = \dot{z}_1^{(2)} = jz_c \operatorname{tg}(n\beta l_1), \quad \dot{z}_2^{(1)} = \dot{z}_2^{(2)} = -jz_c \operatorname{ctg}(n\beta l_2), \quad (1)$$

$$\dot{z}_1^{(0)} = -j\dot{z}_c^{(0)} \operatorname{ctg}(n\beta^{(0)} l_1), \quad \dot{z}_2^{(0)} = -j\dot{z}_c^{(0)} \operatorname{ctg}(n\beta^{(0)} l_2), \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент изменения фазы;  $z_c$  – волновое сопротивление линии;  $n$  – номер гармоники.

Тогда находим:

$$\dot{z}_\Sigma^{(1)} = \dot{z}_\Sigma^{(2)} = \dot{z}_1^{(1)} // \dot{z}_2^{(1)} = jz_c \frac{\sin(n\beta l_1) \cos(n\beta l_2)}{\cos(n\beta l)}. \quad (3)$$

$$\dot{z}_\Sigma^{(0)} = \dot{z}_1^{(0)} // \dot{z}_2^{(0)} = -j\dot{z}_c^{(0)} \frac{\cos(n\beta^{(0)} l_1) \cos(n\beta^{(0)} l_2)}{\sin(n\beta^{(0)} l)}. \quad (4)$$

Определим закономерности изменения тока и напряжения в зависимости от удаленности места измерения на расстоянии  $x$  от точки подключения гармонического источника, рис. 1. Воспользуемся известными соотношениями [10] между токами и напряжениями для участка линии:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_x^{(1)} \\ \dot{I}_x^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(n\beta x) & -jz_c \sin(n\beta x) \\ -j\frac{1}{z_c} \sin(n\beta x) & \cos(n\beta x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(1)} \\ \dot{I}_1^{(1)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Из схем замещения, рис. 3, следует, что

$$\dot{I}_1^{(1)} = \dot{I} \frac{z_2^{(1)}}{z_1^{(1)} + z_2^{(1)}}, \quad \dot{U}_1^{(1)} = \dot{I} z_\Sigma^{(1)} = \dot{I} \frac{z_1^{(1)} z_2^{(1)}}{z_1^{(1)} + z_2^{(1)}}. \quad (6)$$

Используя соотношения (5) и (6) и выражения (1) и (2), получаем:

$$\dot{U}_x^{(1)} = \dot{U}_x^{(2)} = jz_c \dot{I} \frac{\cos(n\beta l_2)}{\cos(n\beta l)} \sin[n\beta(l_1 - x)], \quad (7)$$

$$\dot{I}_x^{(1)} = \dot{I}_x^{(2)} = \dot{I} \frac{\cos(n\beta l_2)}{\cos(n\beta l)} \cos[n\beta(l_1 - x)], \quad (8)$$

$$\dot{U}_x^{(0)} = -j\dot{z}_c^{(0)} \dot{I} \frac{\cos(n\beta^{(0)} l_2)}{\sin(n\beta^{(0)} l)} \cos[n\beta^{(0)}(l_1 - x)], \quad (9)$$

$$i_x^{(0)} = i \frac{\cos(n\beta^{(0)}l_2)}{\sin(n\beta^{(0)}l)} \sin[n\beta^{(0)}(l_1 - x)]. \quad (10)$$

Определим закономерности изменения тока и напряжения в зависимости от удаленности места измерения на расстоянии  $y$  от точки подключения гармонического источника, рис. 1. Выполняя промежуточные преобразования, аналогичные выше приведенным, имеем:

$$\dot{U}_y^{(1)} = \dot{U}_y^{(2)} = jz_c i \frac{\sin(n\beta l_1)}{\cos(n\beta l)} \cos[n\beta(l_2 - y)], \quad (11)$$

$$i_y^{(1)} = i_y^{(2)} = -i \frac{\sin(n\beta l_1)}{\cos(n\beta l)} \sin[n\beta(l_2 - y)], \quad (12)$$

$$\dot{U}_y^{(0)} = -jz_c^{(0)} i \frac{\cos(n\beta^{(0)}l_1)}{\sin(n\beta^{(0)}l)} \cos[n\beta^{(0)}(l_2 - y)], \quad (13)$$

$$i_y^{(0)} = i \frac{\cos(n\beta^{(0)}l_1)}{\sin(n\beta^{(0)}l)} \sin[n\beta^{(0)}(l_2 - y)]. \quad (14)$$

Для проверки полученных выражений положим  $x=0$  и  $y=0$ . Тогда

$$\dot{U}_x^{(1)} = jz_c i \frac{\cos(n\beta l_2)}{\cos(n\beta l)} \sin(n\beta l_1), \quad \dot{U}_y^{(1)} = jz_c i \frac{\sin(n\beta l_1)}{\cos(n\beta l)} \cos(n\beta l_2),$$

$$i_x^{(1)} = i \frac{\cos(n\beta l_2)}{\cos(n\beta l)} \cos(n\beta l_1), \quad i_y^{(1)} = -i \frac{\sin(n\beta l_1)}{\cos(n\beta l)} \sin(n\beta l_2).$$

Отсюда получаем, что в точке  $x=0$  и  $y=0$  выполняются граничные условия:

$$i = i_x^{(1)} + i_y^{(1)} = i \frac{\cos(n\beta l_2)}{\cos(n\beta l)} \cos(n\beta l_1) - i \frac{\sin(n\beta l_1)}{\cos(n\beta l)} \sin(n\beta l_2) = i.$$

$$\dot{U}_x^{(1)} = \dot{U}_y^{(1)}, \quad \dot{U}_x^{(1)} + \dot{U}_x^{(2)} + \dot{U}_x^{(0)} = E.$$

Проверка показывает, что граничные условия для напряжений и токов нулевой последовательности также, как и прямой и обратной последовательностей, выполняются при  $x=0$  и  $y=0$ . Если же в выражения (12) и (14) соответственно подставить  $x=l_1$  и  $y=l_2$ , то получим, как и следовало ожидать, нулевые значения токов. Необходимо заметить, что нулевое значение тока нулевой последовательности в начале линии имеет место только в том случае, если рассматривается одиночная линия. Если же присутствуют и другие линии, подключенные к тем же шинам в ЦП, то ток не будет равен нулю в начале искомой линии.

Используя полученные закономерности (7 – 14), рассмотрим методику определения места поперечной несимметрии в случае доступности измерения напряжений НП. Для этого необходимо допустить, что имеются высоковольтные сенсоры напряжения, установленные непосредственно на ТП, подключенных вдоль линии, со стороны их высшего напряжения. В ЦП на секции шин всегда устанавливается трансформатор напряжения, обеспечивающий измерение напряжения нулевой последовательности в начале линии. Выражения (9) и (13) запишем в следующем виде:

$$U_x^{(0)} = A \cos[n\beta^{(0)}(l_1 - x)], \quad U_y^{(0)} = B \cos[n\beta^{(0)}(l_2 - y)].$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  могут быть определены для граничных условий  $x=l_1$  и  $y=l_2$ , т.к. по концам линии напряжения НП известны, т.е.  $A=U_1^{(0)}$  и  $B=U_y^{(0)}$ . Тогда расстояние  $l_1$  находится из уравнения

$$U_1^{(0)} \cos n\beta^{(0)}l_1 = U_2^{(0)} \cos n\beta^{(0)}(l-l_1). \quad (15)$$

Если использовать напряжения ПП (ОП), которые доступны для измерения со стороны 0,4 кВ ТП, то, применяя формулы (7) и (11), получаем следующее уравнение для определения места повреждения:

$$U_1^{(1,2)} \sin n\beta l_1 = U_2^{(1,2)} \cos n\beta(l-l_1), \quad (16)$$

где напряжение  $U_2^{(1,2)}$  после измерения на стороне 0,4 кВ конечной подстанции приведено к напряжению её высшей стороны. Заметим, что напряжение  $U_1^{(1,2)}$  не может быть определено на шинах ЦП, т.к. там напряжения ПП и ОП равны нулю в силу принятого нулевым значения внутреннего сопротивления источника. Однако его можно рассчитать по измеренным напряжениям на стороне 0,4 кВ головных подстанций.

Для проверки предложенной методики определения места поперечной несимметрии была собрана имитационная модель линии с проводами АС-95 длиной 30 км, соответствующая схеме рис. 1, в которой с шагом 5 км размещались виртуальные измерительные приборы. Подразумевалось, что в этих точках подключены ТП, что позволяет использовать значения напряжений прямой и обратной последовательностей высших гармоник на стороне 0,4 кВ. Использование токов и напряжений НП возможно на практике в случае размещения на линии высоковольтных сенсоров. Волновые сопротивления  $z_c = 347,8$  Ом (ПП) и  $z_c^{(0)} = 974$  Ом (НП); коэффициент изменения фазы для ПП и НП, соответственно,  $\beta = 0,0010659$  1/км и  $\beta^{(0)} = 0,0013325$  1/км. Однофазный источник высших гармоник был подключен к линии на расстоянии 7,5 км от ЦП. Имитационное моделирование показало, что первая «резонансная» частота равна 1950 Гц, т.е.  $n_p = 39$ . В таблице приведены результаты измерений. Напряжения выражены в базисе ЭДС источника «резонансной» частоты  $E = 10$  кВ, токи – в базисе тока  $I_6 = E/z_c = 28,75$  А.

Таблица

Значения токов и напряжений симметричных составляющих

$L$ , км	$U^{(1)}$ , о.е.	$U^{(2)}$ , о.е.	$U^{(0)}$ , о.е.	$I^{(1)}$ , о.е.	$I^{(2)}$ , о.е.	$I^{(0)}$ , о.е.
0	0	0	8,22	14,0	14,0	0
5	2,90	2,90	7,94	13,7	13,7	0,75
10	4,88	4,88	9,85	5,36	5,36	5,98
15	5,88	5,88	13,8	4,21	4,21	4,87
20	6,63	6,63	16,9	2,92	2,92	3,44
25	7,08	7,08	18,8	1,50	1,50	1,77
30	7,25	7,25	19,5	0	0	0

На рис. 4 и 5 показаны графики токов и напряжений, построенные по данным таблицы.

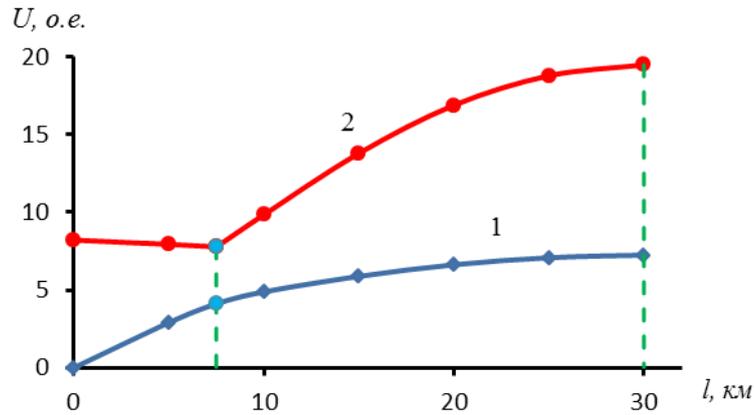


Рис. 4. Изменение напряжений вдоль линии электропередачи:  
 1 – график напряжений прямой (обратной) последовательности;  
 2 – график напряжений нулевой последовательности

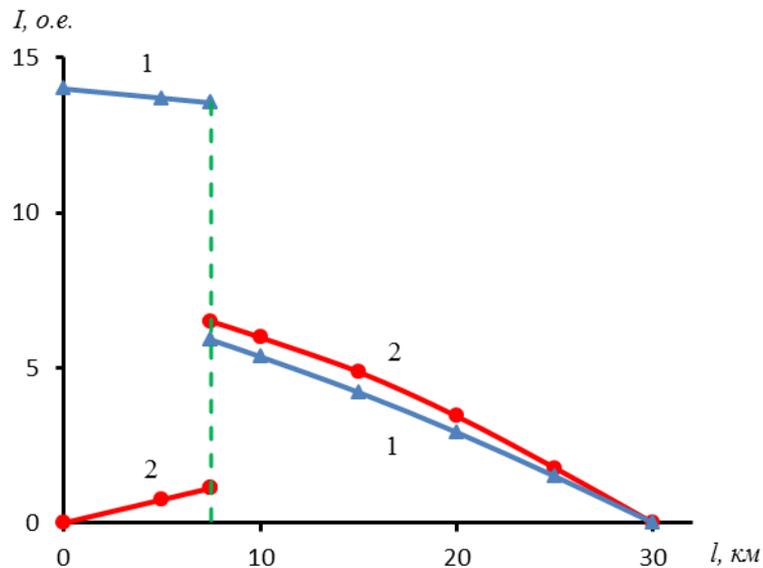


Рис. 5. Изменение токов вдоль линии электропередачи:  
 1 – график токов прямой (обратной) последовательности;  
 2 – график токов нулевой последовательности

Из таблицы получаем, что в уравнении (16)  $U_2^{(1,2)}=7,25$  о.е. Значение  $U_1^{(1,2)}$  находим из уравнения

$$U_x^{(1,2)} = C \sin[n\beta(l_1 - x)] = C \sin[n\beta(l_1 - (l_1 - 5))] = U_1^{(1,2)} \sin(n\beta * 5),$$

где  $U_x^{(1,2)}$  соответствует напряжению на подстанции, подключенной к линии на расстоянии 5 км от её начала. Отсюда получаем  $U_1^{(1,2)}=14,05$  о.е. Теперь можно рассчитать расстояние до места несимметрии по уравнению

$$14,05 \sin(39 * 0,0010659 * l_1) = 7,25 \cos[39 * 0,0010659(30 - l_1)].$$

Решая записанное уравнение, находим, что  $l_1 = 7,49 \approx 7,5$  км.

Если воспользоваться напряжениями НП, согласно данным таблицы получаем следующее уравнение:

$$19,5 * \cos[39 * 0,0013325(30 - l_1)] = 8,22 \cos(39 * 0,0013325 * l_1).$$

Его решение:  $l_1 = 7,493$  км  $\approx 7,5$  км.

Если использовать значения токов на участках линии, то место поперечной несимметрии можно установить только с точностью до величины интервала между точками измерения, как это следует из графиков, представленных на рис. 5. Даже не выполняя вычислений, по данным таблицы можно сказать, что место поперечной несимметрии находится между отметками 5 и 10 км ВЛ, поскольку на отметке 0 км ток ПП равен 14,0 о.е., на отметке 5 км – 13,7 о.е., а на отметках 10 км и 15 км – соответственно 5,36. и 4,21 о.е. По токам НП вывод тот же: на отметке 5 км значение тока 0,75 о.е., на отметке 10 км – 5,98 о.е., на отметке 15 км – 4,87 о.е.

### Выводы

Анализ характера распределения симметричных составляющих напряжений и токов вдоль линии электропередачи показал следующее. Напряжения нулевой последовательности наиболее удобно использовать для определения участка электропередачи, где появилась поперечная несимметрия. Это связано с тем, что напряжения НП монотонно снижаются от начала и конца линии к месту повреждения. И достаточно сравнить значения напряжения в различных точках электропередачи, чтобы установить участок линии, где наличествует повреждение.

Для выделения напряжений НП необходима установка высоковольтных сенсоров, что требует значительных расходов. Напряжения ПП и ОП могут измеряться на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций с использованием многократно более дешевой аппаратуры. Монотонный характер изменения напряжений вдоль линии требует высокой точности исходных данных, закладываемых в математическую модель. Для расчета амплитуд тригонометрических функций достаточно иметь по одному измерению напряжения до и после места несимметрии.

Для повышения достоверности расчетов можно использовать результаты выделения симметричных составляющих напряжений на второй «резонансной» частоте. При этом следует учитывать возможность изменения фазы напряжения вдоль линии.

### Литература

1. Латипов А.Г. Использование высших гармоник напряжения на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций как диагностический признак однофазных замыканий на землю в сетях 6 – 10 кВ // *Электромеханика*. 2011. №5. С. 63-66.
2. Абдуллазянов Р.Э. Математическая модель электропередачи напряжением 6-35кВ при поперечном включении источника высших гармоник // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2013 №1-2. С. 69–73.
3. Вагапов Г.В., Амосов А.М., Чернова Н.В., Абдуллин Л.И. Экспериментальное исследование проявления высших гармоник напряжения на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций как метода ранней диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // *Известия вузов. Электромеханика*. 2014. №4. С. 89–92.
4. Абдуллин Л.И. Раннее выявление замыканий на землю по параметрам напряжения на приемных подстанциях // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2013. №11-12. С. 133–136.
5. QiangFan, KaiHuang, YongXiao, Mei-MeiXu, Jian-GuoChen, WeiGu. The Algorithm Reseach of Detecting Single-Phase-to-Ground Fault Line on Distribution Network with Distributed Generation.

Computer Science and Applications (CSA), 2015 International Conference on. ISBN: 978-1-4799-9962-0. DOI: 10.1109/CSA.2015.50.

6. Dongli Jia; Keyan Liu; Xiaoli Meng; Xiaohui Song. Location of single-phase disconnection fault with non-grounding in distribution grid based on positive sequence voltage. International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015). Year: 2015. Pages: 1 - 6, DOI: 10.1049/cp.2015.0567.

7. 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.

8. 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.

9. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах. М.: Издательство «Омега-Л», 2013. 384 с.

10. Ю.П. Рыжов. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 488 с.

#### Авторы публикации

**Федотов Александр Иванович** – докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС), Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: fed.ai@mail.ru.

**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).

#### References

1. Latipov A.G. Use of higher harmonics of voltage on the 0.4 kV side of consumer substations as a diagnostic feature of single-phase earth faults in 6-10 kV networks // Elektromekhanika - 2011, №5. - P. 63-66.

2. Abdullazyanov R.E. A mathematical model of power transmission with a voltage of 6-35 kV with a transverse inclusion of the source of higher harmonics // Izvestiya VUZov. Problems of energy. - № 1-2, 2013. - P. 69-73.

3. Vagapov GV, Amosov AM, Chernova NV, Abdullin LI Experimental study of the manifestation of higher harmonics of voltage on the 0.4 kV side of consumer substations as a method for early diagnostics of single-phase earth faults in networks with isolated neutral / Izv. Universities. Electromechanics. - 2014. - №4. - P. 89-92.

4. Abdullin LI Early detection of earth faults by voltage parameters at receiving substations / Izv. Universities. Problems of energy. - 2013. - No. 11-12. - P. 133-136 (0.25 bp).

5. QiangFan, KaiHuang, YongXiao, Mei-MeiXu, Jian-GuoChen, WeiGu. The Algorithm Research of Detecting Single-Phase-to-Ground Fault Line on Distribution Network with Distributed Generation. Computer Science and Applications (CSA), 2015 International Conference on. ISBN: 978-1-4799-9962-0. DOI: 10.1109 / CSA.2015.50.

6. Dongli Jia; Keyan Liu; Xiaoli Meng; Xiaohui Song. Location of single-phase disconnection fault with non-grounding in distribution grid based on positive sequence voltage. International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015) .Year: 2015. Pages: 1 - 6, DOI: 10.1049 / cp.2015.0567.

7. Fedotov AI, Vagapov GV, Rozhentsova NV, Abdullazyanov RE, Kurt Sh. Determination of breakage and single-phase earth faults in distribution electric grids according to the parameters of the regime on the 0.4 kV side Lowering substations / Industrial energy. -2016. - № 4. -FROM. 34-40.

8. Fedotov.A.I., FedotovE.A., ChernovaN.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. - StaraLesna, SlovakRep.

9. Kulikov Yu.A. Transient processes in electric power systems. - М .: Publishing house "Omega-L", 2013. - 384 p.

10. Yu.P. Ryzhov. Long-distance power transmission of ultrahigh voltage. - М .: Publishing house MPEI, 2007. - 488 p.

#### **Authors of the publication**

**Fedotov Alexander Ivanovich** - doctor of technical sciences, professor of the department "Electric power systems and grids" KSPEU; E-mail: fed.ai@mail.ru.

**Vagapov Georgii Valerianovich** - candidate of technical sciences, Research of KSPEU;

**Chernova Natalia Vladimirovna** - candidate of technical sciences, associate professor of the department "Electric power systems and grids" KGEU.

*Поступила в редакцию*

*25 мая 2017 г.*