

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В.А. ШУИН, О.А. ДОБРЯГИНА, Ю.Д. КУТУМОВ, Т.Ю. ШАДРИКОВА
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: rza@rza.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью сопровождаются перенапряжениями и значительным увеличением среднеквадратичного значения тока в месте повреждения. При оценке указанных параметров переходных напряжений и токов, как правило, не учитывается наличие высших гармоник в токе однофазных замыканий на землю. В то же время в современных системах электроснабжения широкого применения получили потребители электроэнергии с нелинейными вольтамперными характеристиками, обусловившие увеличение доли высших гармоник в токах однофазных замыканий на землю до 40 и более процентов от суммарного емкостного тока сети, определяемого на основной частоте 50 Гц. При таких соотношениях между уровнями составляющей основной частоты и высших гармоник последние могут оказывать существенное влияние на условия гашения и повторного зажигания заземляющих дуг и, соответственно, на параметры переходных напряжений и токов при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях на землю.

Материалы и методы. Исследования влияния высших гармоник в токе однофазных замыканий на землю на переходные напряжения и токи при дуговых замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью проведены с использованием имитационного моделирования в Matlab с библиотекой блоков SimPowerSystem. Моделирование дуговых перемежающихся замыканий в сетях с изолированной нейтралью осуществлено на основе теорий возникновения максимальных перенапряжений, разработанных W. Petersen'ом и Н.Н. Беляковым.

Результаты. Проведены вычислительные эксперименты на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными значениями суммарного емкостного тока. Показано, что при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях на землю наличие высших гармоник в токе однофазных замыканий на землю может привести к увеличению кратности перенапряжений на неповрежденных фазах на ~13–16 % и среднеквадратичного значения тока в месте повреждения – до ~22 %.

Выводы. Высшие гармоники в токе однофазных замыканий на землю могут оказывать существенное влияние на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги, приводящее к увеличению времени ее гашения, кратности максимальных перенапряжений и среднеквадратичного значения тока в месте повреждения при дуговых перемежающихся замыканиях, что необходимо учитывать при оценке эффективности работы сети в режиме изолированной нейтрали.

Ключевые слова: кабельные сети 6–10 кВ, изолированная нейтраль, дуговые перемежающиеся замыкания на землю, высшие гармоники

THE INFLUENCE OF HIGHER HARMONICS ON TRANSIENTS DURING ARCING EARTH FAULTS IN 6–10 kV CABLE NETWORKS WITH INSULATED NEUTRAL

V.A. SHUIN, O.A. DOBRYAGINA, Yu.D. KUTUMOV, T.Yu. SHADRIKOVA
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: rza@rza.ispu.ru

Abstract

Background. Alternating arc single-phase earth faults in 6–10 kV cable networks with insulated neutral are accompanied by overvoltages and a significant increase in the root-mean-square current value at the fault location. When evaluating the specified parameters of transient voltages and currents during arc earth faults, as a rule, the presence of higher harmonics in earth fault current is not taken into account. At the same time, in modern systems of industrial and urban electricity supply, the customers with nonlinear current-voltage characteristics are widely used. They caused a significant increase in the share of higher harmonics in earth fault currents of more than 40–55 % of the total network capacitive current determined at the fundamental frequency of 50 Hz. With such correlations between the levels of the fundamental frequency component and higher harmonics, higher harmonics can have a significant effect on the conditions of quenching and reignition of grounding arcs and, accordingly, on the parameters of transient voltages and currents in intermittent arc earth faults.

Materials and methods. Simulation in Matlab with SimPowerSystem was used to study the influence of higher harmonics in earth fault current on transient voltages and currents in 6–10 kV cable networks with insulated neutral. Modeling of alternating arc faults was carried out on the basis of existing theories of the occurrence of maximum overvoltages during arc earth faults in networks with isolated neutral developed by W. Petersen and Belyakov N.N.

Results. On the basis of computational experiments on simulation models of 6–10 kV cable networks with different values of the total capacitive current, it was shown that in the case of arc alternating earth faults the presence of higher harmonics in the earth fault current can lead to an increase in the multiplicity of overvoltages in intact phases by ~13–16 % and the root-mean-square value of the current at the fault location by up to ~22 %.

Conclusions. Higher harmonics in earth fault current can have a significant effect on the conditions of extinction and reignition of the grounding arc, leading to an increase in the time of its extinction, the multiplicity of the maximum overvoltage level and root-mean-square value of fault current during alternating arc faults, which should be taken into account when evaluating the network efficiency in the isolated neutral mode.

Key words: 6–10 kV cable networks, insulated neutral, alternating arc earth faults, overvoltages during arc faults, higher harmonics

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.2.030-040

Введение. Через электрические кабельные сети среднего напряжения 6–20 кВ распределяется около половины вырабатываемой в стране электроэнергии¹. В России более 99 % суммарной протяженности кабельных сетей среднего напряжения составляют сети 6–10 кВ [1]. Аварии в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ составляют около 70 % всех нарушений электроснабжения потребителей [1]. Одной из главных причин аварий является моральный и физический износ изоляции кабельных линий (КЛ) 6–10 кВ, достигающий в настоящее время 40–95 % [1, 2].

Несмотря на расширение в России и других странах области применения резонансного заземления нейтрали электрических сетей среднего напряжения через дугогасящий реактор (компенсации емкостного тока), значительная часть кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения работает с изолированной нейтралью. В кабельных сетях с изолированной нейтралью основным видом электрических повреждений являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), а наиболее опасной разновидностью ОЗЗ – замыкания на землю через перемежающуюся дугу, сопровождающиеся опасными перенапряжениями на неповрежденных фазах и значительным увеличением

¹ Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

среднеквадратичного значения тока в месте повреждения [3–5].

Перенапряжения при дуговых переключениях ОЗЗ (ДПОЗЗ) обуславливают возможность возникновения вторичных пробоев изоляции в точках сети с ослабленной изоляцией и перехода ОЗЗ в двойные замыкания или короткие замыкания (КЗ) в месте повреждения, отключаемые штатным действием релейной защиты от КЗ. Существенное влияние на вероятность переходов ОЗЗ в двойные ОЗЗ или КЗ может оказывать также значительное увеличение среднеквадратичного значения тока в месте повреждения при ДПОЗЗ.

На кратность перенапряжений и действующее (среднеквадратичное) значение тока в месте повреждения при дуговых замыканиях основное влияние оказывают условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги [5]. При оценках указанных параметров переходных напряжений и токов при ДПОЗЗ, как правило, не учитывается наличие высших гармоник (ВГ) в токе замыкания. Расчеты и экспериментальные исследования показывают, что доля ВГ в токе ОЗЗ современных распределительных кабельных сетей 6–10 кВ может достигать 40–55 и более процентов от суммарного емкостного тока сети I_{Σ} , определяемого на основной частоте 50 Гц [6–8]. При таких соотношениях между уровнями составляющей основной частоты I_{Σ} и ВГ последние могут оказывать существенное влияние на условия гашения и повторного зажигания заземляющих дуг и, соответственно, на параметры переходных напряжений и токов при ДПОЗЗ.

Степень разработанности проблемы. Известные работы, посвященные исследованиям параметров переходных напряжений и токов при дуговых ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, по цели исследований можно разделить на две основные группы:

- работы, связанные с оценкой максимальных перенапряжений при дуговых ОЗЗ;
- работы, посвященные исследованиям параметров переходных токов и напряжений при дуговых ОЗЗ в целях оценки их влияния на селективность и устойчивость функционирования защит от данного вида повреждений и разработки

способов повышения их технического совершенства.

К первой группе относятся, прежде всего, работы W. Petersen, J.F. Peters и J. Slepian и Н.Н. Белякова, посвященные разработке теории возникновения максимальных перенапряжений при ОЗЗ через перемежающуюся дугу [9–11]. В [3–5, 12] исследуются максимальные перенапряжения при дуговых ОЗЗ при различных режимах заземления нейтрали сети, параметрах сети и условиях зажигания и гашения заземляющей дуги. В [13, 14] приводятся оценки действующего значения тока в месте повреждения при дуговых замыканиях. Отметим, что в указанных работах при оценках максимальных перенапряжений и действующего значения тока в месте повреждения влияние ВГ на переходные напряжения и токи при дуговых ОЗЗ не учитывается.

Влияние ВГ в токе ОЗЗ на условия гашения однофазной дуги в кабельных сетях среднего напряжения рассматривается в [15], где влияние ВГ на условия гашения и зажигания заземляющей дуги при ОЗЗ объясняется падением напряжения на сопротивлении дуги, пропорциональным току ВГ, вследствие чего происходит «дополнительное» повышение действующего на изоляционный промежуток результирующего напряжения. Чем выше содержание ВГ в токе ОЗЗ, тем быстрее достигается напряжение пробоя, которое после каждого пробоя снижается за счет развития дугового канала. Однако эта гипотеза «начинает работать» только при относительно высоком эквивалентном сопротивлении дуги и падении напряжения на ней. В [15] дополнительное падение напряжения от высших гармонических составляющих тока ОЗЗ оценивается величиной до 1 кВ. Необходимо, однако, отметить, что, по экспериментальным данным [11], падение напряжения на горячей дуге при ОЗЗ в КЛ, как правило, не превышает 50–100 В, т.е. значительно меньше 1 кВ. Поэтому гипотеза [15] о механизме влияния ВГ на условия гашения и зажигания дуги при ОЗЗ в КЛ требует дополнительных обоснований. В [15] также отсутствуют оценки влияния ВГ в токе ОЗЗ на величину максимальных перенапряжений и действующее значение тока в месте повреждения.

Материалы и методы. Учитывая сложность переходных процессов, возникающих в кабельных сетях 6–10 кВ при ДПОЗЗ, наиболее эффективным методом исследования влияния ВГ на переходные напряжения и токи при гашениях и повторных зажиганиях заземляющей дуги является имитационное моделирование на ЭВМ. В данном исследовании использовалась система моделирования Matlab с пакетами расширения Simulink и SimPowerSystem.

Для оценки указанного влияния ВГ целесообразно воспользоваться существующими теориями возникновения максимальных перенапряжений при дуговых ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, W. Petersen и Н.Н. Белякова [9, 11], которые применимы к коротким закрытым дугам, горящим в узких каналах, когда возможно принудительное гашение заземляющей дуги. В отличие от теорий W. Petersen и Н.Н. Белякова, теория I.E. Peters и J. Slepian [10] применима только для оценки перенапряжений, возникающих при горении открытых заземляющих дуг, когда полностью отсутствует принудительное гашение [3].

В переходных токах при ОЗЗ принято выделять две основные составляющие: высокочастотную, связанную с процессами разряда емкостей поврежденной фазы, и среднечастотную, связанную с процессами дополнительного заряда емкостей неповрежденных фаз (например, [3]). В соответствии с теорией W. Petersen, гашения заземляющей дуги всегда происходят при первом переходе через нулевое значение зарядной (среднечастотной) составляющей тока в месте ОЗЗ, а повторные зажигания – на первом максимуме восстанавливающегося напряжения. Так как момент гашения заземляющей дуги жестко связан с длительностью первой полуволны зарядной составляющей переходного тока в месте ОЗЗ, данная теория не позволяет оценить влияние ВГ на условия гашения заземляющих дуг, но может быть использована для оценки влияния высших гармоник на максимальные перенапряжения при повторных пробоях изоляции и на среднеквадратичное значение тока в месте повреждения при ДПОЗЗ.

В отличие от теории W. Petersen, теория Н.Н. Белякова не ограничивает длительность горения заземляющей дуги пер-

вой полуволной переходного тока ОЗЗ. В соответствии с теорией Н.Н. Белякова, критическую крутизну переходного тока ОЗЗ, при которой становится возможным принудительное гашение заземляющей дуги, можно оценить по величине первого после момента гашения дуги пика восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе («пика гашения» $U_{п.г}$). На основе экспериментальных исследований Н.Н. Беляковым установлено, что для кабельных сетей напряжением 6 кВ $U_{п.г} \approx 0,37U_{ф.м}$, 10 кВ – $U_{п.г} \approx 0,22U_{ф.м}$ [11]. Применение теории Н.Н. Белякова позволяет оценить влияние ВГ на условия гашения заземляющей дуги и длительность ее горения при повторных пробоях изоляции.

С учетом изложенного для оценки влияния ВГ в токе ОЗЗ на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги при ДПОЗЗ, величину сопровождающих их перенапряжений и действующее значение тока в месте повреждения использовались теории W. Petersen и Н.Н. Белякова.

Результаты исследования. Имитационная модель кабельной сети 6–10 кВ для исследования влияния ВГ на переходные напряжения и токи при дуговых ОЗЗ. Параметры модели. Современные системы моделирования на ЭВМ, в частности программа Simulink с библиотекой блоков SimPowerSystem для моделирования электротехнических устройств, позволяют создавать модели электрических сетей практически любой сложности. Однако сложность трехфазных имитационных моделей, выполненных в программах Simulink и SimPowerSystem по схемам кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения, достаточно полно учитывающим особенности их конфигурации, приводит к значительному увеличению затрат времени на проведение вычислительных экспериментов, обработку и анализ их результатов. Поэтому при исследованиях переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ возникает практическая необходимость в обоснованных упрощениях имитационной модели исследуемого объекта, не приводящих к существенной потере точности результатов. В [16] показано, что в кабельных сетях 6–10 кВ параметры (амплитуда, частота, постоянная затухания) основных частотных составляющих разрядного и зарядного тока в переходных режи-

мах ОЗЗ определяются практически только суммарными емкостями и проводимостями фаз сети на землю и между фазами неповрежденной части сети, параметрами поврежденной линии на участке от шин до точки ОЗЗ и переходным сопротивлением R_n в месте повреждения. С учетом этого эквивалентную модель радиальной кабельной сети 6–10 кВ для исследований влияния ВГ на переходные токи и напряжения при ОЗЗ можно представить в виде, показанном на рис. 1, а, б.

На рис. 2 приведена схема модели эквивалентированной рассмотренным способом сети в Matlab, где поврежденная КЛ с ОЗЗ представлена моделью, учитывающей распределенный характер параметров линии, выполненной с применением стандартного блока Distributed Parameters Line

библиотеки SimScape, а неповрежденная часть сети – эквивалентной упрощенной схемой замещения с сосредоточенными параметрами (рис. 1, б).

Известно, что спектр ВГ в токе устойчивого ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ в диапазоне частот до 1,5–2 кГц полностью определяется спектром высших гармоник напряжения поврежденной фазы в режиме, предшествующем возникновению повреждения [17], при этом состав и уровень высших гармоник тока замыкания практически не зависит от положения места повреждения в сети [18]. С учетом этого для моделирования ВГ в напряжениях сети в модели по схеме рис. 2 использовались источники высших гармоник в составе ЭДС питающей системы.

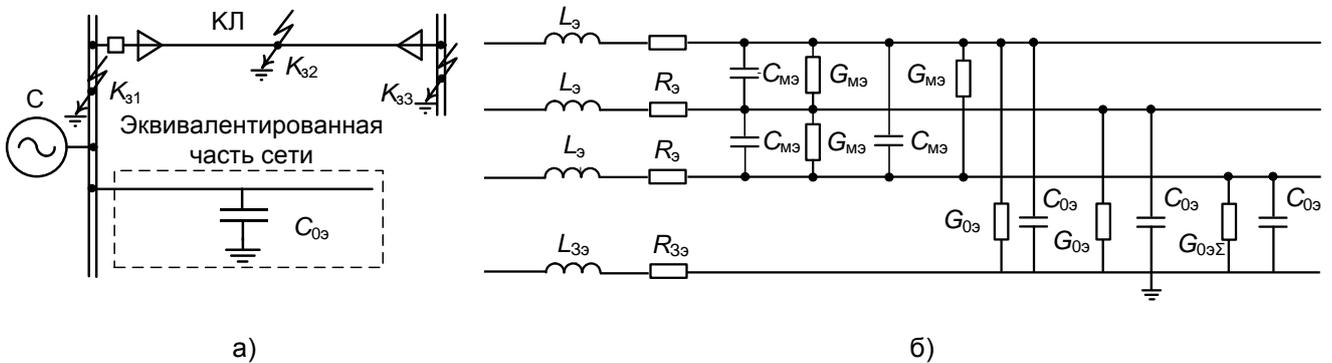


Рис. 1. Эквивалентирование радиальной кабельной сети 6–10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ: а – однолинейная схема сети; б – схема замещения эквивалентированной части сети

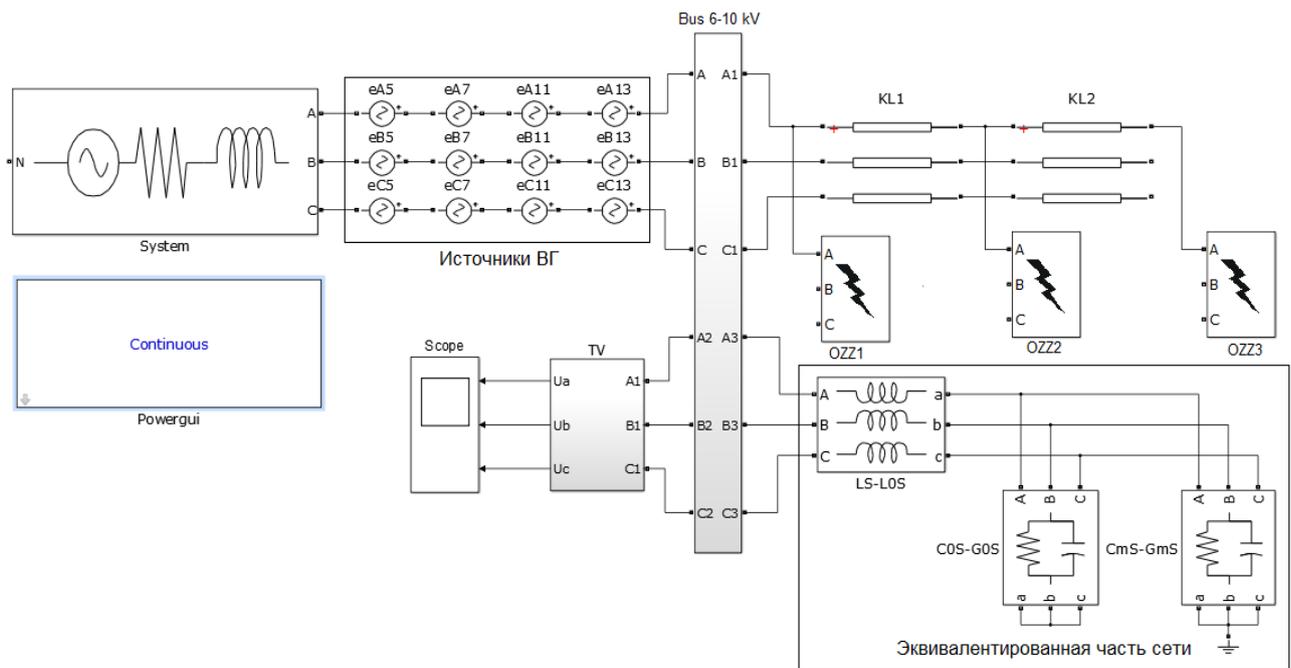


Рис. 2. Имитационная модель эквивалентированной кабельной сети 6–10 кВ в Matlab

Основными источниками ВГ в напряжениях кабельных сетей 6–10 кВ являются нелинейные преобразователи, электро-термические и электросварочные установки, а также силовые трансформаторы, входящие в состав комплексной нагрузки центра питания [18]. В токах нагрузки указанных установок и, соответственно, в напряжениях питающих их сетей преобладают 5, 7, 11 и 13 гармоники [17, 18]. Параметры ЭДС указанных гармонических составляющих в модели по схеме рис. 2 выбирались таким образом, чтобы суммарный уровень гармонических искажений напряжений не превышал допустимого по ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения» для сетей 6–10 кВ значения коэффициента гармонических искажений напряжения $K_{U \text{ макс}} \leq 0,08$ и предельно допустимых коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(v)}$ для 5–13 гармоник, а уровень ВГ в токе устойчивого ОЗЗ – максимальных расчетных значений.

По данным, полученным на основе расчетов на имитационных моделях [18], максимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ не превышает 50–55 % величины суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$, что достаточно хорошо согласуется с указанными выше оценками (до 40 и более процентов), полученными на основе экспериментальных измерений в действующих сетях [8]. С учетом этого при исследованиях влияния ВГ на переходные токи и напряжения при дуговых замыканиях максимальный коэффициент несинусои-

дальности тока устойчивого ОЗЗ $K_{\text{нс}} = 100 \cdot I_{\text{ВГ}\Sigma} / I_{C\Sigma}$ принимался равным 55 %.

Параметры модели КЛ определялись таким образом, чтобы обеспечить в первую очередь максимальную точность отображения разрядной стадии переходного процесса, определяемой индуктивностями поврежденного участка КЛ. Поэтому индуктивности прямой и нулевой последовательности в модели КЛ определены по скорости распространения электромагнитных волн в контурах «фаза–фаза» и «фаза–земля» [3, 16]:

$$L_1 \approx 1 / v_1^2 C_1 \quad (1)$$

$$L_0 \approx 1 / v_0^2 C_0, \quad (2)$$

где C_1, C_0 – емкости для составляющих прямой и нулевой последовательностей; v_1, v_0 – скорости распространения электромагнитных волн в каналах «фаза – фаза» (прямая последовательность) и «фаза – земля» (нулевая последовательность).

Для кабельных линий 6–10 кВ можно принять $v_1 \approx v_0 = 150\text{--}160$ м/мкс.

Активные потери в изоляции для кабельных сетей 6–10 кВ в среднем составляют 5 % от реактивных емкостных потерь [3]. С учетом этого активные проводимости сети определялись как 5 % от значения емкостных на рабочей частоте 50 Гц.

При параметрировании моделей использовались предельные и средние значения параметров элементов кабельных сетей 6–10 кВ, полученные на основе статистического анализа данных по системам промышленного и городского электроснабжения (табл. 1).

Таблица 1. Значения параметров кабельных сетей 6–10 кВ промышленного электроснабжения, питаемых от шин 6–10 кВ понизительных подстанций (ГПП)

Параметр		Значение параметра для объектов сети		
		секция ЦП	секция РП	секция ТП
Суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma}, \text{ A}$	Диапазон значений	3–60	–	–
	Среднее значение	30	–	–
Число КЛ, подключенных к шинам объекта	Диапазон значений	4–16	4–20	2–6
	Среднее значение	8	8	3
Длина КЛ, подключенных к шинам объекта, км	Диапазон значений	0,1–3,0	0,01–1,5	0,01–0,35
	Среднее значение	~1,0	~0,6	~0,1
Сечение КЛ, подключенных к шинам объекта, мм ²	Диапазон значений	120–240	70–185	35–120
	Среднее значение	185	120	70
Относительное значение $I_C \text{ общ*}$ присоединений, подключенных к шинам объекта	Диапазон значений	0,01–0,45 (99 %)	0,01–0,4 (99 %)	0,01–0,1 (98 %)
	Среднее значение	~0,1	~0,03	~0,01

Анализ влияния ВГ в токе ОЗЗ на переходные напряжения и токи при дуговых замыканиях. На рис. 3, 4 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы электрических величин переходного процесса при ДПОЗЗ, полученные на модели кабельной сети напряжением 6 кВ с изолированной нейтралью с $I_{c\Sigma} = 5$ А. Полученные зависимости (рис. 3, 4) иллюстрируют влияние ВГ в токе ОЗЗ на условия гашения и зажигания заземляющей дуги, а также на величину перенапряжений и действующего значения тока в месте повреждения при дуговых перемежающихся замыканиях.

Осциллограммы на рис. 3 показывают влияние ВГ в токе ОЗЗ на величину перенапряжений и действующее значение тока в месте повреждения при ДПОЗЗ по теории Н.Н. Белякова (т. е. при гашениях заземляющей дуги при выполнении условия $U_{п.г} \leq 0,37 U_{ф.м}$).

Осциллограммы на рис. 4 иллюстрируют влияние ВГ в токе ОЗЗ на величину перенапряжений и действующее значение тока в месте повреждения при ДПОЗЗ по теории W. Petersen (т. е. при гашениях заземляющей дуги при первом переходе тока замыкания через нулевое значение).

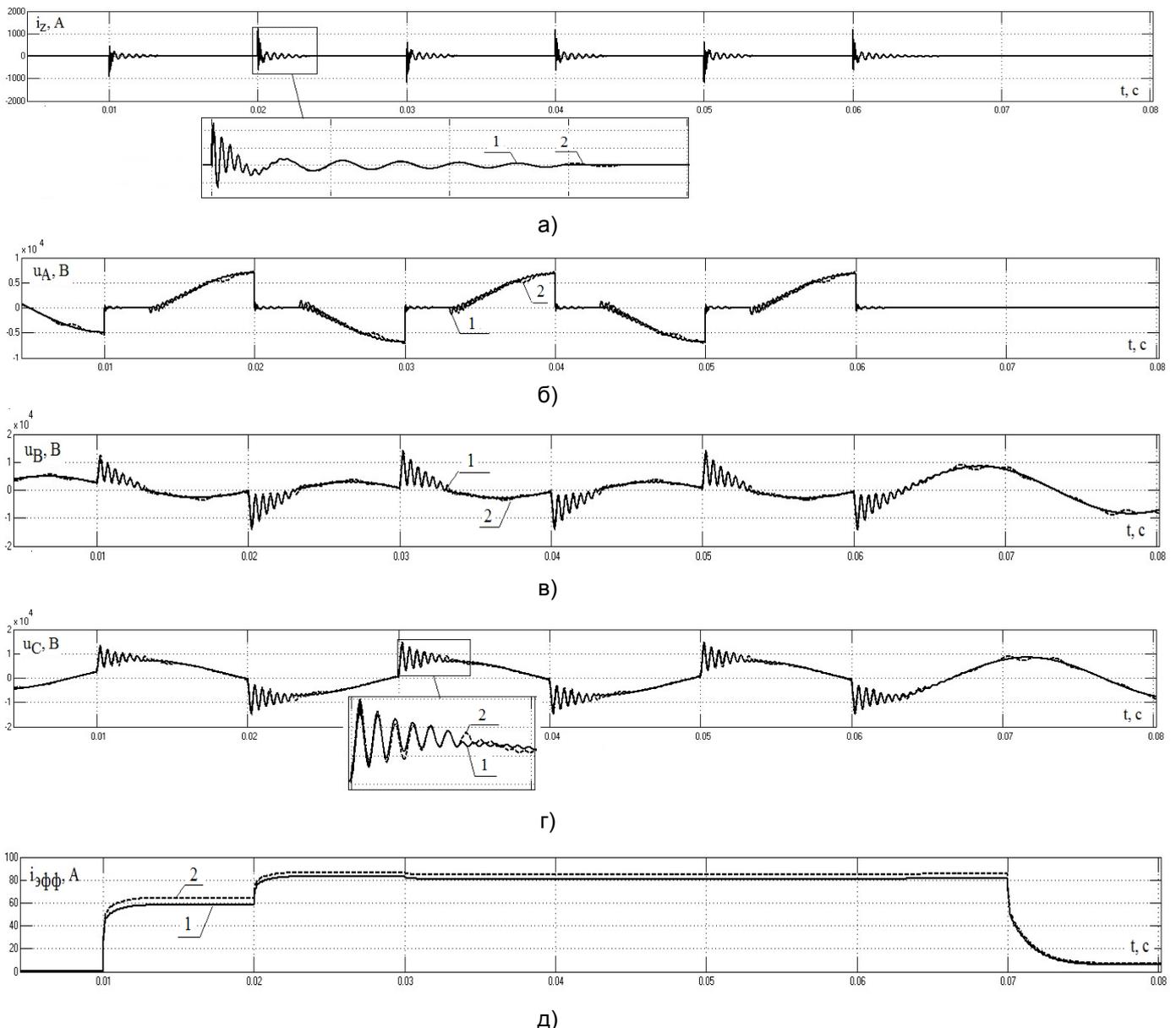


Рис. 3. Влияние ВГ в токе ОЗЗ на значения перенапряжений и среднееквадратичное значение тока ОЗЗ в сети 6 кВ с изолированной нейтралью с $I_{c\Sigma} = 5$ А при ДПОЗЗ с гашением дуги по теории Н.Н. Белякова (1 – $K_{нс} = 0\%$, 2 – $K_{нс} = 55\%$): а – ток в месте ОЗЗ; б – величина напряжения на фазе А; в – величина напряжения на фазе В; г – величина напряжения на фазе С; д – среднееквадратичное значение тока ОЗЗ

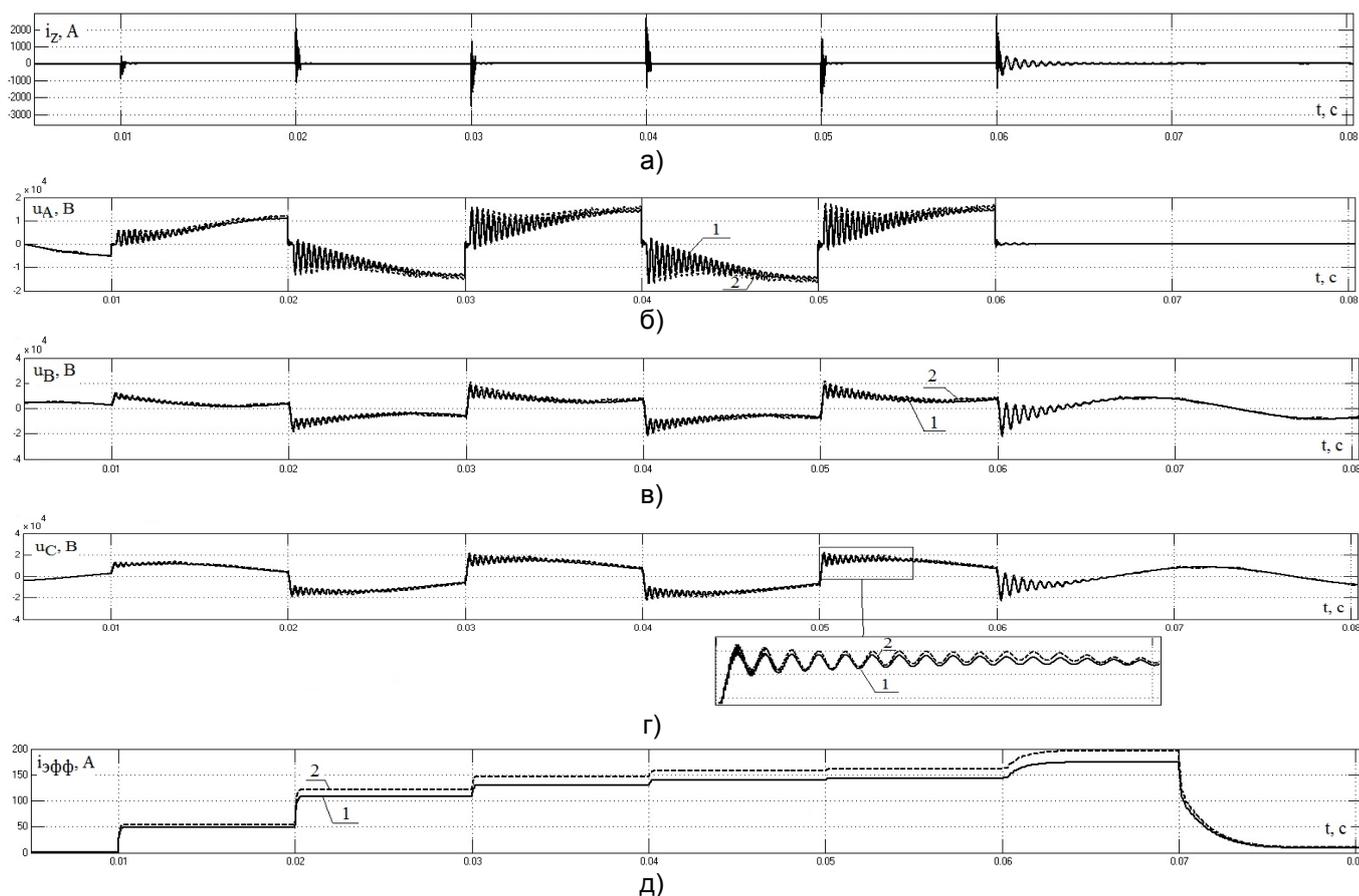


Рис. 4. Влияние ВГ в токе ОЗЗ на значения перенапряжений и среднееквадратичное значение тока ОЗЗ в сети 6 кВ с изолированной нейтралью с $I_{с\bar{z}} = 5 \text{ A}$ при ДПОЗЗ с гашением дуги по теории W. Petersen (1 – $K_{лс} = 0 \%$, 2 – $K_{лс} = 55 \%$): а – ток в месте ОЗЗ; б – величина напряжения на фазе А; в – величина напряжения на фазе В; г – величина напряжения на фазе С; д – среднееквадратичное значение тока ОЗЗ

В табл. 2 приведены обобщенные результаты вычислительных экспериментов на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными значениями суммарного емкостного тока $I_{с\bar{z}}$, учитывающих влияние

ВГ на условия гашения заземляющей дуги, кратности перенапряжений на неповрежденных фазах и среднееквадратичное значение тока в месте повреждения при ДПОЗЗ по теории Н.Н. Белякова и по теории W. Petersen.

Таблица 2. Значения перенапряжений и среднееквадратичные значения тока в месте повреждения в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью в зависимости от уровня ВГ в токе ОЗЗ

Вид ОЗЗ	Параметр	$I_{с\bar{z}} = 5 \text{ A}$		$I_{с\bar{z}} = 10 \text{ A}$		$I_{с\bar{z}} = 30 \text{ A}$	
		$K_{лс} = 0 \%$	$K_{лс} = 55 \%$	$K_{лс} = 0 \%$	$K_{лс} = 55 \%$	$K_{лс} = 0 \%$	$K_{лс} = 55 \%$
Однократный пробой по теории W. Petersen	$U_{п\text{ гаш}}, \text{ В}$	5250	5880	4880	5660	4150	5850
	$U_{с\text{ макс}}, \text{ В}$	12290	13750	12575	14070	12140	13700
	$K_{п}$	2,39	2,67	2,44	2,74	2,36	2,66
Однократный пробой по теории Н.Н. Белякова	$U_{п\text{ гаш}}, \text{ В}$	1880	1450	1670	1300	1000	850
	$U_{с\text{ макс}}, \text{ В}$	11900	13500	11700	13300	11395	12810
	$K_{п}$	2,31	2,62	2,27	2,59	2,22	2,5
ДПОЗЗ по теории Н.Н. Белякова	$U_{с\text{ макс}}, \text{ В}$	13500	15500	13300	15500	12920	15000
	$I_{\text{эфф}}, \text{ А}$	81	86	113	132	214	263
	$K_{п}$	2,63	3	2,59	3	2,51	2,92
ДПОЗЗ по теории W. Petersen	$U_{с\text{ макс}}, \text{ В}$	20000	22800	21000	24000	17500	19800
	$I_{\text{эфф}}, \text{ А}$	145	160	225	254	380	430
	$K_{п}$	3,9	4,43	4,1	4,67	3,4	3,85

Анализ результатов вычислительных экспериментов, приведенных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы.

1. При ДПОЗЗ, по теории Н.Н. Белякова, увеличение уровня ВГ в токе ОЗЗ до максимального расчетного значения приводит к увеличению кратности перенапряжений на неповрежденной фазе от $K_{п} \approx 2,5-2,6$ до $K_{п} \approx 2,9-3,0$, т.е. ее возрастанию примерно на 15–16 % (рис. 3,в,г) и увеличению среднеквадратичного значения тока в месте повреждения на 17–22 % (рис. 3,д).

2. При ДПОЗЗ, по теории W. Petersen, увеличение уровня ВГ в токе ОЗЗ до максимального расчетного значения приводит к увеличению кратности перенапряжений на неповрежденных фазах на 13–14 % (рис. 4,в,г) и среднеквадратичного значения тока в месте повреждения на 10–13 % (рис. 4,д).

Выводы. В кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью высшие гармоники в токе ОЗЗ при достаточно большом относительном уровне по отношению к суммарному емкостному току сети могут оказывать существенное влияние на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги, приводящее к увеличению времени ее гашения на 1–3 полупериода колебаний переходного тока, кратности максимальных перенапряжений на неповрежденных фазах при дуговых перемежающихся замыканиях на 13–16 % и среднеквадратичного значения тока в месте повреждения на 10–22 %, что необходимо учитывать при оценке эффективности данного режима заземления нейтрали.

Список литературы

1. **Боков Г.С.** Техническое перевооружение российских электрических сетей. Сколько это может стоить? [Электронный ресурс] // Новости электротехники. – 2002. – № 2(14). – Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/2002/14/03.php/> (Дата обращения 20.01.2020).
2. **Крутов А.** Класс средних и низких напряжений вообще забыт [Электронный ресурс] // Новости электротехники. – 2002. – № 1(13). – Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/2002/13/04.php/> (Дата обращения 20.01.2020).
3. **Лихачев Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
4. **Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М.** Режимы нейтрали электрических сетей. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 264 с.
5. **Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.** – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 268 с.
6. **Винокурова Т.Ю., Шуин В.А., Шагурина Е.С.** Применение имитационного моделирования для оценки уровня нестабильности высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 6. – С. 31–38.
7. **Overcurrent Protection from Earth Faults Based on Higher Harmonics for Compensated 6- to 10-kV Cable Networks / V.A. Shuin, V.A. Martynov, E.S. Shagurina, T.Y. Shadrikova // Russian Electrical Engineering.** – 2018. – Vol. 89, No. 1. – P. 54–63.
8. **Вайнштейн В.Л.** Исследование высших гармоник тока замыкания на землю // Промышленная энергетика. – 1986. – № 1. – С. 39–40.
9. **Petersen W.** Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss // ETZ. – 1917. – Н. 47, 48.
10. **Peters J.F., Slepian J.** Voltage Induced by Aereign Grounds // Tr. AIEE. – 1928, Apr. – P. 478.
11. **Беляков Н.Н.** Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. – 1957. – № 5. – С. 31–36.
12. **Шуин В.А., Солодов С.В.** Об эффективности ограничения перенапряжений при дуговых замыканиях на землю различных режимов заземления нейтрали сетей 6–35 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 2. – С. 71–75.
13. **Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянцев Н.М.** Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.
14. **Особенности** использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6–10 кВ / В.А. Шуин, О.А. Сарбеева, Е.С. Шагурина, Д.И. Ганджаев // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 32–41.
15. **Ширковец А.И.** Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги // Релейная защита. – 2011. – № 4. – С. 14–19.
16. **Шуин В.А.** Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3–10 кВ // Электричество. – 1983. – № 12. – С. 4–9.
17. **Кискачи В.М.** Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник токов нулевой последова-

тельности // Электричество. – 1967. – № 9. – С. 24–30.

18. **Винокурова Т.Ю., Шуйн В.А., Шагурина Е.С.** Применение имитационного моделирования для оценки уровня неустойчивости высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 6. – С. 31–38.

References

1. Bokov, G.S. Tekhnicheskoe perevooruzhenie rossiyskikh elektricheskikh setey. Skol'ko eto mozhets stoit'? [Technical re-equipment of Russian electric networks. How much can it cost?]. *Novosti elektrotekhniki*, 2002, no. 2(14). Available at: <http://news.elteh.ru/arh/2002/14/03.php/> (20.01.2020).
2. Krutov, A. Klass srednikh i nizkikh napryazheniy voobshche zabyt [The class of medium and low voltages is generally forgotten]. *Novosti elektrotekhniki*, 2002, no. 1(13). Available at: <http://news.elteh.ru/arh/2002/13/04.php/> (20.01.2020).
3. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiyey emkostnykh tokov* [Earth faults in networks with isolated neutral and with capacitive currents compensation]. Moscow: Energiya, 1971. 152 p.
4. Sirota, I.M., Kislenco, S.N., Mikhaylov, A.M. *Rezhimy neytrali elektricheskikh setey* [Neutral grounding mode of electrical systems]. Kiev: Naukova Dumka, 1985. 264 p.
5. Khalilov, F.Kh., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Protection of 6–35 kV networks against overvoltages]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2002. 268 p.
6. Vinokurova, T.Yu., Shuin, V.A., Shagurina, E.S. Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya dlya otsenki urovnya nestabil'nosti vysshikh garmonik v toke odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v kompensirovannykh kabel'nykh setyakh 6–10 kV [The use of simulation to assess the level of instability of higher harmonics in single-phase earth faults in compensated cable networks of 6–10 kV]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 6, pp. 31–38.
7. Shuin, V.A., Martynov, V.A., Shagurina, E.S., Shadrikova, T.Yu. Overcurrent Protection from Earth Fault Currents Based on Higher Harmonics for Compensated 6- to 10-kV Cable Networks. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, no. 1, pp. 54–63.
8. Vaynshteyn, V.L. Issledovanie vysshikh garmonik toka zamykaniya na zemlyu [Investigation of higher harmonics of the earth fault current]. Prom. Energetika, 1986, no. 1, pp. 39–40.
9. Petersen, W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. ETZ, 1917, pp. 47–48.
10. Peters, J.F., Slepian, J. Voltage Induced by Areign Grounds. Tr. AIEE, 1928, 478 p.
11. Belyakov, N.N. Issledovanie perenapryazheniy pri dugovykh zamykaniyakh na zemlyu v setyakh 6 i 10 kV s izolirovannoy neytral'yu [Investigation of overvoltages in arcing faults to the earth in networks of 6 and 10 kV with isolated neutral]. *Elektrichestvo*, 1957, no. 5, pp. 31–36.
12. Shuin, V.A., Solodov, S.V. Ob effektivnosti ogranicheniya perenapryazheniy pri dugovykh zamykaniyakh na zemlyu razlichnykh rezhimov zazemleniya neytrali setey 6–35 kV [On effectiveness of limiting overvoltages during arc faults to earth of various modes of grounding neutral networks of 6–35 kV]. *Vestnik IGEU*, 2006, issue 2, pp. 71–75.
13. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk'yantsev, N.M. Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh [Arc earth fault in cable networks]. *Elektricheskije stantsii*, 1971, no. 8, pp. 64–66.
14. Shuin, V.A. Sarbeeva, O.A., Shagurina, E.S., Gandzhaev, D.I. Osobennosti ispol'zovaniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa v zashchitakh ot zamykaniy na zemlyu elektricheskikh setey 6–10 kV [Features of the use of electrical values of the transition process in protection against earth faults of 6–10 kV electric networks]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 1, pp. 32–41.
15. Shirkovets, A.I. Issledovanie parametrov vysshikh garmonik v toke zamykaniya na zemlyu i otsenka ikh vliyaniya na gashenie odnofaznoy dugi [Study of the parameters of higher harmonics in earth fault current and assessment of their influence on the suppression of a single-phase arc]. *Releynaya zashchita*, 2011, no. 4, pp. 14–19.
16. Shuin, V.A. Vliyanie razryada emkosti povrezhdennoy fazy na perekhodnyy protsess pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 3–10 kV [The effect of the discharge of the capacitance of damaged phase on the transient during earth faults in 3–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1983, no. 12, pp. 4–9.
17. Kiskachi, V.M. Selektivnost' signalizatsii zamykaniy na zemlyu s ispol'zovaniem vysshikh garmonik tokov nulevoy posledovatel'nosti [Selectivity of signaling earth faults using higher harmonics]. *Elektrichestvo*, 1967, no. 9, pp. 24–30.
18. Vinokurova, T.Yu., Shuin, V.A., Shagurina, E.S. Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya dlya otsenki urovnya nestabil'nosti vysshikh garmonik v toke odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v kompensirovannykh kabel'nykh setyakh 6–10 kV [The use of simulation to assess the level of instability of higher harmonics in current of single-phase earth fault in 6–10 kV compensated cable networks]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 6, pp. 31–38.

Добрягина Ольга Александровна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,

e-mail: dobryagina@eef.ispu.ru

Dobryagina Olga Alexandrovna,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering (PhD), Associate Professor of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: dobryagina@eef.ispu.ru

Кутумов Юрий Дмитриевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Kutumov Yuri Dmitrievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Master student of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Шадрикова Татьяна Юрьевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,

e-mail: stu@rza.ispu.ru

Shadrikova Tatyana Yuryevna,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering (PhD), Associate Professor of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: stu@rza.ispu.ru

Шуин Владимир Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, телефон (4932) 26-99-06,

e-mail: vshuin@mail.ru

Shuin Vladimir Alexandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: vshuin@mail.ru

УДК 621.311

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА ВОЛНОВОМ ПРИНЦИПЕ

В.Д. ЛЕБЕДЕВ, Ю.Д. КУТУМОВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: vd_lebedev@mail.ru, kutumov97@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Сложность переходных процессов при распространении электромагнитных волн в воздушных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения обусловлена наличием большого числа частотных компонент в фронте бегущей электромагнитной волны. Для корректного анализа вышеупомянутых переходных процессов в целях разработки устройств релейной защиты и определения места повреждения на волновом принципе необходим точный учет параметров среды, в которой происходит распространение электромагнитной волны. Для ЛЭП такими параметрами являются продольные индуктивности, продольные активные сопротивления, поперечные емкости, а также поперечные активные проводимости. Стоит отметить, что в силу ряда причин удельные продольные индуктивности и активные сопротивления ЛЭП являются зависимыми от частоты параметрами, что обуславливает различную скорость распространения различных частотных компонент фронта электромагнитной волны. В известных работах, посвященных решению данной проблемы, либо не учитывается зависимость параметров ЛЭП от частоты, либо зависимость учитывается приближенно для диапазона высоких частот, что может привести к значительным неточностям при анализе переходных процессов, протекающих в ЛЭП при распространении электромагнитной волны. В связи с этим проблема разработки подхода к моделированию воздушных ЛЭП, который позволит как определять параметры ЛЭП в широком частотном диапазоне, так и исследовать статические режимы и переходные процессы в длинных линиях, остается актуальной.