

# ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ (05.14.12)

УДК 621.314.223.015.38.001.24

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-60-67

## Перенапряжения от однофазных замыканий в сетях номинального напряжения 110 кВ

Н.А. Муфид-заде, Г.Г. Исмаилова

Исследованы перенапряжения при однофазных замыканиях на землю в сетях номинальным напряжением 110 кВ, работающих в различных режимах нейтрали. Из-за низких значений активного сопротивления и высоких показателей индуктивного и емкостного сопротивлений переходные процессы линий электропередач и трансформаторов в сетях 110 кВ существенно отличаются от аналогичных процессов в сетях 6...35 кВ. Подобное отличие приводит к увеличению свободных составляющих перенапряжения и затрудняет их затухание.

Определено, что сети номинального напряжения 110 кВ не могут работать в изолированном режиме нейтрали, так как перенапряжение может превысить семикратное значение фазного напряжения, а это сильно усложняет обеспечение фазной изоляции обмоток трансформаторов. Заземление нейтрали через активное или индуктивное сопротивления со значением, равным сопротивлению нулевой последовательности рассматриваемой схемы, существенно снижает величину токов замыкания на землю и особенно перенапряжения. Заземление нейтрали через активное сопротивление приводит к более эффективным результатам, поскольку перенапряжения и ток замыкания на землю имеют достаточно низкие значения. Заземление нейтрали через индуктивное сопротивление ведет к несколько большим значениям перенапряжений и тока замыкания на землю, а при заземлении нейтрали через нелинейную индуктивность перенапряжения имеют еще более низкие значения, но ток замыкания на землю приближается к значению тока короткого замыкания (КЗ), как при непосредственном заземлении нейтрали.

Сопоставление соответствующих результатов, относящихся к различным способам заземления нейтрали сетей номинальным напряжением 110 кВ, показало, что наиболее эффективным является заземление нейтрали через активное сопротивление со значением, равным сопротивлению нулевой последовательности рассматриваемой схемы. При этом перенапряжения в фазах не превышают 1,78-кратного значения фазного напряжения, и ток замыкания на землю намного меньше, чем ток КЗ при заземленной нейтрали. Однако при выборе способа заземления нейтрали не следует забывать, в чем заключается проблема — в ограничении тока КЗ или в ограничении перенапряжений. Во втором случае заземление нейтрали через быстронасыщающийся реактор более приемлемо.

*Ключевые слова:* токи замыкания на землю, перенапряжение, изолированная нейтраль, нелинейное индуктивное сопротивление.

*Для цитирования:* Муфид-заде Н.А., Исмаилова Г.Г. Перенапряжения от однофазных замыканий в сетях номинального напряжения 110 кВ // Вестник МЭИ. 2019. № 4. С. 60—67. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-60-67.

## Overvoltages Induced by Single-Phase Ground Faults in 110 kV Networks

N.A. Mufid-zadeh, G.G. Ismayilova

Overvoltages induced by single-phase ground faults in 110 kV networks operating in different neutral grounding modes are investigated. Owing to low values of resistance and high values of inductive and capacitive reactances, the transients in power lines and transformers that occur in 110 kV networks differ essentially from similar processes in 6 to 35 kV networks. This difference results in that the transient overvoltage free components have higher amplitudes, and that they have lower attenuation coefficients.

It has been established that 110 kV networks cannot operate with the isolated neutral, because the overvoltage in this case may exceed seven times the nominal phase voltage, which would greatly complicate the transformer winding phase insulation. The use of a neutral grounded through resistance or inductive reactance with a value equal to the zero-sequence impedance of the considered circuit significantly reduces the level of ground fault currents and especially overvoltage. Neutral grounding through resistance leads to more efficient results, because the overvoltages and ground fault current have in this case fairly low values. Neutral grounding through inductive reactance results in somewhat higher overvoltage and ground fault current values. If the neutral is grounded through a nonlinear inductance, the overvoltages have still lower values, but the ground fault current approaches the value of the short-circuit current as in the case of the solidly grounded neutral.

Comparison of the relevant results relating to various grounding methods of 110 kV networks has shown that the best results are obtained in case of using the neutral grounded through resistance with the value equal to the zero-sequence impedance of the considered network circuit. In this case, the overvoltage levels in the phases do not exceed 1.78 of the phase voltage value, and the ground fault current is much less than the short-circuit current in case of using the solidly grounded neutral. However, in choosing the neutral grounding method, it should be constantly borne in mind what particular task has to be solved: to limit the short-circuit current or to limit overvoltages. In the second case, the use of the neutral grounded through a fast-saturating reactor is a more acceptable choice.

*Key words:* ground fault currents, overvoltage, isolated neutral, nonlinear inductive reactance.

*For citation:* Mufid-zadeh N.A., Ismayilova G.G. Overvoltages Induced by Single-Phase Ground Faults in 110 kV Networks. Bulletin of MPEI. 2019;4:60—67. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-60-67.

**Введение**

Сети номинальным напряжением 110 и 220 кВ с большими токами короткого замыкания (повышение связано с развитием сетей, при котором нагрузки и пропускные мощности увеличиваются практически непрерывно) переводят в режим эффективно заземленной нейтрали с целью снижения токов. В настоящее время сети 110 кВ, питающие распределительные сети 6...10 кВ, работают в различных режимах нейтрали в зависимости от схем соединения и нагрузочных режимов.

Известно, что в сетях с изолированной нейтралью дуга, возникающая при однофазном замыкании на землю, не обладает большой стабильностью. Она легко гасится при первом же прохождении либо свободного, либо установившегося токов замыкания на землю через свое нулевое значение и легко зажигается при прохождении напряжения поврежденной фазы через свое очередное максимальное значение. Такой перемежающийся характер дуги повышает напряжение.

В сетях номинальным напряжением 110 и 220 кВ, работающих с эффективно заземленной нейтралью, при замыканиях одной фазы на землю создается дуга с перемежающимся характером, ведущим к перенапряжениям. С учетом того, что в данных сетях линии электропередачи и трансформаторы имеют малые активные сопротивления и большие индуктивности, повышение напряжения может быть значительным. При этом вопрос влияния различных режимов нейтрали на перенапряжения остается открытым.

Большое количество публикаций посвящены изучению перенапряжений однофазных замыканий на землю в сетях 6...35 кВ, работающих с изолированной нейтралью. Результаты [1 — 12] показывают, что коэффициенты перенапряжения очень близки, хотя и имеют различные значения и меняются в интервале  $(3,2...4,0)U_{\phi}$ .

**Схема сети напряжения 110 кВ**

Исследован процесс создания перенапряжений однофазного замыкания на землю в сетях номинальным напряжением 110 кВ, работающих в нагрузке и при различных режимах нейтрали. Схема анализируемой сети изображена на рис. 1.

В состав сети входят три подстанции (п/ст. 1, п/ст. 2, п/ст. 3), соединенные воздушными линиями электропередачи ( $л_1, л_2$ ). В расчетах линии представлены

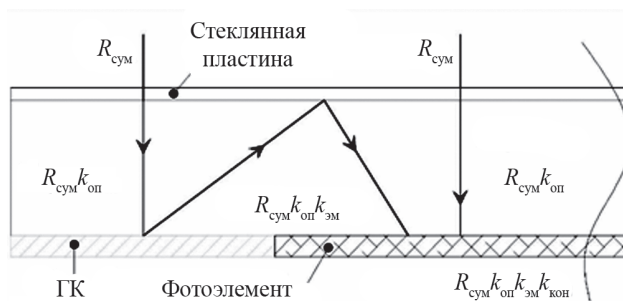


Рис. 1. Электрическая схема сети напряжения 110 кВ

T-образной эквивалентной схемой замещения. Нагрузки питаются с подстанций п/ст. 2 и 3. Обмотки трансформатора  $T_1$  соединены по схеме  $\Delta/Y_0$ . Режим нейтрали меняли в нейтрали вторичной обмотки трансформатора. Принято, что однофазное замыкание на землю происходит на п/ст. 2 на фазе А в системах шин 110 кВ. Замыкание на землю моделируется шестью включателями — 3 для зажигания и 3 для гашения дуги, т. е. предусмотрено трехразовое повторение зажигания и гашения дуги. Для упрощения расчета характеристики дуги не учитывали.

Пусть рассматриваемая сеть работает в своем нормальном нагрузочном режиме, но в какой-то момент времени по неизвестной причине внезапно возникает однофазное замыкание на землю в вышеуказанной точке сети. Расчет проводили с применением алгоритмического языка OtCAD 17. Результаты выполненных расчетов даны в табл. 1, 2 и на рис. 2 — 4. Для получения максимальных значений возникающих перенапряжений замыкание на землю создавали в момент прохождения напряжения повреждаемой фазы через свое максимальное значение.

**Анализ результатов расчета**

Для анализа возможностей работы сети номинальным напряжением 110 кВ с изолированной нейтралью большой интерес представляет определение значений перенапряжений при однофазных замыканиях на землю. Сделаны вычисления определения перенапряжений в рассматриваемой сети, работающей с изолированной нейтралью.

Из данных табл. 1 (значения в числителе) и рис. 2 видно, что при изолированной нейтрали замыкание фазы А с землей увеличивает напряжения фаз В и С

Таблица 1

## Зависимости напряжений фаз, нейтрали и тока замыкания на землю от различных режимов

Режимы нейтрали	Горение дуги	$t$ , мс	$U_A$ , кВ	$U_B$ , кВ	$U_C$ , кВ	$U_N$ , кВ	$I_z$ , кА
Изолированная нейтраль	горит	523,457	0	-205	-237	-157	0,616
			0	-172	-189	-125	0,343
	не горит	523,853	-236	-203	-255	-165	—
			-207	-200	-214	-130	
	горит	532,199	0	370	373	273	1,690
			0	186	187	168	1,500
	не горит	532,598	344	370	387	289	—
			145	183	187	168	
	горит	543,582	0	-444	-470	352	2,428
			0	-258	-270	-199	1,027
	не горит	543,984	-408	-465	-519	-375	—
			-275	-258	-299	-210	
Нейтраль, заземленная через постоянное активное сопротивление	горит	523,511	0	140	-155	77,5	1,247
	не горит	528,466	-89,43	-111	-152	0	—
	горит	533,362	0	140	153	-76,89	1,244
	не горит	538,468	-89,57	-89,39	-89,43	0	—
	горит	543,319	0	140	-150	77,39	1,273
	не горит	548,461	-89,59	-89,7	-89,36	0	—
Нейтраль, заземленная через постоянное индуктивное сопротивление	горит	523,138	0	-195	-215	-140	1,197
	не горит	532,597	-168	-159	161	-77,82	—
	горит	543,759	0	-243	-289	-184	1,318
	не горит	551,824	-173	-153	156	-80,61	—
	горит	563,229	0	254	-275	-177	1,305
	не горит	572,680	-173	-159	158	80,53	—
Нейтраль, заземленная через нелинейное индуктивное сопротивление	горит	523,138	0	97,2	-93,1	-16,5	-6,624
	не горит	530,193	-101	89,6	90,5	6,33	—
	горит	532,057	0	99,6	89,94	17,37	6,548
	не горит	540,298	106	-92,76	-90,31	-6,23	—
	горит	541,621	0	-111	-88,8	-20,56	-6,587
	не горит	550,315	-102	92,7	90,64	6,08	—

Таблица 2

## Перенапряжения на фазах, нейтрали и ток замыкания на землю при поочередных замыканиях фаз А и С на землю

Замыкание фаз на землю	Горение дуги	$t$ , мс	$U_A$ , кВ	$U_B$ , кВ	$U_C$ , кВ	$U_N$ , кВ	$I_z$ , кА
А	горит	523,752	0	-174	-215	-139	0,636
	не горит	524,144	-208	-189	-221	-143	—
С	горит	524,735	350	276	0	266	1,585
	не горит	525,125	357	304	293	251	—
А	горит	525,140	0	324	459	289	2,467
	не горит	525,517	460	333	479	311	—
С	горит	526,101	531	471	0	326	2,898
	не горит	526,198	552	479	551	398	—
А	горит	526,523	0	448	565	363	3,776
	не горит	526,894	741	389	589	353	—

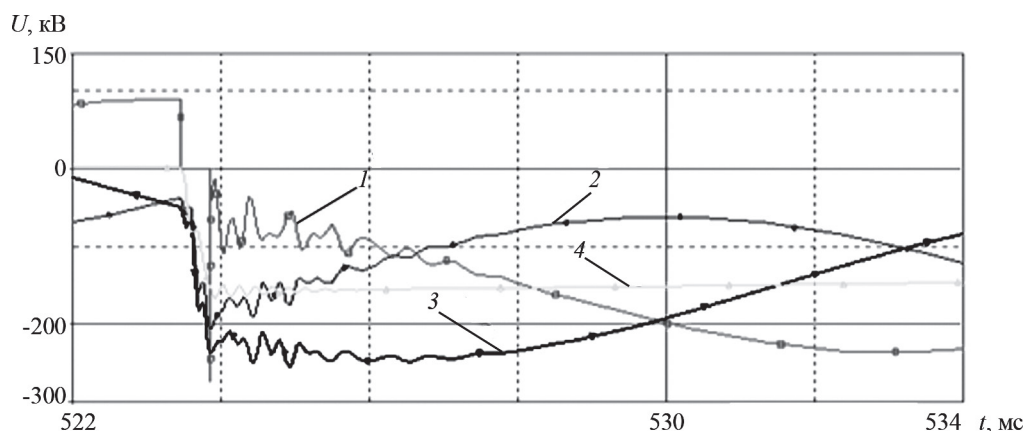


Рис. 2. Перенапряжения  $U_A$  (1),  $U_B$  (2),  $U_C$  (3) и  $U_N$  (4) в фазах после первого зажигания и последнего гашения дуги при изолированной нейтрали

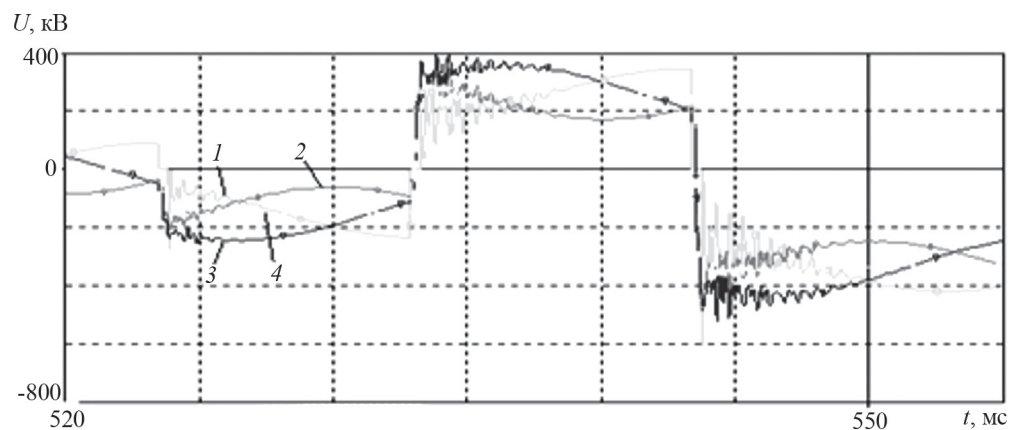


Рис. 3. Перенапряжения  $U_A$  (1),  $U_B$  (2),  $U_C$  (3) и  $U_N$  (4) в фазах после третьего зажигания и гашения дуги при изолированной нейтрали сети

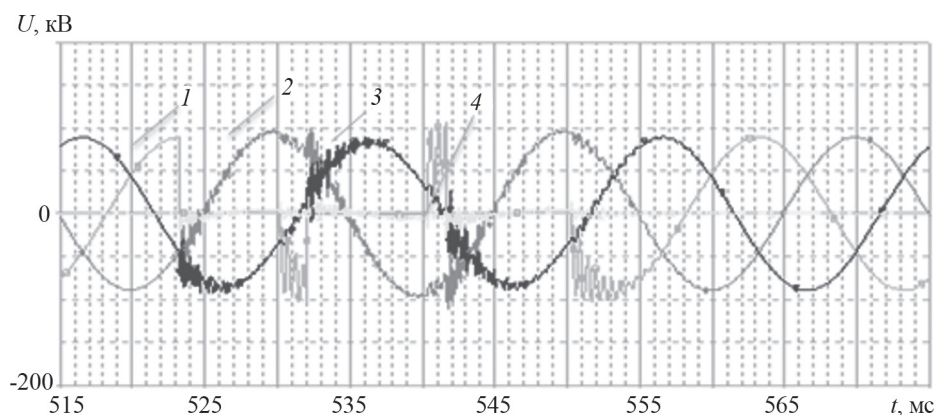


Рис. 4. Перенапряжения  $U_A$  (1),  $U_B$  (2),  $U_C$  (3) и  $U_N$  (4) в фазах после третьего зажигания и гашения дуги при заземлении нейтрали через нелинейную индуктивность

до значений 205 и 237 кВ. Следовательно, максимальное увеличение напряжений здоровых фаз возрастает в 2,63 раза. Напряжение на нейтрали поднимается до 157 кВ. При замыкании фазы  $A$  с землей емкости  $C_{AB}$  и  $C_{AC}$  соединяются параллельно с емкостями  $C_B$  и  $C_C$ . Сумма зарядов в емкостях  $C_{AB}$  и  $C_B$  определяет напряжение фазы  $B$ , а сумма зарядов в емкостях  $C_{AC}$  и  $C_C$  — фазы  $C$ . По этой причине растут напряжения в фазах  $B$  и  $C$ .

Ток, проходящий на землю, достигает значения 616 А. В точке замыкания на землю такой большой ток создает дугу, которая гасится при прохождении тока (либо свободного, либо переходного) через нулевое значение. После гашения дуги заряды этих емкостей вместе с зарядами емкости  $C_{BC}$  распределяются между шестью емкостями трех фаз (3 между фазами и 3 между фазами и землей). Подобное распределение определяет напря-

жения фаз, т. е. в фазах напряжения восстанавливаются с некоторым повышением. В этот момент перенапряжения в фазах *A*, *B* и *C* достигают значений 236, 203 и 255 кВ соответственно.

Значение напряжения фазы *A* высоко и равно 236 кВ, соответственно, и вероятность приведения к повторному пробую в поврежденной точке сети данным восстановленным напряжением достаточно велика. Обычно рассматривается случай, когда дуга загорается через полупериод, т. е. в момент достижения установившимся напряжением поврежденной фазы очередного максимального значения. Стоит отметить, что в этой стадии переходного процесса свободная составляющая напряжения поврежденной фазы (первый пик гашения) имеет достаточно высокий показатель, и сразу после гашения дуги она достигает и даже превосходит максимальное значения напряжения фазы в нормальном режиме.

Соизмеримость (даже превышение) пика гашения и номинального напряжения сети также является одной из отличий процесса создания перенапряжений при однофазных замыканиях на землю в сетях 110 кВ по сравнению с этим же процессом в сетях напряжением 6...35 кВ, где пик гашения составляет  $(0,23...0,37) U_{\phi}$  [1]. Высокое значение пика гашения увеличивает возможность возникновения разряда в поврежденной точке сети намного раньше, чем установившаяся составляющая этого напряжения достигнет максимального значения. После второго разряда перенапряжения в фазах *B* и *C* увеличиваются до значений 370 и 373 кВ. Напряжение нейтрали и ток на землю также растут до значений 273 кВ и 1,69 кА. Видно, что эти значения превосходят соответствующие показатели после первого разряда, поскольку второй разряд начинается при увеличенных значениях фазных напряжений. После второго гашения дуги напряжение фазы *B* остается равным значению напряжения после первого гашения (370 кВ), а напряжение фазы *C* меняется незначительно. В этот момент времени перенапряжения в фазах *A*, *B* и *C* равны 344, 370 и 387 кВ соответственно.

Очередные зажигание и гашение дуги еще больше увеличивают перенапряжения. Так, третье зажигание и гашение дуги дают значения в 408, 465 и 519 кВ в фазах *A*, *B* и *C* указанной сети, а коэффициент перенапряжения превышает 8. Подобные высокие значения перенапряжений усложняют обеспечение электрической прочности фазной изоляции трансформаторов.

Рост перенапряжений в фазах при каждом зажигании и гашении дуги показан на рис. 3.

Активное сопротивление цепи замыкания на землю, состоящее из активных сопротивлений линий электропередач и сопротивлений обмоток трансформаторов со стороны напряжения 110 кВ, имеет достаточно низкое значение, следовательно, ограничение созданных перенапряжений небольшое. Форма кривой перенапряжения на нейтрали показывает, что после гашения дуги

напряжение затухает с очень большой постоянной времени (см. кривая 4, рис. 2, 3). Непрерывное увеличение перенапряжений в фазах после каждого зажигания и гашения дуги невозможно, поэтому можно сказать, что максимальное значение перенапряжения от однофазных замыканий на землю определяется электрической мощностью в данной части сети, условием зажигания дуги и скоростью изменения восстанавливающегося напряжения. Все указанные факторы определяют условие каждого последующего зажигания. Учесть все факторы в расчетах невозможно, и это затрудняет определение предельного значения перенапряжений от однофазных замыканий на землю. Предельное значение перенапряжений трудно определить и опытным путем, поскольку невозможно создать несколько серий зажиганий и гашения дуги. Следовательно, примем, что ограничение определяется ограничителями перенапряжений (ОПН).

При заземлении нейтрали сети с сопротивлением, равным сопротивлению нулевой последовательности рассматриваемой схемы, т. е. с сопротивлением, равным 70 Ом, напряжения фаз *B* и *C* после первого разряда в точке повреждения сети увеличиваются до 140 и 155 кВ, в то время как напряжение нейтрали растет до 77,5 кВ. Ток замыкания на землю равен 1,247 кА (см. табл. 1). После гашения дуги на фазе *A* восстанавливается напряжение, равное по величине фазному напряжению в нормальном режиме, но на фазах *B* и *C* сохраняется более высокое значение, достигающие 111 и 152 кВ. При втором и третьем зажиганиях дуги напряжения фаз *B* и *C* практически неизменны. После второго гашения дуги во всех трех фазах восстанавливаются номинальные напряжения (см. табл. 1). Это наблюдается и после третьего гашения дуги. Таким образом, наличие на нейтрали сопротивления в нескольких десятков Ом существенно ограничивает перенапряжения, возникающие после зажигания дуги (примерно до 155 кВ, т. е. в 1,7 раз), а после гашения дуги обеспечивает восстановление напряжения на всех трех фазах со значением, равным значению фазного напряжения нормального режима. Что касается напряжения нейтрали, то оно не достигает даже значения фазного напряжения нормального режима.

Следует отметить, что при заземлении нейтрали через активное сопротивление свободные составляющие напряжений имеют настолько низкие значения, что свободный ток не переходит через свое нулевое значение, поэтому дуга гасится при прохождении установившегося тока через нулевое значение.

Если нейтраль заземлена индуктивностью 0,223 Гн (эквивалентной 70 Ом), то при замыкании одной фазы на землю индуктивность существенно усилит колебания (амплитуд, периодов и постоянных времени) свободных составляющих напряжения. В результате перенапряжения имеют более высокие значения по сравнению со случаем заземления нейтрали активным сопротивлением.

В данном режиме перенапряжения, возникшие при первом зажигании дуги, равны  $U_B = 195$  кВ,  $U_C = 215$  кВ,  $U_N = 140$  кВ, ток замыкания на землю  $I_3 = 1,197$  кА. При последующих двух новых зажиганиях перенапряжения достигают еще больших значений. При первом зажигании: 243, 289 и 184 кВ, при втором — 254, 275 и 177 кВ. В отличие от режима заземления нейтрали активным сопротивлением, в этом режиме свободный ток проходит через свое нулевое значение. Если дуга гасится в момент прохождения установившегося тока через нулевое значение, то перенапряжения в фазах не превышают 173 кВ, а если в момент прохождения через ноль свободного тока, то перенапряжение составит 298 кВ, т. е. будет равным 3,33-кратному значению номинального напряжения. Известно, что гашение дуги в момент прохождения свободного тока через свое нулевое значение приводит к еще большим перенапряжениям.

Напряжение нейтрали при трех последовательных зажиганиях дуги повышается от 140 до 184 кВ, а затем снижается до 177 кВ. В этом случае ток замыкания на землю равен 1,318 кА.

Соответствующие результаты, полученные при однофазном замыкании на землю в сети с нейтралью, заземленной через быстронасыщающуюся индуктивность, показывают, что при подобном способе заземления нейтрали, по сравнению с рассмотренными способами, перенапряжения имеют минимальные значения. Наблюдается очень малое увеличение фазных напряжений при трех последовательных зажиганиях и гашениях дуги. Наибольшее значение увеличенного напряжения составляет 111 кВ, что соответствует коэффициенту перенапряжения 1,16 (см. рис. 4). Напряжение нейтрали не превышает 20 кВ. Это доказывает, что наличия на нейтрали быстронасыщающегося реактора номинальным напряжением, равным 30% от фазного напряжения, достаточно для защиты от перенапряжений в анализируемой сети.

При заземлении нейтрали через нелинейную индуктивность ток замыкания на землю существенно увеличивается (6,624 кА), приближаясь к значению как при глухозаземленной нейтрали (6,772 кА), но с другой стороны индуктивность уменьшает скорость изменения мгновенных значений тока, особенно вблизи нулевого значения. Последний эффект очень важен, так как снижение скорости изменения тока замыкания на землю затрудняет новое очередное зажигание дуги, а это, в свою очередь, ослабляет повышение перенапряжений. Также снижаются амплитуда и крутизна восстанавливающегося напряжения, что улучшает работу коммутационных аппаратов.

Следует отметить, что более значительные увеличения напряжений в неповрежденных фазах способствуют появлению второго замыкания на землю. Результаты расчетов поочередных замыканий на землю на двух фазах приведены в табл. 2. Из них следует, что при замыкании на землю на фазе *A* напряжение фазы *C* воз-

растает больше, чем напряжение фазы *B*, поэтому фаза *C* принимается как фаза второго замыкания на землю. Таким образом, замыкание на землю на фазе *A* способствует увеличению напряжения фаз *B* и *C* до 174 и 215 кВ. В результате гашения дуги напряжения продолжают расти и достигают 190 и 222 кВ. Маловероятно, что достаточно устаревшая (может и загрязненная) изоляция выдержит перенапряжение в 222 кВ, а, если не выдержит, произойдет второй разряд в фазе *C*. Замыкание на землю на фазе *C* увеличивает напряжения фаз *A* и *B* до 350 и 277 кВ. С гашением дуги на фазе *C* напряжения трех фаз приобретают значения в 358, 304 и 293 кВ.

Наибольшая величина перенапряжения находится на фазе *A*, следовательно, разряд переходит на эту фазу и дуга загорается вновь. Значения перенапряжений в фазах *B* и *C* равны 324 и 459 кВ. После гашения дуги на фазе *A* данные перенапряжения также продолжают расти и достигают 461, 334 и 479 кВ. При третьем зажигании и гашении дуг на этих фазах перенапряжения продолжают увеличиваться. Из данных табл. 2 видно, что в результате непрерывного продолжения создания замыканий на землю поочередно на этих двух фазах перенапряжения монотонно возрастают. В конце третьего этапа создания замыкания перенапряжения в фазах могут доходить до 582, 389 и 589 кВ, а коэффициент перенапряжений превышает значение 6,5. Подобное увеличение перенапряжений объясняется накоплением электрических зарядов в фазах (в емкостях между фазами и между фазами и землей) в результате последовательных замыканий на землю на двух фазах. Разумеется, подобное увеличение перенапряжений носит теоретический характер и практически невозможно, так как при определенном значении перенапряжения однофазное замыкание на землю переходит в дву- или трехфазное, что приводит к срабатыванию релейной защиты, и процесс заканчивается отключением поврежденного участка сети. Перенапряжения ограничивают также с помощью ОПН.

### Заключение

Характер перенапряжения однофазных замыканий на землю в сетях 110 кВ отличается от перенапряжений в сетях 6...35 кВ. В сетях 110 кВ при переходном режиме замыкания одной фазы на землю свободные составляющие имеют большие значения, так как активные сопротивления линий и обмоток трансформаторов этих сетей имеют малые, а индуктивные и емкостные сопротивления — большие значения. Предельное значение перенапряжений однофазного замыкания на землю трудно определить расчетным путём, поскольку каждые последующие зажигание и гашение дуги происходит при увеличенных значениях фазных напряжений. Поиск предельного значения перенапряжений при однофазном замыкании на землю практическим путем также представляет определенные трудности

из-за того, что создание нескольких серий замыканий на землю невозможно. Предельное значение перенапряжений можно найти срабатыванием ОПН.

Режим нейтрали сети существенно влияет на значения токов замыкания на землю и перенапряжения. Заземление нейтрали через активное или индуктивное сопротивление со значением, равным сопротивлению нулевой последовательности рассматриваемой схемы, существенно снижает величину токов замыкания на землю и перенапряжений. В этих случаях перенапряжения не превышают 160 и 290 кВ.

При заземлении нейтрали через быстронасыщающийся реактор величины перенапряжения не превышают даже значения линейного напряжения (110 кВ) сети, а показатель тока замыкания на землю получается близким по значению к току короткого замыкания при непосредственном заземлении нейтрали (6,624 и 6,772 кА). Подключение быстронасыщающегося ре-

актора в нейтраль цепи замыкания на землю снижает скорость изменения тока, проходящего на землю вблизи его нулевого значения, что приводит к уменьшению амплитуды и крутизны восстанавливающегося напряжения и улучшает работу коммутационной аппаратуры.

Сопоставление соответствующих результатов, относящихся к различным способам заземления нейтрали, показывает, что наиболее эффективным является заземление нейтрали через активное сопротивление величиной 70 Ом. При этом перенапряжения в фазах не превышают 160 кВ, что соответствует 1,78-кратному увеличению, а значение тока замыкания на землю равно 1,273 кА. Однако при выборе способа заземления нейтрали не следует забывать, в чем заключается проблема — в ограничении тока короткого замыкания или в ограничении перенапряжений. Во втором случае заземление нейтрали через быстронасыщающийся реактор более приемлемо.

### Литература

1. Дмоховская Л.Ф. и др. Техника высоких напряжений. М.: Энергия, 1976.
2. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971.
3. Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. Л.: Энергия, 1978.
4. Сиротинский Л.И. Техника высоких напряжений. М.: Госэнергоиздат, 1959.
5. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при однофазных коротких замыканиях в сетях 6 и 10 кВ, работающих с изолированной нейтралью // Электричество. 1957. № 5. С. 31—36.
6. Джуварлы Ч.М., Набиев Х.И., Абдурахманов А.И. Переходные процессы при однофазных коротких замыканиях в сетях 6...35 кВ при наличии токоограничивающих индуктивностей // Бюлл. АН Азербайджана. Серия «Физико-технические науки». 1981. № 3. С. 18—27.
7. Шалин А.И. Замыкание на землю в линиях электропередачи 6...35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты // Новости электротехники. 2005. № 1. С. 1—4.
8. Фишман В.И. Способы заземления нейтрали 6...35 кВ // Новости электротехники. 2008. № 2. С. 20—26.
9. Scribd. Calculation of Short-circuit Currents [Официальный сайт] <http://www.scribd.com/doc/224027482/Calculation-of-short-circuit-currents> (дата обращения 04.06.2018).
10. Mytnikov A.V. High Voltage Engineering. Tomsk: TPU, 2012.
11. Parmar J. Types of Neutral Earthing in Power Distribution. Pt. 1 [Электрон. ресурс] <https://electrical-engineering-portal.com/types-of-neutral-earthing-in-power-distribution-part-1> (дата обращения 04.06.2018).

### References

1. Dmokhovskaya L.F. i dr. Tekhnika Vysokikh Napryazheniy. M.: Energiya, 1976. (in Russian).
2. Likhachev F.A. Zamykaniya na Zemlyu v Setyakh s Izolirovannoy Neytral'yu i s Kompensatsiyey Emkostnykh Tokov. M.: Energiya, 1971. (in Russian).
3. Novikov O.Ya. Ustoychivost' Elektricheskoy Dugi. L.: Energiya, 1978. (in Russian).
4. Sirotinskiy L.I. Tekhnika Vysokikh Napryazheniy. M.: Gosenergoizdat, 1959. (in Russian).
5. Belyakov N.N. Issledovanie Perenapryazheniy pri Odnofaznykh Korotkikh Zamykaniyakh v Setyakh 6 i 10 kV, Rabotayushchikh s Izolirovannoy Neytral'yu. Elektrichestvo. 1957;5:31—36. (in Russian).
6. Dzhubarly Ch.M., Nabiev Kh.I., Abdurakhmanov A.I. Perekhodnye Protssesy pri Odnofaznykh Korotkikh Zamykaniyakh v Setyakh 6...35 kV pri Nalichii Tokoogranichivayushchikh Induktivnostey. Byull. AN Azerbaydzhana. Seriya «Fiziko-tehnicheskie Nauki». 1981;3:18—27. (in Russian).
7. Shalin A.I. Zamykanie na Zemlyu v Liniyakh Elektropredachi 6...35 kV. Osobennosti Vozniknoveniya i Pribory Zashchity. Novosti Elektrotekhniki. 2005;1:1—4. (in Russian).
8. Fishman V.I. Sposoby Zazemleniya Neytrali 6...35 kV. Novosti Elektrotekhniki. 2008;2:20—26. (in Russian).
9. Scribd. Calculation of Short-circuit Currents [Ofits. Sayt] <http://www.scribd.com/doc/224027482/Calculation-of-short-circuit-currents> (Data Obrashcheniya 04.06.2018).
10. Mytnikov A.V. High Voltage Engineering. Tomsk: TPU, 2012.
11. Parmar J. Types of Neutral Earthing in Power Distribution. Pt. 1 [Elektron Resurs] <https://electrical-engineering-portal.com/types-of-neutral-earthing-in-power-distribution-part-1> (Data Obrashcheniya 04.06.2018).

12. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J. High Voltage Engineering: Fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

12. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J. High Voltage Engineering: Fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

**Сведения об авторах:**

**Муфидзаде Нахид Абдулла оглы** — кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики энергетического факультета Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности

**Исмайлова Гюльгыз Гюльага кызы** — доктор философии по технике, доцент кафедры электроэнергетики энергетического факультета Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности, e-mail: gulgaz77@mail.ru

**Information about authors:**

**Mufid-zadeh Nakhid A.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electric Power Engineering Dept., Power Faculty of Azerbaijan State University of Oil and Industry

**Ismayilova Gulgaz G.** — Dr.Sci. (Phil in Eng.), Assistant Professor of Electric Power Engineering Dept., Power Faculty of Azerbaijan State University of Oil and Industry, e-mail: gulgaz77@mail.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 07.09.2018

**The article received to the editor:** 07.09.2018