

сти в размыкании контактов модулей в фазе СИПН увеличивается (по сравнению с одноразрывными ВВ) во столько раз, сколько модулей установлено в полюсе, тем самым значительно уменьшая вероятность ПЗ.

### Особенности выбора защитных RC-цепочек в схемах с многоразрывными ВВ

В ходе экспериментальных исследований в сети 110 кВ ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат» проведено сравнение переходных процессов с подключённой и отключённой RC-цепочкой. На рис. 2 представлены осциллограммы фазных напряжений, зарегистрированные в ходе экспериментальных исследований переходных процессов при отключении печного трансформатора вакуумным выключателем ВВЭЛ-110Б-31,5/1000 (четыре разрыва на фазу).

В данном случае наличие RC-цепочки привело к уменьшению числа ПЗ, но не исключило их полностью. Максимальное число ПЗ в схеме с отключённой RC-цепочкой превышало 150, при её наличии — 9. Установленное в схеме защитное оборудование выбрано исходя из СИПН, рассчитанной для случая, при котором отсутствует разновременность в полюсе выключателя. Однако абсолютно синхронной работы контактов в условиях эксплуатации достичь нельзя, поэтому для эффективной защиты от перенапряжений с помощью RC-цепочки следует учитывать наличие разновременности в полюсе выключателя.

### Выводы

1. В результате экспериментальных исследований установлено, что разновременность размыкания контактов в полюсе многоразрывного выключателя существенно влияет на скорость изменения пробивного напряжения при отключении. Эксплуатирующим организациям необходимо контролировать синхронную работу контактов в полюсе многоразрывного выключателя для снижения вероятности повторных зажигания и как следствия — эскалации перенапряжений. Производители вакуумных выключателей должны стремиться к созданию конструкций, обеспечивающих меньшую разновременность размыкания контактов в полюсе многоразрывного выключателя.

2. В методике выбора защитной RC-цепочки в схемах с многоразрывными вакуумными выключателями должна учитываться разновременность размыкания контактов в полюсе. В расчёты следует вводить коэффициент запаса, снижая тем самым эквивалентную скорость изменения пробивного напряжения многоразрывного вакуумного выключателя при отключении.

3. Проведённые эксперименты позволяют создать адекватную математическую модель для оценки перенапряжений, возникающих при коммутациях вакуумных выключателей, в которой учтены особенности, вызванные разновременностью размыкания и замыкания контактов в полюсе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Лаптев О. И. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. — 343 с.

2. Защита сетей 6 – 35 кВ от перенапряжений / Ф. Х. Халилов, Г. А. Евдокимин, В. С. Поляков, и др. — СПб: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2002. — 272 с.

3. Дегтярёв И. Л. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, сопровождающих коммутации вакуумными выключателями: Дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск, 2006.

4. Качесов В. Е. Однофазные повреждения в сетях среднего и высокого напряжения (теория, меры исследования и меры предотвращения повреждений): Дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск, 2008.



## Особенности развития дуговых замыканий на землю в кабельной изоляции сети с резистором в нейтрали

ШИРКОВЕЦ А. И., канд. техн. наук, ООО «Болид»  
630015, г. Новосибирск, Электrozаводская ул., д. 2, корп. 6  
nio\_bolid@ngs.ru

Представлены качественная и количественная оценки влияния активного тока в цепи замыкания на землю на параметры электромагнитных процессов при однофазных повреждениях изоляции силовых кабелей. Рассчитаны вероятности аварийного отката из-за перехода однофазного замыкания в короткое замыкание. Для характерной схемы замещения сети на основе преобразований дифференциального уравнения получены выражения и выполнены расчёты по влиянию отношения активного и ёмкостного токов на коэффициент демпфирования и частоту свободных колебаний в переходном процессе. Изучены условия перевода перемежающейся однофазной дуги в устойчивую фазу её горения при наличии в нейтрали сети резистора.

**Ключевые слова:** заземляющая дуга, активный ток, однофазное повреждение изоляции, силовой кабель, частота свободных колебаний, скорость демпфирования, устойчивость горения.

**А**ктивная составляющая тока  $I_R$  в токе однофазного замыкания влияет на скорости восстановления напряжения на повреждённой фазе и роста электрической прочности в бестоковые паузы. Ожидается, что при соотношениях активного и ёмкостного (при наличии компенсации — остаточного) токов  $I_R/I_C < (1,0 \div 1,2)$  возможно кратковременное усиление деионизации дугового промежутка в бумажно-пропитанной изоляции (БПИ) силового кабеля, в том числе и за счёт стекания избыточного заряда с нейтрали. В изоляции из шитого полиэтилена (СПЭ) незначительная деионизация может иметь место только в газовом канале пробоа, однако восстановление электрической прочности полимерной изоляции, очевидно, уже невозможно.

При включении резистора сопротивлением  $R_N$  в нейтраль сети характер горения дуги при замыканиях на землю

должен изменяться (по сравнению с режимом изолированной нейтрали или заземления через дугогасящий реактор) по крайней мере за счёт изменения после погасания дуги скорости снижения напряжения на нейтрали, определяемой по формуле

$$u_N(t) = u_{N_{\max}} \exp\left(-\frac{t}{3R_N C_\phi}\right), \quad (1)$$

где  $u_{N_{\max}} = (0,5 \div 1,2)u_{\phi \max}$  — диапазон изменения напряжения на нейтрали относительно амплитуды фазного напряжения  $u_{\phi \max}$ ;  $C_\phi$  — ёмкость фазы сети на землю.

При значениях тока  $I_R = (0,7 \div 1,2)I_C$  наибольшие перенапряжения на неповреждённых фазах практически не превышают таковых при первом зажигании дуги. Формула для выбора сопротивления, призванного ограничить перенапряжения, предложена в 1918 г. В. Пе-

терсеном:  $R_N = (1,0 \div 2,5) / 3\omega_{50}C_{\Phi}$ , чему соответствует ток  $I_R = (1,0 \div 0,4) / C$ . На практике при высокоомном резистивном заземлении нейтрали в целях ограничения перенапряжений используются значения  $I_R = (0,6 \div 1,2) / C$ . Наблюдаемый эффект ограничения перенапряжений обуславливает необходимость учёта активного тока в цепи замыкания на землю при исследовании условий горения и гашения однофазной дуги в изоляции силовых кабелей.

Основные задачи представленного в статье исследования:

1. Расчёт вероятности аварийного отказа из-за перехода однофазного замыкания в короткое замыкание (КЗ) для сети с естественным демпфированием за счёт активной проводимости изоляции (в пределах 5 % ёмкостной) и демпфированием, обусловленным включением в нейтраль резистора;

2. Определение влияния активного сопротивления в нейтрали сети на частоту свободных колебаний в переходном процессе дугового замыкания на землю;

3. Оценка уровня перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в зависимости от соотношения активного  $I_R$  и ёмкостного  $I_C$  тока сети, влияние соотношения  $I_R / I_C$  на демпфирование свободных колебаний при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) с характерными частотами до 10 кГц;

4. Изучение условий перевода перемежающейся однофазной дуги в устойчивую фазу её горения за счёт дополнительного активного тока в нейтрали сети.

### Расчёт вероятности аварийного отказа

Эффективность устройств для заземления нейтрали можно оценивать, исходя из числа переходов ОЗЗ в разном рода КЗ. От термического действия дуги происходит 35 % таких переходов, причина ещё 65 % — воздействие перенапряжений и возникновение множественных повреждений на других фазах [1], что справедливо и для кабельных сетей. Тип кабельной изоляции (СПЭ или БПИ) и режим заземления нейтрали сети оказывают существенное влияние на вероятность развития аварийной ситуации при ОЗЗ. Оценка этой вероятности выполнена согласно [2] по следующим формулам:

изолированная нейтраль

$$p = 1 - \exp(-I_{O33} / I_{пр}), \quad (2)$$

резистивно заземлённая нейтраль

$$p = 1 - \exp[-I_{O33} / (1,84 I_{пр})], \quad (3)$$

где  $I_{O33}$  — варьируемое значение тока ОЗЗ, А;  $I_{пр}$  — нормативное предельное значение тока замыкания, при котором допускается длительное замыкание на землю без отключения (по нормам [3] для сети 6 кВ  $I_{пр} = 30$  А, 10 кВ  $I_{пр} =$

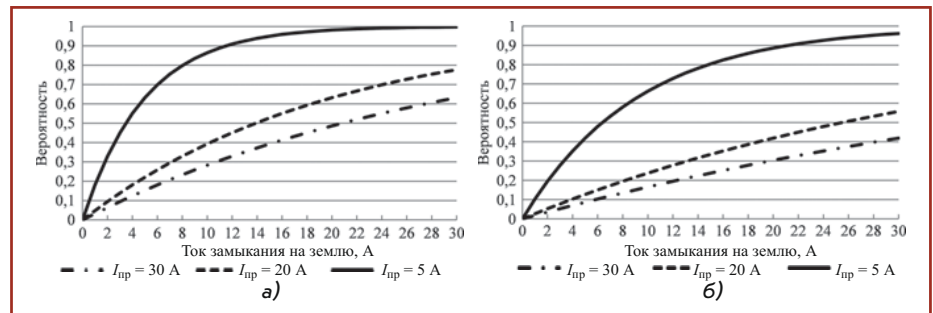


Рис. 1. Зависимости вероятности аварийного отключения (отказа) от тока замыкания на землю при естественном демпфировании (а) и демпфировании с помощью резистора (б)

= 20 А, для сетей с вращающимися машинами  $I_{пр} = 5$  А).

Расчёт вероятности аварийного отключения, выполненный по формулам (2) и (3) для ёмкостных токов до 30 А, приведён на рис. 1. Последний свидетельствует, что расчётная вероятность  $p \leq 0,05$  для  $I_{пр} = 20 \div 30$  А только при значениях  $I_{O33} \leq (1,0 \div 1,5)$  А, а для  $I_{пр} = 5$  А — при  $I_{O33} \leq 0,5$  А. Это означает, что переход ОЗЗ в КЗ возможен даже при эксплуатации коротких кабельных сетей с длинами кабелей единичных присоединений в несколько десятков метров. Наибольшим значениям вероятности отказа соответствуют сети, где удержание ОЗЗ не допускается при токах более 5 А.

Минимальные значения токов замыкания, при достижении которых вероятность перехода ОЗЗ в КЗ составляет  $p = 0,95$ , приведены далее. Для сетей с изолированной нейтралью и предельными токами 5, 20, 30 А они составляют 15, 60, 90 А соответственно, с резистивно-заземлённой нейтралью — 27,5, 110, 165 А соответственно. Дополнительные расчёты показали, что включение в нейтраль резистора приводит к снижению расчётной вероятности аварийного отказа в сети 6 – 10 кВ на 28 – 45 % при токах  $I_{пр} = 20 \div 30$  А. Этот эффект для  $I_{пр} = 5$  А в той же мере выражен только при  $I_{O33} \leq 5$  А  $\approx I_{пр}$ .

Следует отметить, что снижение вероятности аварийного отключения за счёт активного тока  $I_R$  тем значительнее, чем меньше ток замыкания, что соответствует высокоомному резистивному заземлению. В общем случае для этого режима резистор выбирается из условия  $I_{O33} = \sqrt{2} I_C$  ( $I_R = I_C$ ), в ряде случаев допускается  $I_{O33} = \sqrt{3,25} I_C$ . При этом значение тока  $I_R$  должно влиять на искомую вероятность.

Тогда логично заключить, что существует набор соотношений токов  $I_R / I_C$ , позволяющих выбирать номинальное значение резистора для решения конкретной задачи — снижения перенапряжений и вероятности аварийного отказа при удержании ОЗЗ, либо перевода ОЗЗ в устойчивую фазу и его селектив-

ного отключения. Определение этих соотношений позволит сформулировать требования к первичному оборудованию для заземления нейтрали сети, а также рекомендации по настройке релейных защит от замыканий на землю.

### Влияние активного сопротивления в нейтрали сети на частоту свободных колебаний и скорость демпфирования переходного процесса

Для высокоомного резистивного заземления нейтрали (обычно  $R_N \geq 300$  и 500 Ом для сети 6 и 10 кВ соответственно,  $R_N \geq 2000$  Ом для сети 35 кВ) индуктивностью трансформатора для заземления нейтрали можно пренебречь. Индуктивность рассеяния трансформаторов со схемой соединения обмоток  $Y_0 / \Delta$  мощностью до 1000 кВ · А, используемых при низкоомном резистивном заземлении нейтрали ( $R \leq 200$  Ом), приводит к ограничению тока  $I_R$  не более чем на 15 %.

Индуктивность нейтралеобразующего трансформатора влияет на переходные процессы частотой более 1 кГц для кабельных сетей, но по сравнению с влиянием питающего трансформатора мощностью более 10 МВ · А этот эффект выражен слабо. В предложенной постановке задачи переходный процесс в неповреждённых фазах одинаков и проходит синхронно. Схема замещения, отображающая этот процесс, представлена на рис. 2, где  $R_T$  и  $L_T$  — соответственно сопротивление и индуктивность питающего трансформатора.

Дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс в данной схеме относительно напряжения на ёмкости, представляется в следующем виде:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{du_C}{dt} \left( \frac{3}{2R_N C} + \frac{R_T}{L_T} \right) + \frac{u_C}{L_T C} \left( 1 + \frac{R_T}{R_N} \right) = \frac{u_{пр}}{L_T C}, \quad (4)$$

где  $R_N = U_{\Phi} / I_R$  — сопротивление резистора в нейтрали;  $C = I_C / (U_{\Phi} \omega_{50})$  — суммарная ёмкость сети на землю

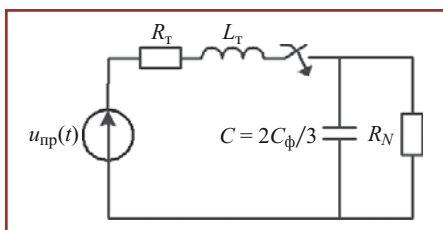


Рис. 2. Схема замещения контуров неповреждённых фаз при замыкании на землю в сети с активным сопротивлением  $R_N$  в нейтрали

( $U_\phi$  — фазное напряжение сети,  $\omega_{50}$  — круговая частота, соответствующая частоте 50 Гц);  $u_{пр}$  — переходное напряжение.

После преобразований уравнения (4) получим

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{du_C}{dt} 2\delta \left(1 + \frac{3}{4\delta^* \omega^*} \frac{I_R}{I_C}\right) + \omega^2 \left(1 + \frac{2\delta^*}{\omega^*} \frac{I_R}{I_C}\right) = \omega^2 u_{пр}, \quad (5)$$

где  $\delta = L_T / (2R_T)$  и  $\omega = 1 / \sqrt{L_T C}$  — абсолютный коэффициент затухания и частота колебаний соответственно;  $\delta^* = \delta / \omega$  и  $\omega^* = \omega / \omega_{50}$  — относительные их значения соответственно.

Частота свободных колебаний переходного процесса в рассматриваемом контуре определяется по выражению

$$\omega_0 = \sqrt{\omega^2 \left(1 + \frac{2\delta^*}{\omega^*} \frac{I_R}{I_C}\right)^2 - \delta^2 \left(1 + \frac{3}{4\omega^* \delta^*} \frac{I_R}{I_C}\right)^2}. \quad (6)$$

Коэффициент демпфирования в схеме (см. рис. 1) определяется активными элементами, причём влияние сопротивления  $R_N$  на затухание колебаний будет решающим

$$\delta_R = \delta \left(1 + \frac{3}{4\omega^* \delta^*} \frac{I_R}{I_C}\right). \quad (7)$$

Исходя из выражений (6) и (7), можно утверждать, что влияние резистора в цепи нейтрали на скорость демпфирования переходного процесса выражается через отношение  $I_R / I_C$  и оно при прочих равных условиях тем меньше, чем выше частота свободных колебаний сети  $\omega^*$ . Это подтверждается расчётами затухания свободных колебаний. Для оценки влияния отношения  $I_R / I_C$  на демпфирование свободных колебаний согласно формулам (6) и (7) примем согласно [4] характерные значения  $\omega$  при  $f = 500 \div 10\,000$  Гц и  $\delta = 2772 \text{ с}^{-1}$  при  $I_R / I_C = 0$  для рассматриваемой кабельной сети. Результаты расчёта приведены в таблице.

В случае изолированной нейтрали сети ( $I_R / I_C = 0$  и  $\delta_R = \delta$ ) стекание заряда на нейтрали за половину периода частоты 50 Гц обеспечивается при отношении  $I_R / I_C \approx 1$ , что приводит к росту коэффициента затухания на 8,5 %. В некоторых режимах, например при отключении части потребителей,

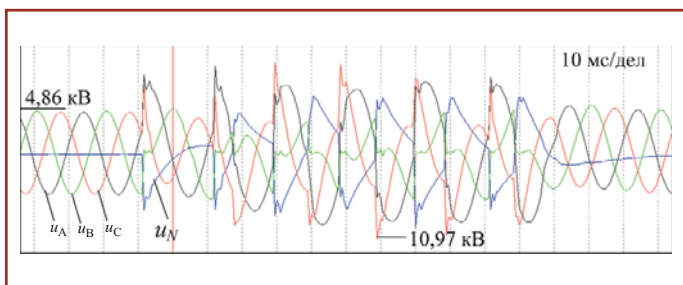


Рис. 3. Натурная осциллограмма самоустранившегося ОЗЗ после 10 дуговых пробоев в кабельной сети 6 кВ с резистивным заземлением нейтрали ( $t_{O33} = 110 \text{ мс}$ ;  $I_R / I_C = 0,36$ )

Отношение $I_R / I_C$	Коеф-фициент демпфи-рования $\delta_R, \text{ с}^{-1}$	Частота свободных колебаний $\omega_0$ при различных значениях частоты переходного процесса $f$ (Гц), $\text{с}^{-1}$					
		500	1000	2000	5000	10 000	
		$\omega^* = 10$	$\omega^* = 20$	$\omega^* = 40$	$\omega^* = 100$	$\omega^* = 200$	
0	2772	1478	5639	12 257	31 293	62 771	
1	3008	2148	5830	12 344	31 327	62 788	
2	3243	2747	6019	12 427	31 360	62 804	
3	3479	3314	6206	12 507	31 390	62 819	
4	3714	3863	6391	12 584	31 419	62 833	
Прирост параметра при $I_R / I_C = 0 \rightarrow I_R / I_C = 4, \text{ с}^{-1} (\%)$		942 (34)	2385 (161)	752 (13,3)	327 (2,67)	126 (0,403)	62 ( $9,88 \cdot 10^{-2}$ )

относительное значение активного тока может возрасти. С практической точки зрения это позволяет пояснить влияние отношения  $I_R / I_C$  на частоты процесса и степень его затухания независимо от значений тока  $I_C$  сети, поэтому определены также значения параметров  $\omega_0$  и  $\delta_R$  при  $I_R / I_C = 2, 3, 4$ .

Расчёты свидетельствуют, что рост доли активного тока в четыре раза (от  $I_R = I_C$  до  $I_R = 4I_C$ ) приводит к возрастанию степени демпфирования на 23,5 %, а по сравнению с изолированной нейтралью ( $I_R / I_C = 0$ ) — на 34 %. При повышении характерной частоты  $f$  переходного процесса от 500 до 1000 Гц наблюдается снижение относительного прироста  $\omega_0$  во всём рассматриваемом диапазоне  $I_R / I_C$  примерно на порядок — от 161 до 13,3 %. Дальнейшее повышение частоты  $f$  или, что равноценно, её относительного значения  $\omega^*$  в 2,0 – 2,5 раза (последовательно до 2, 5, 10 кГц) обуславливает последовательное снижение влияния относительного активного тока  $I_R / I_C$  на частоту свободных колебаний. При  $f = 2$  кГц это влияние становится слабозаметным, а в случае  $f \geq 5$  кГц оно практически полностью нивелируется.

Следовательно, даже если не учитывать индуктивность нейтралеобразующего трансформатора, расчётное влияние заземления нейтрали через резистор в диапазоне  $I_R / I_C = 1 \div 4$  на частоты переходного процесса, связанные с собственными колебаниями контура нулевой последовательности, малозаметно. Это свидетельствует также о том, что при условии практически полного стекания избыточного заряда в бестоковую паузу ( $I_R / I_C \approx 1$ ) переход тока замыкания через нуль в первые периоды процесса дозаряда ёмкости неповреждённых фаз определяется в основном свободной составляющей.

Следовательно, дуга в эти моменты, как и в сети с изолированной нейтралью, может гаснуть. Поэтому при отношении  $I_R / I_C \leq 1$  протекание суммарного тока замыкания  $I_{O33} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$  в месте повреждения не должно приводить к ухудшению условий гашения дуги и повышению вероятности повторных пробоев. Это подтверждается результатами длительной регистрации перенапряжений в кабельной сети 6 кВ (рис. 3).

Несмотря на возможность самопогасания дуги в сети с резистором (см. рис. 3), следует признать, что влияние активного сопротивления в нейтрали на частотные и амплитудные

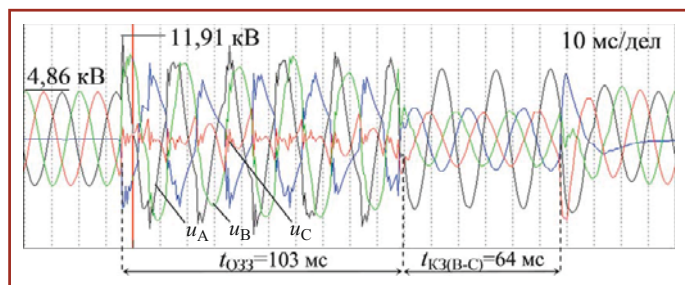


Рис. 4. Натурная осциллограмма дугового ОЗЗ, перешедшего в двухфазное КЗ после 12 дуговых пробоев в кабельной сети 6 кВ с резистивным заземлением нейтрали ( $I_R / I_C = 0,49$ )

параметры, а также благоприятный исход дугового замыкания при  $I_R/I_C < 0,6$  существенно ниже, чем при  $I_R/I_C \geq 0,6 \div 1,0$ . Следовательно, вероятность развития аварийной ситуации в случаях, когда  $I_R/I_C < 0,6$  и  $I_R/I_C = 0$ , при прочих равных условиях отличаются незначительно (рис. 4).

#### Условия перевода перемежающейся однофазной дуги в устойчивую фазу горения

Для определения таких параметров дугового замыкания, как напряжение на нейтрали  $u_N$ , фазы зажигания  $\psi_3$  и гашения  $\psi_r$  дуги, уровень перенапряжений  $K_U$  при наличии в нейтрали сети активного сопротивления используются приведённые далее выражения [5]. Значение фазы гашения дуги, при которой напряжение  $u_N$  и уровень перенапряжений  $K_U$  максимальны, рассчитывается следующим образом:

$$\psi_r = \arcsin \frac{0,2(I_R/I_C)^2 - \sqrt{(I_R/I_C)^2 + 1}}{(I_R/I_C)^2 + 1}. \quad (8)$$

Иллюстрация изменения фазы  $\psi_r$  для практически применяемых соотношений  $I_R/I_C$  представлена на рис. 5. Повышение тока  $I_R$  от резистора в нейтрали приводит к снижению фазы  $\psi_r$ , при которой наблюдаются наибольшие перенапряжения  $K_{U \max}$ . Независимо от режима заземления нейтрали пробой изоляции происходит, как правило, при  $u \approx u_{\max}$  ( $\psi_3 \approx 90^\circ$ ). Зависимость  $\psi_r$  от  $I_R/I_C$  (см. рис. 4) свидетельствует, что максимальное перенапряжение существенно снижается с ростом отношения  $I_R/I_C$ .

Фаза зажигания дуги, отвечающая условию максимального перенапряжения, не зависит от отношения  $I_R/I_C$  и составляет  $\psi_3 \approx 68^\circ$ . При этом перенапряжение в кабельной сети с резистивным заземлением нейтрали с учётом фазы  $\psi_r$  по формуле (8) можно определить по выражению

$$K_U = 1,71 + \frac{(1-d)C_\phi}{C_\phi + C_{\phi\phi}} \times \left[ 0,93 - (\sin \psi_r - 0,2) \exp\left(-\frac{I_R}{I_C} (1,19 - \psi_r)\right) \right], \quad (9)$$

где  $(1-d)$  — коэффициент демпфирования свободных колебаний;  $C_\phi \approx 3C_{\phi\phi}$  — фазная и междуфазная ёмкости сети.

На основе выражения (9) с учётом опыта эксплуатации кабельных сетей среднего напряжения получен вид зависимости  $K_U$  от  $I_R/I_C$ , приведённый на рис. 6. Для широкого класса кабельных сетей характерны значения  $d = 0,05 \div 0,10$ , что соответствует нормальной и ослабленной изоляции сети. Как следует из рис. 6,  $K_{U \max}$  ( $I_R/I_C = 0$ )  $> 3,0$ . Это объясняется тем, что расчёт перенапряжений по формуле (9) справедлив для незначительно ослабленной изоляции кабельной линии, в нём не учитывается дополнительное демпфирование высокочастотного переходного процесса за счёт сопротивления цепи замыкания. Поэтому для более корректной инженерной оценки перенапряжений значения, полученные по формуле (9) и отражённые на рис. 6, допустимо снижать на 5–10 %.

При  $I_R/I_C \geq 2$  эффект ограничения перенапряжений при дуговых ОЗЗ за счёт дальнейшего повышения  $I_R$  становится незначительным. Следовательно, использование для заземления нейтрали резисторов с токами  $I_R > 2I_C$  обусловлено необходимостью решения другой практической задачи — перевода дуги в устойчивую фазу горения и обеспечения селективности релейных защит от ОЗЗ.

Глубокое исследование влияния резистивного заземления нейтрали на характер горения заземляющей дуги и возникающие при этом перенапряжения выполнены отечественным учёным Н. Н. Беляковым на физической модели сети 6 кВ в виде сосредоточенных ёмкостей с образованием зазем-

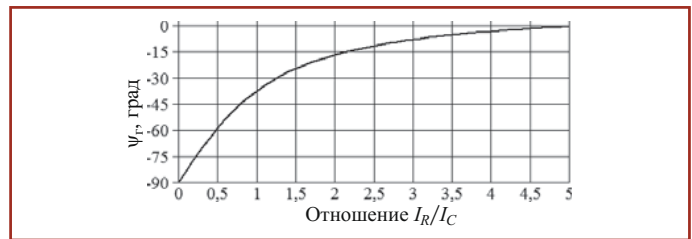


Рис. 5. Зависимость фазы гашения дуги, отвечающей условию  $u_N = u_{N \max}$  от соотношения  $I_R/I_C$

ляющей дуги в разных видах изоляции, в том числе и БПИ кабеля [5]. В рамках этого исследования показано, что при соотношениях  $I_R/I_C = 0,15 \div 9,40$  горение дуги, несмотря на случайность параметров процесса, носит разный характер и при  $I_R/I_C > 3,5$  переходит в устойчивую фазу. Если гашение дуги происходит в момент, когда  $u \neq u_{\phi \max}$ , скорость роста напряжения на дуговом промежутке увеличивается в 1,5–2,0 раза по сравнению с режимом изолированной нейтрали.

Анализ экспериментальных данных позволяет заключить, что выполнение условия  $I_R/I_C \geq 3,5$  обеспечит устойчивое горение дуги при ОЗЗ как в воздушной, так и кабельной сети на основе кабелей с БПИ. Для сетей с кабелями на основе СПЭ-изоляции в целях определения тока  $I_R$ , гарантирующего перевод дуги в устойчивую фазу горения за 0,1–0,5 с и селективное срабатывание простых токовых защит от ОЗЗ, предлагается использовать отношение  $I_R/I_C = 2,5 \div 4,0$ . Это положение закреплено во внутренних стандартах электросетевых предприятий ПАО «МРСК Сибири», ПАО «Ленэнерго», ПАО «МРСК Центра».

В качестве экспериментального обоснования соотношений  $I_R/I_C$ , обеспечивающих изменение характера горения дуги при ОЗЗ, приведём результаты натурных испытаний с осциллографированием тока дуги в действующей кабельной сети 10 кВ эксплуатируемой подстанции 110/10 кВ (рис. 7). Опыты выполнялись с применением искрового промежутка с подвижным и неподвижным шаровыми медными электродами диаметром 1,2 см, скорость вращения первого составляла примерно 1,0 об/с. В случае объединения двух секций сети 10 кВ и суммарном токе  $I_C = 9,9 \div 13,6$  А устойчивое горение дуги наблюдалось при  $I_R/I_C = 1,8 \div 2,5$  (резисторы в нейтрали обеих секций включены).

Исходя из указанных положений, предлагаются следующие условия устойчивого горения дуги для кабельных сетей среднего напряжения:

$$\frac{I_R}{I_C} = \begin{cases} 4,0 & \text{при } I_C \leq I_{\text{норм}}; \\ 2,5 \div 4,0 & \text{при } I_{\text{норм}} < I_C < I_{\text{пред}}; \\ 2,5 & \text{при } I_C > I_{\text{пред}}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $I_{\text{норм}}$  — нормативное значение  $I_C$ , по достижении которого требуется введение компенсации согласно нормам [3];  $I_{\text{пред}} = 60$  А (для кабельных сетей 6–10 кВ) и  $I_{\text{пред}} = 30$  А (для сетей 35 кВ) — предельное значение тока ОЗЗ, обеспе-

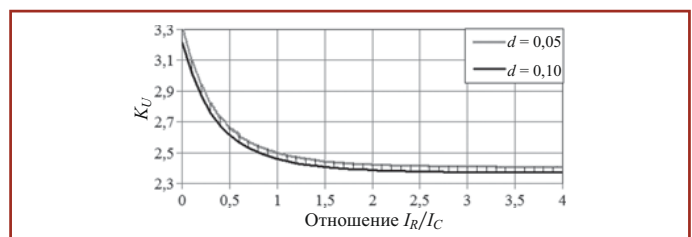


Рис. 6. Зависимость уровня перенапряжений при дуговых ОЗЗ в кабельной сети с резистивным заземлением нейтрали от соотношения  $I_R/I_C$  при различной степени демпфирования

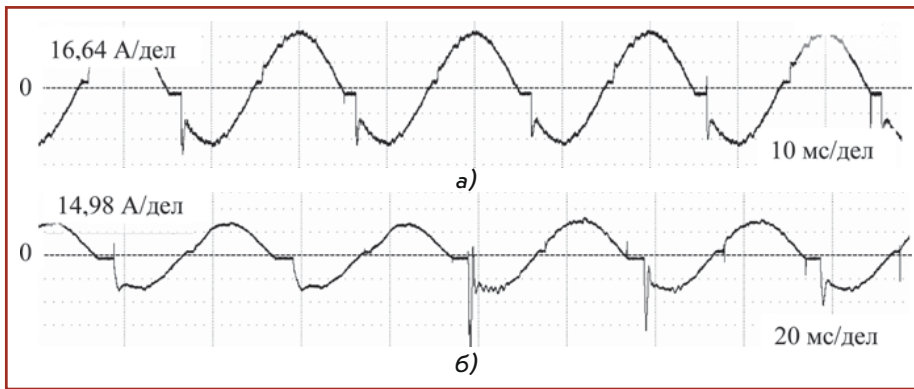


Рис. 7. *Натурные осциллограммы тока дуги в фазе её устойчивого горения при замыкании на землю в сети 10 кВ и отношениях  $I_R/I_C$  равных 1,8 (а) и 2,5 (б)*

чивающего возможность самогашения дуги в сети с компенсацией согласно исследованиям [6].

Предложенный критерий (10) хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований. Основная причина перехода однофазного замыкания в кабеле в устойчивую фазу, независимо от режима заземления нейтрали, — науглероживание канала пробоя с повышением времени непрерывного горения дуги. Важную роль в этом процессе играет энерговыделение в канале горения дуги, которое варьируется в зависимости от состава тока замыкания на землю, этапа горения дуги (соотношения времени горения дуги и длительности бестоковых пауз), типа изоляции и соответствующих условий охлаждения дугового канала и других факторов. В серии натуральных экспериментов в действующей кабельной сети 6 кВ со статистической обработкой осциллограмм дуговых замыканий получены значения 30 – 70 Дж/мс для БПИ и 100 – 260 Дж/мс для СПЭ-изоляции кабелей [7].

Очевидно, что при введении в цепь замыкания на землю дополнительного активного тока от резистора энерговыделение в месте ОЗЗ увеличится. В зависимости от значения тока  $I_R$  изменяются условия горения дуги, что при одной и той же скорости отбора тепла от дугового столба для одного и того же типа кабельной изоляции может привести либо к самоустранению пробоя (наиболее вероятно при  $I_R/I_C = 0,6 \div 1,2$ ), либо к его развитию вплоть до образования науглероженного канала горения дуги (наиболее вероятно при  $I_R/I_C > 2,5$ ). В БПИ развитие процесса возможно как по первому, так и второму варианту, в СПЭ-изоляции самоустранения ОЗЗ не происходит.

Перевод перемежающейся дуги в устойчивую фазу горения с помощью резистора в нейтрали служит для обес-

печения селективного действия защит от ОЗЗ и снижения длительности режима замыкания (в зависимости от схемы сети, логики работы основных и резервных защит и быстродействия выключателей) до 0,2 – 2,5 с. За счёт ограничения перенапряжений предотвращаются аварийные ситуации, в том числе каскадные отключения присоединений из-за перехода ОЗЗ в разного рода КЗ.

#### Выводы

1. Представлены расчётные значения вероятности перехода однофазных замыканий в КЗ для сетей 6 – 10 кВ и токов ОЗЗ в пределах 30 А. Эффект снижения вероятности аварийного отключения за счёт активного тока более заметно выражен при малых токах замыкания на землю. Отмечено, что в режиме удержания ОЗЗ включение в нейтраль резистора приводит к снижению расчётной вероятности аварийного отказа в сети 6 – 10 кВ на 28 – 45 % при предельных допустимых токах  $I_{тр} = 20 \div 30$  А. Выбор сопротивления резистора осуществляется в зависимости от принятого режима эксплуатации сети с ОЗЗ и принципа работы релейных защит (на отключение или сигнал).

2. Показано, что даже при учёте индуктивности нейтралеобразующего устройства расчётное влияние заземления нейтрали через резистор в диапазоне  $I_R/I_C = 1 \div 4$  на частоты переходного процесса, связанные с собственными колебаниями контура нулевой последовательности, мало заметно и нивелируется при частоте более 5 кГц. Рост доли активного тока в четыре раза приводит к возрастанию степени демпфирования на 23,5 %, а по сравнению с изолированной нейтралью ( $I_R/I_C = 0$ ) — на 34 %.

3. Уточнены численные значения параметров дугового замыкания: напряжения на нейтрали, фаз зажигания и га-

шения дуги, уровня перенапряжений  $K_U$  при наличии в нейтрали сети резистора  $R_N$ . На основе аналитических выражений и опыта эксплуатации кабельных сетей среднего напряжения получена зависимость  $K_U$  от  $I_R/I_C$  для широкого класса кабельных сетей при коэффициентах демпфирования, соответствующих нормальной и ослабленной изоляции сети.

4. Выявлено, что при  $I_R/I_C < 0,6$  влияние активного сопротивления в нейтрали на частотные и амплитудные параметры, а также на возможность самогашения дуги мало заметно. Существенное снижение вероятности повторных пробоев за счёт самогашения дуги в кабеле с БПИ наиболее вероятно при  $I_R/I_C = 0,6 \div 1,2$ . Перевод перемежающейся дуги ОЗЗ в устойчивую фазу горения в кабеле, независимо от типа изоляции, наблюдается в диапазоне соотношений  $I_R/I_C = 2,5 \div 4,0$  (и более), т. е. при переходе к низкоомному резистивному заземлению нейтрали.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачёв Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов. — М.: Энергия, 1971. — 152 с.
2. Чебан В. М., Георгиевский В. Л., Долгов А. П. Исследование и разработка комплекса мероприятий по повышению надёжности работы насосно-перекачивающих станций // Научно-технический отчёт № 77056461. — Новосибирский электротехнический институт, 1977. — 73 с.
3. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
4. Вайнштейн Р. А., Шестакова В. В., Русол Д. А. Защита от замыканий на землю в сети 6 кВ с нейтралью, заземлённой через резистор. — Томск: Изд-во ТПУ, 2002. — 37 с.
5. Беляков Н. Н. Перенапряжения от заземляющих дуг в сетях с активным сопротивлением в нейтрали // Труды ВНИИЭ. 1961. Вып. 11. С. 84 – 101.
6. Fuchs E., Fickert L. The Self-Extinguishing Current Limit and the Arc Burning Time of Compensated 20-kV-Power-Grids // Proceedings of PQ2012 8<sup>th</sup> International Conference: 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability. June 16 – 18, 2012. Tartu, Estonia. P. 229 – 235.
7. Shirkovets A., Telegin A. Physical Modeling of Arcing Ground Fault in Cable Insulation and Statistical Analysis of Experimental Results // Proceedings of PQ2014 10<sup>th</sup> International Conference: 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability. June 11 – 13, 2014. Rakvere, Estonia. P. 347 – 350.