

УДК 621.311.1

Экспериментальные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях в сети 20 кВ

А.В. Майоров¹, А.А. Челазнов¹, М.В. Ильиных²

¹ОАО «Объединенная энергетическая компания», г. Москва, Российская Федерация

²ООО «Болид», г. Новосибирск, Российская Федерация

E-mail: mayorov@uneco.ru, chelaznovaa@uneco.ru, ilinich@pnpbolid.com

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время сети 20 кВ г. Москвы выполнены с резистивным заземлением нейтрали, позволяющим кардинально решить проблемы перенапряжений при однофазных замыканиях на землю и реализовать быстрое отключение поврежденного присоединения. Однако резистивное заземление нейтрали сетей среднего класса напряжения вносит особенности в характер протекания переходных процессов, возникающих при однофазных замыканиях на землю, что требует проведения аналитических и экспериментальных исследований процессов при «металлических» однофазных замыканиях в сети 20 кВ.

Материалы и методы: Использованы результаты измерения токов однофазных замыканий на землю и фазных напряжений при однофазном «металлическом» замыкании на землю. Результаты обработаны с использованием методов частотного анализа сигналов, зафиксированных на осциллографах DL-850.

Результаты: Представлены результаты экспериментальных исследований электромагнитных переходных процессов при однофазных «металлических» замыканиях на землю в сети 20 кВ. Показаны осциллограммы фазных напряжений и токов однофазных замыканий на землю, проведен частотный анализ токов, выполнено сравнение значений токов, полученных при использовании различных фильтров нулевой последовательности. Определены значения перенапряжений при однофазных замыканиях на землю. Исследованы процессы во время коммутаций вакуумных выключателей 20 кВ. Показано, что при резистивном заземлении нейтрали сети 20 кВ перенапряжения на «здоровых» фазах в режиме при однофазных замыканиях на землю не превышают $1,85U_{\phi}$, величина тока однофазных замыканий на землю мало зависит от места замыкания.

Выводы: Резистивное заземление нейтрали сети 20 кВ позволяет организовать быстродействующую селективную работу устройств релейной защиты при ОЗЗ, ограничить уровень дуговых перенапряжений и исключить феррорезонансные процессы.

Ключевые слова: электрические сети 20 кВ, перенапряжения при однофазном замыкании, ток и напряжение нулевой последовательности, резистивное заземление нейтрали, опыт однофазного замыкания.

Experimental study of transients under single-phase short circuits in the 20 kV network

A.V. Mayorov¹, A.A. Chelaznov¹, M.V. Ilyinykh²

¹Joint Stock Company «United Energy Company», Moscow, Russian Federation

²LLC BOLID, Novosibirsk, Russian Federation

E-mail: mayorov@uneco.ru, chelaznovaa@uneco.ru, ilinich@pnpbolid.com

Abstract

Background: Moscow 20 kV power networks currently have resistive neutral grounding fundamentally solving the over-voltage problem under single phase-to-ground faults and realizing fast fault clearing. But resistive neutral grounding in medium-voltage systems affects transients occurring under single phase-to-earth faults, which makes it urgent to analyse and study experimentally the processes under solid ("metallic") single phase faults in 20 kV networks.

Materials and methods: We used the results of fault currents and phase voltages measured under phase-to-ground solid fault. The results were processed using the methods of frequency analysis of signals recorded by the DL-850 oscilloscope.

Results: The paper represents the results of experimental studies of electromagnetic transients under phase-to-ground solid faults in the 20 kV network. It also shows the waveforms of phase voltages and fault currents. We have conducted frequency fault current analysis, compared the current values obtained by using different zero-phase-sequence filters, determined the values of overvoltages under phase-to-ground faults, and analysed the processes of switching 20 kV vacuum circuit breakers. It is shown that in case of resistive neutral grounding in 20 kV power networks, overvoltages on healthy phases under single phase-to-ground faults do not exceed $1,85U_{ph}$, with the values of single phase-to-ground fault current practically independent of the fault location.

Conclusions: Resistive neutral grounding in 20 kV networks allows organizing fast selective relaying under single phase-to-ground faults, limiting the level of arc overvoltages, and excluding ferroresonant processes.

Key words: 20 kV electrical networks, phase-to-ground fault overvoltages, zero-phase-sequence current and voltage filters, resistive neutral grounding, phase-to-ground fault experiment.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.023-029

Введение. Надежность электроснабжения, степень тяжести аварийных повреждений, время ликвидации замыканий в электрической сети 6–35 кВ во многом зависят от способа заземления нейтрали. Режим заземления нейтрали сетей среднего напряжения определяет величины перенапряжений, которые воздействуют на изоляцию при замыкании на землю [1].

Во многих странах мира, в том числе и в России, широко распространена система изолированной нейтрали и система компенсированной нейтрали сетей 6–35 кВ. Основное достоинство таких систем заземления нейтрали заключается в том, что в режиме однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) сохраняется электроснабжение потребителей без отключения поврежденного участка сети.

Однако отмеченное преимущество всегда сопровождается негативными явлениями [2]:

- при «металлическом» ОЗЗ напряжение на неповрежденных фазах повышается до линейного, что представляет повышенную опасность для кабельных сетей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ);

- наблюдается возникновение значительных дуговых перенапряжений, которые могут вызвать переход ОЗЗ в двухфазные и многоместные повреждения изоляции;

- режим ОЗЗ может приводить к развитию феррорезонансных явлений и повреждению трансформаторов напряжения в случае резонансной настройки дугогасящих реакторов (ДГР); ОЗЗ сопровождается малыми токами замыкания на землю, что исключает возможность создания простой, надежной и селективной защиты, способной выявить поврежденные присоединения;

- повышается опасность поражения людей и животных из-за длительного существования ненормального режима работы электрической сети.

По этим причинам признано целесообразным модернизировать режим заземления нейтрали сетей 6–35 кВ, перейдя на её заземление через резистор [3].

При ОЗЗ в сетях с заземленной через резистор нейтралью во всех присоединениях протекают собственные емкостные токи, а в поврежденном присоединении, кроме того, протекает активный ток, создаваемый резистором. Это принципиальное отличие позволяет решить две важные задачи:

- 1) селективно определить поврежденное присоединение (за счет применения простых релейных защит, действующих на отключение или сигнал) и незамедлительно принять меры по устранению повреждения;

- 2) существенно ограничить уровень дуговых перенапряжений при ОЗЗ и исключить феррорезонансные процессы (при этом появляется возможность защиты оборудования подстанции (ПС) с помощью нелинейного ог-

раничителя перенапряжения (ОПН) с более низким остающимся напряжением при коммутационном импульсе).

Известно, что полимерная изоляция кабеля из СПЭ крайне чувствительна к высокочастотным перенапряжениям, возникающим при однофазных замыканиях на землю и при коммутациях высоковольтных выключателей, особенно вакуумных.

В отличие от бумажно-масляной, изоляция из сшитого полиэтилена не является самовосстанавливающейся. Это обуславливает необходимость минимизации времени отключения поврежденного фидера при замыканиях на землю и снижении не только уровня перенапряжений, но и длительности их воздействия, например, путем реализации низкоомного резистивного заземления нейтрали с действием зашит от замыканий на землю на отключение.

С осторожностью нужно применять вакуумные выключатели в распределительных сетях, где эксплуатируются кабельные линии с изоляцией СПЭ [4]. Каждая коммутация приводит к прорастанию триингов в толще полимерной изоляции и образованию новых микрополостей, что создает предпосылки для развития частичных разрядов и формирования пути пробоя «жила – заземленный экран». Пропорционально количеству коммутаций происходит снижение электрической прочности основной изоляции кабельной линии, слабым местом которой традиционно являются муфты.

С учетом сказанного, сети 20 кВ ОАО «ОЭК» г. Москвы выполнены с резистивным заземлением нейтрали, позволяющим кардинально решить проблемы перенапряжений при дуговых ОЗЗ и феррорезонансных явлениях, реализовать быстрое отключение ОЗЗ и снизить число повреждений изоляции оборудования высокого напряжения.

Для определения характера и количественной оценки переходных процессов, протекающих в сетях 20 кВ с резистивным заземлением нейтрали при ОЗЗ, проведены экспериментальные исследования при «металлических» однофазных замыканиях в сети 20 кВ ПС Абрамово с осциллографированием сигналов фазных напряжений, тока ОЗЗ, токов в цепях релейной защиты от ОЗЗ.

Целью экспериментальных исследований в сети 20 кВ ПС 220/20 кВ Абрамово ОАО «ОЭК» являлось:

1. Измерение тока ОЗЗ и анализ функционирования релейной защиты от ОЗЗ при возникновении однофазных замыканий на землю в сети 20 кВ.

2. Измерение уровней перенапряжений в сети 20 кВ при однофазных замыканиях на землю.

3. Измерение уровней перенапряжений в сети 20 кВ при штатных коммутациях кабельной линии 20 кВ.

Процессы при ОЗЗ в сети 20 кВ. На рис. 1 представлена схема ПС Абрамово, включающая 2 и 5 секции шин (СШ) 20 кВ, выделенные для проведения экспериментальных исследований. Нейтраль сети 20 кВ ПС Абрамово заземлена через резистор 12 Ом, подключенный к выведенной нейтрали обмоток 20 кВ силового трансформатора Т-2 220/20 кВ мощностью 100 МВА.

Измерение токов ОЗЗ и фазных напряжений при однофазном «металлическом» замыкании на землю выполнялось на 2 СШ 20 кВ ПС Абрамово и на 1 СШ 20 кВ РП-70045, связанного с ПС Абрамово кабельной линией 20 кВ длиной 1,2 км.

Перечень выполненных опытов ОЗЗ:

- «металлическое» ОЗЗ на шинах 2 СШ 20 кВ ПС Абрамово;
- «металлическое» ОЗЗ на шинах 1 СШ 20 кВ РП-70045.

На период проведения опытов ОЗЗ уставки защит фидеров, используемых для создания ОЗЗ и подключения делителей напряжения, были выставлены в соответствии с картами уставок, АВР между секционными выключателями выведено из работы, питание секций 2 и 5 СШ осуществлялось автономно от Т2 220/20 кВ.

Измерение тока ОЗЗ осуществлялось трансформатором тока нулевой последовательности (ТТНП) типа KOLMA 06 D1 150/1 производства АВВ. Дополнительно в цепь однофазной закоротки на землю для измерения тока ОЗЗ устанавливался трансформатор тока (ТТ) типа ТОЛ-10 2000/5. К выводам вторичной обмотки ТТ, зашунтированной нагрузочным сопротивлением, через измерительный кабель подключался цифровой осциллограф-регистратор *DL-850 Scope Corder*.

Для регистрации сигнала тока с трансформатора KOLMA, в связи с невозможностью разрыва его токовых цепей, на его вторичную цепь в релейном шкафу устанавливались токовые клещи FLUKE i200s, с которых снимался сигнал для осциллографа.

Схема подключения измерительной аппаратуры для регистрации тока ОЗЗ и фазных напряжений при экспериментальных исследованиях в сети 20 кВ ПС Абрамово приведена на рис. 2, 3.

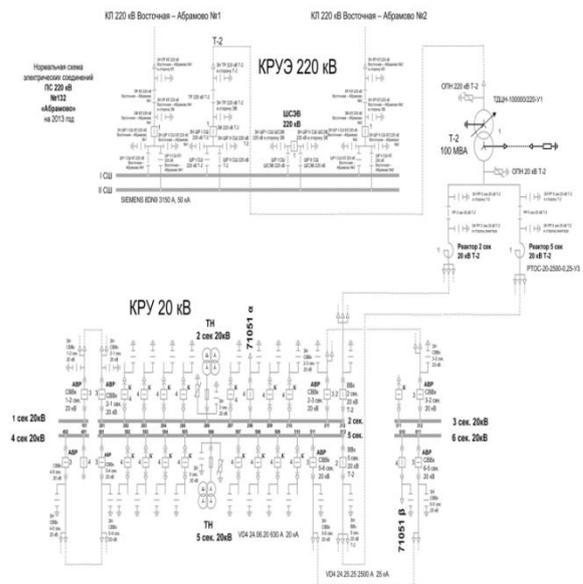


Рис. 1. ПС 220 кВ Абрамово

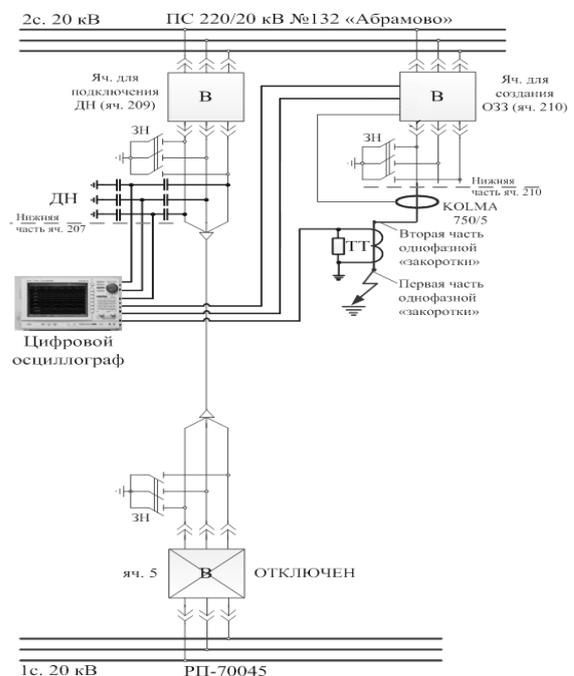


Рис. 2. Принципиальная схема подключения измерительной аппаратуры при проведении опыта ОЗЗ на 2СШ 20 кВ ПС Абрамово

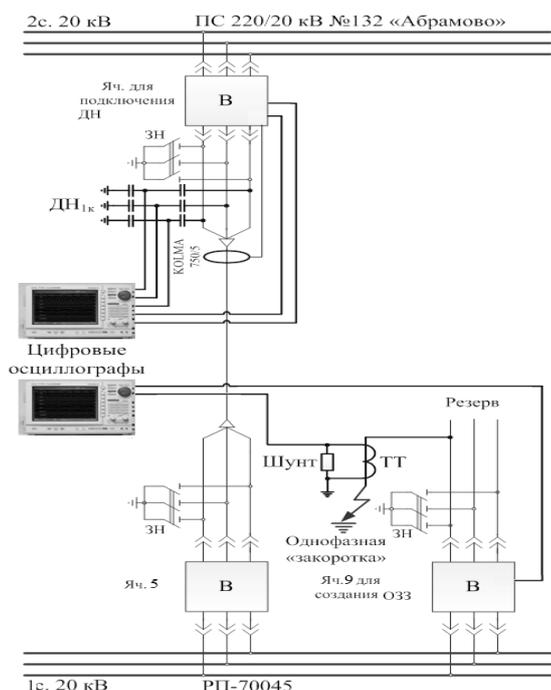


Рис. 3. Принципиальная схема подключения измерительной аппаратуры при измерении емкостного тока ОЗЗ в сети 1СШ 20 кВ РП-70045

Осциллограммы переходных процессов при «металлических» ОЗЗ в сети 20 кВ, полученные с помощью цифровых осциллографов DL-850, приведены на рис. 4, 5. Фиксировались мгновенные значения токов ОЗЗ и фазных напряжений.

На осциллограммах (рис. 4, 5) представлены кривые напряжений и токов при проведении опытов «металлического» ОЗЗ на шинах 20 кВ ПС Абрамово (рис. 4) и ОЗЗ в конце кабельной линии (КЛ) 20кВ длиной 1,2 км на шинах 20 кВ распределительного пункта РП-70045 (рис. 5).

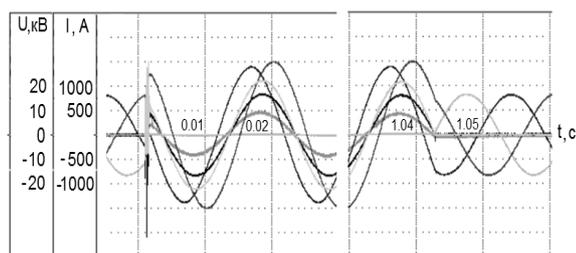


Рис. 4. Фазные напряжения и ток при ОЗЗ в сети 20 кВ

На осциллограммах представлены кривые напряжений фаз А, В, С, токи ОЗЗ снимаемые с ТТ ТОЛ-10, фильтра нулевой последовательности фазных ТТ типа ТРУ 60.21 и тока с токовых клещей от ТТНП типа КОЛМА (для наглядности токи приведены в разных масштабах).

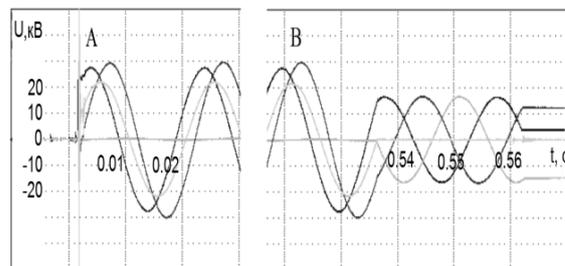
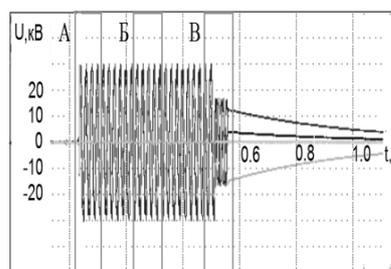


Рис. 5. Фазные напряжения и ток при ОЗЗ землю при ОЗЗ на 1СШ 20 кВ РП-70045

В табл. 1 представлены величины перенапряжений при возникновении «металлического» ОЗЗ в сети 20 кВ. Кратность перенапряжений определялась по формуле

$$k = U_{\max} / U_{\text{фн.р}}$$

где U_{\max} – максимальное значение напряжения в переходном процессе; $U_{\text{фн.р}}$ – амплитуда номинального рабочего фазного напряжения (16,3 кВ – для сети 20 кВ).

Линейное напряжение на 2 СШ 20 кВ ПС Абрамово при проведении экспериментальных исследований составляло 20,2–20,3 кВ.

Таблица 1. Уровни перенапряжений при возникновении ОЗЗ

Режим	Место измерения	Длительность ОЗЗ, с	Кратность перенапряжений, о.е.
ОЗЗ на ПС Абрамово. Опыт 1	ПС Абрамово	1,043	1,52
ОЗЗ на ПС Абрамово. Опыт 2	ПС Абрамово	1,045	1,85
ОЗЗ на РП-70045. Опыт 3	ПС Абрамово	0,479	1,80

Кратности перенапряжений при возникновении ОЗЗ не превышают 1,85 $U_{\text{фн.р}}$.

При однофазном замыкании на 2 СШ 20 кВ ПС Абрамово (рис. 4), осуществленном на присоединении в яч. 210, ОЗЗ штатно отключилось защитой от ОЗЗ терминала REJ527. Время отключения ОЗЗ составило 1,043 с.

При однофазном замыкании на 1СШ 20 кВ РП-70045 (рис. 5), осуществленном на присоединении в яч. 9, ОЗЗ было штатно отключено защитой от ОЗЗ терминала SIPROTEC 7SJ61 РП-70045. Время отключения ОЗЗ составило 0,479 с. На рис. 5 показано восстановление

нормальных фазных напряжений после отключения фидера яч. 9 (сектор В).

При включении на однофазное замыкание происходит ускорение срабатывания токовой защиты фидера шин 20 кВ ПС Абрамово, в результате чего на время 1 с устанавливается $t_{cp} = 0,5$ с. Ускорение защиты привело к срабатыванию защиты от МФЗ и отключению КЛ 20 кВ (фидер яч. 209) со стороны ПС Абрамово. Через $t = 0,046$ с ($t = 0,525$ с после начала ОЗЗ) фидер яч. 209 на ПС Абрамово отключен защитой от междофазных коротких замыканий (КЗ) (ток срабатывания защиты от междофазных замыканий $I_{мф} = 660$ А). После отключения КЛ 20 кВ происходит разряд напряжения линии с постоянной времени $T_a = 0,4$ с.

В табл. 2 представлены результаты гармонического анализа токов ОЗЗ в сети 20 кВ ПС Абрамово, полученных от различных источников сигнала. Значения определены путем цифровой обработки полученных осциллограмм. В последней строке приведены среднеквадратические значения гармоник токов, вычисленные по соотношению

$$I_{\text{агрег.2-40}} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (n = 40).$$

В табл. 3 приведены номера и значения наиболее выраженных гармоник тока ОЗЗ.

Анализ полученных данных (табл. 1–3) показывает, что искажение тока ОЗЗ высшими гармониками незначительно. При токе резистора 960 А среднеквадратические значения гармонических составляющих в токе ОЗЗ не превышают 0,6–0,8 %. Наиболее выраженной является 5-я гармоника, значение которой не превышает 5,5 А (не более 0,6 % от основной гармоники 50 Гц).

При измерении тока ОЗЗ ставилась задача сопоставления сигналов от различных типов трансформаторов тока и оценки их применимости в качестве источников для функционирования релейной защиты от ОЗЗ.

В табл. 4 приведены действующие значения основной гармоники тока однофазного замыкания на землю, полученные по результатам наблюдений с различных измерительных устройств (рис. 2, 3). В результате анализа по-

лученных осциллограмм токов ОЗЗ выявлено, что отсутствует искажение измененного сигнала от используемых в эксперименте источников тока.

Таблица 2. Действующие значения гармонических составляющих тока ОЗЗ при замыкании на 2СШ 20 кВ ПС Абрамово

Номер гармоники	Трансформатор тока 2000/5		Фильтр НП фазных ТТ 600/5		Токовые клещи от KOLMA 150/1	
	А	%	А	%	А	%
1	970,2	100	956,2	100	928,6	100
2	1,023	0,105	1,556	0,163	3,298	0,355
3	0,856	0,088	0,304	0,032	1,608	0,173
4	0,748	0,077	0,555	0,058	0,655	0,071
5	4,347	0,448	4,180	0,437	5,440	0,586
6	0,232	0,024	0,213	0,022	1,213	0,131
7	1,347	0,139	1,279	0,134	1,692	0,182
8	0,505	0,052	0,162	0,017	0,855	0,092
9	0,513	0,053	0,363	0,038	0,936	0,101
10	0,221	0,023	0,096	0,010	0,613	0,066
11	0,409	0,042	0,493	0,052	1,435	0,155
12	0,080	0,008	0,042	0,004	0,598	0,064
13	0,812	0,084	0,615	0,064	1,126	0,121
14	0,079	0,008	0,087	0,009	0,194	0,021
Ид	5,045	0,520	4,799	0,502	8,085	0,871

Значения тока ОЗЗ, полученные от трансформатора тока, установленного в цепи «закоротки», и от фильтра нулевой последовательности фазных трансформаторов тока, отличаются на 1,0–1,5 %. Различие сигналов, полученных от трансформатора тока в цепи «закоротки» и с помощью токовых клещей от трансформатора тока типа KOLMA, не превышает 4,5 %. Эти данные позволяют сделать вывод о достаточной точности отображения тока ОЗЗ фильтром нулевой последовательности (НП) фазных трансформаторов тока и ТТНП, что позволяет использовать их сигналы для организации работы релейной защиты от ОЗЗ.

Таблица 3. Наиболее выраженные гармоники в токе ОЗЗ

Режим	Место измерения	Устройство	Номера гармоник	Наиболее выраженная гармоника
ОЗЗ на ПС Абрамово Опыт 1	ПС Абрамово	ТТ 2000/5 0,5S	2, 5, 7	5 – 4,347 А (0,448 %)
		Фильтр НП фазных ТТ 0,5S	2, 5, 7	5 – 4,180 А (0,437 %)
		ТТНП KOLMA 10P (токовые клещи)	2, 3, 5, 7, 11, 13, 16, 23, 24, 29	5 – 5,440 А (0,586 %)
		ТТНП KOLMA 10P (токовые клещи)	2, 3, 5, 7	5 – 4,775 А (0,513 %)
ОЗЗ на РП-70045	ПС Абрамово	Фильтр НП фазных ТТ 0,5S	2, 3, 4, 5, 7	5 – 4,564 А (0,485 %)
		РП-70045	ТТ 2000/5 0,5S	3, 5, 7
	РП-70045	Фазный ТТ KSOH 200/5 (токовые клещи)	3, 5, 7	5 – 4,052 А (0,438 %)

Таблица 4. Измеренные значения токов ОЗЗ частоты 50 Гц с различных измерительных устройств в сети 20 кВ ПС Абрамово

Режим	Место измерения	Измеренный ток ОЗЗ на момент эксперимента, А		
		Начало опыта		
		ТТ 2000/5 0,5S	Фильтр НП фазных ТТ 0,5S	ТТНП КОЛМА 10Р (токовые клещи*)
ОЗЗ на ПС Абрамово Опыт 1	ПС Абрамово	970,19	956,21	928,61
ОЗЗ на ПС Абрамово Опыт 2	ПС Абрамово	967,20	953,69	931,25
ОЗЗ на РП-70045	ПС Абрамово	–	941,41	–
	РП-70045	954,60	939,25**	–

*Токовые клещи имеют погрешность 2–3 % и угловую погрешность $\leq 6^\circ$.

** Сигнал снимался с помощью токовых клещей с кабельного фазного ТТ типа KSON.

Значения тока ОЗЗ, определенные на момент возникновения замыкания и на момент его отключения при $t_{cp} = 0,46$ с отличаются на 3,6 %. Уменьшение тока к концу опыта объясняется нагревом металла резистора, установленного в нейтрали.

Процессы при коммутациях кабельной линии 20 кВ. Исследование коммутационных перенапряжений проводилось при штатных коммутациях кабельной линии 20 кВ в сети 20 кВ ПС 220/20 кВ Абрамово ОАО «ОЭК». В ходе исследований проводились коммутации включения и отключения ненагруженной кабельной линии 20 кВ вакуумным выключателем VD4.

Для измерения перенапряжений при коммутациях кабельной линии 20 кВ вакуумными выключателями типа VD4/P 24.06.20 использовались делители напряжения, подключаемые к шинам 20 кВ в кабельном отсеке яч. 209. Запись сигналов в процессе коммутаций осуществлялась с помощью цифровых запоминающих осциллографов DL 850. Запуск осциллографа осуществлялся по фронту фазного напряжения. В процессе опыта выполнялась регистрация фазных напряжений в цикле коммутации включения и отключения кабельной линии 20 кВ. Для осциллографирования высокочастотных процессов частота дискретизации осциллографа устанавливалась равной 10 МГц. Длина записи файла составляла 5 с.

На рис. 6 приведены осциллограммы напряжений в начале кабельной линии 20 кВ при включении кабельной со стороны ПС Абрамово, на рис. 7 приведены осциллограммы при отключении КЛ.

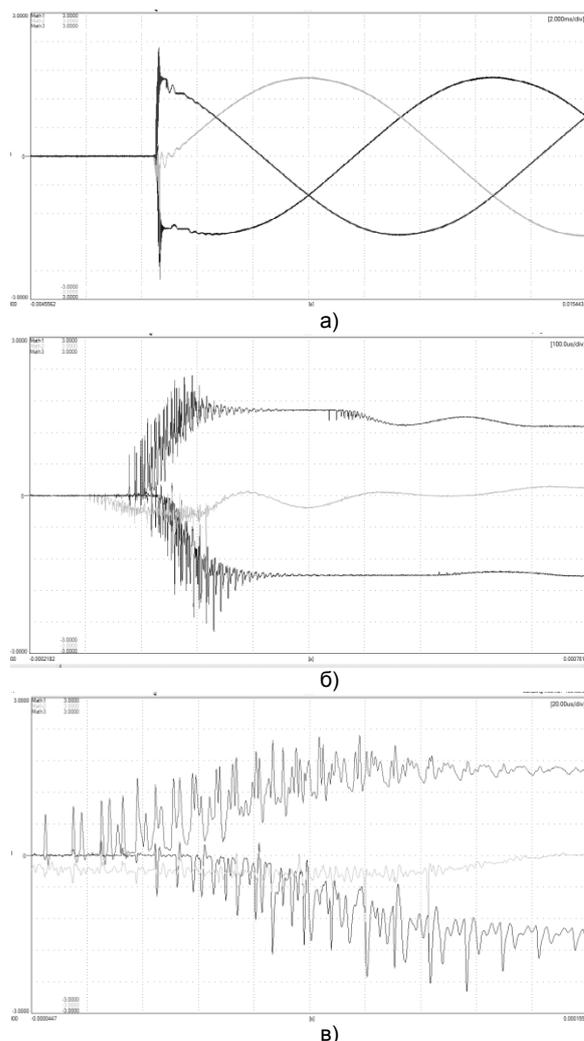


Рис. 6. Осциллограмма фазных напряжений при включении кабельной линии вакуумным выключателем 20 кВ (масштаб по оси ординат 6 кВ/дел, по оси абсцисс: а – 2 мс/дел; б – 0,1 мс/дел; в – 0,02 мс/дел)

Согласно программе исследований, перед опытами включения производили разряд коммутируемой КЛ. Наибольшая кратность перенапряжений при включении КЛ 20 кВ достигает 1,32 о.е. (фаза «В»).

Переходный процесс при включении КЛ на начальном участке сопровождается многочисленными пробоями межконтактного промежутка выключателя, что обусловлено процессами гашения дуги в вакууме.

На время эксперимента все присоединения шин 20 кВ кроме яч. 209 находились в отключенном положении, секция шин с коммутируемым присоединением была отсоединена от других секций. Таким образом, колебательные процессы при включении КЛ обусловлены перезарядкой емкости шин и емкости отключенного кабеля через неустойчиво горящую дугу вакуумного выключателя.

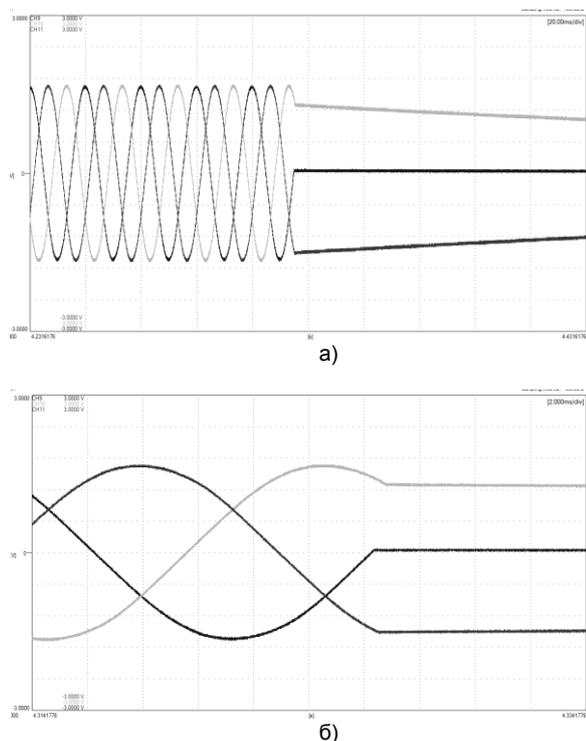


Рис. 7. Осциллограмма фазных напряжений при отключении кабельной линии (масштаб по оси ординат 6 кВ/дел, по оси абсцисс: а – 20 мс/дел; б – 2 мс/дел)

Процессы при отключении происходят без повторных зажиганий. После отключения КЛ происходит разряд кабельной линии с постоянной времени $T_a = 0,4$ с. Повторные пробой при отключении отсутствуют, что объясняется практическим отсутствием разницы потенциалов между размыкающимися контактами выключателя при отключении холостой КЛ.

Заключение

При резистивном заземлении нейтрали сети 20 кВ ($R_n = 12$ Ом) перенапряжения на «здоровых» фазах при ОЗЗ не превышают $1,85 U_{\phi}$, что практически исключает вероятность возникновения повторного пробоя и двойных замыканий в отличие от сетей с разземленной нейтралью.

Величина тока ОЗЗ мало зависит от места замыкания и определяется значением сопротивления резистора в нейтрали, что позволяет организовать быстродействующую селективную работу устройств релейной защиты на всем протяжении кабельной линии.

Искажение тока ОЗЗ высшими гармониками при токе резистора порядка 960 А не превышает 0,8 %. Наиболее выраженной является

5-я гармоника, значение которой не превышает 5,5 А (0,6 % от основной гармоники 50 Гц), что исключает влияние гармоник тока на действие релейной защиты.

При заземлении нейтрали через металлический резистор заземления нейтрали РЗОСЗ-20/20-У2 за время ОЗЗ $t = 0,46$ с за счет нагрева металла проводника происходит уменьшение тока на 3 %. При задержке в отключении ОЗЗ до 5 с уменьшение тока может достигать 15 %, что должно учитываться при расчете уставок релейных защит.

При коммутации включения вакуумным выключателем ненагруженной кабельной линии 20 кВ наблюдаются пробой межконтактного промежутка. Перенапряжения при этом не превышают $1,32 U_{\phi}$. Частота переходного процесса, возникающего за счет неустойчивого горения дуги в вакуумном выключателе, составляет 100–150 кГц. Наличие указанных высокочастотных перенапряжений должно учитываться при формировании требований к изоляции коммутируемых трансформаторов и высоковольтных двигателей.

Список литературы

1. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 415 с.
2. Лихачев Ф.Ф. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
3. Сарин Л.И., Ширковец А.И., Ильиных М.В. Опыт применения резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ // Энергетик. – 2009. – № 4. – С. 13–14.
4. Лавров Ю.А. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией. Особенности проектирования и эксплуатации // Новости Электротехники. – 2007. – №1(43).

References

1. Vil'geym, R., Uoters, M. *Zazemlenie neytrali v vysokovol'tnykh sistemakh* [Neutral grounding in high voltage systems]. Moscow, Gosenergoizdat, 1959. 415 p.
2. Likhachev, F.F. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiyey emkostnykh tokov* [Earth faults in networks with insulated neutral and capacitive currents compensation]. Moscow, Energiya, 1971. 152 p.
3. Sarin, L.I., Shirkovets, A.I., Il'nykh, M.V. *Opyt primeneniya rezistivnogo zazemleniya neytrali v elektricheskikh setyakh 6–35 kV* [Experience in applying resistance neutral grounding in 6–35 kV electrical networks]. *Energetik*, 2009, no. 4, pp. 13–14.
4. Lavrov, Yu.A. *Kabeli 6–35 kV s plastmassovoy izolyatsiyey. Osobennosti proektirovaniya i ekspluatatsii* [6–35 kV cables with plastic insulation. Design and operation specifics]. *Novosti Elektrotekhniki*, 2007, no. 1(43).

Майоров Андрей Владимирович,
ОАО «Объединенная энергетическая компания»,
генеральный директор,
e-mail: mayorov@uneco.ru

Челазнов Александр Алексеевич,
ОАО «Объединенная энергетическая компания»,
доктор технических наук, заместитель руководителя департамента,
e-mail: chelaznovaa@yandex.ru.

Ильиных Михаил Владимирович,
ООО «Болид»,
начальник научно-исследовательского отдела,
e-mail: ilinich@pnpbolid.com