

В этом и в нескольких последующих номерах редакция публикует ряд статей сотрудников и выпускников кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» Московского энергетического института (ныне Национальный исследовательский университет «МЭИ»). Статьи посвящаются памяти крупного ученого, доктора технических наук, профессора Даниила Всеволодовича Разевига, который в 1958–1973 гг. руководил этой кафедрой, был деканом электроэнергетического факультета, проректором МЭИ по научной работе, а с 1966 по 1973 гг. — главным редактором журнала «Электричество».

В апреле с.г. исполняется 100 лет со дня рождения Даниила Всеволодовича Разевига, статья о нем помещена в этом номере, в разделе «Из истории электротехники».

Высокочастотные коммутационные перенапряжения в сети среднего напряжения

БОРИСОВ Р.К., КОЛОМИЕЦ Е.В., ГАФФАРОВ Р.Ф.

Рассмотрены условия возникновения высокочастотных импульсных перенапряжений в сетях среднего напряжения с изолированной и резистивно заземленной нейтралью. Расчеты показали, что при высоких значениях частоты возможен резонанс напряжения. В этом случае перенапряжения могут достигать десятикратных значений. Применение дугогасительных решеток, резистивное заземление нейтрали и установка ОПН позволили снизить аварийность в сетях среднего напряжения, но не смогли устранить аварии из-за высокочастотных перенапряжений. Представлены результаты экспериментальных исследований распределения импульсных напряжений по обмотке трансформатора. Натурными и имитационными экспериментами подтверждено возникновение резонанса на среднем уровне напряжения при коммутации на высоком напряжении. Ограничители перенапряжений при высокочастотных перенапряжениях имеют ограниченную зону защиты. Для регистрации высокочастотных перенапряжений разработан цифровой регистратор с бесконтактными датчиками напряжения. Проведена регистрация перенапряжений при коммутации на трансформаторной подстанции 10 кВ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высокочастотные импульсные перенапряжения, сети среднего напряжения, цифровой регистратор, бесконтактные датчики напряжения

Многие аварии в сети среднего (СН) напряжения 6–20 кВ с повреждением оборудования обусловлены перенапряжениями, возникающими в процессе эксплуатации. Изучению причин возникновения перенапряжений, анализу их характеристик и разработке методов защиты от них посвящено множество теоретических и экспериментальных научных работ, а также учебной литературы [1, 2].

Известно, что в сетях с изолированной нейтралью при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) из-за перемежающейся дуги возникают перенапряжения. Согласно требованиям [3] в сетях 6, 10, 35 кВ с токами замыкания на землю более 30, 20 и 10 А соответственно должна применяться их компенсация путем установки дугогасящих реакторов. При резонансной настройке, когда емкостное сопротивление на землю равно индуктивному сопротивлению реактора, условия для переходных процессов при ОЗЗ благоприятные: ток промышленной частоты в месте повреждения, скорость восстановления напряжения на поврежденной фазе после

гашения дуги и уровень дуговых перенапряжений минимальны. В реальных условиях при изменяющейся емкости сети и отсутствии систем автоматической настройки компенсации обеспечить режим резонансной настройки невозможно (по этой же причине невозможно выполнить и рекомендации [3] о работе с небольшой перекомпенсацией). В публикациях [2–5] в сетях с изолированной нейтралью перенапряжения по отношению к фазному напряжению не превышают шестикратных значений. Испытания изоляции оборудования проводят в соответствии с ГОСТ 1516.3-96 «Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции». Испытательное напряжение переменного тока примерно в 7 раз выше номинального напряжения. Если в распределительном устройстве установлены ограничители перенапряжений (ОПН), то остающееся напряжение при коммутационных перенапряжениях не превышает испытательного напряжения и повреждение оборудова-

ния при ОЗЗ из-за коммутационных перенапряжений может происходить только при сниженной прочности изоляции.

В то же время возникающие повреждения электротехнического оборудования при коммутациях в сетях СН во многих случаях остаются невыясненными, так как значения перенапряжений в процессе эксплуатации не регистрируются. Эксперименты с регистрацией перенапряжений в реальных сетях немногочисленны и не дают статистически достоверных данных.

Высокочастотные коммутационные импульсные перенапряжения в сети 10 кВ с изолированной нейтралью. Коммутационные перенапряжения возникают при внезапных изменениях в схеме или параметров сети (плановые и аварийные переключения линий, трансформаторов и т.д.), а также в результате замыканий на землю и между фазами. При включении элементов электрической сети (проводов линии или обмоток трансформаторов и реакторов) или отключении (разрыв электропередачи) возникают колебательные переходные процессы, которые могут привести к возникновению значительных перенапряжений. Наиболее опасно возникновение резонанса напряжения на высоких частотах, приводящего к многократному возрастанию напряжения.

Так, на подстанции при ОЗЗ на фидере 10 кВ произошло повреждение двух ячеек комплексного распределительного устройства (КРУ) из-за перекрытия проходных изоляторов отключенного секционного выключателя. После замены ячеек КРУ были проведены испытания изоляции в соответствии с ГОСТ 1516.3-96. При включении фидеров произошло повторное повреждение тех же ячеек. В качестве одной из предполагаемых версий перекрытия изоляторов принято возникновение резонанса высокочастотной составляющей напряжения. Для проверки версии рассчитывались переходные процессы на программном комплексе ATPDrawVersion 5.9p4; КРУ-10 кВ моделировалось сосредоточенными параметрами, а отходящие кабели (АСБ 3'240) – специальными моделями ATPDraw. Собственная частота колебаний КРУ-10 кВ равна 17,7 кГц. Если частота источника близка этой частоте, то наблюдается явление резонанса.

В качестве одного из возможных источников колебаний рассматривались отходящие от КРУ фидеры. Рассчитывались частоты разряда кабелей различной длины при однофазном КЗ. На рис. 1 приведена зависимость частоты высокочастотных перенапряжений от длины кабеля до места ОЗЗ.

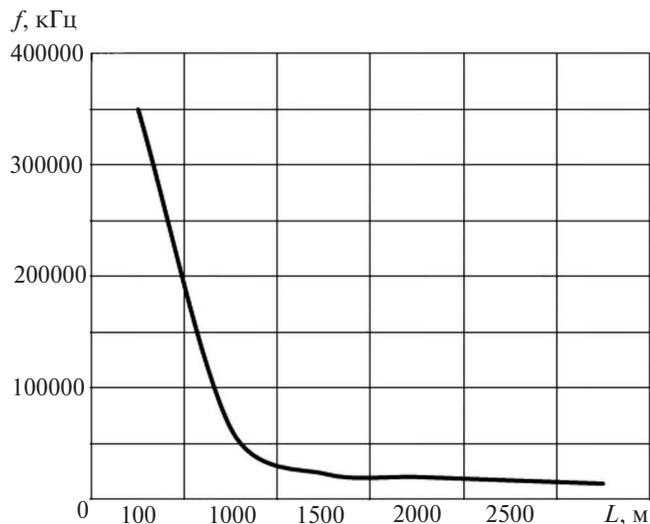


Рис. 1. Зависимость частоты разряда кабеля от его длины (кабель проложен в земле на глубине 1 м)

Возникновение резонанса возможно лишь при близком ОЗЗ. Таким образом, ближние однофазные КЗ на отходящих фидерах в сети с изолированной нейтралью в системе КРУ–КЛ опасны из-за возможности возникновения резонансных ВЧ перенапряжений на холостых концах КРУ, что может привести к повреждению изоляции.

Высокочастотные коммутационные импульсные перенапряжения сети 20 кВ с резистивно заземленной нейтралью. Высокочастотные перенапряжения могут возникать и в сети 20 кВ с резистивно заземленной нейтралью при коммутациях кабельных линий. Проводился анализ повреждений трансформаторов напряжением 20/10 кВ. Повреждения происходили при включении трансформатора и при однофазных замыканиях на землю. Наблюдалась деформация верхней и нижней консолей фазы (с отделением диска обмотки). Можно предположить, что причина их возникновения – пробой межвитковой изоляции из-за перенапряжений. При этом в основном наблюдаются разрушения в верхней и нижней частях обмотки с явно выраженной деформацией обмотки – отделением ее диска. При перекрытии изоляции в средней части обмотки таких разрушений не происходит.

Был рассчитан коммутационный процесс включения трансформатора 20/0,4 кВ. Фаза ВН трансформатора 20/0,4 кВ по своей конструкции представляет многослойную дисковую обмотку из алюминиевой фольги. Число витков фольги в диске около 50 для трансформатора 2500 кВА, а число дисков – 15. Было установлено, что при отсутствии резонанса напряжение по дискам распределяется неравномерно: на первом и последнем дисках примерно в 2,5 раза выше, чем на остальных дисках.

При возникновении резонанса напряжение существенно возрастает на всех дисках.

Для определения распределения импульсных напряжений по дискам обмотки трансформатора проводились экспериментальные исследования при импульсных воздействиях напряжения в виде: затухающих колебательных импульсов на частоте 0,5; 1; 2 МГц и аperiodических импульсов 1,2/50 и 8/20 мкс. Измерения регистрировались осциллографом FLUKE 199С. Генераторы подключались к началу и концу обмотки трансформатора. Результаты распределения напряжения по дискам обмотки при колебательных затухающих импульсах представлены на рис. 2.

Интересно, что расчетами и экспериментами установлено: при воздействии аperiodического (грозового) импульса 1/50 мкс напряжение по дискам распределяется равномерно. При подаче импульса 8/20 мкс возникают колебания, близкие к резонансным, и распределение напряжения по дискам становится неравномерным.

Высокочастотные коммутационные импульсные перенапряжения из-за наведенных импульсных напряжений с высокого напряжения. В [7–9] показано, что резонансные перенапряжения в трансформаторах могут возникать в обмотках среднего напряжения из-за наведенных импульсных напряжений с обмотки высокого напряжения. Рассмотрим один из таких случаев. На ГЭС в цепях собственных нужд генераторного напряжения при коммутациях на стороне 500 кВ периодически происходили повреждения оборудования 13 кВ. Исследования привели к выводу, что наиболее вероятной причиной перекрытия изоляции на выводах трансформатора собственных нужд является волна напряжения с крутым фронтом, которая передается на сторону 13,8 кВ электростатическим образом через емкостную связь между обмотками. Расчетами переходных процессов на стороне 500 и 13,8 кВ было показано, что резонансная частота токоограничивающе-

го реактора составляет около 50 кГц. Для проверки расчетов были проведены контрольные измерения амплитудно-частотных характеристик импульсных перенапряжений в цепях 13,8 кВ при коммутациях на ОРУ–500 кВ. Измерения проводились при имитации переходных процессов на стороне 500 кВ и при натуральных коммутациях.

К одной из фаз автотрансформатора (АТ) на стороне 500 кВ подключался генератор (второй вывод генераторов заземлялся), с помощью которого подаются импульсы напряжений различной формы и частоты. Генератор обеспечивает подачу колебательных затухающих импульсов напряжения (частота колебаний от 1 до 100 кГц) и близких к прямоугольным импульсы с амплитудой около 700 В. Измерения проводились на ошиновке 13,8 кВ трансформаторной группы до и после реактора. В режиме, когда выключатель собственных нужд включен от генератора на фазу В АТ, подавались колебательные затухающие импульсы напряжения с различной частотой колебаний. Измерения проводились на фазах А, В и С 13,8 кВ до и после реактора. Проводились также коммутации выключателем на ОРУ-500 кВ в различных режимах. Измерения делались с помощью делителей напряжения. Коэффициент передачи делителей примерно 10000. Типичные осциллограммы импульсов напряжений представлены на рис. 3.

Из осциллограмм видно, что основная частота импульсных напряжений составляет около 50 кГц. Наблюдается явный резонанс напряжения. Амплитуда импульсных напряжений более 40 кВ при отключенном трансформаторе собственных нужд. С учетом результатов имитационных экспериментов при включенном трансформаторе СН амплитудное значение может быть более 80 кВ.

Особенности воздействия импульсных перенапряжений на твердую изоляцию. В [10] хорошо изложена теория пробоя (электрического и теплового) твердых диэлектриков. В случае резконеоднородного поля или при очень малой длительности воздействующего напряжения в твердых диэлектриках возникают каналы неполных пробоев как следствие протекающего тока разряда. С повышением амплитуды импульса длина каналов разряда возрастает и при некотором достаточно высоком напряжении каналы прорастают сквозь толщу диэлектрика. Разряды оставляют тонкие нитевидные следы в диэлектрике. Существенно, что прорастание канала разрядов сквозь толщу диэлектрика еще не означает его полного пробоя. Пробой диэлектрика происходит при прорастании разряда через диэлектрик и образовании канала повышенной проводимости (рис. 4). На фото показано, что про-

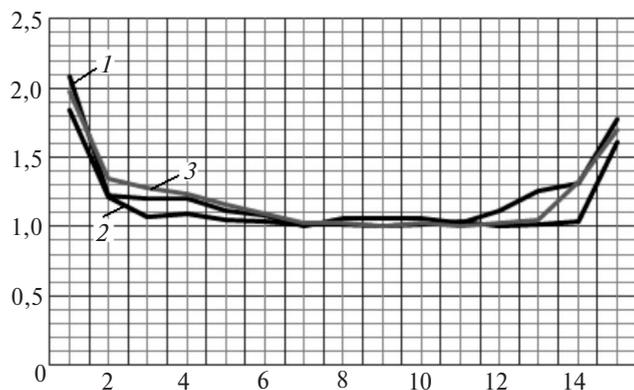


Рис. 2. Коэффициент распределения напряжения по дискам обмотки по отношению к минимальному значению: 1 – 0,5 МГц; 2 – 1 МГц; 3 – 2 МГц

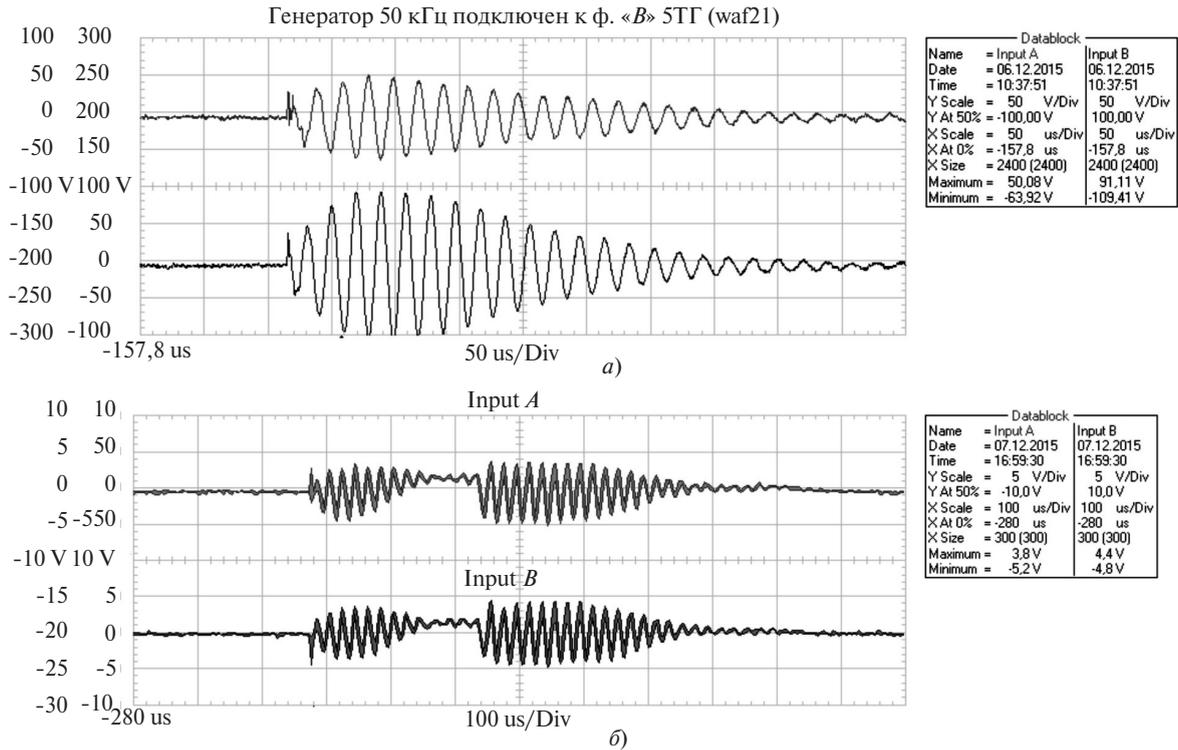


Рис. 3. Осциллограммы импульсных напряжений до реактора (вход *A*) и после (вход *B*): *a* – осциллограммы при имитации от генератора; *б* – осциллограммы импульсных напряжений при включении выключателя на 500 кВ

бою диэлектрика предшествовало прораствание разряда в виде дендритов.

Работа ограничителей перенапряжений при воздействии импульсных высокочастотных перенапряжений. Практически во всех рассмотренных случаях повреждений оборудования при импульсных высокочастотных перенапряжениях были установлены ОПН, но не смогли защитить оборудование от повреждений. В [11] представлены результаты экспериментальных исследований для определения причин неудачной работы ОПН по защите от перенапряжений. Характеристики различных типов ОПН исследовались с помощью комбинированного генератора колебательных импульсов. По результатам экспериментов был сделан вывод, что ОПН имеет ограниченную зону защиты при импульсных перенапряжениях.

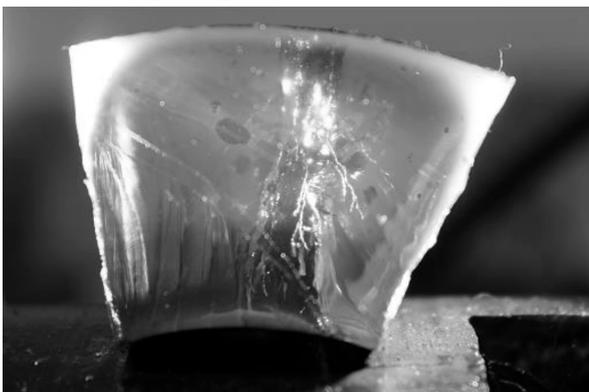


Рис. 4. Фото канала пробоя в кабеле

Зона защиты ОПН от высокочастотных перенапряжений зависит от частоты этих перенапряжений, значения тока срабатывания ОПН. Условие, по которому можно определить зону эффективной защиты ОПН:

$$U_{\text{пер}} \leq U_{\text{исп.из}}$$

где $U_{\text{пер}}$ – уровень перенапряжений в месте воздействия на изоляцию; $U_{\text{исп.из}}$ – испытательное напряжение изоляции. Значение напряжения в месте воздействия на изоляцию при срабатывании ОПН

$$U_{\text{пер}} = U_{\text{ост}} + L di / dt,$$

где $L di / dt$ – падение напряжения на индуктивности от ОПН до места воздействия на изоляцию; $U_{\text{ост}}$ – остающееся напряжение при срабатывании ОПН.

Регистрация коммутационных высокочастотных перенапряжений. Известные из литературы эксперименты по регистрации перенапряжений в сетях ВН и СН напряжения относительно немногочисленны. Связано это с тем, что для проведения таких экспериментов необходимо подключать делители напряжения и, соответственно, отключать на время работы напряжение в действующих электроустановках.

Для того чтобы упростить процедуру регистрации переходных процессов и импульсных перенапряжений на ВН и СН, был разработан цифровой

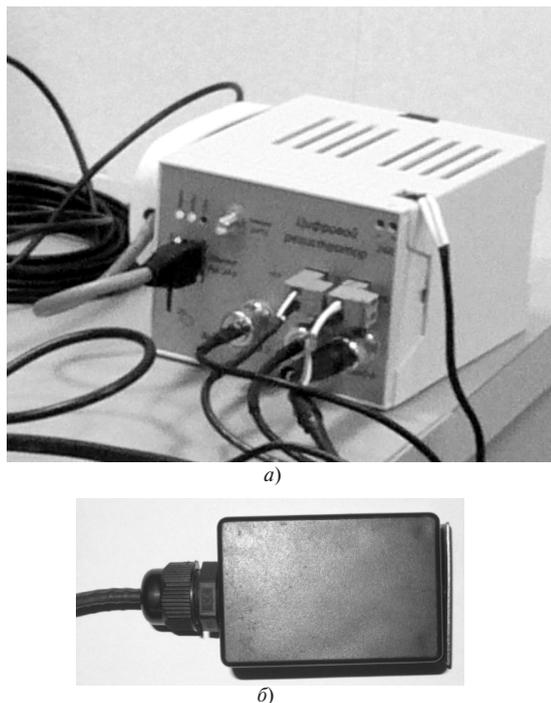


Рис. 5. Цифровой регистратор переходных процессов (а) с бесконтактным датчиком напряжения (б)

регистратор высокочастотных переходных процессов ЦРВПП-1 с бесконтактными датчиками напряжения (рис. 5).

Для регистрации напряжения требуется лишь наличие не экранированного от электрического поля участка. Датчики устанавливаются на безопасном расстоянии от элементов оборудования, находящихся под напряжением. Диапазон частот при регистрации переходных процессов — от 0 до 2 МГц. Частота дискретизации при осциллографировании импульсных процессов составляет 7,2 МГц, а переходных процессов — 10 кГц. Диапазон измерения бесконтактного датчика напряжения 1÷600 кВ. Информация хранится в памяти (флешка 9ГГб), может передаваться по радиоканалу и считываться на компьютер по WiFi.

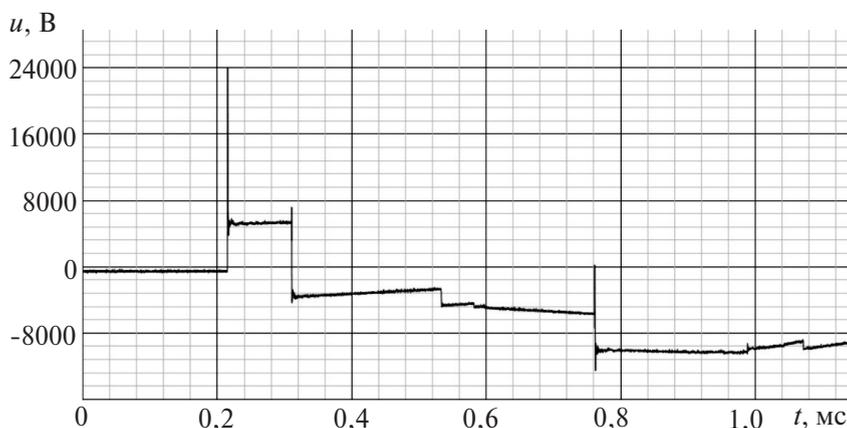


Рис. 6. Осциллограмма напряжения «фаза—земля» при коммутации холостого трансформатора

С помощью регистратора были получены осциллограммы высокочастотного переходного процесса на ТП 10 кВ при коммутации холостого трансформатора (рис. 6).

Видно, что при коммутациях возникают трехкратные импульсные перенапряжения.

Заключение. Одной из причин аварий являются высокочастотные коммутационные перенапряжения, возникающие в результате переходных процессов в сетях ВН и СН. Для распределительных устройств ВН нормативными документами на этапе проектирования предусмотрены выполнение расчетов переходных процессов и выбор мероприятий по защите от грозовых и коммутационных перенапряжений. Для распределительных устройств СН такие работы не проводятся. Применение ДГР, резистивное заземление нейтрали и установка ОПН позволили снизить аварийность в сетях СН, но не устранили аварии из-за высокочастотных перенапряжений.

Для снижения аварийности из-за высокочастотных коммутационных перенапряжений необходимы следующие мероприятия:

1. На этапе проектирования следует выполнять расчеты коммутационных переходных процессов для всех классов напряжения и правильно выбирать устройства защиты от перенапряжений и места их установки.
2. В процессе эксплуатации необходим контроль высокочастотных перенапряжений с помощью цифровых регистраторов с бесконтактными датчиками для предотвращения кумулятивного эффекта при воздействии на твердую изоляцию.
3. Необходим нормативный документ по защите от высокочастотных импульсных перенапряжений. В нем должны быть представлены расчетные методы, типовые случаи применения устройств защиты от перенапряжений и указаны места их установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1986, 464 с.
2. Долгинов А.И. Перенапряжения в электрических системах. М.: Госэнергоиздат, 1962, 512 с.
3. Правила устройства электроустановок, 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
4. Базуткин В.В. К проблеме компенсации емкостных токов в сетях 6-10-35 кВ. — ЭЛЕКТРО, 2007, № 1, с. 23–26.
5. Беляков Н.Н. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю с одновременным обрывом фаз. — Электричество, 1958, № 11, с. 17–22.

6. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35 кВ. СПб.: Терция, 2004, 188 с.

7. Ларин В.С., Матвеев Д.А., Жуйков А.В. Исследование наведенных перенапряжений на вторичных обмотках трансформатора отбора мощности. — Электротехника, 2018, № 5, с. 27–32.

8. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.1. Условия возникновения и защитные мероприятия. — Электричество, 2015, № 11, с. 33–40.

9. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.3. Измерение напряжения в в обмотках на резонансных частотах. — Электричество, 2016, № 1, с. 20–24.

10. Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. Физика диэлектриков (область сильных полей): Учебное пос. 2-е изд. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011, 245 с.

11. Борисов Р.К., Исам М. А. Абдельшафи, Коломиец Е.В. Экспериментальные исследования устройств защиты от импульсных перенапряжений. — Вестник МЭИ, № 6, 2016, с. 11–15.

[15.01.2020]

А в т о р ы: **Борисов Руслан Константинович** — кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Московского энергетического института (ТЭВН МЭИ), диссертацию защитил в 1981 г.

Коломиец Евгений Владимирович — инженер кафедры ТЭВН МЭИ.

Гаффаров Рафик Фаритович — начальник Восточного района электрических сетей АО «ОЭК».

Electrichestvo, 2020, No. 4, pp. 4–9

DOI:10.24160/0013-5380-2020-4-4-9

High-Frequency Switching Overvoltages in a Medium-Voltage Network

BORISOV Ruslan K. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — *Leading researcher of the High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., Cand. Sci. (Eng.)*

KOLOMIYETS Eugene V. (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — *Engineering of the High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept.*

GAFFAROV Rafik F. (*JSC «OЕК», Moscow, Russia*) — *Head of the East region of Electrical Networks*

Conditions under which high-frequency impulse overvoltages occur in medium-voltage (MV) networks with insulated and resistively grounded neutrals are considered. It has been shown from numerical analysis results that voltage resonance may occur at high frequencies. In that case, the overvoltages may reach ten times the nominal voltage value. Owing to the use of arc chutes, resistively grounded neutrals, and metal-oxide surge arresters, the failure rate in MV networks has been decreased; however, faults due to high frequency overvoltages still have not been eliminated. Results from experimental investigation of impulse voltage distribution along the transformer winding are presented. The results of full-scale and simulation experiments have confirmed the possibility of resonance to occur at the medium-voltage level in carrying out switching operations at the high-voltage level. Under the conditions of high-frequency overvoltages, metal-oxide surge arresters are able to protect a limited area. A digital recorder equipped with contactless voltage sensors has been developed for recording high-frequency overvoltages. The overvoltages excited by switching operations at a 10 kV substation have been recorded.

К e y w o r d s: *high-frequency impulse overvoltages, medium-voltage networks, digital recorder, contactless voltage sensors*

REFERENCES

1. Bazutkin V.V., Larionov V.P., Pital' Yu.S. *Tekhnika vysokikh napryazheniy. Izolyatsiya i perenapryazheniya v elektricheskikh sistemakh* (High voltage technique. Insulation and overvoltage in electrical systems). Moscow, Energoatomizdat, 1986, 464 p.

2. Dolginov A.I. *Perenapryazheniya v elektricheskikh sistemakh* (Overvoltage in electrical systems). Moscow, Gosenergoizdat, 1962, 512 p.

3. *Pravila ustroystva elektroustanovok, 7-ye izd.* (Rules for the installation of electrical installations, 7th ed.). Moscow, NTs ENAS, 2003.

4. Bazutkin V.V. *ELEKTRO — in Russ. (ELECTRO)*, 2007, No. 1, pp. 23–26.

5. Belyakov N.N. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1958, No. 11, pp. 17–22.

6. Yevdokunin G.A., Titenkov S.S. *Vnutrenniye perenapryazheniya v setyakh 6–35 kV* (Internal overvoltages in 6–35 kV networks). St. Petersburg, Tertsia, 2004, 188 p.

7. Larin V.S., Matveyev D.A., Zhuykov A.V. *Elektrotekhnika — in Russ. (Electrical Engineering)*, 2018, No. 5, pp. 27–32.

8. Larin V.S. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 11, pp. 33–40.

9. Larin V.S. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 1, pp. 20–24.

10. Vorob'yev G.A., Pokholkov YU.P., Korolev YU.D., Merkulov V.I. *Fizika dielektrikov (oblast' sil'nykh poley): Uchebnoye pos. 2-ye izd.* (Physics of dielectrics (region of strong fields): Educational pos., 2nd ed.). Tomsk, Publ. of Tomsk Polytechnic University, 2011.

11. Borisov R.K., Isam M.A. Abdel'shafi, Kolomiyets Ye.V. *Vestnik MEI — in Russ. (Bulletin MEI)*, 2016, No. 6, pp. 11–15.

[15.01.2020]