

УДК 621.311

**ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ КОММУТАЦИЯХ МАЛЫХ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ****ГАШИМОВ А.М*., ДМИТРИЕВ Е.В., ДМИТРИЕВ В.Е., ПИВЧИК И.Р.**

Институт Физики НАН Азербайджана
Новосибирская Государственная Академия Водного транспорта*

Приведены результаты анализа экспериментов, выявивших возникновение высокочастотных перенапряжений, связанных с кумулятивными пробоями межконтактного промежутка выключателя при включении ненагруженной системы шин высоковольтным выключателем. Приведены соображения по измеренным токам.

Наибольшими перенапряжениями и наибольшим числом опасных воздействий на оборудование распределительных устройств сопровождаются эксплуатационные коммутации ненагруженных шин и маломощных аппаратов разъединителями и выключателями [1-5]. Каждая такая операция сопровождается многократными пробоями промежутка между расходящимися и сходящимися контактами. При каждом пробое в высоковольтной схеме возникают затухающие электромагнитные колебания с частотами более 50 кГц. Число таких процессов за одну коммутацию разъединителя может быть достаточно большим в зависимости от параметров схемы, класса выключателя и разъединителя. Амплитуды колебаний могут достигать величин свыше $3,5 U_{\phi}$ при коммутации разъединителями и свыше $6 U_{\phi}$ при коммутации выключателями, что представляет большую опасность для высоковольтного оборудования. В результате повреждается изоляция измерительных трансформаторов. Проблема защиты оборудования распределительного устройства от таких перенапряжений до настоящего времени не решена.

В настоящей статье представлены результаты анализа перенапряжений при коммутациях малых емкостных токов высоковольтными выключателями и излагаются некоторые соображения по возможности их ограничения.

При проведении анализа среди набора экспериментального материала оказалось целесообразным вновь использовать результаты натуральных экспериментов, проведенных в 80-е годы, по циклу отключение-включение системы сборных шин на подстанции Армавир 330. Для указанных экспериментов были выделены 2 системы шин 330 кВ. Коммутация осуществлялась одним выключателем при четырех отключенных. К шинам был подключен трансформатор напряжения типа НКФ – 330 и вентильный разрядник. Электронным шестилучевым осциллографом с механической разверткой конструкции ВЭИ осциллографировались три фазных напряжения на шинах 330 кВ через специальный емкостной делитель напряжения и три фазных тока в первичной обмотке трансформатора напряжения. Аварийным шлейфовым осциллографом через трансформатор напряжения осциллографировались три фазных напряжения и напряжение $3U_0$. На всех осциллограммах, полученных на электронном осциллографе, видны следующие один за другим высокочастотные процессы зарядки шин. Процесс заряда можно разделить на два этапа. Первый – с вынужденной составляющей, амплитуда которой определяется соотношением между емкостями шин на землю, между собой и переменной емкостью между контактами выключателя, превышающей емкости шин из-за малого расстояния между сходящимися контактами. Второй этап – с вынужденной составляющей шин при замкнутых контактах выключателя. Минимальная амплитуда вынужденной составляющей близка к нулю, максимальная – равна рабочему напряжению. В

некоторых случаях вынужденная составляющая имеет промежуточное значение. Максимальное значение перенапряжений по полученным осциллограммам оценить не удалось. С помощью современных компьютерных средств обработки изображений удалось установить, что амплитуда перенапряжений по крайней мере в шесть раз выше номинального. В двух из восьми случаев наблюдалось возникновение высокочастотных перенапряжений и после включения шин через одиннадцать и двадцать периодов (Рис.1).

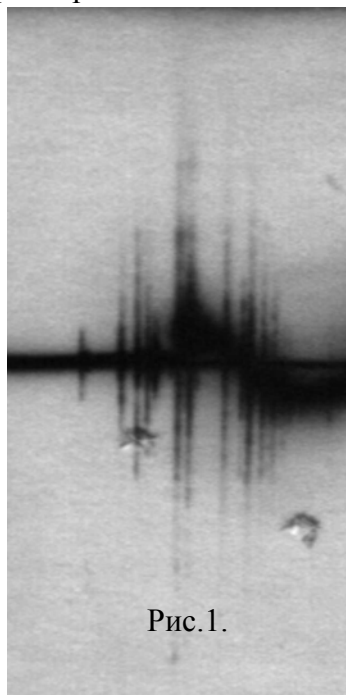


Рис.1.

Перенапряжения возникли в максимуме напряжения на шинах и прекратились после прохождения обратного максимума. Очевидно, что это наводки от искрящих контактов. С наибольшей точностью удалось оценить перенапряжения на одной фазе при увеличенной яркости одного из шести лучей электронного осциллографа. В этом режиме луча перед первым циклом отключения – включения удалось зафиксировать колебания с частотой около 60 кГц. (оценка частоты была проведена по характеристикам оборудования второй системы шин 330 кВ подстанции Армавирская). На рис.2 представлены осциллограммы на одной из фаз (при максимальной яркости соответствующего луча) на стадии включения. Осциллограммы представлены в двух вариантах. В первом необработанном (левый рисунок), для выявления амплитуды перенапряжений, и во втором, обработанном (правый рисунок), для выявления амплитуды вынужденной составляющей напряжения, с помощью которой можно выявить кратность перенапряжения. Сопоставление указанных осциллограмм позволило установить кратность

перенапряжений более шестикратной. Перенапряжения не ограничены вентильным разрядником. Явление коронирования также не оказало существенного влияния на

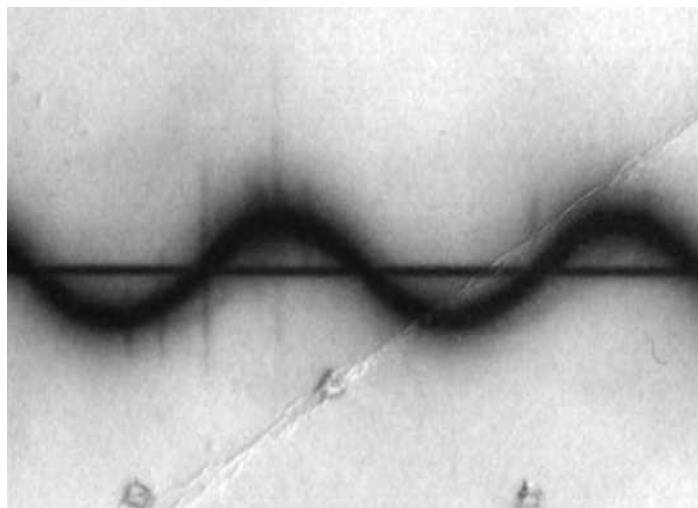
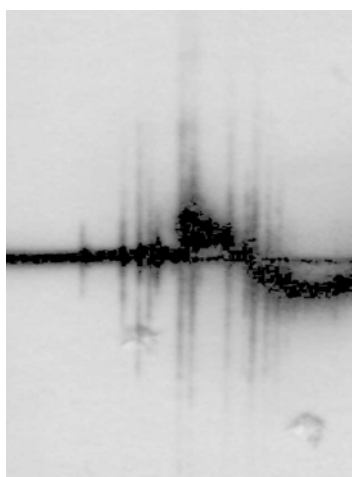


Рис.2.

ограничение перенапряжения в связи с высокой частотой переходного процесса. Характер явления перенапряжения, судя по осциллограммам (утолщение по обе стороны пика кривой), аналогичен явлению перенапряжений при дуговых процессах замыкания на землю в сетях с неэффективно заземленной нейтралью с постепенным увеличением перенапряжений до максимального значения с последующим затуханием. Отличие состоит в том, что явление носит искровой характер и многократно повторяется в течении одного полупериода. Искровой характер связан с большим давлением газовой среды в выключателе и незначительной емкостной нагрузкой сборных шин. Расчетные характеристики искры: ток 500А, постоянная времени 1мкс. Емкостной ток шин 0,2А.

В связи с описанным экспериментом, интересно вспомнить об авариях на Экибастузской ГРЭС-2, третью из которых одному из авторов пришлось рассматривать.

Там на СШ 500 кВ при постановке под напряжение генератора случился трехкратный взрыв выключателя типа ВНВ, после чего он был снят с производства по причине, связанной не с аварией, а с не прохождением полного цикла испытаний.

По нашим предложениям были испытаны емкостные делители напряжения. Включили трансформатор тока, как это было при аварии. Измеряли напряжение визуально на экране осциллографа, на котором были видны сильные колебания. Через 5 минут на экране появилась картина, аналогичная той, что была перед аварией. За 15 минут колебания на экране прекратились и мы увидели обычную синусоиду.

Выключатели можно ставить под напряжение с одной или другой стороны полуторной схемы. Отличие состоит в геометрии с разных сторон. Если синхронизация генератора осуществляется выключателем со стороны шин, то никаких неприятностей нет. При осуществлении синхронизации с другой стороны, взрыв выключателя происходил три раза. Были разработаны рекомендации по синхронизации с другой стороны, затем выключатели были заменены.

Для более подробного изучения явления были выполнены эксперименты на модели с рабочим фазным напряжением до 230 В переменного и постоянного тока. При таком напряжении электрические явления при коммутациях, как известно, носят искровой характер. Была собрана обычная схема распределительного устройства из многих элементов r , L , C , которая подключалась через сосредоточенные элементы r , L к источнику тока.

Для качественных измерений была использована двенадцати разрядная шестнадцатиканальная плата аналого-цифрового преобразователя (АЦП), подключенная к ЭВМ. Входное сопротивление АЦП более 100 МОм. В память компьютера вводились массивы мгновенных значений напряжений и токов исследуемой электрической цепи. В результате программной обработки, из массива выбирались максимальные значения напряжений и токов, вычислялись среднеквадратические значения, полная, активная и реактивная мощности и сопротивления, фаза включения, ударный коэффициент и коэффициент затухания, спектр гармоник, строились вольт-амперные и магнитные характеристики в переходных и установившихся режимах, в различных системах координат, в том числе, в фазовой плоскости.

Программа обработки представляет из себя макрос, написанный на языке Visual Basic для приложений, встроенный в MS Excel. Для фиксации момента включения АЦП запускается раньше включения исследуемой цепи. Программа устанавливает момент включения. Величина тока, являющаяся достоверным событием включения, должна быть больше помех и определяется экспериментально. Программа устанавливает моменты перехода через ноль значений напряжений и токов, которые используются для определения частоты источника и пределов интегрирования при вычислениях.

С помощью АЦП и программной обработки массива информации выполнен комплекс исследований процесса коммутации включения электрических схем малой мощности, носящих емкостной характер. Использовались источники постоянного и переменного тока различной частоты. Материал контактов выключателя – латунь. Во всех случаях при малых токах – единицах мА, возникали искровые пробои между контактами при их соприкосновении, переходной процесс при этом во всех случаях подобен процессу при коммутации малых токов высоковольтными выключателями. Отличие состоит в отсутствии перенапряжений при коммутациях в цепях низкого напряжения (кратность перенапряжений до 1). Выполненный эксперимент на модели подтвердил, что при включении под напряжение системы сборных шин процесс включения носит искровой характер, а в высоковольтных цепях он сопровождается значительными перенапряжениями.

Таким образом, в общей комплексной проблеме защиты от перенапряжений - грозовых, коммутационных, резонансных, феррорезонансных и дуговых, необходимо решать и проблему искровых перенапряжений при коммутациях малых токов высоковольтными выключателями [5-7].

Из осциллограмм видно, что на первом этапе включения почти все напряжение источника приходится на промежуток между контактами выключателя (емкостное распределение напряжения). Это вызывает пробой между контактами, а сопровождающий пробой ток, в связи с малой величиной, не способен создать хорошо проводящую среду между контактами. Большая емкость между контактами выключателя связана с весьма малым промежутком между ними. Прежде, чем установится хорошо проводящая среда между контактами, происходящие многократные пробои вызывают местный разогрев, который создает необходимую проводящую среду [8]. С увеличением величины коммутируемого тока время создания проводящей среды уменьшается.

Для решения проблемы перенапряжений, связанных с выключателями, можно рассмотреть мероприятия:

1. Шунтирование основных контактов высокоомными резисторами, что раньше делалось.
2. Создание искусственной дополнительной нагрузки системы сборных шин, увеличивающей ток включения выключателя.

При использовании шунтирования основных контактов резисторами включение должно осуществляться через резистор, аналогично выключателям с предвключаемыми резисторами.

Анализ влияния нелинейных шунтирующих резисторов на восстанавливающиеся напряжения между контактами выключателей при ликвидации коротких замыканий, как непосредственно за выключателем, так и удаленных, показал, что нелинейность является существенно положительным фактором для повышения отключающей способности выключателей [4]. Применение резисторов для защиты от высокочастотных перенапряжений при коммутациях разъединителями рассмотрено в работе [3]. Задача решалась с помощью математической модели подстанции с элементами, обладающими сосредоточенными и распределенными параметрами, и моделью резистора, как слабо нелинейного элемента с коэффициентом нелинейности 0,7–0,8. Полученные в [1-4] результаты показали, что нелинейные резисторы в цепи разъединителя эффективнее линейных. Как видно, включение сборных шин через предвключаемый высокоомный резистор может решить проблему искровых перенапряжений. Это мероприятие интересно с технической стороны, в связи с возможностью решения комплекса проблем эксплуатации, но требует много времени для реализации и усложняет выключатель.

Впервые получены токи через трансформатор напряжения, как униполярные со следованием через пять-девять периодов (Рис.3).

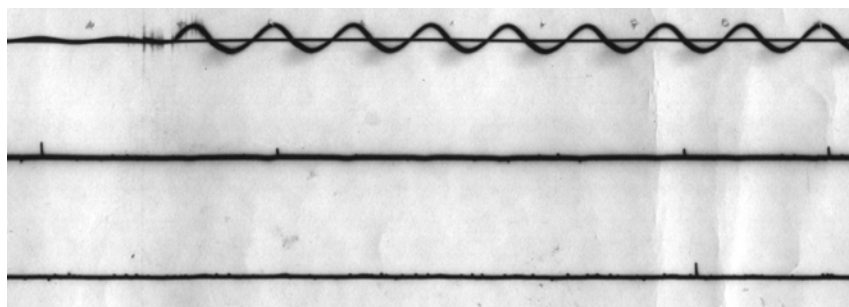


Рис.3.

Откуда эти токи? Их картина, происхождение, после долгих размышлений привели нас к выводу, что эти токи совершенно не понятны. Они не зависят от напряжения на ТН, будь то номинальное напряжение, или меньшее, в отключенном состоянии вы-

ключателя. Очевидно, что эти токи помешали созданию НКФ-750, поскольку их величина при 750 кВ была значительной. И был создан трансформатор типа НДЕ.

В настоящее время созданы цифровые осциллографы, которые не обладают недостатками предыдущих конструкций. Полагаем, что названные осциллографы при соответствующих технических условиях будут обладать возможностью сбора данных без искажений.

Заключение

При коммутации высоковольтными выключателями малых емкостных токов возникают высокочастотные перенапряжения, связанные с многократным кумулятивным искровым пробоем межконтактного промежутка в процессе схождения контактов, с амплитудой колебаний выше $6 U_{\phi}$. Для уменьшения уровня перенапряжений целесообразно увеличение величины коммутируемого тока увеличением нагрузки системы шин. Увеличение нагрузки системы шин расстраивает феррорезонансный контур, образующийся из источника питания, емкостей делителя напряжения выключателя, системы шин и индуктивности трансформатора напряжения, это исключает на подстанциях, снабженных дополнительными батареями конденсаторов связи, возможность возникновения феррорезонансных перенапряжений, снижает скорость восстановления напряжения при ликвидации коротких замыканий. Увеличение нагрузки сказывается положительно при осуществлении автоматического повторного включения шин.

-
1. *Зилис Л.Д., Кузмичева К.И., Ивановский А.* Перенапряжения при коммутациях разъединителями системы шин и работа разрядников. Электрические станции, 1982, №9, с.64-67.
 2. *Ковалев Б.И., Киндяков В.С., Ковалева А.В., Максимов В.М. и др.* Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. М.: СПО ОРГРЭС, 1998, с. 26
 3. *Ахмедов Х.М. Гашимов А.М., Дмитриев Е.В., Кузнецов В.Г., Максимов М.В., Шидловский А.М.* Вопросы защиты оборудования распределительных устройств от высокочастотных коммутационных перенапряжений. В кн.: Сборник статей по электрофизике и электроэнергетике. Баку, ЭЛМ, 1997, с.212-218.
 4. *Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Григорашвили О.К.* Напряжения, воздействующие на резисторы, шунтирующие дугогасительные контакты выключателей, при отключении коротких замыканий. В кн.: Частичное заземление нейтрали в электрических системах через резистор. Баку, ЭЛМ, 1976, с. 115-129.
 5. *Антипов К.М., Максимов В.М., Шур С.С., Гашимов А.М., Джуварлы Ч.М., Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Магда И.И.* Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащие емкостные делители напряжения. Москва, Союзтехэнерго, 1987г.
 6. *Месяц Г.А.* Эктоны. М.: Наука, 2000. 424 с.
 7. *Вершинин Ю.Н.* Электронно – тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 258 с.
 8. *Дьяков А.Ф., Бобров Ю.К., Сорокин А.В., Юргеленас Ю.В.* Физические основы электрического пробоя газов. М: Издательство МЭИ, 2001. 264 с.

**YÜKSƏK GƏRGİNLİKLİ AÇARLARLA KİÇİK TUTUM
CƏRƏYANLARIN KOMMUTASIYA UADA ÖLÇMƏLƏR**

HƏŞİMOV A.M., DMİTRİYEV Y.V., DMİTRİYEV V.Y., PİVÇİK İ.R.

Yüksək gərginlikli açarlarla yüksüz sistem şinlərin qoşulmasında açarların kontaktlararası kumulyativ elektrik deşilməsi ilə bağlı əmələ gələn yüksək tezlikli ifrat gərginliyin təcrübi nəticələrinin analizi verilmişdir. Ölçülən cərəyan haqqında fikirlər verilmişdir.

**MEASUREMENTS AT COMMUTATION OF SMALL CAPACITOR
CURRENTS BY THE HIGH-VOLTAGE SWITCHES**

HASHIMOV A.M., DMITRIEV Y.V., DMITRIEV V.Y., PIVCHIK I.R.

Results of the analysis of the experiments which have revealed occurrence high-frequency overvoltages connected with cumulative breakdowns of an intercontact interval of the switch are resulted at switching of the non-loaded bus rods system by the high-voltage switch. Reasons on the measured currents are resulted.