

Результаты исследований переходных процессов при коммутациях вакуумных выключателей

БАЗАВЛУК А. А., САРИН Л. И., НАУМКИН И. Е., ООО «Болид»

nio_bolid@ngs.ru

ГОГОЛЮК В. В., ОАО «Газпром»

Анализируются неблагоприятные и опасные для электрооборудования процессы в электрических сетях средних классов напряжения во время коммутаций вакуумных выключателей (ВВ) различных производителей. Механические и электрические переходные процессы при этом необходимо рассматривать в едином комплексе. Приведены результаты сравнительных испытаний выключателей. Заявлены технические характеристики ВВ, к которым рекомендуется предъявить новые требования.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вакуумные выключатели, неблагоприятные процессы, перенапряжения, высокочастотные процессы, ОПН, испытания.

В настоящее время наиболее изношенное оборудование на подстанциях — выключатели. Доля отработавших свой ресурс коммутационных аппаратов составляет более 20 % [1], поэтому они будут заменяться в первую очередь. На смену масляным выключателям среднего класса напряжения приходят вакуумные и элегазовые выключатели. В электрических сетях горно-металлургических предприятий технологические режимы связаны с большим числом переключений (до 100 раз в сутки), что и определяет тип устанавливаемого коммутационного оборудования (ВВ обладают наибольшим коммутационным ресурсом относительно других выключателей).

По результатам исследований, представленных в [2], установлено, что активное внедрение ВВ в сетях 6 – 10 кВ указанных предприятий привело к росту числа однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), возникающих в результате коммутационных перенапряжений (КП). Там же указано, что число аварийных отключений, связанных с КП, увеличилось за 6 лет эксплуатации ВВ (2002 – 2008 гг.) в среднем в 3,8 раза. Не исключено, что негативный эффект от применения ВВ в сетях предприятий других отраслей начнёт проявляться несколько позже в силу меньшей интенсивности коммутаций и более медленной деградации изоляции.

Неблагоприятные процессы при коммутациях ВВ

В своё время на этапе создания вакуумной коммутационной аппаратуры существовала проблема возникновения перенапряжений при отключении ВВ из-за обрыва дуги тока до его естественного перехода через нулевое значение (явление «среза» тока). Значение тока «среза» достигало десятков ампер, что было связано с применением тугоплавкого материала для изготовления контактов в целях увеличения отключающей способности выключателя, а также с наличием «жесткой» вакуумной дугогасящей среды. «Жесткость» определяется значением тока «среза» и способностью ВВ отключать высокочастотный (ВЧ) ток. Чем более «жесткая» дугогасящая среда, тем

выше ток «среза» и тем больший ВЧ ток способен отключить выключатель.

В настоящее время указанная проблема потеряла свою актуальность, поскольку теперь возможен подбор оптимального материала для изготовления контактов (сплав меди и хрома в различных соотношениях). Токи «среза» в современных ВВ не превышают 3,5 – 6 А. Однако решить проблему возникновения ВЧ перенапряжений при коммутации ВВ в полной мере не удалось ни зарубежным, ни отечественным производителям коммутационных аппаратов [3], поскольку способность вакуума гасить дугу ВЧ тока влечёт за собой неблагоприятные процессы.

1. Эскалация перенапряжений в цикле ВЧ повторных пробоев, которая прослеживается на осциллограмме (рис. 1) при отключении ВВ.

2. Перенапряжения в цикле ВЧ предварительных пробоев, представленном осциллограммами на рис. 2, 3 при включении ВВ.

3. Перенапряжения, вызванные виртуальными «срезами» тока (ВСТ).

Первый неблагоприятный процесс. Если начало разведения контактов ВВ происходит до момента достижения током промышленной частоты одной из фаз нуля, процесс восстановления напряжения на контактах после «среза» тока может прерваться пробоем межконтактного промежутка (первоначальной пробой) при условии, что переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН) на контактах ВВ превысит возрастающее пробивное напряжение (ВПН) межконтактного промежутка вакуумной дугогасительной камеры (ВДК).

В этом случае чем больше ток «среза», тем значительней возрастает напряжение со стороны фидера, больше ПВН на контактах выключателя и тем вероят-

ней первоначальной пробой. После него через контакты проходит суммарное значение токов промышленной частоты и высокой частоты. Поскольку вакуумный промежуток обладает способностью отключать ВЧ ток при его переходе через нулевое значение (при di/dt менее 250 – 350 А/мкс [4]), существует вероятность пробоя межконтактного промежутка ВДК (повторный пробой), если ПВН на контактах ВВ вновь превысит ВПН межконтактного промежутка ВДК.

Амплитуда ПВН до перехода тока промышленной частоты через ноль в цикле повторных пробоев уменьшается (если «срез» тока произошёл до перехода тока через ноль), как и перенапряжения. Когда выключатель не выдерживает ПВН в цикле повторных пробоев до перехода через ноль тока промышленной частоты, после перехода ток промышленной частоты и амплитуда ПВН увеличиваются и возникает рост перенапряжений — так называемая эскалация перенапряжений.

В случае «среза» тока после его перехода через нулевое значение и превышения ПВН над ВПН сразу возникает эскалация перенапряжений в цикле повторных пробоев, так как в этой четверти периода промышленной частоты мгновенное значение тока возрастает. Таким образом, эскалация перенапряжений — это нарастание напряжений со стороны коммутируемого присоединения после обрыва дуги тока, возникающее в результате многократного повторения последовательно происходящих процессов:

- обмена энергией в контуре «ёмкость кабельной линии (КЛ) — индуктивность коммутируемого электрооборудования», приводящего к росту напряжения на контактах выключателя;
- пробоя в камере выключателя, если ПВН на контактах превысило предельное значение, а контакты ещё не успели разойтись на достаточное расстояние;
- гашения дуги тока при переходе тока через ноль за счёт ВЧ составляющей.

Эскалация перенапряжений продолжается до момента выполнения одного из трёх условий:

- ПВН не превышает ВПН;
- суммарный ток в ВВ не переходит больше через нулевое значение или скорость его перехода превышает 250 – 350 А/мкс. При этом горит устойчивая дуга тока промышленной частоты, в случае отключения которого в следующем нуле тока не возникнут перенапряжения. К данному моменту времени контакты ВВ расходятся на расстояние, достаточное для выдерживания ПВН;
- нарушается изоляция коммутируемого оборудования.

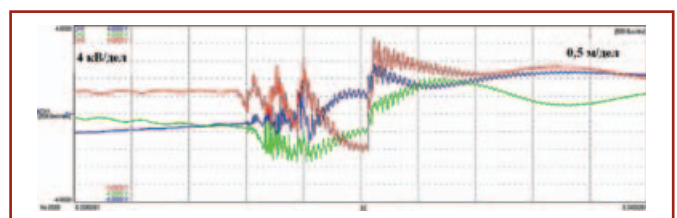


Рис. 1. Осциллограмма переходного процесса фазных напряжений при отключении ВВ в сети 6 кВ

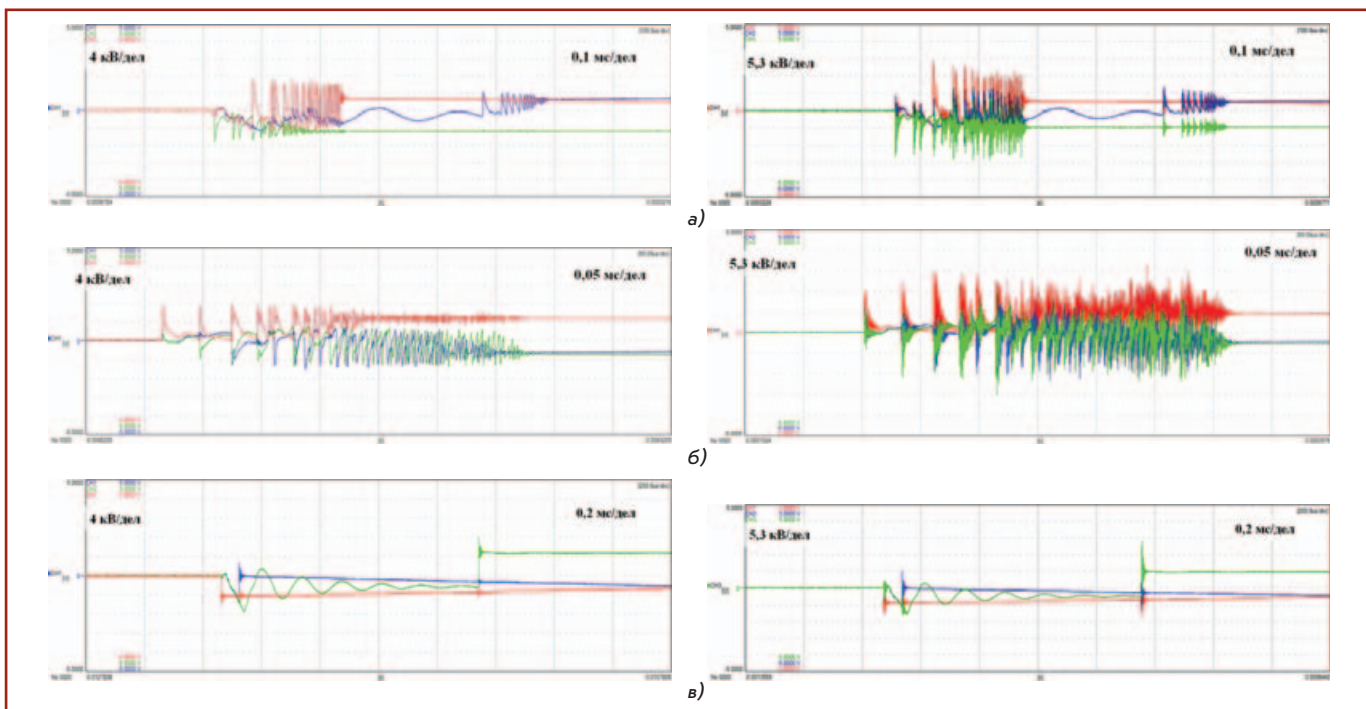


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов фазных напряжений в начале (рисунок слева) и конце (рисунок справа) КЛ при включении вакуумных выключателей ВВ/TEL-10-20/1000 (ОАО «Таврида электрик») (а) и ВВП-10-20/630 (ООО «НПП Контакт») (б), а также масляного выключателя ВМП-10-20/600 (в)

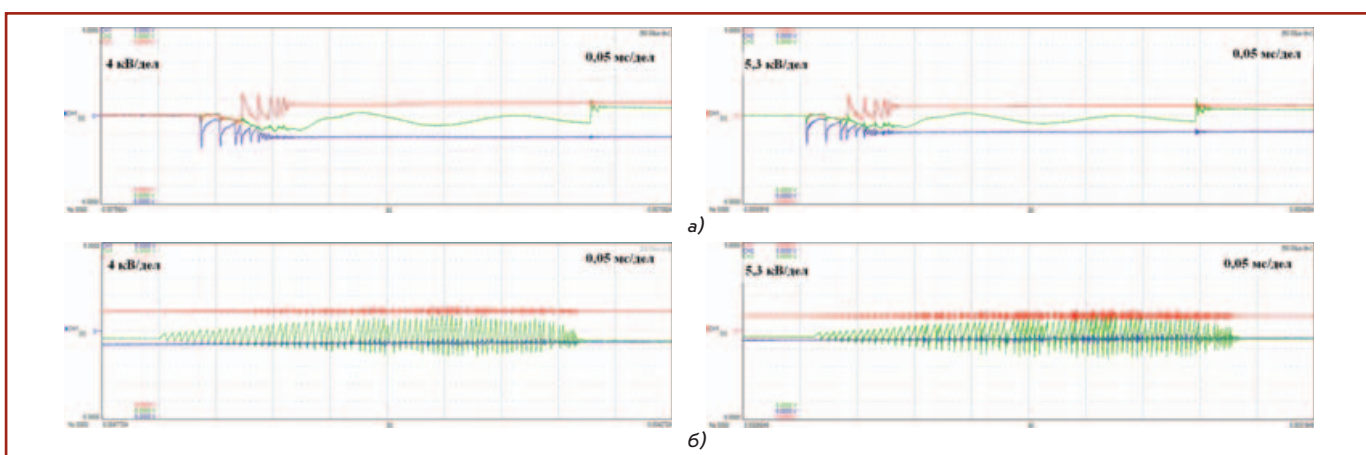


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов фазных напряжений в начале (рисунок слева) и конце (рисунок справа) КЛ при включении (а) и в момент «отскока» контактов (б) вакуумного выключателя ВВТЭ-М-10-20/630 производства ОАО «ЭНЕКО»

Второй неблагоприятный процесс. При включении выключателя до касания контактов происходит предварительный пробой межконтактного промежутка ВДК. Как и при отключении, в случае первоначального пробоя ток, содержащий в себе большую долю ВЧ составляющей, при переходе через ноль обрывается, если скорость его перехода не превышает 250 – 350 А/мкс. При этом происходит восстановление электрической прочности межконтактного промежутка и рост ПВН на контактах выключателя.

Поскольку контакты выключателя сходятся, ПВН непременно превысит падающее пробивное напряжение (ППН) на них. Далее происходит циклический процесс предварительных пробоев, но без эскалации перенапряжений. Предварительные пробои межконтактного про-

межутка ВДК прекращаются при соблюдении одного из следующих условий:

- а) контакты выключателя замыкаются;
- б) суммарный ток в ВВ не переходит более через нулевое значение до замыкания контактов, или скорость его перехода через ноль больше 250 – 350 А/мкс. В этом случае до момента замыкания контактов горит устойчивая дуга тока промышленной частоты;
- в) нарушение изоляции коммутационного оборудования.

Третий неблагоприятный процесс. Возникающая в цикле пробоев ВЧ составляющая тока в одной фазе трансформируется в две другие. Если трансформированный ВЧ ток имеет достаточную амплитуду и при переходе через нулевое значение гаснет, начинается переходной процесс, при котором запасённая в момент «среза» тока энергия воздей-

ствует на изоляцию коммутационного электрооборудования в виде перенапряжений с высокими кратностями. Явление ВСТ маловероятно и возможно в схеме с высокоёмкостными междофазными связями, но возникающие при этом перенапряжения наиболее опасны для изоляции электрооборудования своей колоссальной кратностью, а также частотой, достигающей единиц мегагерц.

Такие ВЧ процессы губительно влияют на витковую изоляцию электрических аппаратов (в первую очередь высоковольтных электродвигателей, уровень изоляции которых составляет $2,8U_{\phi}$ для новых электрических машин) и на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, интенсивность развития трингов (дефектов) в которых повышается с ростом частоты воздействующего напряжения [5].

Сравнительные испытания ВВ

В июне 2010 г. на Новосибирской ТЭЦ-4 совместно с ОАО «МРСК Урала» были проведены сравнительные испытания выключателей, коммутировавших электродвигатель шаровой мельницы мощностью 800 кВт, который был соединён с выключателем кабелем с бумажно-масляной изоляцией длиной 100 м. Цель работы — оценка переходных процессов при коммутациях и сравнительный анализ характеристик ВВ различных отечественных производителей: ОАО «ЭЛКО», г. Минусинск (выключатель ВВТЭ-М-10-20/630); ОАО «Таврида-электрик», г. Москва (ВВ/TEL-10-20/1000); ОАО «НПП Контакт», г. Саратов (ВБГ-10-20/630). Кроме того, испытанию подвергся также маломасляный выключатель ВМП-10-20/600. Снятые при его включении осциллограммы показаны на рис. 2, в.

Отличительная особенность испытаний — осциллографирование переходных процессов при коммутациях одного и того же присоединения различными выключателями. В ходе испытаний осциллографировались напряжения на шинах секции КРУ 6 кВ, в начале КЛ непосредственно за выключателем, в конце КЛ у двигателя, а также токи через ограничитель перенапряжений (ОПН) и токи нагрузки в КЛ. Схемы измерений представлены на рис. 4.

Графики изменения скорости движения подвижного контакта и «дребезг» контактов (в виде дискретного сигнала по трём полюсам внизу графика) изображены на рис. 5. В таблице приведены основные характеристики переходных процессов при коммутациях исследуемых выключателей и, по мнению специалистов ООО «Болит», отражена степень опасности зарегистрированных параметров разным

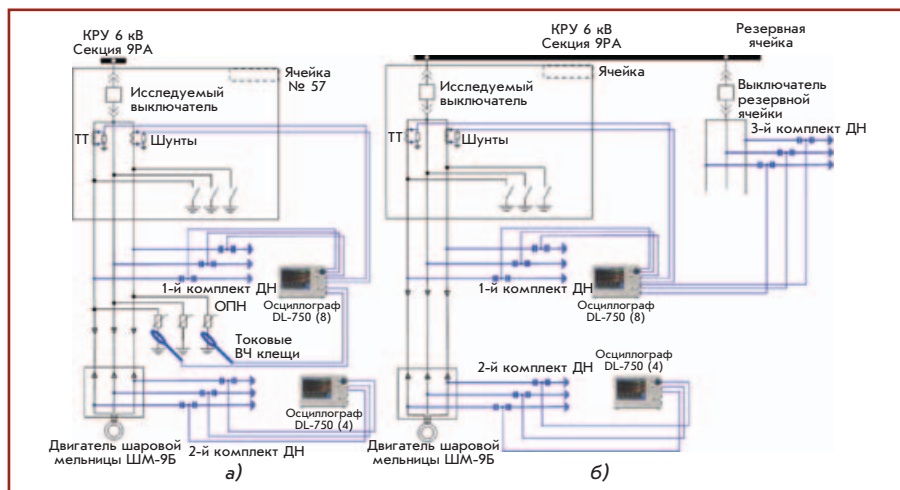


Рис. 4. Схемы подключения измерительного оборудования для исследования переходных процессов при коммутациях электродвигателя ШМ-9Б (ячейка 57 КРУ 6 кВ) при наличии (а) и без ОПН (б)

цветом (красный — наибольший уровень опасности, оранжевый — средний, зеленый — низкий).

В процессе коммутаций исследованных ВВ возникают ВЧ предварительные пробои различной продолжительности и амплитуды в зависимости от типа выключателя (см. рис. 2, 3). При включении масляного выключателя предварительные пробои отсутствуют, что связано с характером дугогасящей среды (см. рис. 2, в). Перенапряжения в начале КЛ при отключении выключателей не превышают $1,9U_{ф.макс}$ при включении — $2U_{ф.макс}$. Амплитуда ВЧ спектра (3 – 5 МГц) коммутационных перенапряжений (КП) возрастает до значений, при которых кратность перенапряжений в конце КЛ для разных выключателей увеличивается вдвое по

сравнению с кратностью в начале КЛ (см. рис. 2, 3).

Графики на рис. 5 отражают работу приводов исследованных выключателей и всей механической системы в целом (этапы движения контактов, наличие заеданий и «дребезг» контактов). Наибольшей скоростью замыкания контактов среди ВВ обладает выключатель ВВТЭ-М-10-20/630. При этом повышается скорость падения пробивного напряжения (ППН) и уменьшается продолжительность предварительных пробоев, однако увеличивается «дребезг» контактов при включении, во время которого вновь появляются множественные ВЧ пробои в ВДК (см. рис. 3).

Скорость замыкания контактов в выключателе ВМП-10-20/1000 гораздо больше, чем в исследованных ВВ, поэто-

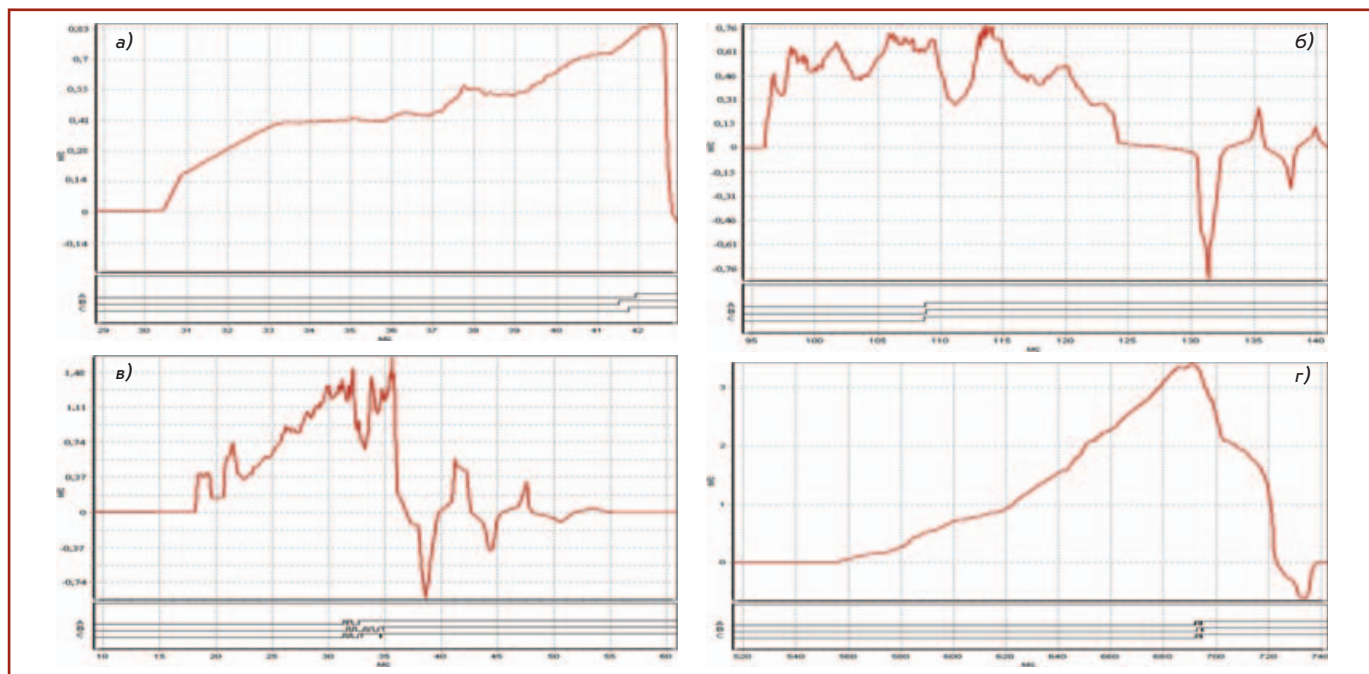


Рис. 5. Графики изменения скорости замыкания контактов вакуумных выключателей ВВ/TEL-10-20/1000 (ОАО «Таврида электрик») (а) ВБГ-10-20/630 (ООО «НПП Контакт») (б), ВВТЭ-М-10-20/630 (ОАО «ЭНЭКО») (в) и масляного выключателя ВМП-10-20/600 (г)

Характеристика	ВБГ-10-20/630	ВВ/TEL-10-20/1000	ВВТЭ-М-10-20/630	ВМП-10-20/600
Скорость замыкания контактов, м/с	0,66	0,94	1,26	3,38
Скорость падения пробивного напряжения, кВ/мс (длительность предварительных пробоев, мкс)	12,4 (192,0)	35,8 (135,7)	66,5 (43,8)	— (0)
Скорость размыкания контактов, м/с	1,05	0,63	1,17	3,83
Скорость возрастания пробивного напряжения, кВ/мс	19,7	24,1	61,8	7,02
Наличие «дребезга»	Отсутствует	Отсутствует	Присутствует	Присутствует
Средняя (максимальная) кратность перенапряжений при включении	$3,34U_{ф.макс}$ ($4,4U_{ф.макс}$)	$2,97U_{ф.макс}$ ($3,46U_{ф.макс}$)	$1,89U_{ф.макс}$ ($2,57U_{ф.макс}$)	$2,55U_{ф.макс}$ ($3,06U_{ф.макс}$)
Неодновременность замыкания контактов, мкс	150	430	320	1150
Ток «среза», А	3,3	2,7	2,9	2,35
Переходное сопротивление контактов, мкОм	38 – 44	37 – 41	35 – 39	55 – 185
Электрическая прочность (до 2 мм), кВ/мм	18,8	38,1	52,8	1,8*

* Электрическая прочность образовавшихся при воздействии электрической дуги газов под давлением в цикле ВЧ повторных пробоев.

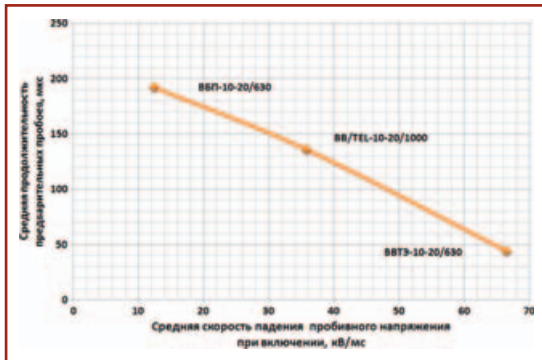


Рис. 6. График зависимости продолжительности предварительных пробоев от скорости ППН

му их «дребезг» при включении имеет наибольшее значение. В выключателях ВВ/TEL-10-20/1000 и ВБГ-10-20/630 «дребезг» контактов, приводящий к обрыву дуги тока, отсутствует, что связано с низкой скоростью замыкания контактов, но число предварительных пробоев при этом значительно возрастает. График зависимости средней продолжительности предварительных пробоев от скорости замыкания контактов приведен на рис. 6.

Наибольшим значением неодновременности замыкания контактов среди исследованных ВВ обладает выключатель ВВ/TEL-10-20/1000, что объясняется, вероятно, отсутствием механической связи между полюсами (каждый полюс выключателя приводится в движение собственным электромагнитом). Указанный параметр для масляного выключателя ВМП-10-20/600 составляет более 1 мс, что, по-видимому, вызвано (как и длительный «дребезг») большим сроком его эксплуатации (более 40 лет).

Меры защиты от неблагоприятных процессов

Согласно [8]: «В установках с вакуумными выключателями, как правило, должны быть предусмотрены мероприятия по защите от КП. Отказ от защиты от перенапряжений должен быть обоснован». При этом имеется в виду актуальность защиты так называемых «индуктивных элементов» — электродвигателей и трансформаторов. Указанная задача решается в основном включением:

- ОПН или RC-цепей по схеме «фаза – земля» на всех трёх фазах сети в начале КЛ непосредственно за ВВ;

- RC-цепей между фазами в начале питающего кабеля по схеме «фаза – фаза» («треугольник») непосредственно за ВВ.

Исследования, проведённые независимыми компаниями за последние 3 – 5 лет, показали, что ОПН, применяемые для защиты коммутируемого оборудования, малоэффективны. Они практически не влияют на число повторных пробоев в ВДК и не ограничивают перенапряжения с крутым фронтом (ВЧ перенапряжения условно от 100 кГц до 10 МГц), которые сопровождают коммутации любых ВВ. Это связано с тем, что при предварительных пробоях и в процессе эскалации перенапряжений в случае повторных пробоев за счёт возникновения волновых процессов в контуре «ёмкость кабеля – индуктивность коммутируемого электрооборудования» уровни возникающих КП (см. рис. 2, 3 и таблицу) не достигают порога срабатывания ОПН, который, как правило, превышает $3,5U_{ф.макс}$.

Приемлемая защита от КП — RC-цепи, представляющие собой безынерционные фильтры, которые устраняют ВЧ перенапряжения с крутым фронтом. Уровень ограничения перенапряжений при коммутациях выключателей в этом случае составляет $(2,2 – 3,0)U_{ф.макс}$. Первый недостаток этого способа — увеличение ёмкостного тока ОЗЗ при подключении

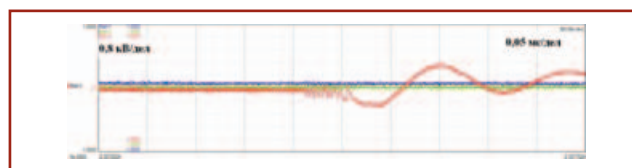


Рис. 7. Осциллограмма переходного процесса фазных напряжений при отключении масляного выключателя ВМП-10-20/600 в сети 6 кВ

RC-цепи по схеме «фаза – земля», второй — снижение надёжности системы из-за высоковольтных конденсаторов, особенно при подключении по схеме «фаза – фаза». Кроме того, RC-цепи по возможности следует устанавливать в конце КЛ рядом с коммутируемым электрооборудованием, что технически трудно реализовать.

Наиболее перспективный метод ограничения ВЧ перенапряжений, возникающих при коммутации ВВ, — применение специальных продольных устройств на основе электропроводной керамики, которые лишены недостатков RC-цепей и ОПН.

Масляная, элегазовая и другие дугогасящие среды

Кроме вакуума в качестве дугогасящей среды в выключателях средних классов напряжения используется масло или элегаз. Масляные выключатели на сегодняшний день считаются морально и физически устаревшими, элегазовые выключатели, наряду с вакуумными, широко внедряются. Масляная дугогасящая среда по сравнению с вакуумной и элегазовой — более «мягкая» и способна гасить дугу ВЧ тока только при отключении выключателя в течение лишь нескольких десятков микросекунд в цикле ВЧ повторных пробоев. Переходный процесс не успевает развиться до эскалации перенапряжений, поскольку газы, образовавшиеся при горении дуги, быстро остывают и их давление без воздействия дуги тока 50 Гц ослабевает (рис. 7).

Вакуумная и элегазовая дугогасящие среды обеспечивают стабильное гашение дуги ВЧ тока. Согласно многочисленным исследованиям вакуум — наиболее «жёсткая» среда, способная гасить дугу тока большей частоты, чем элегазовая. Степень «жёсткости» дугогасящей среды в числовом эквиваленте принято оценивать скоростью перехода тока через нулевое значение, при котором ещё возможно гашение дуги ВЧ тока. Для вакуум-

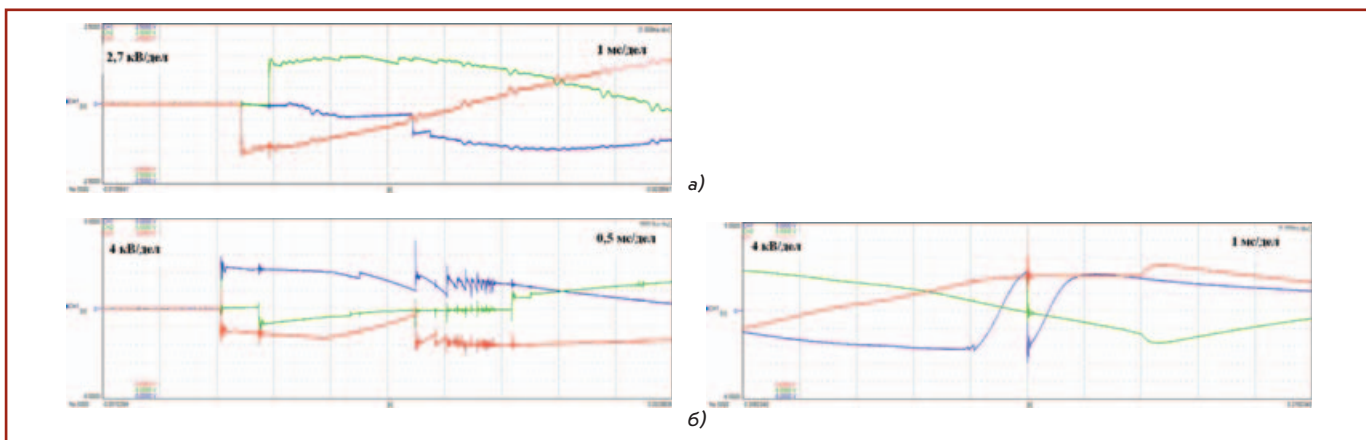


Рис. 8. Осциллограммы переходного процесса фазных напряжений при включении (слева) и отключении (справа) элегазового выключателя LFI мощностью $400 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ (а) и $1250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ (б) в сети 10 кВ

ма этот параметр находится в диапазоне $250 - 350 \text{ А/мкс}$.

На рис. 8 приведены характерные осциллограммы фазных напряжений при коммутации ненагруженных трансформаторов мощностью 400 и $1250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ элегазовым выключателем LF1 производства Merlin Gerin («Schneider Electric»). Из указанных осциллограмм следует, что неблагоприятные процессы происходят не во всех элегазовых выключателях и коммутируемом ими оборудовании. Они наблюдаются в основном в коммутационных аппаратах с «жёсткой» дугогасящей средой.

В настоящее время в качестве изоляционной и дугогасящей среды в выключателях рассматриваются варианты использования различных синтетических жидкостей. Положительные результаты научных разработок в данной области свидетельствуют о возможности замены взрывоопасного трансформаторного масла на более безопасные синтетические жидкости, которые при этом обладают высокой дугостойкостью и оптимальными дугогасительными свойствами.

«Жёсткость» даже в пределах дугогасящей среды одного и того же типа может отличаться, поэтому её определение для вакуумной, элегазовой и масляной дугогасящих сред различного состава и концентрации примесей требует дополнительных исследований. Вакуумные выключатели как аппараты с наиболее «жёсткой» средой должны стать объектом повышенного внимания. Несмотря на техническую простоту и небольшое число узлов в конструкции аппарата, переходные процессы при коммутациях различных ВВ довольно значительно отличаются друг от друга (см. рис. 2, 3).

Технические требования к ВВ напряжением 10 кВ

Основные элементы ВВ: ВДК, привод, замыкающий и размыкающий контакты ВДК. При коммутациях самые важные (с точки зрения КП) механические и электрические переходные процессы происходят в микросекундных диапазонах на расстоянии между контактами менее 2 мм . Механические переходные процессы зависят от качества исполнения приво-

да (отсутствия люфтов и «дребезга»), а также от его быстрой и вместе с тем плавной работы, от синхронности и линейности движения полюсов выключателя. В свою очередь механические процессы в совокупности с характеристиками ВДК влияют на электрические переходные процессы, т. е. определяют их параметры при коммутациях и опасность для электрооборудования. Таким образом, механические и электрические переходные процессы необходимо рассматривать в комплексе.

Учитывая отмеченную связь некоторого роста аварийности в электрических сетях с внедрением ВВ, необходимо разработать и обосновать единые технические требования к выключателям с «жёсткой» дугогасящей средой в целях минимизации негативного эффекта. Требования, сформулированные в стандартах, не могут быть универсальными для всех типов выключателей среднего класса напряжения в силу специфических процессов, происходящих при коммутациях выключателей с «жёсткой» дугогасящей средой. Для таких выключателей (в первую очередь вакуумных) технические требования должны быть пересмотрены и дополнены на основе современных исследований и существующих отечественных, зарубежных и международных стандартов.

Новые технические требования позволят ограничить выход на рынок некачественного оборудования, а также стимулировать отечественных производителей к повышению культуры производства. Далее приведены технические характеристики ВВ, определяющие механические и электрические переходные процессы, требования к которым необходимо ужесточить:

- одновременность замыкания/размыкания контактов;
- скорость движения контактов при включении/отключении;
- параметры «дребезга» (вибрации) контактов;
- переходное сопротивление контактов;
- ток «среза»;
- давление в ВДК;
- электрическая прочность ВДК на расстояниях между контактами до 2 мм ;

- скорость изменения пробивного напряжения при включении/отключении;
- продолжительность предварительных пробоев при включении.

Заявленные технические характеристики в ходе эксплуатации могут ухудшаться, что негативно влияет на переходные процессы при коммутациях, поэтому, вопреки заявлениям некоторых производителей, для ВВ необходима проверка этих характеристик в ходе эксплуатации. В связи с этим следует разработать соответствующую методику контроля для выключателей с «жёсткими» дугогасящими средами. В этом документе должны быть указаны элементы конструкции выключателя, которые обеспечат универсальное подключение к ним устройств проверки механических и электрических характеристик.

Для получения более полной и наглядной информации во время проверки технических характеристик целесообразно проводить осциллографирование переходных процессов при коммутациях ВВ. Для этого следует рассмотреть необходимость создания испытательного стенда, позволяющего коммутировать установленную схему и осциллографировать переходные процессы в различных её точках, что позволит измерять значение тока «среза», кратность перенапряжений, продолжительность предварительных пробоев, электрическую прочность на расстояниях до 2 мм , скорость изменения пробивного напряжения и пр.

Выводы

1. Современные выключатели средних классов напряжения при их коммутациях могут быть источниками неблагоприятных переходных процессов, вызывающих повреждение и деградацию изоляции электрооборудования.

2. Существующие средства защиты от коммутационных перенапряжений часто оказываются неэффективными и не могут в полной мере обеспечить безопасность электрооборудования.

3. Переходные процессы при коммутациях вакуумных выключателей различного типа значительно отличаются друг друга.

4. Действующие стандарты и методики не могут быть использованы как универсальные документы для выключателей с различными дугогасящими средами. Необходимо разработать технические требования к вакуумным выключателям и соответствующую методику проверки их основных характеристик.

5. Для определения области применения разных типов выключателей, в том числе выключателей с синтетическими дугогасящими средами, следует провести комплексные исследования схем с различными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назарычев А. Н. Анализ основных преимуществ применения вакуумных выключателей // Энергоэксперт. 2007. № 4 – 5.
2. Кудрявцев А. А. Исследование аварийности в сетях 6 – 10 кВ горно-металлургических предприятий // Новости электротехники. 2009. № 6 (60).
3. Гуль А. Сравнение коммутационных перенапряжений выключателей СН, основанное на испытаниях в лабораторных

условиях и промышленных сетях // Мат-лы V междунар. конф. ТРАВЭК «Высоковольтное коммутационное оборудование». 2009 г.

4. Дяттерёв И. Л. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, сопровождающих коммутации вакуумных выключателей: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Новосибирск, 2006.

5. Лавров Ю. А. Кабели 6 – 35 кВ с пластмассовой изоляцией. Особенности проектирования и эксплуатации // Новости электротехники. 2007. № 1 (43).

6. Емельянов А. А., Емельянова Е. А. Импульсные технологии повышения электрической прочности в вакууме. — М.: Физматлит, 2009. — 160 с.

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

8. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. — 264 с.

ляции кабеля одинаково. Она не восстанавливает свои свойства после повреждения и «заплавания» канала пробоя не происходит, что наблюдается в кабелях с БПИ в 60 – 70 % случаев. По опыту эксплуатации замыкание на землю в кабелях с пластмассовой изоляцией за время до 1 мин может переходить в устойчивую фазу с термическим разложением полимера и вероятным развитием аварийной ситуации. Также известно, что переход однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в многофазное возможен даже при пофазной раскладке кабелей в плоскости.

Это утверждение иллюстрирует рис. 1, где показан повреждённый таким образом кабель напряжением 35 кВ с изоляцией СПЭ. Длительность ОЗЗ в сети до перехода его в двухфазное КЗ составила 38 с. Следовательно, в сетях с кабелями, имеющими полимерную изоляцию, целесообразно организовывать релейную защиту (РЗ) от ОЗЗ с действием на отключение. С этим тезисом связана задача правильного выбора номинального напряжения кабеля $U_{ном}$.

Поскольку на этапе проектирования $U_{ном}$ кабелей с полимерной изоляцией обычно принимается равным номинальному напряжению сети, необходимо учесть следующее: согласно МЭК 60502-2 [2] эта сеть относится к категории «А» или «В», поэтому длительность существования режима ОЗЗ должна быть ограничена (для сетей категории «А» — 1 мин, категории «В» по МЭК 60183 [3] — 1 ч, но с условием, что суммарная продолжительность ОЗЗ за год не должна превышать 125 ч).

Таким образом, в целях минимизации повреждения кабельной изоляции в любом случае ОЗЗ должно отключаться как можно быстрее. Для этого рекомендуются в нейтраль сети 6 – 35 кВ включать резисторы и обеспечивать резервирование потребителей, например с помощью быстродействующего АВР со временем срабатывания до 100 мс. Такое решение технически обосновано, поскольку в российских сетях 70 – 75 % устойчивых и неотключённых ОЗЗ переходят в многофазные КЗ.

Помимо выбора $U_{ном}$ очень важно учитывать вероятный перегрев кабеля и повреждение изоляции вследствие ненормированного нагрева его экрана из-за протекания по нему наведённых токов, сопоставимых с рабочим током жилы. Эта проблема для конкретной КЛ легко решается после расчётного обоснования путём одностороннего разземления экранов или их транспозиции [4].

Однако ни в одном отечественном стандарте по кабелям с изоляцией СПЭ решение этой задачи нормативно не закреплено, и во исполнение не всегда применимых для нового оборудования требований ПУЭ «оболочка кабеля заземляется с двух сторон». Результаты такого непродуманного следования требованиям нормативных документов, а также сопутствующих ошибок проекта и монтажа были убедительно продемонстрированы на примере опыта эксплуатации кабеля с изоляцией СПЭ в системе электроснаб-

Технология эксплуатации и критерии отбраковки кабелей среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена

ШИРКОВЕЦ А. И., инженер, ООО «Болид»
nio_bolid@ngs.ru

Представлен обзор современной нормативной документации по разработке, сооружению и эксплуатации кабельных линий (КЛ) на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) на напряжение 6 – 35 кВ, обоснованы оптимальные нормы их испытаний повышенным напряжением сверхнизкой и промышленной частоты. В рамках создания технологии эксплуатации проанализированы наиболее информативные методы неразрушающего контроля КЛ, выполненных кабелем с полимерной изоляцией, в том числе измерение частичных разрядов (ЧР) и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$. Практическую ценность представляют предложенные числовые показатели критериев отбраковки КЛ в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, нормативная документация, технология эксплуатации, напряжение сверхнизкой частоты (СНЧ), неразрушающий контроль, критерии отбраковки.

Сегодня на рынке электротехнической продукции кабели с изоляцией СПЭ (как отечественного, так и зарубежного производства) пользуются наибольшим спросом. Это связано главным образом с нормативным требованием, введённым в положения о технической политике ряда сетевых предприятий (например, ОАО ФСК ЕЭС [1, п. 2.2.3]), о необходимости применения новых видов оборудования, в том числе кабелей с полимерной изоляцией.

Тем не менее примерно половина выпускаемых некоторыми российскими заводами кабелей среднего напряжения (КСН) — это кабели с «классической» бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ). Ситуация закономерна, поскольку кабели

с БПИ эксплуатируются уже десятки лет и технология их эксплуатации известна и привычна. К тому же применение кабелей с полимерной изоляцией не всегда технически оправдано.

К твёрдой кабельной изоляции, активно применяемой в настоящее время для КСН, относится не только сшитый полиэтилен, но и этилен-пропиленовая резина (ЭПР). Процессы старения изоляции ЭПР и СПЭ принципиально подобны, хотя диэлектрические потери в ЭПР примерно на порядок выше: при 20 °С параметр $\tan \delta_{ЭПР} = (2 \div 4) \cdot 10^{-3}$, в то время как в СПЭ $\tan \delta_{СПЭ} = (4 \div 8) \cdot 10^{-4}$ и снижается до $(1,5 \div 2,0) \cdot 10^{-5}$ при нагреве до 95 °С.

При электрическом пробое «поведение» любой монолитной полимерной изо-