

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОММУТАЦИЯХ ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

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

ГОГОЛЮК В.В., ОАО «Газпром»

Показаны неблагоприятные и опасные для электрооборудования процессы в сетях средних классов напряжения во время коммутаций вакуумных выключателей различных производителей. Механические и электрические переходные процессы при коммутациях вакуумных выключателей необходимо рассматривать в едином комплексе. Заявлены технические требования, которые рекомендуется предъявлять к вакуумным выключателям, и предложена методика их проверки.

Вакуумные выключатели (ВВ) в настоящее время являются приоритетно рекомендуемым коммутационным оборудованием для использования в сетях средних классов напряжения. Однако вместе с положительными эксплуатационными свойствами вакуумных выключателей наблюдаются и отрицательные: коммутируемое ими оборудование может повреждаться.

Повреждения вызываются неблагоприятными процессами, сопровождающимися коммутации вакуумных выключателей: перенапряжения, вызванные токами среза; эскалация перенапряжений при отключении в цикле высокочастотных (ВЧ) повторных пробоев; перенапряжения при включении в цикле ВЧ предварительных пробоев; перенапряжения в результате виртуальных токов среза. Перечисленные процессы характерны только для выключателей с жесткими дугогасящими средами, в число которых входит вакуум. Высокие кратности перенапряжений опасны в первую очередь для двигателей, уровень изоляции которых составляет порядка $2,8 U_{фм}$. Высокие частоты переходного процесса при коммутациях ВВ (сотни килогерц и единицы мегагерц) представляют серьезную опасность для витковой изоляции высоковольтного оборудования, кабельных муфт и кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ).

В настоящее время в полной мере решить проблему возникновения ВЧ перенапряжений при коммутации ВВ не удалось ни зарубежным ни отечественным производителям коммутационных аппаратов. По результатам исследований [1], активное внедрение ВВ в сетях 6–10 кВ горно-металлургических предприятий привело к росту однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), спровоцированных коммутационными перенапряжениями (КП). Там же указано, что число аварийных отключений, связанных с КП, возросло в среднем в 3,8 раза за 6 лет эксплуатации ВВ (2002–2008 гг.).

Основные составные части ВВ – вакуумная дугогасительная камера (ВДК) и привод, замыкающий/размыкающий контакты ВДК. При коммутациях в выключателях самые важные, с точки зрения КП, механические и электрические переходные процессы происходят в микросекундных диапазонах при расстояниях между контактами до 2 мм. Качество исполнения привода, а именно отсутствие люфтов и дребезга, а также быстрая и, вместе с тем, плавная работа привода, синхронность замыкания и размыкания по полюсам и линейное изменение скорости движения контактов в каждом полюсе выключателя влияют на механические переходные процессы. Механические процессы, в свою очередь, в совокупности с

характеристиками ВДК влияют на электрические переходные процессы, т.е. определяют характеристики ВЧ процессов при коммутациях и их опасность. Таким образом, механические и электрические переходные процессы необходимо рассматривать в едином комплексе.

Вакуумные выключатели, как относительно новый вид коммутационного оборудования, требуют повышенного внимания со стороны производителей и эксплуатации, поскольку для ВВ свойственны специфические переходные процессы, которые в других типах выключателей не наблюдаются. В электроэнергетике сложилась ситуация, что наиболее изношенное оборудование на подстанциях – это выключатели. Доля отработавшего свой срок коммутационного оборудования составляет более 20 % [2]. Таким образом, одним из первоочередных видов оборудования, которое будет заменено в ближайшее время, станут коммутационные аппараты. На смену масляным выключателям в средних классах напряжений приходят вакуумные и элегазовые.

Учитывая связь некоторого роста аварийности в электрических сетях с внедрением ВВ, необходимо разработать и обосновать единые технические требования к вакуумным выключателям, как к коммутационным аппаратам с наиболее жесткой дуго-

Таблица 1. Требования к характеристикам ВВ на напряжение 10 кВ

| Характеристики | Значение | |
|---|------------------|-----|
| Неодновременность замыкания полюсов, не более, мс | 1 | |
| Неодновременность размыкания полюсов, не более, мс | 1 | |
| Скорость движения контактов, не менее, м/с | при включении | 1,2 |
| | при отключении | 1,5 |
| Характеристики дребезга | Отсутствие | |
| Переходное сопротивление контактов, не более, мкОм | 40 | |
| Ток среза, не более, А | 3,5–5 | |
| Давление в ВДК, не выше, Па | 10 ⁻⁴ | |
| Продолжительность повторных пробоев, мкс | 50 | |
| Электрическая прочность ВДК до 2мм, не менее, кВ/мм | 35 | |
| Скорость изменения пробивного напряжения, не менее, кВ/мс | при включении | 60 |
| | при отключении | 75 |

гасящей средой. Требования должны содержать новые и пересмотренные характеристики ВВ, содержащиеся в ГОСТ Р 52565–2006. Данные технические требования в первую очередь ограничат выход на рынок некачественного оборудования и оборудования кустарного производства, а также будут стимулировать отечественных производителей к повышению качества производства.

Таблица 1 содержит требования к характеристикам ВВ со значениями, которые достижимы на стадии современного производства. Любое из этих требований выполнено хотя бы для одного из российских ВВ, но сочетание всех требований встречается лишь в зарубежных выключателях.

Необходимо добиваться выполнения этих требований и для вакуумных выключателей отечественного производства.

Также необходимо разработать соответствующую методику, которая будет дополнять методику оценки характеристик выключателей с дугогасящими средами, использующимися ранее, и содержать новые разделы, рассчитанные на оценку характеристик тех параметров, которые присутствуют только ВВ.

Для получения более полной и наглядной информации необходимо осциллографировать переходные процессы при коммутациях ВВ, для чего необходимо рассмотреть возможность создания испытательного стенда, который позволил бы коммутировать испытательную схему (схемы) и осциллографировать переходные процессы в различных ее частях. Стенд должен обеспечить измерение

величины тока среза, перенапряжений в различных узлах схемы, продолжительности предварительных пробоев и электрической прочности в ВДК на расстояниях между контактами до 2 мм, скорости изменения пробивного напряжения и т.д.

По утверждению некоторых производителей вакуумные выключатели являются аппаратами, которые не требуют периодических проверок. Однако исходя из анализа опыта эксплуатации ВВ, можно заключить, что такие проверки необходимы. При этом рекомендуется контролировать следующие параметры. При этом следует проверять следующие параметры:

■ **Электрическую прочность ВДК** при расстоянии между контактами до 2 мм. Зависимость пробивного напряжения от расстояния между контактами для вакуума нелинейная [3], поэтому электрическая прочность на расстояниях до 2 мм, при которых происходят самые важные процессы при коммутациях, отличается от электрической прочности при разведенных контактах. Электрическую прочность ВДК на малых расстояниях возможно определять в составе выключателя по предварительным пробоям из осциллограмм при включении, измеряя скорость изменения пробивного напряжения. Далее в соответствии со скоростями движения контактов пересчитывается электрическая прочность при расстояниях до 2 мм.

■ **Скорость изменения пробивного напряжения** (является производным электрической прочности при расстояниях до 2 мм и скорости движения контактов). Скорость измене-

ния пробивного напряжения может быть оценена из осциллограмм, полученных при коммутациях ВВ.

■ **Продолжительность предварительных пробоев.** Характеристика, зависящая от скорости изменения пробивного напряжения, которая может быть оценена из осциллограмм при коммутациях на стенде.

■ **Ток среза.** В настоящее время в вакуумных выключателях применяются контакты из современных материалов (главным образом, сплава меди и хрома в процентных соотношениях 50/50 или 70/30). В выключателях, в которых установлены такие контактные системы, нет больших токов среза и, соответственно, нет больших перенапряжений, вызванных непосредственно токами среза. Но и малая величина среза тока является фактором, вызывающим эскалацию перенапряжений, поэтому необходимо стремиться к уменьшению его значения. Величину тока среза необходимо оценивать на испытательном стенде с помощью осциллографа, регистрируя при этом ток через выключатель и перенапряжения со стороны нагрузки.

■ **Давление в ВДК.** Одним из факторов, влияющих на электрическую прочность, является давление в ВДК, которое оценивается по величине ионного тока.

■ **Неодновременность замыкания/размыкания полюсов при включении/отключении.** В процессе коммутации в случае неодновременности замыкания/размыкания контактов возникает кратковременный неполнофазный режим, во время которого могут происходить перенапряжения высокой кратности. С увеличением неодновременности замыкания контактов перенапряжения увеличиваются. Данная характеристика является механической и может оцениваться прибором ПКВ.

■ **Скорость движения контактов.** Одним из важнейших параметров является скорость движения контактов ВДК, которая вместе с электрической прочностью, определяет скорость изменения пробивного напряжения, определяющая продолжительность предварительных пробоев при включении и повторных пробоев при отключении, когда время между нача-

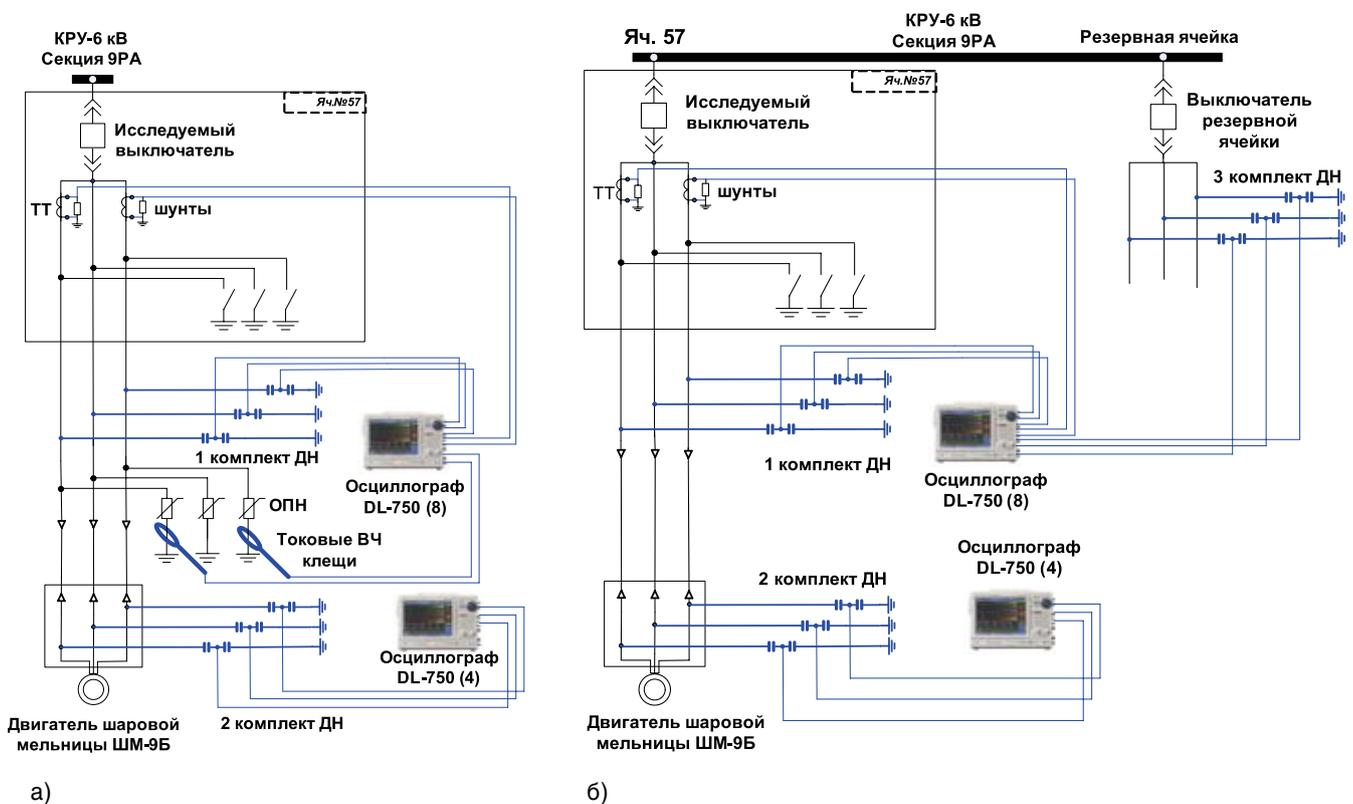


Рис. 1. Схемы подключения измерительного оборудования для исследования переходных процессов при коммутациях электродвигателей ШМ-9Б яч. 57 КРУ-6 кВ с под-ключенными (а) и отключенными (б) ОПН

лом расхождения контактов и моментом перехода отключаемого тока промышленной частоты через ноль мало. С увеличением скорости движения контактов уменьшается длительность воздействия ВЧ перенапряжений и вероятность возникновения эскалации перенапряжений. Данная характеристика является механической и может оцениваться прибором ПКВ.

■ **Характеристики дребезга.** Контакты при столкновении могут отскакивать в случае отсутствия достаточного демпфирующего эффекта. При этом происходит обрыв тока дуги с возникновением единичных и множественных ВЧ повторных пробоев. Характеристики дребезга являются механическими и могут оцениваться прибором ПКВ, в том числе при плановых испытаниях.

■ **Переходное сопротивление контактов в ВДК.** Этот параметр важно отслеживать не только потому, что оно является показателем состояния контактов, но и потому, что оно само по себе влияет на изменение состояния контактов в процессе эксплуатации. Тепловой режим соприкасающихся контактов при высоком зна-

чении переходного сопротивления способствует диффузии металлов, которая усиливается действием пружины поджатия. Эффект холодной сварки контактов влечет за собой деградацию состояния их поверхностей, которая усиливается всякий раз при коммутации отключения ВВ.

Для корректной оценки результатов рекомендуемых испытаний вакуумных выключателей следует принимать во внимание накопленные ранее данные по конкретным типам ВВ, а также контролировать стабильность их состояния в эксплуатации и отслеживать динамику изменения ключевых параметров ВДК и привода.

В связи с необходимостью проведения проверок в требованиях к выключателям необходимо указать элементы конструкции выключателя, которые обеспечат универсальное подключение к выключателям устройства проверки механических и электрических характеристик.

В 2010 году совместно с сотрудниками Новосибирской ТЭЦ-4 состоялись сравнительные испытания выключателей, коммутировавших электродвигатель шаровой мельницы

мощностью 800 кВт, соединенный с выключателем кабелем с бумажно-масляной изоляцией длиной около 100 метров. Целью работы была 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, выключатель ВВ/TEL-10-20/1000); ОАО «НПП Контакт» (г. Саратов, выключатель ВВП-10-20/630). В ходе испытаний коммутировался также маломасляный выключатель ВМП-10-20/600.

Особенностью испытаний, проведенных на новосибирской ТЭЦ-4, является осциллографирование переходных процессов при коммутациях выключателей на одну и ту же нагрузку. В ходе коммутаций осциллографировались напряжения на шинах секции КРУ-6 кВ, напряжения в начале кабельной линии (КЛ) непосредственно за выключателем, напряжения в конце КЛ непосредственно у двигателя, токи через ОПН и токи в КЛ. Схемы измерений представлены на рис. 1. Характер-

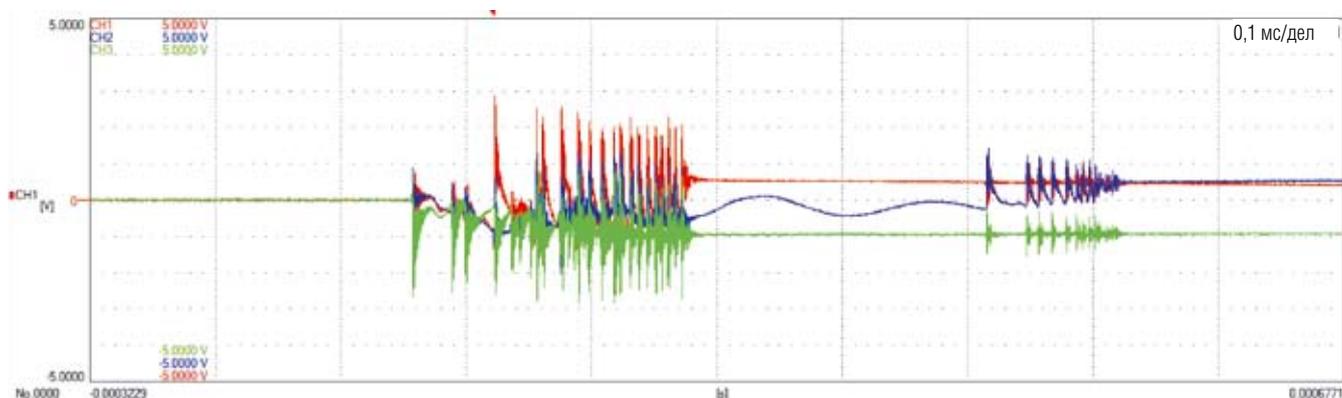


Рис. 2. Характерная осциллограмма фазных напряжений на фидере ШМ-9Б в конце КЛ непосредственно у двигателя при включении ВВ/TEL-10-20/1000

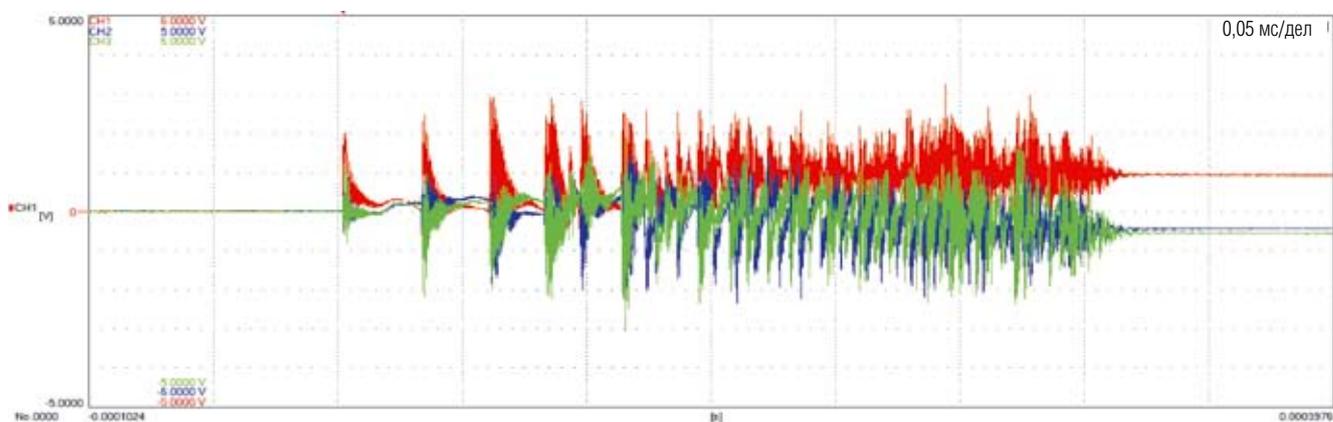


Рис. 3. Характерная осциллограмма фазных напряжений на фидере ШМ-9Б в конце КЛ непосредственно у двигателя при включении ВБП-10-20/630

ные осциллограммы переходных процессов при включении ВВ (развертка по напряжению для всех случаев – 5,3 кВ/дел) представлены на рис. 2–5.

В таблице 2 отражены основные значимые характеристики переходных процессов при коммутациях ВВ и то, насколько опасны по нашему мнению отраженные в ней величины (красный цвет – наибольший уровень опасности, оранжевый цвет – средний уровень опасности, зеленый цвет – низкий уровень опасности).

Кратности перенапряжений в начале КЛ при коммутациях не превышают $2,0U_{\text{фнм}}$, что ниже уровня ограничения ОПН, поэтому установка ОПН непосредственно за выключателем не оправдана. Перенапряжения в конце КЛ, т.е. непосредственно у приводного электродвигателя, за счет волновых процессов в контуре «емкость кабеля-индуктивность двигателя», по амплитуде оказались

выше, чем за выключателем, превысив уровень срабатывания ОПН. Поэтому любые аппараты для защиты оборудования от коммутационных перенапряжений, в том числе ОПН, следует по возможности устанавливать в конце кабельной линии непосредственно у защищаемого объекта, что неоднократно отмечалось в работах по ВВ, например, [3].

Наибольшей скоростью замыкания контактов среди ВВ обладает выключатель ВВТЭ-М-10-20/630, что повысило скорость падения электрической прочности и уменьшило продолжительность предварительных пробоев, но негативно отразилось на параметрах дребезга контактов при включении, во время которого множественные пробой в ВДК вновь имели место (рис. 4 б). Скорость замыкания контактов в выключателе ВМП-10-20/1000 гораздо больше, чем у исследованных ВВ, поэтому дребезг контактов при включении

имеет наибольшие значения, однако пробой при включении отсутствуют, что связано с характером дугогасящей среды. В выключателях ВВ/TEL-10-20/1000 и ВБП-10-20/630 дребезг контактов, приводящий к обрыву дуги тока, отсутствует, что связано с низкой скоростью замыкания контактов, но количество предварительных пробоев при этом значительно увеличивается.

На рис. 6 представлена зависимость продолжительности предварительных пробоев от скорости падения пробивного напряжения.

Наибольшее значение неодновременности среди испытуемых ВВ при замыкании соответствует выключателю ВВ/TEL-10-20/1000, что, вероятно, объясняется отсутствием механической связи между полюсами (каждый полюс выключателя приводится в движение собственным электромагнитом). Максимальная неодновременность замыкания контактов при вклю-

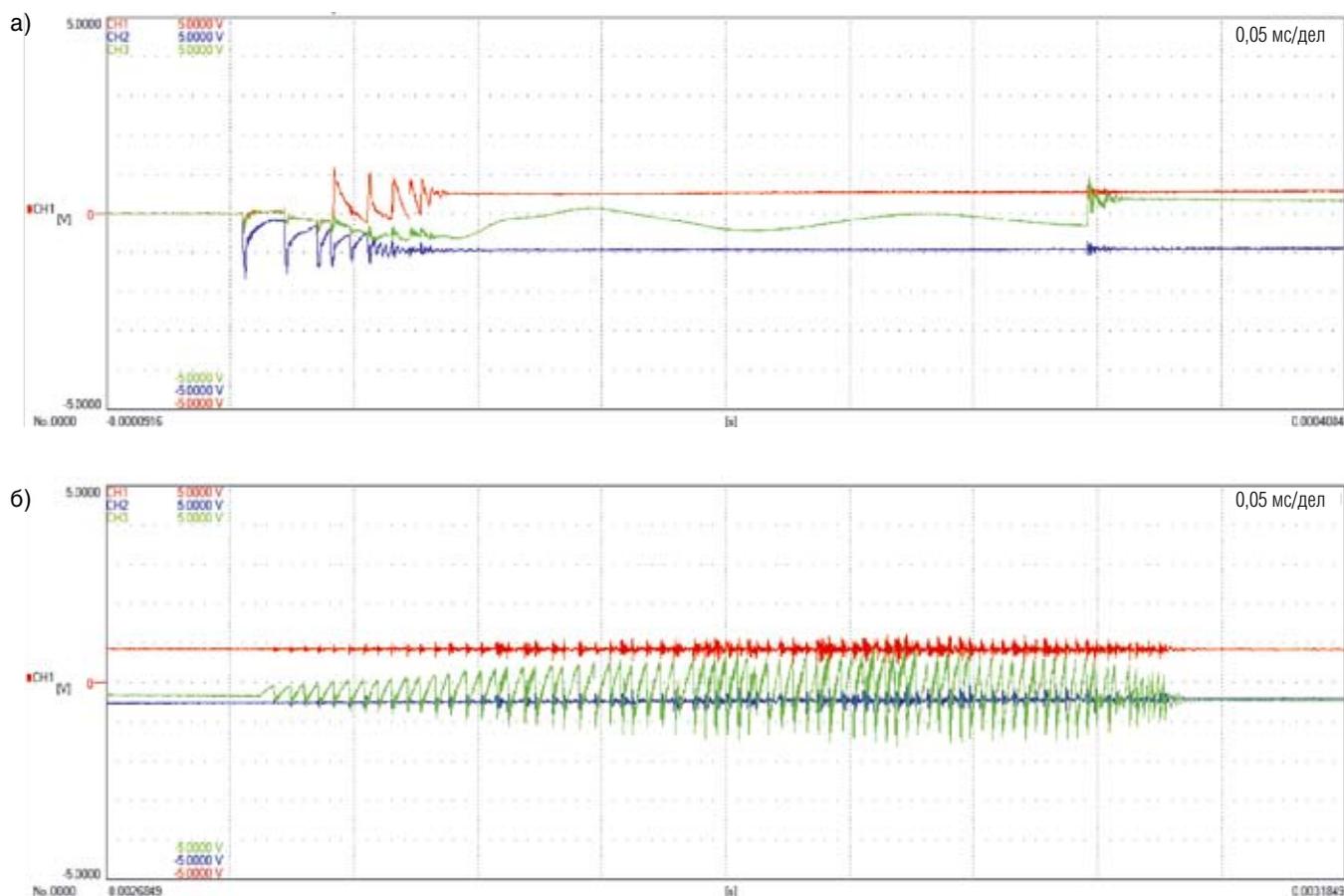


Рис. 4. Характерные осциллограммы фазных напряжений на фидере ШМ-9Б в конце КЛ непосредственно у двигателя при включении ВБТЭ-М-10-20/630

- а) – предварительные пробои во время сближения контактов,
 б) – множественные пробои во время отскока контакта

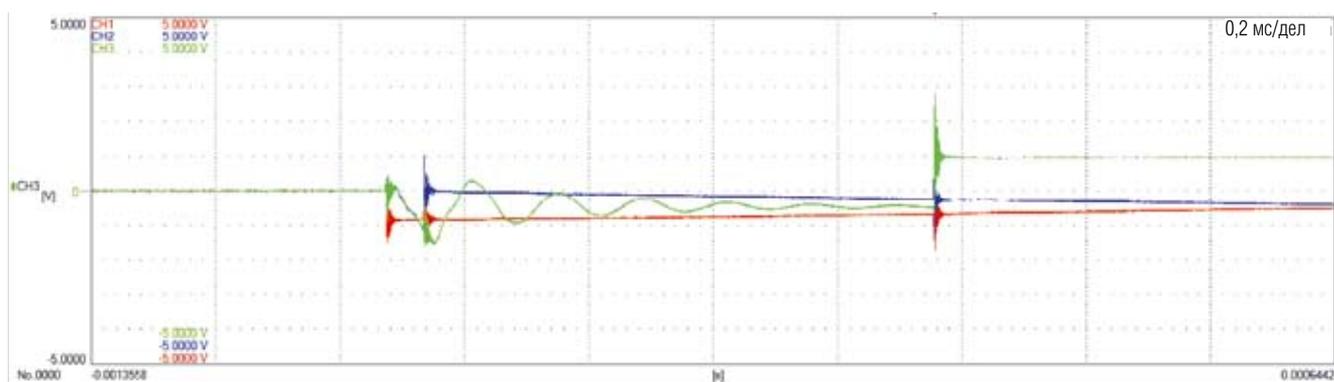


Рис. 5. Характерная осциллограмма фазных напряжений на фидере ШМ-9Б в конце КЛ непосредственно у двигателя при включении ВМП-10-20/600

чении ВМП-10-20/600 составила более 1 мс, что обусловлено, наряду с заметным дребезгом контактов, большим сроком эксплуатации указанного выключателя – более 40 лет.

Перенапряжения, зарегистрированные в сериях коммутаций от-

ключения, для всех рассмотренных выключателей не превысили $1,9U_{\text{фм}}$ независимо от точки измерения (за выключателем, у двигателя). Это обусловлено низкими токами среза, которые в современных ВВ, благодаря подбору оптимального матери-

ала для изготовления контактов, не превышают 3,5–5,0 А.

При коммутации масляного выключателя предварительных ВЧ пробоев не наблюдалось, поскольку масло – более мягкая дугогасящая среда, чем вакуум. В этой связи ток

Таблица 2. Основные значимые характеристики выключателей, полученные в ходе исследований (средние значения)

| Характеристика/выключатель | ВБП-10-20/630 | ВВ/TEL-10-20/1000 | ВВТЭ-М-10-20/630 | ВМП-10-20/600 |
|---|---------------|-------------------|------------------|---------------|
| Скорость движения контактов при замыкании, м/с | 0,66 | 0,94 | 1,26 | 3,38 |
| Скорость падения пробивного напряжения при включении, кВ/мс (длительность предварительных пробоев, мкс) | 12,4 (192,0) | 35,8 (135,7) | 66,5 (43,8) | - (0) |
| Скорость контактов при размыкании, м/с | 1,05 | 0,63 | 1,17 | 3,83 |
| Скорость возрастания пробивного напряжения при отключении, кВ/мс | 19,7 | 24,1 | 61,8 | 7,02 |
| Дребезг | Отсутствует | Отсутствует | Присутствует | Присутствует |
| Средняя кратность перенапряжений при включении | 3,34 $U_{фм}$ | 2,97 $U_{фм}$ | 1,89 $U_{фм}$ | 2,55 $U_{фм}$ |
| 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 среды в дугогасительной камере масляного выключателя при его отключении фактически является электрической прочностью остывающих после горения дуги газов, находящихся под высоким давлением

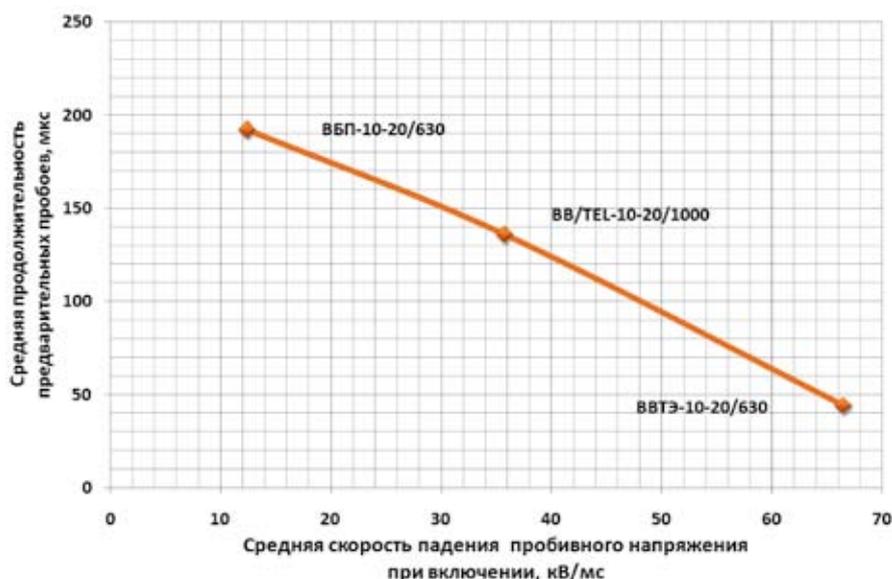


Рис. 6. Зависимость продолжительности предварительных пробоев от скорости падения пробивного напряжения

высокой частоты при переходе через ноль не гасится, и дуга продолжает гореть до полного замыкания контактов. При отключении наблюдается некоторое количество повторных пробоев, что, вероятно, связано с тем, что при отключении дуги происходит испарение масла с образованием газов под высоким давлением, которые теперь уже являются жесткой дугогасящей средой. Повторные пробои в масляном выключателе... микросекунд и не приводят к эскалации перенапряжений. Поясним это обстоятельство следующим образом. Во время повторных пробоев образующиеся за счет дуговых процессов газы начинают относительно быстро остывать, поскольку ток промышленной частоты между контактами уже не протекает и мощного

воздействия на масло силовой дуги тока 50 Гц тоже нет. За счет этого давление газов и дугогасящая способность среды в камере существенно снижаются, что в целом и обуславливает малое количество повторных пробоев.

Выводы

1. Вакуумные выключатели, исследованные в данной работе, обладают в целом удовлетворительными характеристиками, однако для повышения безаварийной работы электрооборудования необходимо выполнить доработку каждого типа выключателя. В выключателе ВВТЭ-М-10-20/630 необходимо устранить дребезг контактов, в ВВ/TEL-10-20/1000 и ВБП-10-20/630 необходимо увеличить скорость

движения контактов при включении и отключении, кроме того в ВБП-10-20/630 необходимо улучшить характеристики ВДК.

2. После рассмотрения всех достоинств и недостатков выключателей различных типов, учитывая результаты, полученные в данной работе, нельзя категорически утверждать, что жидкостные выключатели морально устарели, и пришло время выключателей только с вакуумной и газовыми дугогасящими средами. Необходимо разрабатывать требования к различным типам выключателей, определять область их применения и учитывать возможность использования в будущем в качестве дугогасящей среды жидкие синтетические материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев А.А. Исследование аварийности в сетях 6–10 кВ горно-металлургических предприятий. // Новости Электротехники. – 2009. – № 6(60).
2. Назарычев А.Н. Анализ основных преимуществ применения вакуумных выключателей. // Энергоэксперт. – 2007. – № 4–5.
3. Дяттерев И.Л. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, сопровождающих коммутации вакуумных выключателей. – Автореферат дисс. канд. техн. наук: 05.14.12 / И.Л. Дегтярев – Новосибирск, 2006. – 21 с.
4. Емельянов А.А., Емельянова Е.А. Импульсные технологии повышения электрической прочности в вакууме. – М.: Физматлит, 2009. – 160 с.