

ИСПЫТАНИЕ НА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

АВТОРЫ:

Л.А. ДАРЬЯН,
Д.Т.Н.,
ЗАО «ТЕХНИЧЕСКАЯ
ИНСПЕКЦИЯ»

В.П. ПОЛИЩУК,
К.Ф.-М.Н.,
ОИВТ РАН

А.В. ШУРУПОВ,
К.Ф.-М.Н.,
ОИВТ РАН

В настоящее время в электроэнергетике остро стоит проблема обеспечения взрывобезопасности высоковольтного маслонаполненного электрооборудования. По условиям эксплуатации нельзя полностью исключить возможность взрыва такого оборудова-

ния, но вполне решаемой является задача значительного уменьшения вероятности взрыва и существенного снижения материального ущерба. Одним из главных препятствий на пути создания взрывобезопасного электрооборудования является отсутствие эффективных и доступных методов испытаний.

Ключевые слова: бумажно-масляная изоляция; дуговой разряд; взрывобезопасность; газообразование; бездуговой источник импульсного давления; трансформаторное масло; разрушения трансформаторов.

ВВЕДЕНИЕ

Срок службы трансформаторов и другого высоковольтного маслонаполненного электротехнического оборудования (ВМЭО) исчисляется десятками лет. В ходе эксплуатации под действием частичных разрядов, нагрева, кавитации и других факторов происходит деградация бумажно-масляной изоляции (БМИ) [1]. Со временем ухудшение изоляционных характеристик может превысить критический уровень, и тогда внутри ВМЭО возникает короткое замыкание (КЗ), которое, как правило, приводит к развитию дугового разряда (ДР) мощностью в десятки — сотни МВт. Под действием ДР происходит интенсивное разложение трансформаторного масла (ТМ) и БМИ с образованием большого объема газов. Поскольку ТМ практически несжимаемо, то эти газы вызывают резкий рост давления и, как следствие, взрывное разрушение ВМЭО. Горячие газы, вырвавшись из поврежденного трансформатора и перемешавшись с воздухом, могут воспламениться. Вероятность возникновения пожара после взрыва составляет около 15% [2], при этом ущерб от пожара может на порядок превысить стоимость разрушенного ВМЭО.

В случае особо тяжелых аварий затраты только на замену оборудования могут исчисляться десятками миллионов долларов США. Поэтому повышение взрывобезопасности ВМЭО является весьма важной задачей для электроэнергетики.

Степень разрушения ВМЭО при взрыве определяется главным образом величиной энергии Q_d , выделившейся в ДР. Энергия Q_d зависит от длительности горения ДР t_d (или времени срабатывания защитных устройств), места возникновения КЗ, характеристик внешней цепи. По данным литературы, диапазон возможных значений этой

энергии превышает два порядка величины Q_d . Например, в силовых трансформаторах класса напряжений 735 кВ значения энергии Q_d изменялись от 1 до 147 МДж [2]. Бак трансформатора этого класса напряжений взрывался при энергии ДР свыше 8 МДж, но пожар мог возникнуть, если энергия Q_d превышала 14 МДж. В измерительных трансформаторах классов напряжений 110–330 кВ минимальное значение энергии Q_d составляет 0,3–0,5 МДж; в распределительных трансформаторах мощностью порядка 100 МВА эта энергия может изменяться в диапазоне 3–10 МДж. При ДР в коробах высоковольтных вводов эта энергия может составлять десятки мегаджоулей.

По условиям эксплуатации ВМЭО нельзя полностью исключить возникновение внутреннего КЗ, но за счет технологических и конструкторских решений можно добиться существенного снижения вероятности аварии и уменьшения ущерба. Для проверки эффективности этих решений необходим эффективный метод испытания оборудования на воздействие импульса высокого давления, возникающего в ДР. В стандартной методике испытаний на взрывобезопасность используется метод инициирования электрической дуги внутри ВМЭО. Однако за последние двадцать лет в России и в других странах бывшего СССР утрачены отраслевые испытательные стенды, на которых можно было проводить подобные испытания.

В работах [3–6] приведены результаты исследований, в которых обоснован альтернативный метод испытаний ВМЭО на взрывобезопасность. В этом методе импульс высокого давления, возникающий после КЗ внутри ВМЭО, создается при сжигании взрывчатых материалов (ВМ). Новый метод позволяет отказаться от дорогостоящих испы-

тательных установок и проводить испытания непосредственно на месте изготовления или установки ВМЭО. Как показывают оценки, испытания по альтернативной методике обойдутся значительно дешевле, чем испытания по стандартной методике.

В Объединенном институте высоких температур РАН был создан бездуговой источник импульсного давления (БИИД), предназначенный для проведения испытаний на взрывобезопасность ВМЭО. К настоящему времени опробованы конструкции БИИД, которые позволяют проводить испытания на взрывобезопасность ВМЭО с энергией воздействия до 5 МДж.

В данной работе кратко изложены результаты исследований ДР в трансформаторном масле, на основании которых был разработан БИИД, и обобщен опыт использования БИИД для определения взрывобезопасности серийного ВМЭО.

В работе анализируются известные методы защиты от взрывов ВМЭО. На основе этого анализа была разработана система динамической защиты (СДЗ) ВМЭО от взрыва, результаты испытаний которой с помощью БИИД также представлены в данной работе.

В соответствии с принятым определением взрывобезопасное электрооборудование — это электрооборудование, в котором при внутреннем воздействии дуги допускается разрушение конструкции, но все ее фрагменты должны находиться внутри нормируемой зоны безопасности вблизи оборудования. Размер зоны безопасности рассчитывается как диаметр (ширина) образца оборудования, увеличенный на две его высоты, но не менее чем на 1,8 м. Энергию импульса высокого давления, при которой разрушение оборудования удовлетворяет указанным выше условиям, можно рассматри-



Трансформатор на подстанции в Западной Сибири после взрыва

вать как меру его взрывобезопасности.

ДУГОВОЙ РАЗРЯД В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

Результаты наших экспериментальных исследований ДР в макетном образце ВМЭО подробно изложены в работах [3–7]. Далее приведены лишь основные характеристики ДР, полученные в этих работах. Условия опытов были близки к тем, что возникают после КЗ в промышленном ВМЭО, в котором ток разряда за 3–10 мс нарастает до 10–30 кА. Максимальный ток дуги достигал 30 кА при времени нарастания 1–3 мс. Общая продолжительность горения ДР была 3–20 мс. Максимальное тепловыделение в дуге Q_d достигало 0,1 МДж. Источником энергии служил емкостный накопитель с напряжением зарядки до 5 кВ. В ВМЭО мощность ДР максимальна в течение первого

полупериода тока, в дальнейшем из-за снижения удельного сопротивления изоляционной жидкости напряжение на ДР и его мощность уменьшаются.

ДР зажегся между двумя параллельными латунными электродами диаметром 20 мм, расстояние между которыми изменялось от 17 до 30 мм. Электроды находились в камере с внутренним диаметром 310 мм и объемом 61 л. Объем жидкости составлял 35 л. Оставшийся объем (26 л) заполнялся азотом при атмосферном давлении. Расстояние от места возникновения ДР до границы раздела «жидкость–газ» составляло 100 мм. Разряд инициировался при подаче напряжения (≈ 3 кВ) на электроды, соединенные медной проволокой диаметром 0,1 мм.

В экспериментах измерялись ток и напряжение на ДР, давление в жидкости и в газовой полости над ней. Время отклика датчиков давления (ДД) — менее 0,5 мс. Один ДД был установлен вблизи нижнего фланца камеры, другой — на рас-

стоянии 50 мм от верхнего уровня жидкости. Проводилась высокоскоростная киносъемка развития разряда с временным разрешением 0,1 мс и видеосъемка границы раздела «жидкость–газ» с разрешением не хуже 0,8 мс. В описанных опытах использовалось трансформаторное масло марки ГК.

На рис. 1 приведены осциллограммы токов и напряжения на ДР. Время существования ДР ($\approx 7,5$ мс) близко к длительности полуволны тока на промышленной частоте. В начальный момент на осциллограмме напряжения наблюдается резкий рост, который после взрыва инициатора и формирования плазмы сменяется быстрым падением. По оценкам, длительность пика высокого напряжения (≈ 20 мкс) совпадает со временем электрического взрыва инициатора. На спаде тока (рис. 1) наблюдаются пульсации напряжения, которые, вероятно, связаны с перемещением дуги по поверхности электродов. Скорость перемещения дуги — около 20 м/с. Как показывает анализ, столб ДР вытягивается под действием собственного магнитного поля, в результате чего напряжение на ДР увеличивается, возникает шунтирующий пробой и напряжение уменьшается. По оценкам, характерное значение напряженности электрического поля в столбе ДР — 0,1–0,3 кВ/см.

Скоростная киносъемка разряда показала, что сначала свечение плазмы было сосредоточено вблизи электродов. В этот момент область свечения расширялась со скоростью $\approx 0,3$ км/с, но уже через 0,5 мс эта скорость уменьшилась примерно втрое, т.е. скорость расширения плазмы значительно меньше скорости звука в ТМ, которая составляет $\approx 1,4$ км/с [8]. Излучение плазмы перекрывало межэлектродный промежуток через ≈ 1 мс после инициации ДР.

ОСЦИЛЛОГРАММЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

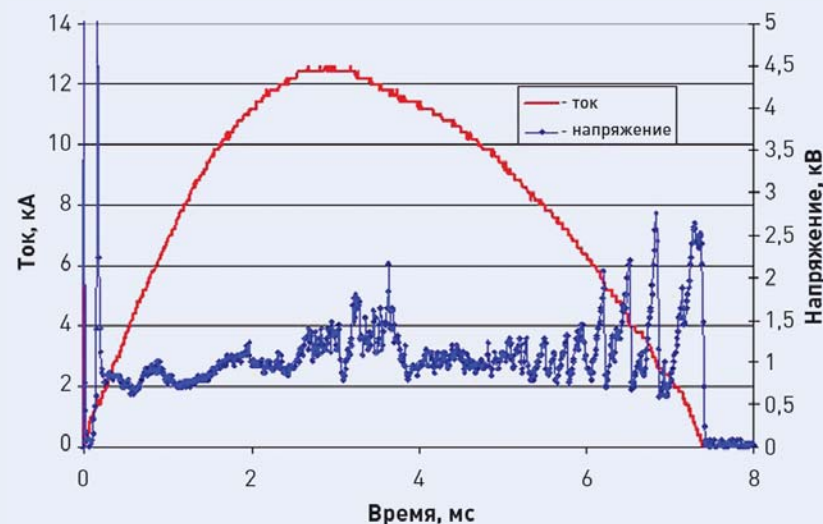


Рис. 1

На рис. 2 приведены «осциллограммы» давления в жидкости вблизи дна камеры. Видно, что характер изменения давления в ТМ является импульсно-периодическим. Наиболее отчетливо это проявляется в первое время горения ДР, в течение ≈ 3 мс, когда первые шесть экстремумов давления (максимумы и минимумы) следовали с почти постоянным интервалом $\approx 0,8$ мс. Прослеживается корреляция между сигналами с ДД и осциллограммой напряжения. Так, первому максимуму давления соответствует «размазанный» максимум напряжения. Абсолютному максимуму давления, который был зафиксирован через 3,71 мс после возникновения ДР и составил $\approx 1,7$ МПа (рис. 2), предшествует скачок напряжения до 2,2 кВ, который произошел через 3,64 мс после возникновения дуги (см. рис. 1). По-видимому, при резком снижении напряжения (пробое) на промежутке в жидкости возникают интенсивные звуковые волны.

ТМ поднималось под действием расширяющегося парогазового пузыря, что приводило к сжатию газа и росту давления в нем. Как следует из видеосъемки, уровень жидкости поднимался равномерно на высоту $\approx 0,1$ м, после чего происходил прорыв парогазовой смеси в область, занятую азотом. Характерная скорость подъема жидкости составляла 10–20 м/с. Из этих данных можно оценить составляющие баланса энергии в ДР. В обсуждаемом эксперименте величина энергии Q_d составила 64 кДж, при этом максимальная кинетическая энергия движения жидкости была 3–5 кДж, т.е. 5–10% от всей энергии, выделившейся в разряде. Основная часть энергии Q_d расходовалась на нагрев ТМ и его разложение.

После разряда в ТМ в азотной «подушке» устанавливалось избыточное давление на уровне 10–50 кПа, кото-

ДАВЛЕНИЕ В ТМ ВБЛИЗИ НИЖНЕГО ФЛАНЦА

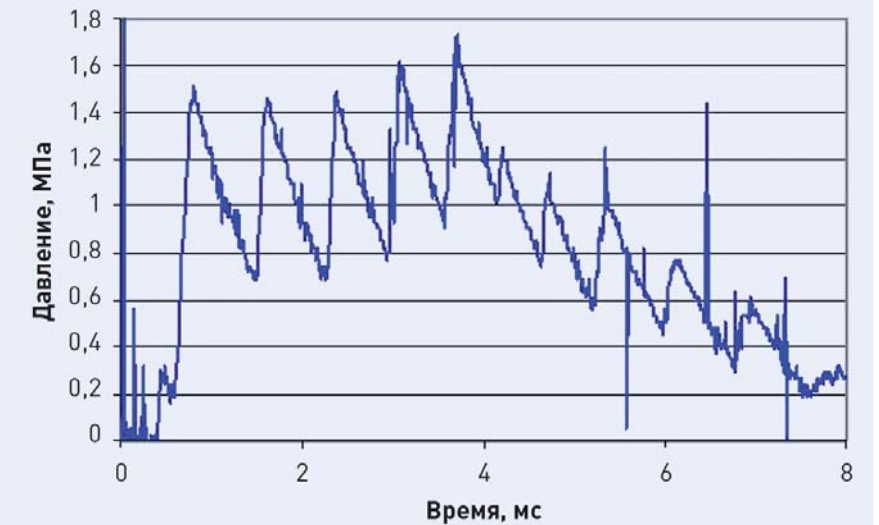


Рис. 2

рое пропорционально объему газов, выделившихся при разложении ТМ. Процесс разложения ТМ в разрядах принято характеризовать коэффициентом газообразования V_g , который представляет собой отношение объема образовавшихся газов к энергии Q_d , выделившейся в ДР. По нашим данным, $V_g = 0,11$ л/кДж.

Объем образовавшихся газов, пропорциональный энергии Q_d , определяет величину давления внутри ВМЭО, поэтому энергия Q_d может рассматриваться в качестве меры взрывобезопасности.

Проведенные эксперименты позволили выявить качественные особенности динамического воздействия ДР на корпус ВМЭО, главная из которых состоит в том, что в жидкости отсутствуют ударные волны. Темп роста среднего давления составляет 0,3–0,5 МПа/мс. На фоне растущего давления в камере наблюдаются интенсивные звуковые волны. Максимальное давление на стенке камеры составляло ≈ 2 МПа. При ха-

рактерной скорости границы раздела «жидкость — азот» 10–20 м/с давление в парогазовом пузыре должно быть 5–10 МПа.

БЕЗДУГОВОЙ ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ

Результаты исследований ДР определили требования к бездуговому источнику импульсного давления, с помощью которого можно моделировать воздействие ДР на ВМЭО. В БИИД импульс давления формируется при расширении струи пороховых газов (СПГ), образующейся при сжигании ВМ. При этом существенно, что длительность воздействия импульсного давления должна быть достаточно велика — порядка 50 мс. Это условие исключает использование для получения СПГ с нужными параметрами ВМ типа

гексогена или тротила. В экспериментах мы использовали ВМ типа пороха, который сгорает значительно медленней, чем тротил. Теплота сгорания ВМ составляла 3,8 кДж/г, удельное газообразование — 0,9 л/г.

Генератор СПГ представлял собой камеру высокого давления, из которой через сопло Лавала истекали продукты сгорания ВМ. Величиной и длительностью импульса давления можно было управлять, изменяя площадь сечения сопла, массу ВМ и распределение ВМ по камере сгорания. Эксперименты проводились в той же камере, что и эксперименты с ДР. Генератор СПГ пристыковывался к одному из окон так, чтобы область воздействия СПГ была примерно такой же, как и при горении ДР. Рабочими жидкостями являлись ТМ и вода. Расчетное тепловыделение при сгорании ВМ Q изменялось в диапазоне 10–50 кДж.

Измерялось давление в характерных точках камеры, а также проводилась высокоскоростная съемка движения жидкости под действием СПГ. Измерения показали, что давление в струе на входе в жидкость достигало 10–20 МПа, это давление устанавливалось примерно за 1 мс. Длительность воздействия струи на жидкость изменялась от 20 до 60 мс. Типичное значение давления на стенках камеры было около 1 МПа. Характер движения границы раздела «жидкость — газ» под действием СПГ, погруженной в жидкость, был таким же, как и под действием ДР при одинаковой энергии воздействия. Граница раздела, оставаясь плоской, поднималась со скоростью 10–20 м/с. Следует отметить, что не выявлено заметного отличия реакции воды и ТМ на воздействие СПГ.

Выполненные эксперименты свидетельствуют о том, что можно обеспечить гидравлическое подобие течений жидкости при воздействии

СПГ и ДР. Эквивалентность течения жидкости под действием ДР и СПГ достигается при равенстве энергии и длительности воздействия. При выполнении этого условия генератор СПГ (БИИД) можно использовать для моделирования воздействия ДР на корпус ВМЭО. Первые конструкции БИИД были рассчитаны на энергию воздействия 0,5 МДж, к настоящему времени энергия БИИД увеличена на порядок (рис. 3).

БИИД использовался нами для определения взрывобезопасности серийного ВМЭО [6, 9] и экспериментальной проверки эффективности существующих и перспективных средств защиты ВМЭО от взрыва [10]. БИИД может также применяться для получения исходных данных при разработке и верификации численных методов расчета перспективных конструкций ВМЭО и систем защиты от взрыва.

БЕЗДУГОВОЙ ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭНЕРГИЮ 5 МДЖ ПЕРЕД КОНТРОЛЬНЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ

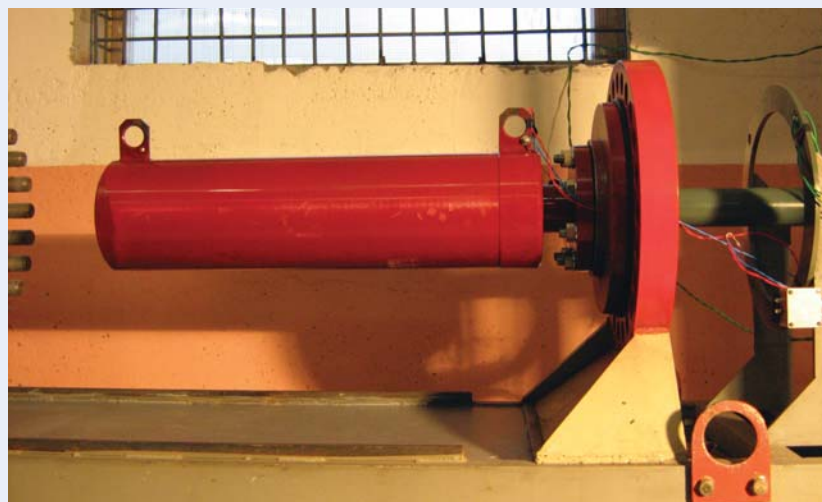


Рис. 3

ИСПЫТАНИЯ НА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ СЕРИЙНОГО ВМЭО

С помощью БИИД были проведены испытания на взрывобезопасность серийных измерительных трансформаторов тока (ТТ), трансформатора напряжения (ТН), а также конденсаторов связи (КС). Подробно результаты испытаний представлены в работах [6, 9], здесь ограничимся их кратким резюме. Испытания проводились на основании методики, согласованной ПАО «ФСК ЕЭС». Названия заводов-изготовителей, названия испытанного оборудования, характерные значения токов при внутреннем КЗ и ожидаемые характерные значения энергии ДР приведены в табл. 1. Энергия ДР оценивалась на основании данных заводов-изготовителей о токах КЗ

ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ МАСЛОНАПОЛНЕННОЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПЫТАННОЕ С ПОМОЩЬЮ БИИД

№ п/п	Название ВМЭО	Завод-изготовитель	Диапазон токов КЗ, кА	Энергия $Q_{\text{в}}$, МДж	Длительность воздействия БИИД, мс
1	ТТ типа ТБМО-110	ОАО РЭТЗ «Энергия»	1,5–3	0,4	60
2	ТТ типа ТФРМ 330	КО ЗЗВА	5–10	1	60
3	ТН типа НКФ-110 II Г	КО ЗЗВА	15–20	1	70
4	КС типа СМА-110/√3-6,4	ОАО УККЗ	1–2	0,5; 1	50; 10
5	КС типа СМА-166/√3-14	ОАО УККЗ	2–3	1; 1,5	50; 10

Таблица 1

КС ТИПА СМА-166/√3-14 ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЙ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МДЖ (СЛЕВА) И 1,5 МДЖ (СПРАВА)



Рис. 4



и конструкции ВМЭО. При проведении испытаний измерительные трансформаторы были заполнены ТМ марки ГК, в КС использовалась диэлектрическая жидкость на основе фенилсилилэтана.

Во время испытаний внутри ВМЭО были установлены ДД на разных расстояниях от места ввода СПГ,

также проводилась скоростная видеосъемка с двух взаимно-перпендикулярных направлений с временным разрешением не менее 3,3 мс. Если в тестируемом оборудовании использовались системы защиты в виде сильфонов-компенсаторов или разрывных мембран, то на них устанавливались контактные датчики, фиксировавшие начало их

движения. Область воздействия СПГ соответствовала диапазону наиболее вероятного возникновения КЗ.

В табл. 1 также приведена длительность воздействия БИИД, которое оценивалось из показаний ДД. Малая длительность импульса (10 мс) при испытаниях КС означает, что во время тестирования их корпус разрушился, и произошел сброс давления. В обоих случаях размер зоны разброса фрагментов корпуса превысил размер нормируемой зоны безопасности. Поэтому КС типа СМА-110/√3-6,4 и типа СМА-166/√3-14 не могут быть признаны взрывобезопасными при энергии воздействия 1 и 1,5 МДж соответственно. На рис. 4 приведены фотографии КС типа СМА-166/√3-14 после испытаний с энергией 1 и 1,5 МДж. Повторные испытания с меньшей энергией БИИД показали, что КС типа СМА-110/√3-6,4 и типа СМА-166/√3-14 могут быть признаны взрывобезопасными при энергии воздействия 0,5 и 1 МДж соответственно.

При испытаниях ТН типа НКФ-110 II Г производства КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» (ЗЗВА) произошло частичное повреждение корпуса с выбросом ТМ, однако все продукты разрушения, включая ТМ, оказались внутри нормируемой зоны безопасности.

Испытания позволили не только установить уровень взрывобезопасности тестируемого оборудования, но и найти решения, которые увеличили его стойкость к воздействию импульсного давления. Так, первоначальная конструкция ТТ типа ТФРМ 330 производства КО ЗЗВА была «забракована» — после воздействия импульса высокого давления из корпуса ТТ произошел выброс струи ТМ на расстояние свыше 30 м. Завод-изготовитель внес необходимые изменения в конструкцию ТТ, и по результатам повторных испытаний этот трансформатор был признан взрывобезопасным при энергии воздействия 1 МДж, причем требование взрывобезопасности при энергии 1 МДж выполняется с «запасом».

ОСОБЕННОСТИ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Из литературных данных известно, что в силовых трансформаторах внутренние КЗ чаще всего возникают в высоковольтных вводах, маслонаполненных кабельных коробах и устройствах регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) [2]. ДР развивается вблизи места возникновения КЗ между корпусом трансформатора («землей») и элементами конструкции, находящимися под высоким потенциалом. Длина столба дуги, определяющая напряжение на ДР, в зависимости от конструкции ВМЭО может изменяться в диапазоне от 0,1 до 0,3 м. Под действием пондеромоторных сил и сил конвекции ДР непрерывно и хаотически перемещается по поверхности. Так как характерная скорость движения ДР — порядка 10 м/с, а время его «жизни» — ≈50 мс, то площадь поверхности

трансформатора, подвергаясь воздействию ДР, составляет ≈0,1 м². Поэтому ДР перемещается внутри объема, составляющего порядка 10–30 л. Этот факт поясняет, в частности, почему, несмотря на высокую мощность ДР, внутри ВМЭО не возникают ударные волны.

После КЗ корпус трансформатора является одним из электродов ДР. Вследствие этого область высокого давления примыкает к стенке трансформатора, что определяет локальность динамического воздействия ДР на его корпус. Время выравнивания давления внутри бака трансформатора оценивается как удвоенное время прохождения звуковой волной максимального расстояния между противоположными стенками трансформатора. Для измерительных трансформаторов класса напряжений до 330 кВ с объемом бака порядка 0,5 м³, аналогичных тем, что рассматривались в предыдущем разделе, время выравнивания давления составляет ≈1 мс, т.е. много меньше времени горения ДР. В распределительных трансформаторах VII габарита время установления давления составляет ≈15 мс. Это означает, что внутри больших трансформаторов существует большой перепад давления, максимальное значение которого достигается в зоне горения ДР. Из этих оценок следует, что под действием импульсного давления трансформаторы малых габаритов должны разрушаться («раздуться») сравнительно равномерно по всей поверхности. Именно такие повреждения были зафиксированы при наших испытаниях измерительных трансформаторов.

В трансформаторах с большими габаритами разрушение, как правило, носит локальный характер, при котором площадь поврежденной поверхности составляет менее 10% от всей площади поверхности трансформатора. Пример подобного разрушения показан на рисунке на стр. 68.

Предельное избыточное давление, которое способен выдержать корпус трансформатора, зависит от его конструкции, места возникновения КЗ и длительности импульса. В соответствии с общими требованиями деформация корпуса должна быть упругой при избыточном статическом давлении 0,05 МПа. При избыточном статическом давлении свыше 0,2 МПа имеет место значительная пластическая деформация. При динамическом нагружении корпуса можно ожидать взрывного разрушения, если избыточное давление свыше 0,5 МПа будет удерживаться более 5 мс.

По-видимому, наиболее вероятные условия для взрыва реализуются в промежутке времени от 10 до 30 мс после возникновения ДР. На ранней стадии горения ДР, примерно в первые 10 мс, давление внутри трансформатора не успевает достичь критических значений. На более поздней стадии ДР, примерно после 30 мс, вероятность взрыва уменьшается. Во-первых, заметно снижается электрическая мощность ДР вследствие возрастания электропроводности изоляционной жидкости, что приводит к уменьшению скорости газообразования в ДР и снижению темпа роста давления. Во-вторых, к этому моменту времени начинает сказываться увеличение объема бака вследствие деформации. Этот дополнительный объем частично компенсирует рост давления из-за разложения ТМ.

На основании изложенного выше можно сформулировать основные требования к системам защиты ВМЭО от взрыва:

- время реакции системы на рост давления внутри бака не должно превышать 5 мс;
- система должна ограничивать максимальное давление в баке на уровне 0,3–0,5 МПа.

Система защиты должна быть установлена вблизи особо проблемных узлов трансформатора, если не представляется возможным защитить всю поверхность.

ИСПЫТАНИЯ МАКЕТОВ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ ВЗРЫВА

Все известные методы защиты ВМЭО направлены на создание дополнительного объема ΔV, в который может расшириться ТМ в случае роста давления после возникновения ДР.

Эффективность работы системы защиты можно оценить из отношения:

$$k = \frac{\Delta V}{V_g Q_a} \quad (1)$$

Отношение k , которое можно назвать коэффициентом надежности системы защиты, представляет собой отношение дополнительного объема, который может занять ТМ, к объему газов, выделившихся в результате разложения ТМ. Можно ввести два характерных значения коэффициента надежности k_1 и k_2 в соответствии со следующим определением:

- при $k > k_1$ деформация бака ВМЭО является в основном упругой, и оборудование является взрывобезопасным;
- при $k < k_2$ можно ожидать взрывного разрушения бака;
- при промежуточных значениях параметра надежности ($k_2 < k < k_1$) можно ожидать значительной пластической деформации корпуса.

Ориентировочно можно принять, что характерные значения коэффициента надежности равны: $k_1 \approx 0,7–0,8$; $k_2 \approx 0,1–0,3$.

В литературе обсуждаются два метода создания дополнительного объема для ТМ. Первый метод основан на покрытии внутренней поверхности трансформатора демпферным пористым материалом [11]. Предполагается, что под действием высокого давления этот материал сожмется, и появится необходимый свободный объем. Дополнительный защитный эффект может быть достигнут, если работа сжатия материала достаточно велика, так что заметная часть кинетической энергии потока ТМ потратится на сжатие. Метод «пористых покрытий» может быть эффективным только при условии, что значительное сжатие пористого материала происходит при сравнительно низком избыточном давлении — порядка 0,3–0,5 МПа, при этом эффективный модуль Юнга не должен превышать 0,5 МПа.

Второй метод защиты можно назвать методом «разрушаемой мембраны». Он состоит в установке на корпусе ВМЭО защитных мембран, кото-

рые разрушаются под действием импульсного давления ДР и через которые ТМ вытекает в специальную емкость [12]. Этот метод защиты используется, например, в системе Transformer Protector фирмы SERGI.

Ниже кратко изложены результаты испытаний описанных систем защиты [10].

При проверке метода «пористых покрытий» использовался макет ВМЭО, который представлял собой стальную цилиндрическую емкость объемом 0,95 м³ и высотой 1,45 м с конической насадкой в нижней части. Диаметр емкости — 1 м, толщина стенок — 7 мм. Верхняя крышка крепилась к цилиндру 24 болтами М12. На внутреннюю поверхность крышки была наклеена пластина толщиной 50 мм из пенопласта, изготовленного из прессованной крошки плотностью 0,04 кг/дм³. Емкость была заполнена водой. БИИД был установлен на расстоянии 0,2 м от верхней крышки, расчетное значение энергии БИИД — 0,35 МДж.

МАКЕТ ВМЭО ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ В ВИДЕ РАЗРЫВНОЙ МЕМБРАНЫ

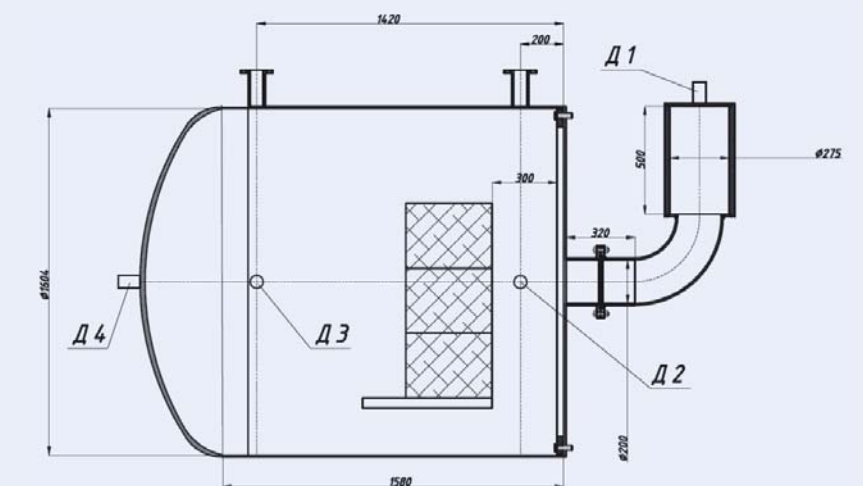


Рис. 5

В ходе испытаний крышку бака вблизи БИИД подняло на 0,8 м, а из 24 крепежных болтов уцелело только 3. После эксперимента выяснилось, что один из краев крышки выгнулся на 50 мм, пенопласт раскрошился на мелкие фракции. Этот опыт показал, что пористая стенка не защищает корпус ВМЭО. Подобный результат можно считать ожидаемым. Действительно, чтобы эта система защиты оказалась эффективной, необходимо, чтобы за время нарастания давления в жидкости (3–5 мс) увеличение объема за счет сжатия пористой среды могло компенсировать увеличение давления. Это возможно либо при сравнительно медленном темпе увеличения давления, не более 0,1 МПа/мс, либо при малых объемах защищаемого объекта — порядка 0,1 м³.

Низкую эффективность данного метода можно проиллюстрировать следующими оценками. Если характерный размер бака трансформатора — a , то при облицовке всей его внутренней поверхности демпферным покрытием с максимальным сжатием h возможное увеличение доступного объема для ТМ составит порядка:

$$\Delta V \approx 6a^2 h \quad (2)$$

Под воздействием импульсного давления покрытие будет равномерно сжиматься только при объеме бака до $\approx 0,5$ м³. Принимая для оценки, что $a \approx 0,5$ м и $h \approx 0,02$ м, из (2) находим, что $\Delta V \approx 30$ л. Это может оказаться достаточным для защиты от взрыва при энергии дуги порядка 0,5 МДж ($V_g \approx 55$ л, $k \approx 0,6$).

Для баков больших размеров покрытие эффективно может сжиматься лишь вблизи места возникновения КЗ общей площадью порядка 1 м². В этом случае дополнительный объем ΔV составит ≈ 20 л. При энергии ДР $Q_g \approx 1$ МДж ($V_g \approx 110$ л) эффективность системы защиты составит

$k \approx 0,2$, т.е. можно ожидать взрывного разрушения бака.

В целом, пористые покрытия, которые сжимаются под действием импульсного давления порядка 0,3–0,5 МПа и имеют эффективный модуль Юнга порядка 1 МПа, могут представлять интерес для использования в системах защиты от взрыва ВМЭО с объемом бака до 0,5 м³, если ожидаемая энергия ДР не превышает 0,5 МДж.

На рис. 6 приведен эскиз макета ВМЭО, на котором проверялся метод «разрушаемой мембраны». Макет имел вид цилиндрической емкости, которая при испытаниях заполнялась водой. Емкость была закрыта стальной крышкой толщиной 12 мм. В центре крышки имелось отверстие диаметром 200 мм, закрытое алюминиевой фольгой толщиной 0,2 мм.

На расстоянии 300 мм от крышки устанавливались бетонные блоки, имитировавшие обмотку трансформатора. Область воздействия БИИД находилась между бетонными блоками и крышкой на расстоянии 0,2 м от отверстия в ней — напротив датчика давления Д2. Датчик давления Д1 определял давление

в воздушной полости за мембраной, датчики давления Д3 и Д4 измеряли давление в жидкости вдали от БИИД. Энергия импульса высокого давления была 1 МДж, длительность импульса — 50 мс.

Контактный датчик, установленный на мембране, зафиксировал ее разрыв через 3 мс после запуска БИИД. Скорость истечения воды через мембрану, рассчитанная по изменению давления воздуха в полости за мембраной, достигала 20 м/с. Давление в жидкости составляло 1,8 МПа. Скоростная съемка показала, что деформация корпуса макета ВМЭО продолжалась 10–15 мс. После эксперимента было установлено, что остаточная деформация стальной крышки составила около 40 мм. В этом опыте были созданы «идеальные» условия для обсуждаемого метода защиты: тонкая мембрана большого диаметра была установлена прямо напротив эпицентра роста давления. Однако эта система не защитила бак от значительной деформации.

Система защиты от взрыва, приведенная на рис. 5, представляет собой упрощенный вариант системы Transformer Protector (TP), которая

СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ (РАБОЧИЙ КЛАПАННЫЙ БЛОК БЕЗ КОЖУХА)



Рис. 6

АВТОТРАНСФОРМАТОР С СДЗ ПЕРЕД ИСПЫТАНИЯМИ



Рис. 7

в последние годы поставляется на объекты энергетики России. Однако опыт ее эксплуатации нельзя признать удачным. Так, 22 сентября 2009 г. на ПС «Машук» в результате внутреннего КЗ произошло взрывное повреждение корпуса автотрансформатора АТ-1, на котором была установлена система TP. Объяснение неудачной работы системы TP в этой аварии специалисты фирмы SERGI изложили в отчете [13]. По данным [13], во время аварии ток ДР достигал 10 кА, время горения ДР — 60 мс. При анализе работы системы TP они исходили из предположения, что напряжение на ДР было 37 кВ, так что энергия Q_g была около 11 МДж. Значение напряжения 37 кВ, полученное без учета падения напряжения на индуктивном сопротивлении, представляется завышенным. По нашим оценкам, напряжение на ДР было заметно меньше, так что энергия ДР была около 4 МДж. При такой энергии Q_g

объем образовавшихся газов составлял $\approx 0,45$ м³.

По данным [13], разрывная мембрана диаметром 8 дюймов (≈ 200 мм) разорвалась через $\approx 4,5$ мс после КЗ при избыточном давлении 0,08 МПа. Через образовавшееся отверстие произошел сброс части ТМ, что обеспечило через 112 мс «депрессуризацию» бака. Пиковое давление в баке достигало 0,6 МПа. По мнению авторов [13], система TP хотя и не защитила корпус ВМЭО от взрывного разрушения, но предотвратила возникновение пожара. Однако из данных [13] о скорости потока ТМ через диафрагму следует, что за время горения ДР через нее протекло менее 25 л ТМ. Поэтому коэффициент надежности системы защиты из (1) составляет $k \approx 0,05$, так что TP и не могла защитить бак ВМЭО от взрывного разрушения. Что касается отсутствия пожара, то вероятность его возникновения после взрыва и без

систем защиты не превышает 15% [2], тем более что энергия Q_g была сравнительно невелика.

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Проведенный анализ показывает, что известные системы защиты ВМЭО от взрыва не являются достаточно эффективными и необходима разработка новых систем. В данном разделе кратко описаны результаты испытаний системы динамической защиты (СДЗ), разработанной в Шатурском филиале ОИВТ РАН. Основным элементом СДЗ являются подвижные подпружиненные блоки (рис. 7) с общей площадью порядка 1 м², которые устанавливались на боковой поверхности корпуса трансформатора вблизи наиболее вероятных мест возникновения КЗ. Максимальное перемещение блоков под действием импульсного давления достигало $\approx 0,3$ м.

Испытания СДЗ проводились на автотрансформаторе (АТ) 25 МВА, который был выведен из эксплуатации, но в котором были сохранены все элементы внутренней конструкции. На рис. 8 приведена фотография АТ с установленными элементами СДЗ, защитные кожухи которой выкрашены в синий цвет. Под круглым кожухом находились 16 подвижных блоков, под прямоугольным кожухом — 35 блоков (см. рис. 6). Слева на рис. 7 видна защитная камера, в которую помещался БИИД. На тыльной стороне трансформатора СДЗ не ставились, только на одном из трех высоковольтных вводов была установлена защита в виде специальных диафрагм.

В экспериментах использовался БИИД с энергией от 1 до 3 МДж при длительности воздействия

от 30 до 50 мс. Для диагностики процесса деформации корпуса бака использовалась скоростная съемка (до 2000 кадров в секунду), четыре ДД и датчики перемещения. При испытаниях бак АТ заполнялся водой.

Была проведена серия из десяти экспериментов. Импульс давления подавался в зоны наиболее вероятного возникновения КЗ на обеих сторонах трансформатора, в том числе и в район высоковольтного ввода. При подаче импульса высокого давления на тыльную стенку АТ, на которой не была установлена СДЗ, была зафиксирована значительная пластическая деформация корпуса с частичным разрушением элементов конструкции, но без образования течей. Скоростная съемка зафиксировала, что блоки СДЗ приходят в движение примерно через 5 мс после подачи импульса высокого давления.

Основные результаты испытаний:

- максимальное давление в АТ возрастает примерно пропорционально энергии БИИД: при энергии 1 МДж пиковое давление составляет около 0,5 МПа, при энергии 3 МДж это давление превышает 1 МПа;
- основная деформация корпуса АТ без установки СДЗ происходит через 20–30 мс после подачи импульса высокого давления;
- скорость движения подпружиненных блоков в СДЗ увеличивается с ростом энергии БИИД, и при энергии 3 МДж достигает 30 м/с;
- СДЗ имеет значительно меньшее время срабатывания по сравнению с заводской системой защиты от взрыва в виде защитной мембраны;
- СДЗ, установленная напротив зоны ввода импульса давления, защитила корпус АТ

от значительной пластической деформации вплоть до энергии импульса 3 МДж.

По оценкам, СДЗ при испытанной конфигурации имеет коэффициент надежности $k \approx 0,5$. Надежность защиты от взрыва может быть увеличена на 30–50%, если устанавливать СДЗ на обеих сторонах трансформатора и на всех высоковольтных вводах.

ВЫВОДЫ

Показано, что бездуговой источник импульсного давления может использоваться для моделирования динамического воздействия дугового разряда на высоковольтное маслонаполненное электрооборудование. С помощью этого источника давления были проведены оценки взрывобезопасности серийных измерительных трансформаторов и конденсаторов связи; испытаны макеты существующих и перспективных систем защиты оборудования от взрыва.

Испытания макета защиты высоковольтного маслонаполненного оборудования в виде «разрушаемой мембраны» показали, что она не предохраняет его корпус от значительной деформации, которая может закончиться разрушением.

Испытания разработанной системы динамической защиты, установленной на автотрансформаторе мощностью 25 МВА, показали, что она предотвращает взрывное разрушение корпуса автотрансформатора, по крайней мере, при энергии воздействия 3 МДж.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.А. Дарьян, В.Г. Аракелян. Стойкость изоляционных жидкостей к газообразованию // Электротехника. 1997. № 2. С. 45–49.

2. M. Foata, J.B. Dastous. Power transformer tank rupture prevention // Сессия CIGRE-2010. Париж, 2010. Отчет A2-102.
3. Л.А. Дарьян, Ю.А. Дементьев, В.П. Ефремов, В.П. Полищук, А.В. Шурупов. Альтернативный метод оценки взрывобезопасности и взрывозащищенности высоковольтного маслонаполненного электрооборудования // ЭЛЕКТРО. 2009. № 5. С. 43–46.
4. L.A. Daryan, A.V. Kozlov, S.N. Luzganov, M.N. Povareshkin, V.P. Polistchook, A.V. Shurupov, N.P. Shurupova. Experimental study of a flow of liquid under action of an arc discharge and jet of powder gases // Physics of Extreme States of Matter. 2010. Chernogolovka, 2010. P. 112.
5. L.A. Daryan, A.V. Kozlov, A.V. Kotov, M.N. Povareshkin, V.P. Polistchook, A.V. Shurupov, N.P. Shurupova. Pulse arc discharge in mineral and organic oils // Proceedings of Int. Conf. on Physics of Extreme States of Matter-2012. 1–6 March, Russia, Elbrus. Institute of Problems of Chemical Physics. Chernogolovka, 2012. P. 168.
6. Л.А. Дарьян, А.В. Козлов, М.Н. Поварешкин, В.П. Полищук, А.В. Шурупов. Бездуговые испытания высоковольтного маслонаполненного электрооборудования на взрывобезопасность // ЭЛЕКТРО. 2011. № 5. С. 23.
7. Л.А. Дарьян, А.В. Козлов, А.В. Котов, М.Н. Поварешкин, В.П. Полищук, А.В. Шурупов, Н.П. Шурупова. Дуговой разряд в минеральном и органическом масле // Известия КБГУ. 2014. Т. IV. № 3. С. 92–98.
8. Физические величины: Справочник / под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1260 с.
9. Л.А. Дарьян, В.П. Полищук, А.В. Шурупов. Применение бездугового источника импульсного давления // Электроэнергия. Передача и распределение. № 5. 2014. С. 78–85.
10. Л.А. Дарьян, В.П. Полищук, А.В. Шурупов. Испытания систем защиты от взрыва высоковольтного маслонаполненного электрооборудования // Энергоэксперт. 2013. № 4(39). С. 28.
11. А.В. Мишуев, В.В. Казеннов, Н.В. Громов. Устройство защиты электрического трансформатора от взрыва и пожара при коротком замыкании. Патент RU 2334332.
12. Ф. Манье. Устройство для предотвращения взрыва электрических трансформаторов. Патент RU 2263989.
13. Компания "SERGI". Подстанция «Машук». Активация Transformer Protector 22 сентября 2009 г. Ссылка Are61rr00.03e от 09/10/09.



Международный форум
по энергоэффективности
и развитию энергетики

РОССИЙСКАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ НЕДЕЛЯ

реклама

3–7 ОКТЯБРЯ 2017 ГОДА
Москва
Санкт-Петербург

Информационная служба РЭН-2017:

Тел.: 8 (800) 333-17-73

Email: info@rusenergyweek.com

www.rusenergyweek.com

 РОСКОНГРЕСС



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ПРАВИТЕЛЬСТВО МОСКВЫ