



3rd International Colloquium Transformer Research and Asset Management
Split, Croatia, October 15 – 17, 2014

БЕЗДУГОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

Л.А. Дарьян, ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС»
В.П. Полищук, А.В. Шурупов, Объединенный институт высоких температур РАН

Аннотация

Взрывы высоковольтного маслонаполненного электрооборудования (ВМЭО) приводят к значительному материальному ущербу. Эти взрывы происходят в результате воздействия дугового разряда (ДР), который возникает при внутреннем коротком замыкании (КЗ). За счет совершенствования конструкции ВМЭО и систем защиты можно добиться значительного уменьшения вероятности возникновения взрывов и существенно снизить материальный ущерб. Исследование перспективных взрывобезопасных конструкций ВМЭО и новых систем защиты от взрыва предполагают наличие эффективных методов испытаний. В работе описаны результаты разработки и применения бездугового источника импульсного давления (БИИД), который предназначен для моделирования воздействия ДР на ВМЭО и определения эффективности работы известных систем защиты от взрыва. Для создания импульса высокого давления в БИИД используется химическая энергия взрывчатых материалов, при сгорании которых образуются струя пороховых газов (СПГ).

В работе представлены результаты экспериментальных исследований ДР в трансформаторном масле (ТМ) в условиях, типичных для начальной стадии разряда: время нарастания тока 3-5 мс, максимальный ток дуги – до 30 кА, время горения ДР - 3-20 мс. Энергия, выделившаяся в ДР, достигала 0,1 МДж. Установлено, что характерное значение напряженности электрического поля в столбе ДР составляет 0,2 кВ/см, коэффициент газообразования в ДР есть 110 л/МДж, темп роста давления в ТМ – 0,3 МПа/мс. Полученные результаты позволили создать БИИД с заданными параметрами. Установлено, что течение ТМ под действием ДР и СПГ являются подобными, если при одинаковой длительности воздействия энергия, выделившаяся в ДР, равняется энтальпии СПГ на входе в жидкость.

В данной работе проанализированы особенности разрушения трансформатора после взрыва, и сформулированы требования для систем безопасности. С помощью БИИД проведены испытания макетов двух известных методов защиты ВМЭО от взрыва. В первом методе защита ВМЭО от разрушения при взрыве, как считается, достигается за счет быстрого сброса давления внутри корпуса ВМЭО при раскрытии специальных мембран. Во втором методе защиты предлагается устанавливать пористые покрытия на внутренних поверхностях корпусов ВМЭО. При этом предполагается, что под

воздействием импульсного давления произойдет сжатие пористой стенки, внутренний объем ВМЭО возрастет, и давление на стенках камеры уменьшится до безопасного уровня. Эксперименты проводились на модели ВМЭО с характерным размером 1 м при энергии воздействия до 1,5 МДж. Результаты испытаний показали, что вышеуказанные системы не могут защитить корпус ВМЭО от значительных повреждений.

В работе описана система динамической защиты от взрыва (СДЗ). Эффективность применения данной системы с БИИД была доказана по результатам проведения испытаний с автотрансформатором 25 МВА. Было показано, что СДЗ защищает трансформатор от значительных повреждений вплоть до энергии динамического импульса 3 МДж.

Ключевые слова

Взрыв трансформатора, дуговой разряд, динамическое давление

1. Введение

Срок службы трансформаторов и другого высоковольтного маслонаполненного электротехническое оборудование исчисляется десятками лет. В процессе эксплуатации под действием частичных разрядов, нагрева, кавитации и других факторов происходит деградация бумажно-масляной изоляции (БМИ) [1]. Со временем ухудшение изоляционных характеристик может превзойти критический уровень, и внутри ВМЭО возникнет короткое замыкание, которое, как правило, приводит к развитию дугового разряда с мощностью десятки и даже сотни МВт. Под действием ДР происходит интенсивное разложение трансформаторного масла и БМИ с образованием газообразных продуктов разложения изоляции (ГПРИ). Поскольку ТМ практически несжимаемо, то образование газа вызывает значительный рост давления, и, как следствие, взрывное разрушение ВМЭО. При перемешивании горячих ГПРИ, вырвавшихся из разрушенного трансформатора, с атмосферным воздухом возможно воспламенение образовавшейся газовой смеси. Ущерб от возникшего пожара может на порядок превышать стоимость ВМЭО, разрушенного при взрыве. Вероятность возникновения пожара после взрыва составляет около 15 % [2].

В случае особо тяжелых аварий только стоимость оборудования подлежащего замене может исчисляться десятками миллионов долларов США. Поэтому повышение взрывобезопасности ВМЭО является весьма серьезной проблемой для электроэнергетики, которая при существующем положении дел будет только усугубляться. Во-первых, наблюдается общая тенденция увеличения установленной мощности единицы оборудования, во-вторых, далеко не всегда удается обеспечить надлежащий темп его обновления.

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

превышает два порядка величины. Например, в силовых трансформаторах класса напряжений 735 кВ значения энергии Q_a 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_a превышала 14 МДж.

В измерительных трансформаторах классов напряжений 110-330 кВ энергия Q_a обычно составляет 0,3 - 1 МДж; в распределительных трансформаторах мощностью порядка 100 МВА эта энергия может изменяться в диапазоне 3- 10 МДж. При ДР в более мощных трансформаторах и коробах высоковольтных вводов эта энергия может составлять десятки мегаджоулей.

По условиям эксплуатации ВМЭО нельзя полностью исключить возможность возникновения внутреннего КЗ, но за счет технологических и конструкторских решений можно добиться существенного снижения вероятности аварии и уменьшения ущерба. К таким решениям относятся, в частности, разработка взрывобезопасных конструкций ВМЭО и новых систем защиты от взрыва. Для решения данной задачи 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. 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, моделируется за счет химической энергии взрывчатых материалов (ВМ). Новый метод позволяет отказаться от дорогостоящих испытательных установок и проводить испытания непосредственно на месте изготовления или установки ВМЭО. Как показывают оценки, испытания по альтернативной методике обойдутся значительно дешевле испытаний 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 обобщен наш опыт использования БИИД для повышения взрывобезопасности ВМЭО, а также кратко изложены результаты исследований ДР в ТМ, на основании которых был разработан БИИД.

В соответствие 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 вокруг оборудования, радиус которой рассчитывается как диаметр (ширина) оборудования, увеличенный на две его высоты, но не менее чем на 1,8 м. Энергия импульсного давления, при которой разрушение ВМЭО

удовлетворяет данному требованию, можно рассматривать в качестве меры его взрывобезопасности.

2. Дуговой разряд в трансформаторном масле

Результаты наших экспериментальных исследований ДР в макетном образце ВМЭО подробно изложены в работах [3-6]. 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 разряда была 3-20 мс. Максимальное тепловыделение в дуге Q_a достигало 0,1 МДж. Источником энергии служил емкостной накопитель с напряжением зарядки 4 кВ. Используемая электрическая схема позволяла моделировать две полуволны тока разной полярности. В ВМЭО мощность ДР максимальна в течение первого полупериода тока, в дальнейшем из-за снижения удельного сопротивления изоляционной жидкости напряжение на разряде и его мощность уменьшаются.

ДР зажигался между двумя параллельными латунными электродами диаметром 20 мм, расстояние между которыми изменялось от 17 до 30 мм. Electroды находились в камере с внутренним диаметром 310 мм и объемом 61 л. Объем жидкости составлял 35 л. Оставшийся объем (26 литров) заполнялся азотом при атмосферном давлении. Расстояние от места возникновения разряда до границы раздела «жидкость-газ» составляло 100 мм.

В экспериментах измерялись ток и напряжение ДР, давление на стенках камеры и в газовой полости над жидкостью. Время отклика датчиков давления (ДД) - менее 0,5 мс. Один ДД был установлен вблизи нижнего фланца камеры, другой – на расстоянии 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 ТМ марки ГК.

Разряд инициировался при подаче напряжения ($\cong 3$ кВ) на электроды, соединенные медной проволокой диаметром 0,1 мм. На рис. 1 и рис. 2 представлены результаты одного из опытов. На рис. 1 приведены осциллограммы токов и напряжения на ДР. Время существования разряда ($\cong 7,5$ 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 ($\cong 20$ мкс) совпадает со временем электрического взрыва медного 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 сосредоточено вблизи электродов. В этот момент область свечения расширялась со скоростью $\cong 0,3$ 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 $\cong 1,4$ км/с. Излучение плазмы перекрывало межэлектродный промежуток примерно через 1 мс после возникновения ДР.

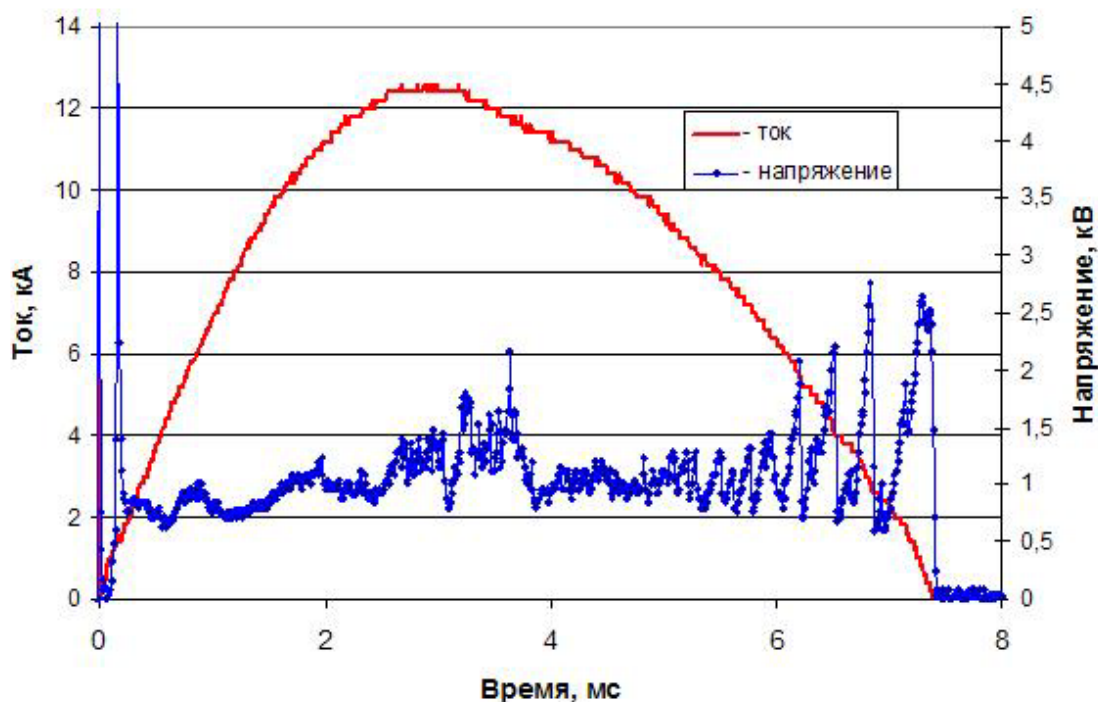


Рисунок 1 – Осциллограммы тока и напряжения

На рис. 2 приведены «осциллограммы» давления в жидкости. Как видно, характер изменения давления в ТМ является импульсно-периодическим. Особенно отчетливо это проявляется в первое время горения ДР, в течение $\cong 3$ мс, когда первые шесть экстремумов давления (максимумы и минимумы) следовали с почти постоянным интервалом $\cong 0,8$ мс. Прослеживается корреляция между сигналами с ДД и осциллограммой напряжения на разряде. Так, первому максимуму давления соответствует «размазанный» максимум напряжения. Абсолютному максимуму давления в масле, который был зафиксирован через 3,71 мс после возникновения ДР и составил $\cong 1,7$ МПа (рис.2), предшествует скачок напряжения до 2,2 кВ, который произошел через 3,64 мс после возникновения дуги (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 $\cong 0,1$ м, после чего происходит прорыв парогазовой смеси в область, занятую азотом. Характерная скорость подъема жидкости составляла $\cong 10-20$ м/с. Из этих данных можно оценить составляющие баланса энергии в ДР. В обсуждаемом эксперименте величина энергии Q_a составила 64 кДж, при этом максимальная кинетическая энергии движения жидкости была 3-5 кДж, т.е. 5-10 % от всей энергии, выделившейся в разряде. Основная часть энергии Q_a пошла на нагрев ТМ и его разложение.

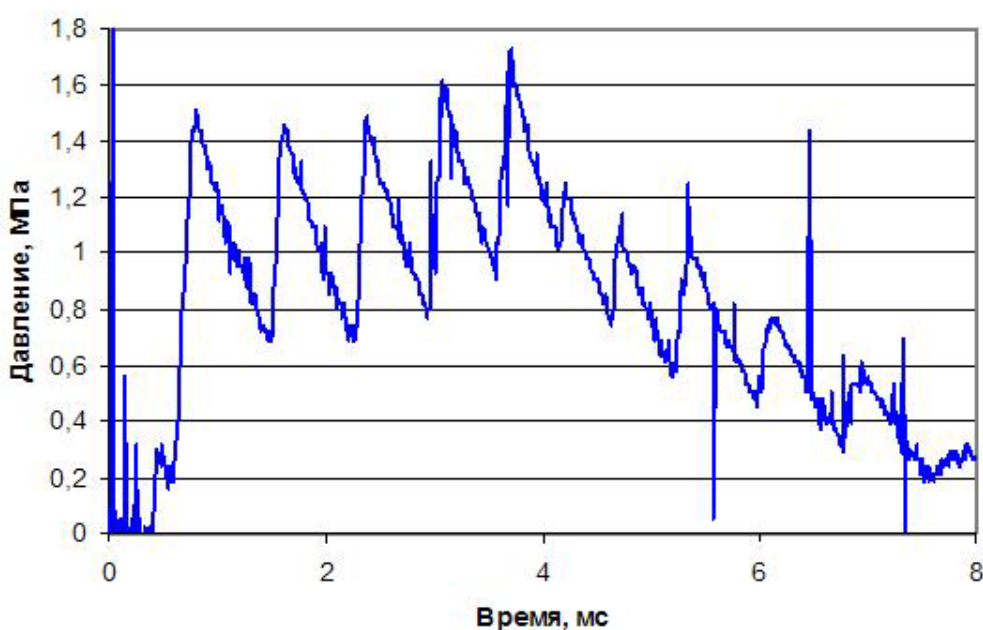


Рисунок 2 – Давление в ТМ вблизи нижнего фланца

После разряда в ТМ в азотной «подушке» устанавливалось избыточное давление на уровне 10-50 кПа, которое пропорционально объему выделившихся газов при разложении ТМ. Процесс разложения ТМ в разрядах принято характеризовать коэффициентом газообразования V_g , который представляет собой отношение объема выделившихся газов к энергии ДР. По нашим данным, $V_g = 0,11$ л/кДж.

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 $\cong 2$ МПа. При характерной скорости границы раздела «жидкость-азот» 10-20 м/с давление в парогазовом пузыре должно быть 5 - 10 МПа.

3. Бездуговой источник импульсного давления (БИИД)

Результаты исследований ДР определили требования к бездуговому источнику импульсного давления (БИИД), 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 своих экспериментах мы использовали ВМ типа пороха, который сгорает значительно медленней, чем тротил. Теплота сгорания выбранного ВМ составляет 3,8 кДж/г, удельное газообразование - 0,9 л/г.

Генератор СПГ представлял собой камеру высокого давления, из которой через сопло Лавалья истекали продукты горения ВМ. Величиной и длительностью импульса давления можно была 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, 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 для моделирования воздействия ДР на корпус ВМЭО.

На рис. 3 представлен БИИД на энергию 5 МДж перед проведением контрольных испытаний.



Рисунок 3 - Бездуговой источник импульсного давления на энергию 5 МДж

Бездуговой источник импульсного давления может быть использован для решения целого ряда задач, направленных на повышение взрывобезопасности ВМЭО, а именно:

- проведение испытаний серийных образцов ВМЭО;
- проверка эффективности работы взрывозащитных систем и устройств;
- проработка новых конструкций ВМЭО, имеющих более высокий уровень взрывобезопасности, и проведение типовых испытаний;
- получение исходных данных для разработки и верификации численных методов расчета перспективных конструкций ВМЭО и систем защиты от взрыва.

4. Особенности взрывного разрушения трансформаторов

Анализ опубликованных данных показывает, что в силовых трансформаторах наиболее уязвимыми элементами, в которых возникают внутренние КЗ, являются высоковольтные вводы, маслonaполненные кабельные короба и устройства РПН. Дуговой разряд 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. В результате действия пондеромоторных сил и конвекции ДР непрерывно и хаотически перемещается по внутренним поверхностям трансформатора. Так как характерная скорость движения ДР – порядка 10 м/с, а время его «жизни» - $\cong 50$ мс, то площадь поверхности трансформатора, подвергнутой воздействию дуги, составляет $\cong 0,1$ м². Поэтому ДР перемещается внутри объема порядка 10-30 л. Этот факт поясняет, в частности, почему, несмотря на высокую мощность ДР, внутри ВМЭО не возникают ударные волны.

После возникновения КЗ корпус трансформатора является одним из электродов дугового разряда. 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 волны максимального расстояния между противоположными стенками трансформатора. Для измерительных трансформаторов класса напряжений до 330 кВ с размером бака порядка 0,5 м время выравнивания давления составляет $\cong 1$ мс, то есть много меньше времени горения ДР. В распределительных трансформаторах VII габарита время установления давления составляет $\cong 15$ мс. Это означает, что внутри больших трансформаторов во время горения ДР может существовать 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 («раздуваться») сравнительно равномерно по всей поверхности. Повреждения именно такого характера были зафиксированы при наших испытаниях измерительных трансформаторов [6].

В трансформаторах с большими габаритами разрушения, как правило, носят локальный характер, при котором площадь поврежденной поверхности составляет менее 10 % от всей площади внешней поверхности трансформатора. Пример подобного взрывного разрушения трансформатора показан на рис. 4.



Рисунок 4 - Трансформатор на ПС в Западной Сибири после взрыва

Предельное избыточное давление, которое способен выдержать корпус трансформатора, зависит от его конструкции, места возникновения КЗ и длительности импульса. В соответствии с общими требованиями к трансформаторам деформация их корпусов должна оставаться в упругой зоне при избыточном статическом давлении 0,05 МПа. При избыточном статическом давлении свыше 0,2 МПа имеет место значительная

пластическая деформация. При динамическом нагружении корпуса трансформатора можно ожидать взрывного разрушения, если избыточное давление свыше 0,5 МПа будет удерживаться более 5 мс.

По-видимому, наиболее вероятные условия для взрыва трансформатора реализуются в диапазоне 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. Это обстоятельство приводит к уменьшению скорости газообразования в ДР и снижению темпа роста давления. Во-вторых, к этому моменту времени начинает сказываться увеличение внутреннего объема бака трансформатора вследствие деформации стенок под действием высокого давления. Этот дополнительный объем частично скомпенсирует рост давления из-за разложения ТМ.

На основании вышеизложенного 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 трансформатора на уровне 0,3-0,5 МПа.

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

5. 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 внутреннего КЗ. Эффективность работы системы защиты можно оценить из отношения:

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

Величина k , которую можно назвать параметром надежности системы защиты, представляет собой отношение дополнительного объема, которое может занять ТМ, и объема газов, выделившихся в результате разложения ТМ в дуговом разряде. Можно ввести два характерных значения параметра надежности системы защиты k_1 и k_2 в соответствии со следующим определением:

- при $k > k_1$ деформация бака ВМЭО является упругой, и оборудование является не только взрывобезопасным, но и взрывозащищенным;
- при $k < k_2$ можно ожидать взрывного разрушения бака;
- при промежуточных значениях параметра надежности ($k_2 < k < k_1$) должна происходить значительная пластическая деформация корпуса.

Ориентировочно можно принять, что характерные значения параметра надежности равны $k_1 \cong 0,7-0,8$ и $k_2 \cong 0,1-0,3$.

В литературе обсуждаются два метода создания дополнительного объема для ТМ. Первый метод основан на покрытии внутренней поверхности трансформатора демпферным пористым материалом [7]. Предполагается, что под действием высокого давления пористый материал сожмется, появится свободный объем, который заполнится расширяющимися ГПРИ. Это ограничит рост давления внутри корпуса. 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. До настоящего времени этот метод защиты еще не прошел испытаний и не внедрен на практике.

Второй метод защиты можно назвать методом «разрушаемой мембраны». Суть этого метода состоит в установке на корпусе ВМЭО защитных мембран, которые разрушаются под действием импульсного давления ДР, и через которые ТМ вытекает в специальную емкость [8]. Считается, что таким образом можно удерживать давление в баке ВМЭО в допустимых пределах. Второй метод защиты используется достаточно широко, например, в системе *Transformer Protector* фирмы *SERGI*.

Ниже представлено краткое описание испытаний описанных выше систем защиты.

При экспериментальной проверке этого метода «*пористых покрытий*» мы использовали 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.

В ходе испытаний крышку бака подняло на 0,8 м, а из 24 крепежных болтов уцелело только 3. После эксперимента выяснилось, что один из краев крышки выгнуло на 50 мм, пенопласт раскрошило на мелкие фракции. Этот эксперимент показал, что пористая стенка не защищает корпус ВМЭО от импульса высокого давления. Подобный результат можно считать ожидаемым. Действительно, чтобы рассматриваемая система защиты оказалась эффективной, необходимо, чтобы за время 3-5 мс, то есть за то время, в течение которого происходит нарастание давления в жидкости, увеличение объема, доступного для жидкости, 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 размерах защищаемого объекта - порядка 0,1 м.

По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод о недостаточной эффективности данного метода. Это утверждение можно проиллюстрировать следующими оценками. Если характерный размер бака трансформатора a , то при облицовке всей внутренней поверхности трансформатора демпферным покрытием с максимальным сжатием h возможное увеличение доступного объема масла составит порядка:

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

Под действием импульсного давления пористое покрытие будет равномерно сжиматься только при размере бака до $\cong 0,5$ м. Принимая для оценок, что $a \cong 0,5$ м и $h \cong 0,02$ м, из (2) находим, $\Delta V \cong 30$ л. Этого может оказаться достаточным, чтобы защитить трансформатор от взрыва при энергии дуги порядка 0,5 МДж ($V_g \cong 55$ л).

При увеличении размера бака трансформатора после возникновения КЗ эффективно может сжиматься покрытие лишь вблизи места возникновения КЗ общей площадью порядка 1 м². В этом случае дополнительный объем ΔV составит $\cong 20$ л. При энергии ДР $Q_a \cong 1$ МДж ($V_g \cong 110$ л) эффективность такой системы защиты составит $k \cong 0,2$, т.е. даже при сравнительно небольшой энергии ДР можно ожидать взрывного разрушения бака.

Резюмируя, пористые покрытия, которые сжимаются под действием импульсного давления порядка 0,3-0,5 МПа, и имеющие эффективный модуль Юнга порядка 0,5 МПа, могут представлять интерес для использования в системах защиты от взрыва трансформаторов с размером бака до 0,5 м, если ожидаемая энергия ДР не превышает 0,5 МДж. При этом материал пористого покрытия должен сохранять свои свойства в условиях длительной эксплуатации.

На рис. 5 приведен эскиз макета ВМЭО, на котором проверялся данный метод «разрушаемой мембраны». Макет ВМЭО имел вид цилиндрической емкости диаметром 1,4 м, которая 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 были установлены бетонные блоки массой 70 кг, которые имитировали обмотку трансформатора. Область воздействия БИИД находилась между бетонными блоками и крышкой на расстоянии 0,2 м от отверстия в ней – напротив датчика давления ДД2. Датчик давления ДД1 определял давление в воздушной полости за мембраной, датчики давления ДД3 и ДД4 измеряли давление в жидкости в дальней зоне действия БИИД. Проводилась скоростная съемка процесса импульсного воздействия на корпус ВМЭО. Энергия импульса высокого давления было около 1 МДж, длительность импульса – 50 мс.

Контактный датчик, установленный на мембране, зафиксировал, что ее разрыв произошел примерно через 3 мс после запуска БИИД. Скорость истечения воды через мембрану, рассчитанная по изменению давления воздуха в полости за мембраной, достигала 20 м/с. Максимальное давление в

жидкости составило 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, бетонные блоки при этом сместились на 50 мм. В этом опыте были созданы оптимальные условия для обсуждаемого метода защиты: тонкая мембрана большого диаметра была установлена прямо напротив эпицентра роста давления. Однако обсуждаемый метод защиты не оказался достаточно эффективным, т.к. не защитил корпус бака от значительной деформации.

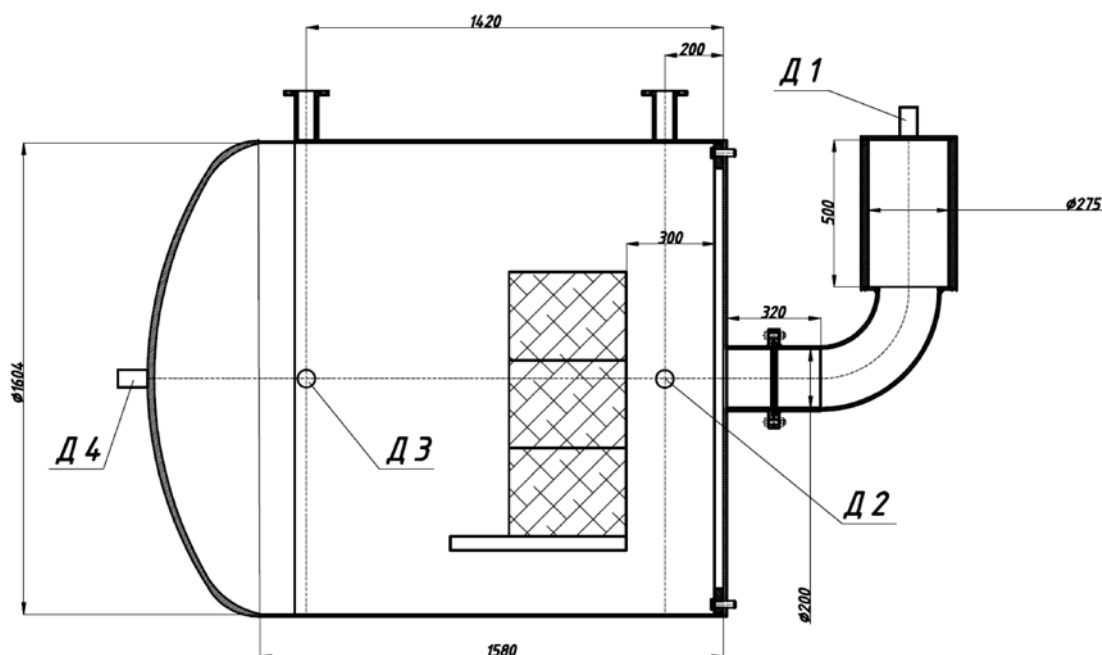


Рисунок 5 - Макет ВМЭО для испытания системы защиты в виде разрывной мембраны

Система защиты бака от деформации при взрыве, приведенная на рис. 5, представляет собой упрощенный вариант системы *Transformer Protector (TP)* фирмы *SERGI*. Эта система защиты в последние годы поставляется на объекты энергетики России, однако опыт ее эксплуатации нельзя признать обнадеживающим. Так 22 сентября 2009 г. на ПС «Машук» в результате внутреннего КЗ произошло взрывное повреждение корпуса автотрансформатора АТ-1 – 330 кВ, на котором была установлена система *TP*. Своё объяснение причин неудачной работы системы *TP* в этой аварии специалисты фирмы *SERGI* изложили в отчете [9]. По данным этого отчета во время аварии амплитуда тока составляла 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, выделившаяся в ДР, была около 11 МДж. Это значение напряжения на ДР, полученное без учета падения напряжения на индуктивном сопротивлении, представляется завышенным. По нашим оценкам, напряжение на ДР было заметно меньше,

так что полная энергия ДР была около 4 МДж. При такой энергии Q_a объем ГПРИ составляет около $0,45 \text{ м}^3$.

По данным [9] разрывная мембрана диаметром 8 дюймов ($\cong 200 \text{ мм}$) разрушилась через $\cong 4,5 \text{ мс}$ после возникновения КЗ при избыточном давлении $0,08 \text{ МПа}$. Через образовавшееся отверстие произошел сброс части ТМ, что обеспечило через 112 мс «депрессюризацию» бака трансформатора. Пиковое давление внутри бака достигало $0,6 \text{ МПа}$. По мнению авторов отчета [9] хотя система ТР и не защитила корпус ВМЭО от взрывного разрушения, но предотвратила возникновение пожара. Однако данные, приведенные в отчете [9], заставляют усомниться в этом выводе. Из этих данных следует, что максимальная скорость течения масла через разрушенную мембрану не превышала 20 м/с . Как показывают расчеты на основании приведенных в отчете [9] значений скорости потока ТМ, через диафрагму за время горения дуги через нее протекло менее 25 л ТМ . Поэтому коэффициент надежности системы защиты из (1) составляет $k \cong 0,05$, так что ТР и не могла защитить бак ВМЭО от взрывного разрушения. Что касается отсутствия пожара, то вероятность его возникновения после взрыва, как отмечалось выше, не превышает 15% , и тот факт, что не произошло воспламенение, нельзя ставить в заслугу системе ТР, тем более что энергия Q_a была сравнительно невелика.

6. Испытания системы динамической защиты

Проведенный анализ показывает, что известные системы защиты ВМЭО от взрыва не являются достаточно эффективными и необходима разработка новых систем защиты. В данном разделе кратко описаны результаты испытаний системы динамической защиты (СДЗ), разработанной в Объединенном институте высоких температур РАН. Основным элементом СДЗ являются подвижные подпружиненные блоки (рис. 6) с общей площадью порядка 1 м^2 , которые устанавливались на боковой поверхности корпуса трансформатора вблизи наиболее вероятных мест возникновения КЗ. Максимальное перемещение блоков под действием импульсного давления составляло $\cong 0,3 \text{ м}$. Защита высоковольтных вводов осуществлялась с помощью специальных диафрагм.

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

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 экспериментов 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.



Рисунок 6 - Система динамической защиты (рабочий клапанный блок без кожуха)



Рисунок 7 - Автотрансформатор с СДЗ перед испытаниями

Основные результаты испытаний:

- максимальное давление в макете автотрансформатора 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 подвижных блоков в СДЗ возрастает с ростом энергии БИИД и при энергии 3 МДж максимальная скорость блоков 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, защищает 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 может быть увеличена на 30–50 %, если устанавливать системы динамической защиты на обеих сторонах трансформатора и на всех высоковольтных вводах.

ВЫВОДЫ:

1. Исследованы течения трансформаторного масла и воды под действием дугового разряда и струи пороховых газов. Показано, что течения исследованных трансформаторного масла и воды под действием дугового разряда и струи пороховых газов являются подобными при одинаковых значениях длительности и энергии воздействия.

2. Разработан бездуговой источник импульсного давления, позволяющий проводить испытания ВМЭО на взрывобезопасность и взрывозащищенность при энергии воздействия до 5 МДж.

3. Экспериментально показано, что метод защиты ВМЭО, заключающийся в покрытии внутренней стенки пористым материалом, который может сжиматься под действием высокого давления расширяющегося парогазового пузыря, не может быть эффективен для трансформаторов больших габаритов.

4. Испытания макетов защиты ВМЭО в виде «разрушаемой мембраны» показали, что они не предохраняют его корпус от значительной пластической деформации, которая может закончиться его разрушением. Коэффициент надежности такой системы защиты не превышает 0,1.

5. Описана система динамической защиты ВМЭО от взрыва. Испытания этой защиты, установленной на автотрансформаторе мощностью 25 МВА, показали, что система динамической защиты предотвращает взрывное разрушение корпуса автотрансформатора, по крайней мере, при энергии воздействия 3 МДж.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дарьян Л.А., Аракелян В.Г. Стойкость изоляционных жидкостей к газообразованию // Электротехника.1997. № 2.- С. 45-49.
2. Foata M., Dastous J.B. «Power transformer tank rupture prevention» // Сессия CIGRE-2010. Париж. 2010. Отчет А2-102.
3. Дарьян Л.А., Дементьев Ю.А., Ефремов В.П., Полищук В.П., Шурупов А.В. Альтернативный метод оценки взрывобезопасности и взрывозащищенности высоковольтного маслонаполненного электрооборудования // ЭЛЕКТРО. 2009. № 5. с.43-46.
4. Daryan L.A., Kozlov A.V., Luzganov S.N., Povareskin M.N., Polistchook V.P., Shurupov A.V., Shurupova N.P. 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. Povareskin, 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. Дарьян Л.А., Козлов А.В., Поварешкин М.Н., Полищук В.П., Шурупов А.В. Бездуговые испытания высоковольтного маслонаполненного электрооборудования на взрывобезопасность // ЭЛЕКТРО. 2011. №5. с. 23.
7. Мишурев А.В., Казеннов В.В., Громов Н.В. Устройство защиты электрического трансформатора от взрыва и пожара при коротком замыкании. Патент RU 2334332.
8. Манье Ф. Устройство для предотвращения взрыва электрических трансформаторов. Патент RU 2263989.
9. Компания “SERGI”. Подстанция «Машук». Активация Transformer Protector 22 сентября 2009 г. Ссылка Are61rr00.03e от 09/10/09.