

П.А. Солодов

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ МЕРЫ ЕМКОСТИ XXI ВЕКА

Меры электрической емкости уже давно получили широкое распространение в качестве эталонов при проведении поверок во всем мире. Характеристики, обеспечиваемые исключительно конструктивной геометрией, высокая стабильность параметров и ряд других преимуществ делают меры емкости незаменимым инструментом в метрологии.

Сотрудники нашего предприятия более 10 лет занимаются исследованием и изготовлением высоковольтных мер емкости. На сегодняшний день мы являемся лидерами российского рынка в секторе высоковольтных образцовых мер емкости с газовой изоляцией. Высоковольтные конденсаторы марки КГИ (конденсатор газовой изоляцией) уже давно зарекомендовали себя как надежные, высококачественные приборы. Нашу продукцию много лет используют не только в России, но и в странах ближнего зарубежья. Оглядываясь назад, можно смело сказать, что за прошедшие годы проведена большая работа и достигнуты отличные результаты. Выпускаемые сегодня приборы – результат множества итераций, направленных на получение оптимального результата. Задачи, которые мы ставили себе при разработке приборов, – это создание компактных, надежных и удобных в эксплуатации приборов, соответствующих



Рис. 1. КГИ-200 на высоковольтных испытаниях



Рис. 2. Новый КГИ-10 с нулевым избыточным давлением элегаза, испытательное напряжение до 22 кВ

требованиям, предъявляемым опытом российской эксплуатации.

Почему именно газовая изоляция? Изоляция высоковольтных мер емкости, как, впрочем, и других высоковольтных измерительных приборов, должна обеспечивать минимальные значения угла диэлектрических потерь. При малых габаритах это можно обеспечить только применением однородного диэлектрика, в качестве которого может выступать жидкость или газ. Наибольшее распространение в качестве внутренней изоляции высоковольтных аппаратов получили трансформаторное масло и элегаз. Масло, естественно, имеет гораздо больший вес, и основным его преимуществом перед газовой изоляцией являются хорошие теплоотводящие характеристики, что актуально для трансформаторов напряжения. Элегаз, в своем роде, уникальный диэлектрик. Известный еще в XIX веке, широкое применение этот газ нашел только во второй половине XX века. Химическая формула элегаза – SF_6 . Несмотря на наличие в молекуле фтора, элегаз абсолютно безвреден. Это химически инертный газ, нетоксичный, негорючий, не имеет цвета и запаха. Уникальность элегаза заключается в том, что его электрическая прочность уже при давлении в 3 атм. выше, чем у трансформаторного масла, и более чем в 2 раза превышает электрическую прочность воздуха при том же давлении. Благодаря этому габариты высоковольтных аппаратов с элегазовой изоляцией значительно меньше аналогичных по характеристикам аппаратов с другими типами изоляции. Повышая давление элегаза, можно добиться рекордной электрической прочности. Единственное ограничение – элегаз относительно легко сжижается. При давлении в 10 атм. элегаз начинает конденсироваться уже при температуре около $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Плотность газа при этом снижается, и происходит уменьшение электрической прочности изоляции. При давлении в 5 атм. конденсат образуется при температуре около $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рис. 3. КГИ-230 на испытаниях



Рис. 4. Популярный советский конденсатор Р51 (испытательное напряжение 15 кВ) и конденсаторы КГИ-100 (испытательное напряжение 125 кВ)



Рис. 5. Конденсаторы КГИ-10, 35, 200, 200

Насколько надежны приборы с элегазовой изоляцией? Несмотря на широкое распространение в мире высоковольтных мер емкости с элегазовой изоляцией, многих покупателей до сих пор смущает наличие внутри прибора «непонятного» газа под давлением. При разработке всех приборов мы руководствовались тем, что приборы не будут попадать под «сосуды под давлением» и их обслуживание не должно вызывать проблем у пользователей. Практика изготовления и эксплуатации высоковольтных аппаратов с элегазовой изоляцией показывает, что добиться 100%-ной герметичности корпусов практически невозможно. Элегаз очень «текуч». Сварные корпуса, большое количество уплотнений – все это снижает надежность по герметичности. Существующие нормы для аппаратов по утечкам в любом случае подразумевают периодическое заполнение элегазом во время эксплуатации. Для образцовых конденсаторов изменение плотности элегаза – это, вдобавок, и изменение значения емкости. В своих приборах, в ущерб стоимости, мы сознательно полностью отказались от сварных и клееных соединений и за счет конструкции свели количество уплотнений к минимуму. За несколько лет нами была разработана собственная расчетная модель уплотнений, позволяющая добиться полного отсутствия утечек элегаза.

Может ли высоковольтный прибор быть компактным? Существует стереотип, что высоковольтный прибор должен иметь внешнюю изоляцию не меньше, чем на высоковольтных аппаратах или ЛЭП.

Во-первых, внешняя изоляция высоковольтных сетевых аппаратов в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями должна иметь

большую длину пути утечки, и испытательные напряжения для них значительно выше номинальных значений. Изоляция должна выдерживать значительные перенапряжения и обеспечивать работоспособность аппарата в любых погодных условиях. Дождь, снег, повышенная влажность, пыль – все это не должно стать препятствием к нормальной работе. Естественно, что требования к измерительным приборам не столь суровы.

Во-вторых, размеры изоляции определяются в первую очередь напряженностью электрического поля при максимальном напряжении. При правильной конфигурации электрического поля за счет экранов размеры изоляции могут быть снижены в разы.

Какие приборы нужны сегодня российскому потребителю? Понятно, что качество и надежность требуются всегда, поэтому поговорим о нюансах. В отличие от Европы, где широкое распространение получили закрытые комплексные распределительные устройства, в России основная часть подстанций находится на открытом воздухе и на значительном расстоянии друг от друга. Размеры самих подстанций нередко настолько огромны, что персонал старается передвигаться по территории на машине. В таких условиях измерительное оборудование постоянно приходится транспортировать, и дороги, как нам известно, попадаются разные. Это значит, что для удобства высоковольтных испытаний, приборы должны быть виброустойчивыми, легкими и компактными. Выпускаемые европейскими производителями высоковольтные приборы предназначены для использования в лабораторных условиях и не приспособлены для транспортировки.



Рис. 6. КГИ-10

Все наши приборы имеют жесткую, виброустойчивую конструкцию. Для снижения массы и инерционных характеристик конденсаторов в конструкции мы используем в основном алюминиевые сплавы.



Рис. 7. КГИ-100 и КГИ-200

Чем наши приборы лучше аналогов? Европейские приборы подобного класса имеют испытательное напряжение ниже требований ГОСТов. В своих приборах мы учли все рекомендации ГОСТов и соответственно получили большие запасы по прочности изоляции. Размеры и габариты приборов мы довели при этом до рекордно низких показателей. Так, например, высоковольтный конденсатор КГИ-100 на номинальное напряжение 100 кВ весит всего 17 кг и легко умещается в спортивную сумку.

Как нам удалось достичь таких результатов? Расчет высоковольтных электрических полей долгое время основывался на различных анали-

тических методах и эмпирических данных. Сейчас, с развитием вычислительной техники, широкое распространение получили различные численные методы расчета, позволяющие производить точные вычисления за короткий промежуток времени. Создавая первые приборы, мы прежде всего старались реальными испытаниями проверить правильность выбранных нами методик. Сложно учесть все отклонения реально изготовленного прибора от теоретической модели. Сформированная годами методика расчета электрических полей позволяет нам сегодня изготавливать новые приборы с гарантированным результатом. Благодаря оптимизации электрических полей за счет сложных геометрических переходов, мы достигли существенного снижения габаритов при сохранении испытательных характеристик. Современные методы проектирования и оптимизации помогают нам и при конструировании. Все детали и узлы конструкции проходят расчет на прочность с одновременным корректированием с целью уменьшения веса. Все наши приборы – это результат применения наукоемких технологий, закрепленных практическими испытаниями.

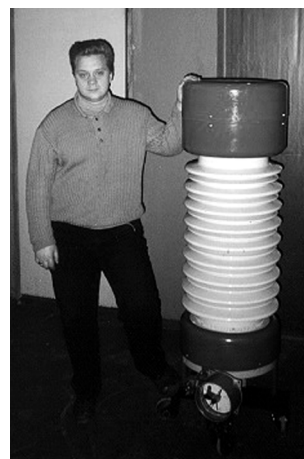


Рис. 8. Первые конденсаторы КГИ-200



Рис. 9. Использование КГИ-200 на подстанции

Основой любого высоковольтного прибора является высоковольтный изолятор. При разработке первых приборов мы брали за основу стандартные изоляторы, применяемые в высоковольтном аппаратостроении. Узкая номенклатура вы-



Рис. 10. КГИ-100 весом 17 кг



Рис. 11. КГИ-100 и КГИ-10



Рис. 12. Делитель напряжения ДНО-230

пускаемых заводами изоляторов вынуждала нас подстраивать конструкцию под тот или иной выбранный тип изолятора. При этом масса и габариты приборов оставляли желать лучшего. Для кардинального изменения ситуации нами был проведен ряд исследований и разработана собственная технология изготовления высоковольтных изоляторов. Благодаря этому решению, мы смогли разрабатывать приборы с собственным изолятором, идеально подходящим к выбранной конструкции. Если первые меры емкости мы делали с оглядкой на выпускаемые в Европе аналоги, то сейчас конструктивно наши приборы уникальны и имеют свои отличительные черты.

Что мы предлагаем сегодня? Серийно выпускаемые высоковольтные меры емкости серии КГИ имеют номинальные напряжения от 10 до 230 кВ. Поскольку мы являемся изготовителями и разработчиками, то есть возможность в кратчайшие сроки выпустить новые конденсаторы, с заданными заказчиком характеристиками. Помимо образцовых мер емкости, мы предлагаем линейку приборов, базирующихся на основе конденсаторов серии КГИ. В первую очередь это образцовые емкостные делители напряжения ДНО и эталоны для поверки трансформаторов напряжения ПТЕИ (преобразователь токовый емкостной измерительный). Измерительные преобразователи серии ПТЕИ заменяют образцовые измерительные трансформаторы напряжения, при этом масса комплекта гораздо меньше традиционных масляных трансформаторов напряжения. Так, например, масляный образцовый трансформатор напряжения класса напряжения 100 кВ весит около 500 кг, а масса аналогичного комплекта на базе конденсатора КГИ-100 менее 18 кг. При этом ниже и стоимость. Нашими специали-

стами постоянно ведутся работы по разработке новых измерительных приборов, и мы надеемся в ближайшие годы значительно расширить линейку выпускаемой продукции.

Наша фирма основана бывшими специалистами завода ОАО ВО «Электроаппарат» и Научно-исследовательского института высоковольтного аппаратостроения (ОАО «НИИВА»). Первые опытные образцы конденсаторов КГИ были изготовлены на заводе «Электроаппарат». Мы продолжаем тесное сотрудничество с этими предприятиями в области исследований и разработки высоковольтной техники. Совместно с НИИВА мы производим полный комплект оборудования для поверок трансформаторов тока и напряжения. Наши испытательные и производственные мощности позволяют нам выпускать высоковольтные приборы до класса напряжений 750 кВ и выше. Выбирая наши приборы, заказчики получают современные, не имеющие аналогов, высококачественные измерительные приборы, созданные специально для российского потребителя.

*Павел Александрович Солодов,
генеральный директор,
ООО «S&S»,
ведущий преподаватель,
кафедра «Компьютерные
технологии в машиностроении»,
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет,
г. Санкт-Петербург,
e-mail: solodoff@highvolt.ru*