

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕГАЗОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА С НОМИНАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ 110-220 КВ И ВЫШЕ

*Петухов С.В., Надеин В.Ф., Радюшин В.В., Бутаков С.В., Бабкин И.М.,
Кришьянис М.В.*

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
Архангельск*

Ключевые слова: комплектное распределительное устройство, электрическая прочность, стримеры, пробой, предел прочности, термическая стойкость.

Аннотация. В данной статье рассмотрены преимущества элегазового оборудования и так же исследованы тенденции развития и внедрения его в Российской Федерации. Необходимость замены оборудования вызвана тем обстоятельством, что устойчивое функционирование единого сетевого электроэнергетического комплекса Российской Федерации невозможно без надёжной и качественной работы распределительных электрических сетей, которые являются завершающим звеном в системе обеспечения потребителей электрической энергией и находятся в непосредственном взаимодействии с конкретным потребителем. Проектирование энергетических объектов и электрических сетей всегда являлось приоритетным направлением в оснащении не только конкретного объекта, но и всего города и страны в целом. Поэтому в настоящее время актуальна проблема повышения надёжности электроснабжения городов, посёлков, крупных промышленных предприятий. Парк электрооборудования подстанций имеет большую долю оборудования, отработавшего установленный стандартами минимальный срок службы. Износ основных производственных фондов энергосистемы европейской части России, даже в самых благополучных местах, превысил отметку 50%. При этих значениях ремонт оборудования может обходиться дороже его замены. В статье также дан подробный обзор и анализ продукции ведущих фирм мира и нашей страны в области элегазовых электрических аппаратов, из которого видны такие преимущества использования элегазового оборудования, как надёжность, компактность, безопасность. Как подтверждение этой идеи проведён анализ и расчёт экономической целесообразности разработки элегазового трансформатора. По сравнению с вариантом маслонеполненного двухкаскадного трансформатора тока на тот же класс напряжения, удалось снизить стоимость за счёт новых решений в конструкции.

COMPARATIVE ANALYSIS OF GAS-POWERED CURRENT TRANSFORMERS WITH RATED VOLTAGES 110-220 KV AND ABOVE

*Petukhov S.V., Nadein V.F., Radyushin V.V., Butakov S.V., Babkin I.M.,
Krishjanis M.V.*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk

Keywords: complete switchgear, electrical strength, streamers, breakdown, ultimate strength, thermal resistance.

Abstract. The article discusses the advantages of low-gas equipment. The article examines the trends in the development and implementation of gas-fired equipment in Russia. The need to replace the equipment is caused by the fact that the sustainable functioning of the unified grid electric power complex of Russia is impossible without reliable and high-quality operation of electrical distribution networks. Electrical grids are the final link in the system of providing consumers with electrical energy and they are in direct interaction with a specific consumer. The design of electrical networks is a priority in the power supply of the whole city and the whole country. Therefore, the problem is currently relevant of improving the reliability of power supply to cities, towns, and large industrial enterprises. The substation's electrical equipment fleet has a large proportion of equipment that has

completed the minimum service life set by the standards. The depreciation of production assets in Russia's energy systems has exceeded 50%. At the same time, repairing equipment is more expensive than replacing it. The article also provides a detailed overview and analysis of the products of the world's leading companies and of Russia in the field of gas-free electrical devices. This shows the advantages of using low-gas equipment – reliability, compactness, safety. The article analyzes and calculates the economic feasibility of development of a gas-free transformer. Due to new design solutions it was possible to reduce the cost of the transformer compared with the option of an oil-filled two-stage current transformer of the same voltage class.

Значительную часть высоковольтного, высокотехнологичного электротехнического оборудования в конце 1990 – начале 2000 гг. заняли производители зарубежных стран. В настоящее время энергетическая отрасль требует серьезной технологической модернизации в связи с импортозамещением. Важную роль в линейке оборудования занимают измерительные элегазовые трансформаторы тока и напряжения классов 110 кВ и выше.

Количество трансформаторов тока и напряжения (в дальнейшем ТТ и ТН) с элегазовой изоляцией на объектах электроэнергетики увеличивается, чему способствуют отсутствие пожароопасного масла, взрыво- и пожарозащищенность при аварийных ситуациях, меньшие габариты; техническое обслуживание сводится к контролю давления элегаза в ТТ [1].

Но имеется ряд недостатков, которые требуется учитывать при разработке аппаратов с элегазом:

- определение величины изоляционных промежутков, достижение возникновения частичных разрядов, для предотвращения распада элегаза с возникновением химически активных составляющих;
- герметичность соединений для обеспечения газоплотности при указанных диапазонах температуры окружающего воздуха.

Рассмотрим сравнительные технические характеристики импортных и отечественных ТТ и трудности, с которыми сталкивается отечественная промышленность при проектировании трансформаторов тока высоких напряжений [2].

Измерительные трансформаторы тока марки TG на напряжение от 72,5 до 550 кВ производство фирмы ABB.

Известно, что внутри газонаполненного корпуса аппарата при коротком замыкании или прямом ударе молнии возникает и горит электрическая дуга, величиной тока до нескольких десятков килоампер. Это приводит к резкому повышению давления внутри корпуса и, как следствие, взрыву. Поэтому к любому газонаполненному электроэнергетическому оборудованию предъявляется одно из основных требований по безопасности – взрывобезопасность. Для этого разработчики элегазового оборудования вводят в конструкцию аппаратов различные клапаны и мембраны, которые обеспечивают сброс давления при его недопустимом повышении. В конструкции TG имеется специальная мембрана, которая разрывается при превышении давления внутри корпуса более 10 атмосфер. В технических условиях на трансформатор, согласованных с РАО “ЕЭС России”, записано, что он должен быть взрывобезопасным при горении внутренней электрической дуги короткого замыкания в течение 0,3 секунд.

Компания «КВК Электро» – является официальным представительством корпораций "ELEQ" и «RITZ» расположенных на территории Германии. «КВК Электро» поставляет на российский рынок измерительные трансформаторы номинальные напряжения которых от 0,66 кВ до 750 кВ. Корпорация «RITZ-Messwandler» – имеет мировой опыт производства измерительных трансформаторов с 1945г. Они поставляют на Российский рынок высоковольтные измерительные трансформаторы типа SKF.

Обмотка трансформаторов тока в первичной сети ТТ серии SKF (аналоги – ТГФ, ТОГ, ТГ, SAS) выполнена в виде одной, двух или четырех токоведущих шин, которые проходят через тороидальные сердечники с вторичными обмотками. Трансформаторы тока могут иметь несколько (до восьми) тороидальных ленточных сердечников, которые независимы друг от друга. Для измерений используются обмотки следующих классов точности 0,1; 0,2; 0,2S; 0,5; 0,5S; 1 и 3. Для защиты используются классы точности 5P, 10P, TPS, TPX, TPY и TPZ.

Элегаз является высоковольтной изоляцией внутри трансформатора тока внутри объема. Применяется специальная система уплотнения, которая позволяет обеспечить утечку газа не более 0,5% в год. Трансформаторы взрывозащищенного исполнения, что достигается применением предохранительной мембраны.

В таблице 1 приведен сравнительные основные характеристики ТТ 110 кВ зарубежных производителей.

Табл. 1. Сравнительные характеристики трансформаторов тока напряжением 110 кВ

Наименование параметра		TG145	SKF	SAS
$U_{ном}$	кВ	110	110	110
$U_{раб.макс.}$	кВ	126	126	126
$I_{ном.первич.}$	А	5-3000	100-5000	до 4000 А
$I_{ном.втор.}$	А	1; 5	1; 5	1; 5
Ток термической стойкости	А	до 63	-	
Метрологические характеристики		0,2S; 0,2; 0,5S; 0,5; 10P; 10PR; 5P; 5PR; TPY; TPZ	0,2; 0,2S; 0,5; 0,5S; 1,0	0,2; 0,2S; 0,5; 0,5S; 1,0
$S_{ном}$	В·А	0,5-100	5 - 61	
Класс безопасности		2-30	5 - 11	
$L_{утечки}$	см/кВ	2,26; 2,5; 3,1		
Тип изоляции		Фарфор/ Полимер		Композит
Категория размещения и климатическое исполнение	°С	УХЛ1 (-60/+40)		
Избыточное рабочее давление газа при температуре +20°С	МПа	0,55		

Отечественной промышленностью для напряжения 110 кВ выпускаются трансформаторы тока марки ТГФ-110 (см. табл. 2), которые по своим свойствам и техническим характеристикам в основном соответствует образцам импортных производителей [3].

В отличие от зарубежных аналогов, в отечественных аппаратах для внутренней изоляции трансформаторов тока было решено не применять твердый диэлектрик, что позволило расширить диапазон температуры эксплуатации до -55°C без добавления примесей в элегаз.

Табл. 2. Технические характеристики трансформаторов тока марки ТГФ-110

Характеристики	Значения			
	Многовитковый ТГФ		Двухвитковый ТГФ с переключением	
$U_{ном}$, кВ	110			
$U_{раб.макс}$, кВ	126			
$f_{раб}$, Гц	50			
$I_{ном.первич.}$, А	100, 150	200, 300, 400	300-600, 600-1200	750-1500; 1000-2000
$I_{ном.втор.}$, А	1 и 5			
Ток 3-х секундной термической стойкости, А	6	11-17-22	30-50	50-60
Метрологические характеристики	0,2S-0,2; 0,5S-0,5			
$S_{ном}$, В·А	2-30			
Класс безопасности	5-11			
Класс точности обмоток для защиты	5P-10P			
Климатическое исполнение	У1/УХЛ1			
$L_{утечки}$, см/кВ	2,26			

Трансформатор тока имеет верхнее расположение вторичных обмоток, закрепленных на эпоксидной распорке-изоляторе с фланцем, и на котором крепится шарообразный корпус и фарфоровая крышка.

В качестве внешней изоляции применена фарфоровая крышка с армированными фланцами. Шарообразный корпус позволил оптимизировать объем элегаза, т.к. алюминиевый экран обмоток имеет форму конгруэнтную форме корпуса.

В двухвитковом варианте витки выполнены в виде медной шины, в многовитковом варианте первичная обмотка выполнена гибким проводом.

Для того чтобы иметь более равномерное намагничивание магнитопроводов первичным потоком, половина витков первичной обмотки располагается на поверхности шарообразного корпуса с одной стороны и половина витков на диаметрально противоположной стороне корпуса.

Конструктивно первичная обмотка состоит из нескольких одинаковых проводников с наконечниками. На корпусе имеется два переключателя, с помощью

которых можно получить необходимое значение коэффициента трансформации для трансформаторов тока. Провода от вторичных обмоток размещены в алюминиевой трубе, расположенной по центру фарфоровой крышки.

На фланце основания располагается эпоксидный блок вторичных выводов элегаз – воздух.

На нижнем фланце также имеется сигнализатор давления с температурной компенсацией и вентиль для подкачки элегаза после монтажа трансформатора тока на подстанции или, при необходимости, во время эксплуатации. В последнее время трансформатор тока ТГФ-110 выпускается под маркой ТГФМ.

В линейке трансформаторов тока имеются элегазовые трансформаторы тока напряжением 220-330 кВ и выше, идут научные разработки по повышению качества и эксплуатационных свойств изделий, например, трансформаторов тока 500 кВ, за счет новых материалов и компоновки. По этой теме ведутся научные разработки. Разработка конструкции трансформатора тока ТГФ-500 потребовала проверки и подтверждения расчетами заявленных характеристик.

В процессе разработки трансформатора тока ТГФ-500 выполнялся расчёт электрического поля во всех потенциально опасных промежутках. Форма и размеры внутренних элементов конструкции обеспечивают необходимую электрическую прочность внутренней изоляции при всех нормируемых видах воздействий в соответствии с ГОСТ 1516.3, в том числе при воздействии испытательного напряжения промышленной частоты, импульсах грозовых и коммутационных перенапряжений. В качестве примера расчёта электрического поля на рисунке 1 приведена качественная картина эквипотенциалов внутри и снаружи высоковольтной оболочки. Выполненные расчёты позволили оптимизировать конструкцию и достичь максимальной электрической прочности высоковольтной изоляции, надёжности работы конструкции в целом.

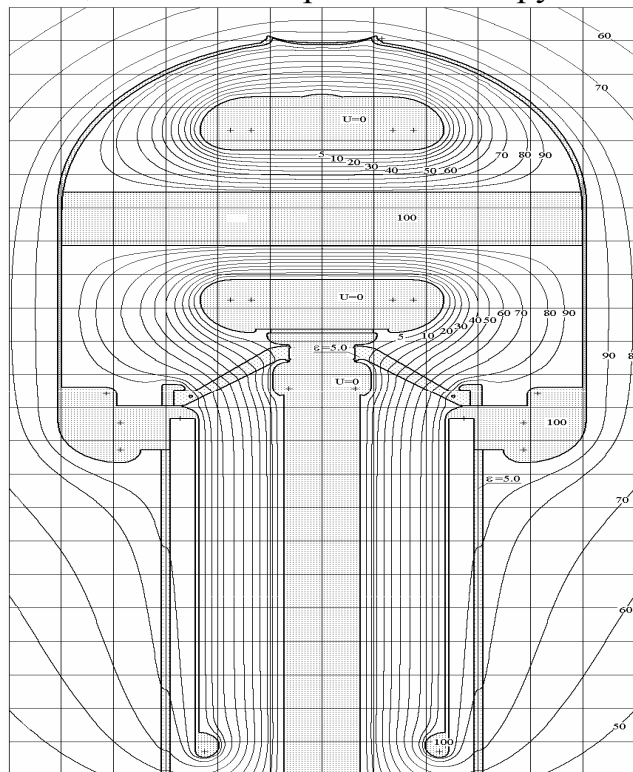


Рис. 1. Качественная картина эквипотенциалов внутри и снаружи высоковольтной оболочки

В настоящее время большинство крупных электрических фирм занимаются разработкой и выпуском высоковольтного оборудования с использованием SF_6 в основном на высокие классы напряжения. У оборудования, работающего на элегазе, более высокая отключающая способность. Отпадает необходимость в компрессорных станциях и прочем оборудовании для получения сжатого воздуха. Применение шестифтористой серы в качестве изоляции в электрических аппаратах значительно уменьшает их размеры, снижает материалоемкость, повышает надежность и долговечность их работы при общем росте показателей технических характеристик. Внедрение элегазовых выключателей снижает капитальные затраты на строительство и общие эксплуатационные затраты. Благодаря этому удаётся конструировать целые аппаратные комплексы в виде единой подстанции, названные элегазовыми комплектными распределительными устройствами – КРУЭ. Причём, отдельные элементы, собранные в виде элегазовых ячеек разных конструкций, позволяют выполнить подстанцию практически по любой силовой схеме.

Весьма важной характеристикой изолирующей среды в высоковольтном оборудовании является теплоотводящая способность – свойство передавать тепло в менее нагретую область внутри и снаружи конструкции. Известно, что количество тепла, необходимое для нагревания единицы объёма газа при прочих равных условиях в основном зависит от произведения удельной теплоемкости (c) газа и его плотности (p). Несмотря на то, что теплопроводность и теплоёмкость элегаза в газообразном состоянии ниже, чем у воздуха, из-за более высокой из-за плотности его теплопередающие свойства гораздо выше.

Условия работы высоковольтного элегазового оборудования в средних широтах при очень низких температурах окружающего воздуха приводят к необходимости поиска путей новых конструктивных типоразмеров [4].

При рабочих давлениях, при которых обеспечивается необходимая изоляционная и коммутационная способность аппаратов, элегаз при низких температурах, в соответствии с диаграммой состояния (рис. 1), переходит из газообразного в жидкое состояние, а при температуре ниже тройной точки ($-50,8^{\circ}\text{C}$) в твёрдое состояние. Таким образом происходит снижение плотности газообразной фазы, а следовательно, снижение изоляционной и коммутационной способности аппаратов. Наиболее простым решением проблемы было бы осуществлять подогрев элегаза. Недостатками являются удорожание конструкции и усложнение эксплуатации [5].

Ещё одним решением является снижение давления элегаза. Но для выключателей, в которых коммутирующая способность зависит от давления в дугогасительной камере, это удалось достичь только при напряжении 110 кВ. Снижение давления ухудшает коммутирующие свойства.

Наконец, возможен третий вариант конструктивного исполнения элегазового оборудования, а именно, с использованием смесей элегаза с другими газами, сжижающимися при более низкой температуре, например, с добавкой к элегазу до 50% азота (N_2) или тетрафторметана (CF_4). Такие смеси значительно дешевле и меньше влияют на экологию. Зарубежные фирмы уже используют эти газы в элегазовых аппаратах, предназначенных для работы в районах с холодным климатом, например в Канаде.

По изоляционной способности каждый из этих газов намного хуже элегаза (в 2,3-2,5 раза). Вместе с тем смесь элегаза с азотом, даже при большом содержании азота, благодаря «синергетичности» этих газов имеет достаточно высокую электрическую прочность [6]. При уменьшении парциального давления N_2 электрическая прочность смеси падает медленнее, чем концентрация азота, в отличие от смеси SF_6-CF_4 , и составляет для смеси 40% элегаза и 60% азота около 85% от электрической прочности чистого элегаза. Более того, смесь SF_6-N_2 при равном давлении менее чувствительна к микродефектам на поверхности изоляции, чем чистый элегаз [7].

Использование смеси SF_6-N_2 приводит, во-первых, к сокращению расхода дорогостоящего элегаза, а во-вторых, к уменьшению выброса его в атмосферу. Выброс азота не влияет на экологию. Вместе с тем CF_4 , так же, как и SF_6 , во-первых, дорогой газ, а во-вторых, является тепличным. Поэтому использование смеси SF_6-CF_4 , с точки зрения стоимости газа и экологии, не даёт никакого преимущества по сравнению с чистым элегазом.

Список литературы

1. Борин В.Н., Ковалев В.Д. Состояние и перспективы развития элегазового коммутационного оборудования // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2013. – № 2. – С. 32-36.
2. Давлетова А.Р. Сравнительный анализ технических характеристик современного элегазового электрооборудования подстанций // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей победителей IV Международной научно-практической конференции. – Пенза: Наука и Просвещение, 2016. – С. 86-89.
3. Хамидуллин Р.Р. Перспектива развития измерительных трансформаторов тока 110-500 кВ // Тинчуринские чтения: Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. – Т. 1, ч. 1. – С. 136-141.
4. Сорокин Д.А., Лопатин В.П., Ишмухамедов И.К. Об особенностях эксплуатации элегазового электрооборудования в условиях холодного климата // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). – Уфа: ООО Научно-инженерный центр "Энергодиагностика", 2018. – С. 251-254.
5. Зацаринная Ю.Н., Габбасов М.Ф., Зорин А.П. Элегаз и его применение в электроэнергетике // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, №6. – С. 137-139.
6. Балобанов Р.Н., Лопухова Т.В., Зацаринная Ю.Н. Влияние времени эксплуатации элегазового оборудования на состояние изоляции // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 16. – С. 122-124.
7. Аракелян В.Г. Физическая химия элегазового электротехнического оборудования. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 300 с.

Сведения об авторах:

Петухов Сергей Васильевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники;
Надеин Валерий Феодосиевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники;
Радюшин Вячеслав Витальевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники;
Бутаков Сергей Владимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники;
Бабкин Игорь Михайлович – к.х.н., доцент кафедры электроэнергетики и электротехники;
Кристьянис Майя Волдемаровна – старший преподаватель кафедры электроэнергетики и электротехники.