

Трансформаторы с элегазовой изоляцией впервые были разработаны в США фирмой Вестингауз в конце 50-х годов. Силовые трансформаторы напряжением до 138 кВ и мощностью до 40 МВ - А были разработаны в 60-х годах [1]. В Европе элегазовые трансформаторы появились в середине 60-х годов. Однако дальнейшего развития ни в США, ни в Европе они не получили. В Японии первый трансформатор с элегазовой изоляцией напряжением 69 кВ и мощностью 3 МВ • А был изготовлен в 1969 г. Возрастающие требования пожаробезопасного оборудования и запрет применения негорючих изоляционных жидкостей на основе трихлордифенила в 1972 г., стимулировали развитие элегазовых трансформаторов (ЭТ). Их производство постоянно увеличивалось с началом поставок элегазовых трансформаторов напряжением 69 кВ мощностью 3 и 10 МВ-А для комплектных элегазовых подстанций в 1979 г. В 1991 г. элегазовые трансформаторы составляли свыше 8 % в общем производстве силовых трансформаторов. Требования пожаробезопасности мощных высоковольтных подстанций, расположенных в жилых районах могут быть выполнены с установкой элегазовых трансформаторов. Такой трансформатор напряжением 275 кВ мощностью 300 МВ - А впервые был изготовлен в 1990 г. Применение силовых трансформаторов с элегазовой изоляцией в России началось в 2012 г., компания ЗАО «ИСК «Союз-Сети» завершила работы по монтажу двух элегазовых трансформаторов 220/20 кВ мощностью по 63 МВА производства Toshiba (Япония) на строящейся подземной подстанции 220 кВ «Сколково»[2]. Работы были осуществлены под руководством представителей шеф-инженеров от фирмы Toshiba. Эти трансформаторы специально разработаны для использования на подземных энергообъектах. Ранее подобные автотрансформаторы в России не применялись. Конструктивные особенности элегазовых трансформаторов можно описать следующим образом [3]. Система охлаждения

В таблице 1 приведены основные физические характеристики элегаза, воздуха и масла.

Основным значимым для трансформатора различием элегаза, Таблица 1- Физические свойства элегаза, воздуха и масла

Характеристики	Элегаз	Воздух	Масло
Плотность, кг/см <sup>3</sup>	0,125	1,2	0,85
Вязкость, мЗ/с	0,153 · 10 <sup>-4</sup>	0,157 · 10 <sup>-4</sup>	0,188 · 10 <sup>-4</sup>
Динамическая вязкость, мЗ/с	0,0249 · 10 <sup>-4</sup>	0,0116 · 10 <sup>-4</sup>	0,156 · 10 <sup>-4</sup>
Тепловая проводимость, ккал/Дм · ч · 0С	0,0115	0,0126	0,0221
Удельная теплоемкость, ккал/Дм · ч · 0С	0,144	0,145	0,246
Число Прандтля	0,669	0,669	0,735
Диэлектрическая постоянная	1	1	2,3
Электрическая прочность (относительно масла)	Около 1/2	Около 1	Около 1/4
Отношение теплоемкостей равных объёмов	Около 1/440	Около 1/200	Около 1/140
Отношение теплопроводности для потоков с одинаковой скоростью	Около 1/15	Около 1/7,5	Около 1/33
Горючесть	негорючее	горючее	горючее
Разлагаемость	Не разлагается в присутствии кислорода	Окисляется	Окисляется

воздуха и масла является теплопередающая способность на единицу объема. Например, при рабочем давлении газа 1,2

кгс/см<sup>2</sup> теплопередающая способность элегаза составляет 1/200 от масла (плотность 1/65, удельная теплоемкость 1/3). Для обеспечения требуемого отвода тепла в элегазовых трансформаторах должна быть более совершенная система охлаждения. Например, охлаждающие каналы в обмотках должны увеличить циркуляцию газа, а изоляция провода должна быть выполнена из высокотемпературного изоляционного материала, такого как PET (полиэтилен терефталат) или PPS (полиэтилен сульфид). Изоляция в элегазовом трансформаторе для витковой изоляции пленочный материал является более подходящим, чем бумага по соображениям импульсной прочности. Наиболее подходящим материалом являются PET и PPS, в виде пленки, которая имеет отличные теплопередающие свойства. Что касается типа обмоток, то переплетенная обмотка применяется при напряжении 66 кВ и выше. В равномерном поле при давлении элегаза 1,2 кгс/см<sup>2</sup> его электрическая прочность почти такая же как и трансформаторного масла. Однако пробивное напряжение газовой изоляции зависит от максимальной напряженности поля. Максимальная напряженность, которая может быть допущена в масле, недопустима в элегазе. Поэтому изоляция в элегазовом трансформаторе требует определенного усовершенствования по сравнению с масляными трансформаторами. Чтобы уменьшить напряжение на газовых промежутках в системе газ — твердая изоляция применяются материалы с малой диэлектрической постоянной, а в некоторых случаях применяются полые дистанцирующие детали для уменьшения их диэлектрической постоянной [4].

Давление газа. Для повышения электрической прочности и улучшения охлаждения желательно высокое давление элегаза. Однако большинство трансформаторов имеют бак не простой цилиндрической формы, а иной формы, и поэтому экономически невыгодно изготавливать их рассчитанными на высокое давление. Поэтому в большинстве элегазовых трансформаторов применяется давление 2 кгс/см<sup>2</sup> при максимальной рабочей температуре. И все же, элегазовые трансформаторы напряжением 275 кВ имеют максимальное рабочее давление несколько выше. Это сделано для повышения электрической прочности, что дало возможность иметь трансформатор в пределах транспортных габаритов. Переключающее устройство РПН в контакторе переключающего устройства применены вакуумные камеры во избежание попадания в элегаз продуктов горения дуги. В элегазовых трансформаторах отсутствует очистка элегаза, и его электрическая прочность может быть снижена металлическими частицами, образующимися при механическом износе контактов. Поэтому в избирателе вместо скользящих контактов применены контакты катящегося типа. Кроме того, сочленения движущихся частей имеют безмасляную структуру со специальной обработкой поверхностей. Таким образом, в элегазовых трансформаторах применяется совершенно иное переключающее устройство, нежели в масляных трансформаторах. В Японии

многие подстанции сверхвысокого напряжения расположены в густонаселенных городских районах. Чтобы удовлетворить очень жестким требованиям, предъявляемым к трансформаторам для таких подстанций были разработаны три варианта элегазовых трансформаторов напряжением 275 кВ и мощностью 300 МВ-А, показанные на рис. 1 и в таблице 2. С увеличением мощности решить вопросы охлаждения только элегазом стало практически невозможным. Было принято охлаждение с помощью жидкости перфторуглерод (PFC) для всех трех типов трансформаторов [5]. В варианте А броневого типа поток перфторуглерода направлен сверху обмотки вдоль катушек. Конструкция обмоток, включая изоляцию, почти такая же как в масляном трансформаторе.

Рис. 1 - Эскизы строения элегазовых трансформаторов большой мощности в Японии. Тип А (а): 1 — охладитель; 2 — распределитель охлаждающей жидкости; 3 — смесь элегаза и паров охлаждающей жидкости; 4 — компрессор; 5 — баллон с газом; 6 — магнитопровод; 7— обмотка; 8 — охлаждающая жидкость (PFC); 9— насос. Тип В (б): 1 — элегаз; 2 — магнитопровод; 3 — охлаждающая панель; 4 — регулятор давления; 5 — листовая обмотка; 6 — насос; 7— теплообменник; 8 — возврат охладителя; 9 — бак. Тип С (в): 1 — бак; 2— элегаз; 3— распределительная мембрана; 4— охлаждающая жидкость (PFC); 5 — охладитель; 6— обмотка; 7— изоляционный цилиндр (стенка сосуда); 8— магнитопровод; 9— насос

При смешивании элегаза и паров перфторуглерода вариации давления смеси с изменением температуры увеличиваются. Регулятор давления поддерживает величину давления на уровне 2 кгс/см<sup>2</sup> во всем диапазоне температур. Форма бака почти та же, как для маслonaполненного трансформатора броневого типа. В варианте В применены листовые обмотки из алюминия с использованием барьеров из листов PЕТ. Обмотки охлаждаются жидкостью перфторуглерода, циркулирующей в панелях цилиндрической формы листовой обмотки. Жидкость перфторуглерода полностью изолирована от элегаза. Цилиндрической формы бак рассчитан на максимальное давление 4 кгс/см<sup>2</sup>.

Таблица 2 - Элегазовые трансформаторы большой мощности в Японии (рис. 1) Тип А В С С потоком охлаждающей жидкости сверху вниз (рис.1, а) С раздельным охлаждением (рис. 1, б) С заполнением жидкостью внутреннего бака с активной частью (рис. 1, в) Тип трансформатора и обмотки Броневого Стержневой с листовыми обмотками Стержневой с дисковыми обмотками

Изоляция Элегаз + перфторуглерод (2 кгс/см<sup>2</sup>). Витковая изоляция — синтетическая пленка Элегаз (4 кгс/см<sup>2</sup>). Витковая изоляция — синтетическая пленка Элегаз (3,5 кгс/см<sup>2</sup>). Изоляция обмотки — PFC. Витковая изоляция — синтетическая пленка

Охлаждение Принудительная циркуляция жидкости перфторуглерода в охладительных каналах между катушками Принудительная циркуляция жидкости перфторуглерода в охладительных панелях в обмотке Принудительная циркуляция жидкости перфторуглерода в изоляционном отсеке (магнитопровод и обмотки в перфторуглероде) Параметры трансформатора

Трехфазный 275 кВ, 300 МВ-А с РПН Трехфазный, 275 кВ, 300 МВ • А, с регулировочным трансформатором в нейтрали Трехфазный, 275 кВ, 250 МВ-А с РПН В варианте С обмотки и магнитопровод залиты жидкостью перфторуглерода. Жидкость в этом варианте является как изолятором, так и теплоносителем. Вся активная часть и жидкость находятся в изоляционном цилиндрическом баке. Пространство между стенками этого бака и стенками стального бака заполнено элегазом с максимальным давлением 3 кгс/см<sup>2</sup>. Сверху изоляционный бак закрыт выравнивающей давление разделительной мембраной. В заключение можно сделать выводы о следующих преимуществах и недостатке элегазовых трансформаторов. Первым и основным преимуществом элегазовых трансформаторов является их полная пожаробезопасность. Кроме того, они имеют следующие преимущества, по сравнению с маслонаполненными трансформаторами, устанавливаемыми в закрытых помещениях и под землей: 1. Отпадает необходимость в противопожарном оборудовании и аварийной емкости для масла. 2. Отпадает необходимость в защитном ограждении (стенках) для защиты другого оборудования. 3. Охладители могут быть установлены значительно выше самого трансформатора. 4. Уменьшенный вес благодаря отсутствию масла 5. Сниженный уровень шума по сравнению с маслонаполненными трансформаторами. Эти преимущества позволяют уменьшить размеры подстанции или помещения и снизить стоимость. Недостатком является меньшее значение тепловой постоянной времени по сравнению с маслонаполненными трансформаторами. Поэтому допустимая длительность перегрузок меньше.