

УДК 621.311

**Т. В. Лопухова, Ю. Н. Зацаринная, Р. Н. Балобанов**

**ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ЭЛЕГАЗОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

*Ключевые слова: элегазовые трансформаторы, элегаз, система охлаждения, изоляция, конструкция.*

*В статье рассмотрены трансформаторы с элегазовой изоляцией и их конструкционные особенности. В заключение статье приводится вывод о преимуществах и недостатках элегазовых трансформаторов.*

*Keywords: gas-insulated transformers, insulating gas, cooling, insulation, construction.*

*The article describes the gas-insulated transformers and their design features. In conclusion, the paper presents conclusions about the advantages and disadvantages of gas-insulated transformers.*

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
	0 кгс/см	1,2 кгс/см	0 кгс/см	
Плотность, кг/см <sup>3</sup>	6,15	13,48	1,205	866
Вязкость, м <sup>3</sup> /с	0,153-10 <sup>"4</sup>	0,157-10~4	0,188-10 <sup>"4</sup>	0,0314
Динамическая вязкость, м <sup>3</sup> /с	0,0249-10~4	0,0116 - 10 <sup>"4</sup>	0,156-10 <sup>"4</sup>	0,363-10~4
Тепловая проводимость, ккалДм·ч·°С	0,0115	0,0126	0,0221	0,106
Удельная теплоемкость, ккалДм·ч·°С	0,144	0,145	0,246	0,452
Число Прандтля	0,669	0,669	0,735	482
Диэлектрическая постоянная	1	1	1	2,3
Электрическая прочность (относительно масла)	Около 1/2	Около 1	Около 1/4	1
Отношение теплоемкостей равных объемов	Около 1/440	Около 1/200	Около 1/140	1
Отношение теплопроводности для потоков с одинаковой скоростью	Около 1/15	Около 1/7,5	Около 1/33	1
Горючесть	негорючее			горючее
Разлагаемость	Не разлагается в присутствии кислорода			Окисляется

воздуха и масла является теплопередающая способность на единицу объема. Например, при рабочем давлении газа  $1,2 \text{ кгс/см}^2$  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 РЕТ (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 РЕТ 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  $1,2 \text{ кгс/см}^2$  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  $2 \text{ кгс/см}^2$  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.

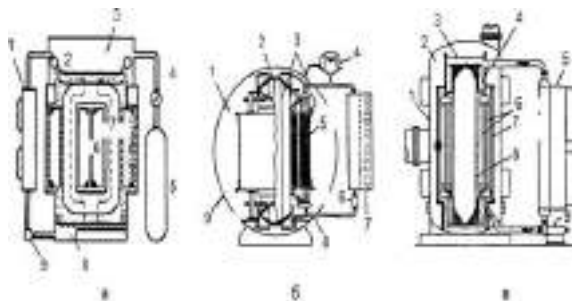


Рис. 1 - Эскизы строения элегазовых трансформаторов большой мощности в Японии. Тип А (а): 1 — охладитель; 2 — распределитель охлаждающей жидкости; 3 — смесь элегаза и паров охлаждающей жидкости; 4 — компрессор; 5 — баллон с газом; 6 — магнитопровод; 7 — обмотка; 8 — охлаждающая жидкость (PFC); 9 — насос. 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  $2 \text{ кгс/см}^2$  во всем диапазоне температур. Форма бака почти та же, как для маслонаполненного трансформатора броневого типа.

В варианте В применены листовые обмотки из алюминия с использованием барьеров из листов РЕТ. Обмотки охлаждаются жидкостью перфторуглерода, циркулирующей в панелях цилиндрической формы листовой обмотки. Жидкость перфторуглерода полностью изолирована от элегаза. Цилиндрической формы бак рассчитан на максимальное давление  $4 \text{ кгс/см}^2$ .

**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 — РФС. Витковая изоляция — синтетическая пленка
Охлаждение	Принудительная циркуляция жидкости перфторуглерода в охлаждающих каналах между катушками	Принудительная циркуляция жидкости перфторуглерода в охлаждающих 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 регулируемым 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 недостатках 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.

### Литература

1. Аракелян В.Г. «Физическая химия элегазового электротехнического оборудования». — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 300 с
2. (<http://www.sdelanounas.ru/blogs/20414/>)
3. (<http://forca.ru/stati/podstancii/transformator-s-elegazovoy-izolyaciey-toshiba.html>).
4. Балобанов Р.Н., Лопухова Т.В., Зацаринная Ю.Н. Влияние времени эксплуатации элегазового оборудования на состояние изоляции/ Р.Н. Балобанов, Т.В. Лопухова, Ю.Н. Зацаринная // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – №16 – С. 122–124.
5. Макаров В.Г. Выбор трансформатора в трехфазном магнито-транзисторном инверторе/ В.Г. Макаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – №17 – С. 50–54.

© Т. В. Лопухова - канд. пед. наук, проф. каф. электрических станций КГЭУ, lopuhovatv@mail.ru; Ю. Н. Зацаринная - канд. тех. наук, доц. той же кафедры, доц. каф. автоматизированных систем сбора и обработки информации КНИТУ, zac\_jul@mail.ru; Р. Н. Балобанов – магистрант КГЭУ.