

# Газоизолированные высоковольтные линии

Владимир Вариводов, [Журнал "ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение"](#)

Применение традиционных кабелей связано с рядом проблем. Сегодня кабели с масляной, бумажной, синтетической изоляцией (в том числе и на основе сшитого полиэтилена) предусматриваются на критические мощности величиной примерно до 1700 МВт. Эти кабели плохо приспособлены для передачи энергии на расстояния свыше нескольких десятков километров из-за ограничений по термической стойкости и возможных резонансных явлений.

Диэлектрические потери в этих типах кабелей также весьма велики, что обусловлено достаточно высокой диэлектрической проницаемостью полимеров, бумаги и масла.

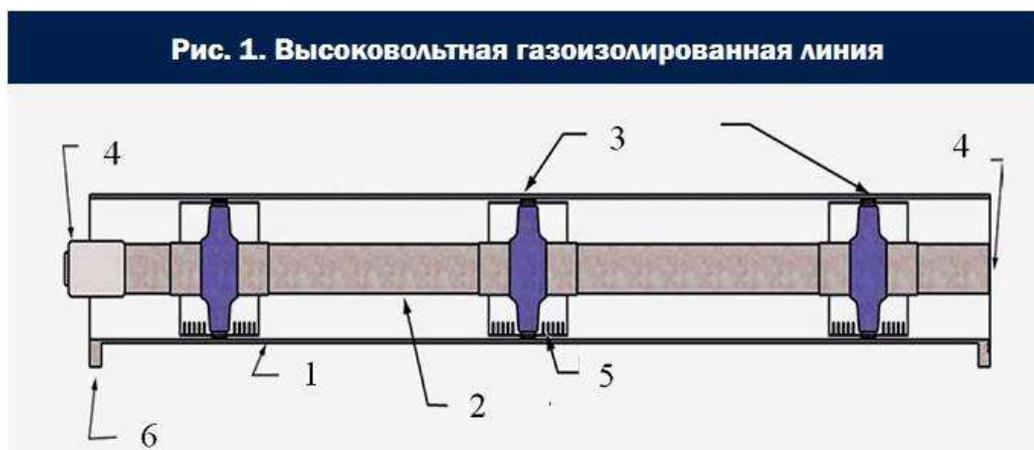
Помимо прочего, традиционные кабели не являются экологически чистыми, как правило, они пожароопасны (при коротком замыкании в одной фазе в результате пожара повреждаются и другие), а электромагнитные поля в них не полностью локализованы — на поверхности земли, где они проложены, уровень электромагнитных воздействий может быть весьма значительным.

Кроме того, существуют значительные технологические проблемы при вертикальной прокладке кабелей.

Переход от воздушных линий электропередачи к кабелям требует изменения систем автоматики и релейной защиты, а при применении длинных кабелей необходимы устройства компенсации реактивной мощности.

## ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ГАЗОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Технологии линий (или токопроводов) с газовой изоляцией (ЛГИ) позволяют решить практически все упомянутые проблемы традиционных кабелей. На рис. 1 представлена принципиальная конструкция газоизолированной линии однофазного исполнения.



1 — оболочка, 2 — токоведущая жила, 3 — изоляторы, 4 — контакты, 5 — ловушки частиц, 6 — фланцы

В случае пофазного исполнения токоведущая жила и оболочка располагаются коаксиально. Опорные изоляторы, установленные на одинаковом расстоянии, удерживают жилу в центре оболочки, при этом электрическая изоляция осуществляется с помощью высокопрочного в электрическом отношении газа (элегаза, сухого воздуха, или их смеси, другого газа) под давлением, которое обычно имеет диапазон от 4 до 20 атм.

Токоведущая жила представляет собой твердую металлическую трубу, как правило, из алюминиевого сплава. Жила поддерживается внутри металлической оболочки с помощью изоляторов, изготовленных из литых эпоксидных компаундов горячего отверждения. Для повышения электрической прочности газовой изоляции вблизи поддерживающих изоляторов устанавливаются ловушки частиц.

Оболочка ЛГИ обеспечивает механическую прочность конструкции и герметизацию газовых объемов секций. Для уменьшения потерь энергии в оболочке материалом для нее, как правило, служит сплав алюминия. Секции собираются в единую линию непосредственно на месте монтажа.

Соединения секций в ЛГИ должны учитывать: необходимость непрерывности электрической системы, компенсацию тепловых расширений, герметизацию газовых объемов.

Возможны различные способы соединения секций — с помощью сварки, фланцев и скользящих контактов. В последние годы, как правило, соединения секций осуществляются с помощью сварки в атмосфере инертного газа. Для того чтобы пыль или металлические частицы не проникли в оболочку во время сварки, концы секций вставляются в соединительную муфту.

Соединения жил и оболочек должны производиться в чистой передвижной камере при соблюдении мер предосторожности, чтобы исключить попадание грязи и частиц внутрь. Антикоррозийное покрытие наносится в стадии полного соединения оболочек.

Тепловое расширение оболочки обычно компенсируется с помощью сильфонов из нержавеющей стали или алюминия либо перемещением одного из концов ЛГИ, а токоведущих жил — с помощью втычных контактов.

После установки каждый герметизированный участок линии подвергается различным проверкам — на качество сварки, электрических соединений и т.п. Затем герметичный участок заполняется газом под давлением, который должен быть отфильтрован и высушен так, чтобы все следы влаги были устранены.

Перед началом эксплуатации ЛГИ обязательно проводятся высоковольтные испытания.

Для изменения профиля трассы применяются поворотные элементы. В газоизолированных линиях трехфазного исполнения все три фазы находятся в одной оболочке.

Газоизолированные линии могут прокладываться в земле, на ее поверхности и в туннелях.

## **ПЕРВОЕ**

## **ПОКОЛЕНИЕ**

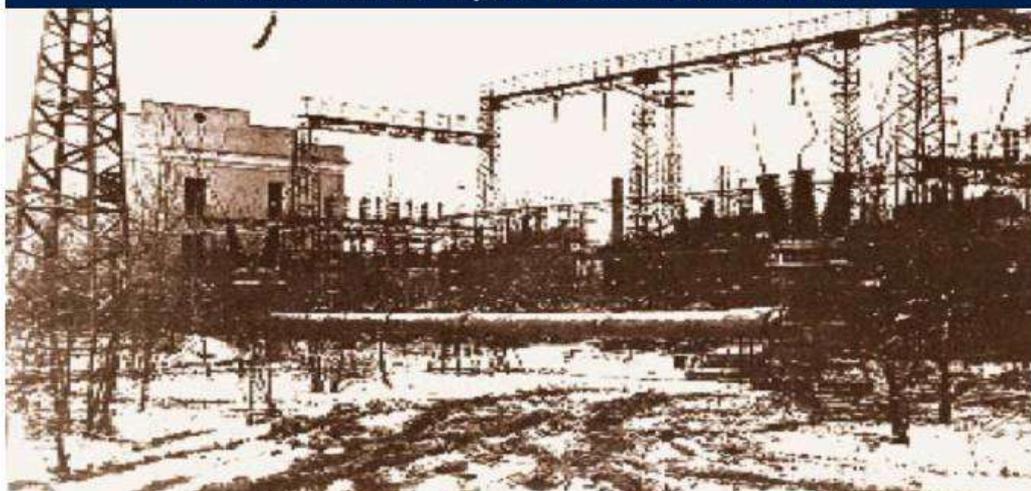
## **ЛГИ**

Начало развития газоизолированных линий и первые упоминания о них относятся к 1964 г., т.е. происходило это практически одновременно с началом продвижения на рынок

элегазовых выключателей и комплектно-распределительных устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ).

Первая промышленная установка ЛГИ на напряжение 242 кВ протяженностью 414 м была реализована в 1972 г. американской компанией CGIT Westboro (проект Hudson Switching Station), затем в Германии в 1974 г. компанией Siemens. В Японии эксплуатация первой промышленной ЛГИ была начата в 1978 г. В это же время аналогичные проекты появились в России. В 1975 г. Всесоюзным (теперь Всероссийским) электротехническим институтом им. В.И. Ленина была разработана, изготовлена и установлена в опытно-промышленную эксплуатацию на подстанции «Бескудниково» в Москве ЛГИ-110 кВ (рис. 2), а затем — в 1978 г. ЛГИ-220 кВ (рис. 3). В 1980 г. этим же институтом была установлена в опытную эксплуатацию на испытательном стенде в Тольятти ЛГИ-500 кВ. В дальнейшем наиболее активными в промышленном освоении ЛГИ были компания CGIT Westboro (США), поставившая в период с 1972 по 2003 г. около 120 ЛГИ, а также Chubu Electric Power Co и Toshiba (Япония).

**Рис. 2. Первая российская ЛГИ-110 кВ трехфазного исполнения в опытно-промышленной эксплуатации на подстанции «Бескудниково» в Москве, 1975 г.**



Первое поколение ЛГИ имело ряд недостатков, затрудняющих их внедрение: высокая стоимость — линия заполнялась полностью дорогим элегазом, монтаж и технологии изготовления не были отработаны и поэтому дороги; недостаточная надежность в эксплуатации из-за относительно высоких утечек элегаза при использовании ручной сварки труб, а также применение изоляторов с высокой напряженностью электрического поля неоптимизированной конструкции и т.д.

**Рис. 3. Газоизолированная линия 220 кВ в трехфазном исполнении  
российского производства в опытно-промышленной эксплуатации  
на подстанции «Чагино» в Москве, 1979 г.**



## **ВТОРОЕ**

## **ПОКОЛЕНИЕ**

## **ЛГИ**

Примерно с 2000 г. можно говорить о втором поколении газоизолированных линий электропередачи.

Эти линии характеризуются использованием смесей элегаза с азотом, что примерно на 20% снижает их стоимость. Кроме того, облегчается использование ЛГИ при низких температурах. В них применяются специальные ловушки частиц внутри герметичных секций, так как металлические частицы наиболее опасны для внутренней изоляции линии. ЛГИ второго поколения также обладают существенным снижением возможных утечек газа за счет применения современных автоматизированных орбитальных систем сварки трубчатых оболочек в полевых условиях, ультразвукового контроля качества сварки, использования для оболочек спирально сваренных труб. Применены новые эффективные системы мониторинга состояния линий и специальные процедуры предпусковых испытаний.

**Рис. 4. Одна из первых газоизолированных линий (ЛГИ-275 кВ), выполненных с использованием смеси элегаза и азота (Chubu Electric Power Co)**



Японской фирмой Chubu Electric Power Co была введена в эксплуатацию одна из первых газоизолированных линий второго поколения (рис. 4), заполненная смесью из элегаза и азота. В рамках этого проекта были проведены работы по замене существующей воздушной линии 275 кВ на ЛГИ в туннеле, что позволило получить дополнительные городские площади.

В результате сейчас стоимость ЛГИ на напряжение 220—500 кВ не превышает стоимости кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена той же мощности. Кроме того, надежность ЛГИ из-за практического отсутствия старения изоляции, по данным зарубежных компаний, существенно выше.

С появлением ЛГИ второго поколения повысилась активность применения газоизолированных линий. В последние годы реализован целый ряд проектов компанией Siemens, китайские компании совместно с ВЭИ создали ЛГИ 220—500 кВ с использованием сухого воздуха под давлением.

Сегодня формируется зона предпочтительного применения ЛГИ — это мощные (1000—4000 МВт) линии передачи электроэнергии, условия прокладки которых не позволяют применять ЛЭП и традиционные кабели (невозможность отчуждения больших площадей земли под ЛЭП; повышенные требования по надежности, безопасности, в том числе пожаробезопасности, уровню внешних электромагнитных полей — напряженность электромагнитного поля на поверхности земли при применении ЛГИ на порядок ниже, потерям электроэнергии; наличие препятствий для прокладки ЛЭП — рек, гор).

Приоритетными областями применения газоизолированных линий сейчас являются внутриподстанционные связи, глубокие вводы электроэнергии в крупные города, вертикальные вводы, передача через реки и другие препятствия с помощью ЛГИ, встроенных в мосты или транспортные туннели.

В качестве примера глубокого ввода электроэнергии в город представлена двухцепная газоизолированная линия 550 кВ (рис. 5). Аналогичные линии глубокого ввода электроэнергии на основе ЛГИ имеются в ряде крупнейших городов мира.



Прежде всего газоизолированные линии применяются там, где на подстанциях требуется повышенная безопасность. В этом случае ошиновка осуществляется с помощью ЛГИ. При пересечении нескольких линий электропередачи также оптимальным является применение газоизолированных линий.

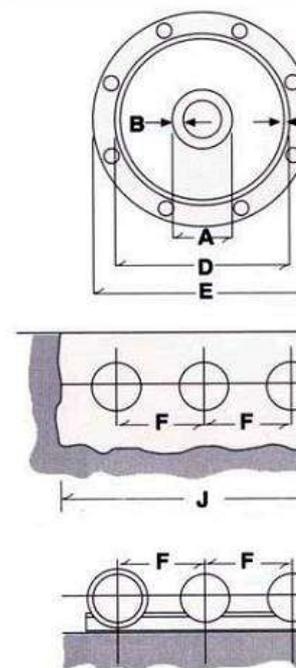
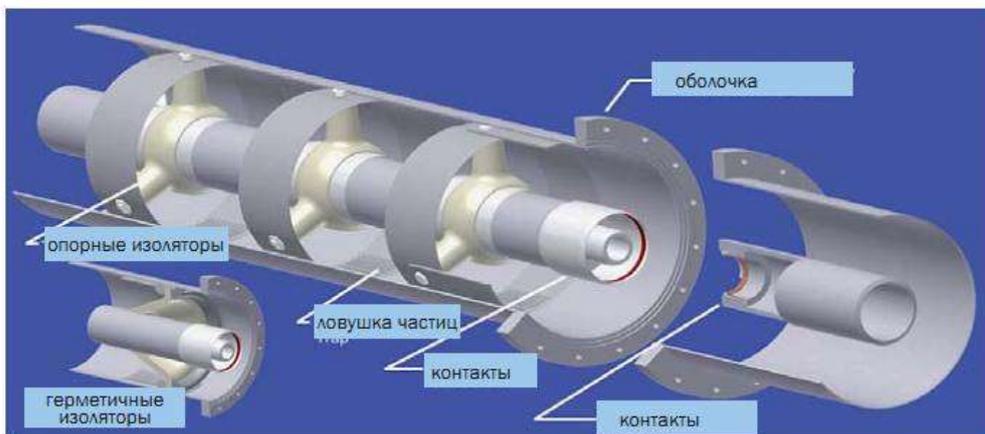
Если компоновка подстанции экстремально компактна — сборные шины также могут выполняться на основе ЛГИ.

Особенно эффективны газовые токопроводы для вертикальной электропередачи, например, с подземных станций и подстанций при пересечении болотистых участков, дорог, районов городской застройки, где требуются повышенные требования по экологии и компактности.

Для оценки радиальных размеров газоизолированных линий можно воспользоваться данными компании CGIT Westboro (рис. 6).

**Рис. 6. Ориентировочные размеры газоизолированных линий на различные классы напряжения (по данным компании CGIT Westboro)**

Напряжение	Основные размеры									
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
145 / 172 kV	89	15.2	7.6	241	343	368	914	1219	1270	241
242 / 300 kV	102	12.7	7.6	307	406	457	914	1219	1524	318
362 kV	127	12.7	6.4	375	483	559	914	1219	1829	356
420 / 550 kV	178	12.7	6.4	508	648	711	914	1321	2286	457
800 kV	178	12.7	6.4	622	749	813	1067	1524	2642	533
1200 kV	203	12.7	9.5	762	889	1016	1219	1676	3099	610



Из представленных данных видно, что радиальный размер оболочки газоизолированных линий в однофазном исполнении для номинального напряжения от 145 до 1200 кВ лежит в диапазоне 240—760 мм, при этом толщина оболочки меняется мало и составляет 6,5—7,6 мм. Более точный выбор габаритов ЛГИ осуществляется по специальным методикам, учитывающим состав газа и его давление, передаваемую мощность, различные конструктивные особенности. Максимальная передаваемая мощность, в свою очередь, зависит от того, находится ли газоизолированная линия в земле, на поверхности земли или в туннеле.

Важнейшее значение для обеспечения высокой надежности ЛГИ имеют испытания ее после изготовления. Типовые испытания линий должны включать:

- испытания изоляции — высоковольтные и на частичные разряды;
- токовые и температурные испытания;
- динамические испытания при протекании токов КЗ;
- испытания систем защиты;
- механические испытания оболочек;
- испытания на газоплотность;
- антикоррозионные испытания;
- механические испытания контактов;
- испытания на стойкость к внутренней дуге.

Регламентация различных требований МЭК к газоизолированным линиям представлена в документе «IEC TECHNICAL REPORT 61640». В России в ОАО «ФСК ЕЭС» разработан и представлен на утверждение стандарт организации «Элегазовые токопроводы 20—500 кВ».

## ВЫВОДЫ

1. Газоизолированные линии имеют преимущества перед традиционными кабелями по

пропускной способности, возможной предельной длине, уровню потерь электроэнергии, безопасности (в том числе и по-жаробезопасности), совместимости с ЛЭП по системам автоматики и релейной защиты, возможностям вертикальной прокладки, уровню внешних электромагнитных полей, необходимости применения устройств компенсации реактивной мощности.

2. Несмотря на достаточно большой международный опыт внедрения газоизолированных линий, в последние годы появилось второе поколение ЛГИ, которое характеризуется высокой надежностью, снижением стоимости, использованием вместо чистого элегаза смесей элегаза с азотом, а также специальных устройств и технологий, повышающих электрическую прочность газа и газоплотность оболочек ЛГИ.

3. Приоритетными областями применения газоизолированных линий сейчас являются внутривыпускные связи, глубокие вводы электроэнергии в крупные города и выдача мощности от электростанций, вертикальные вводы электроэнергии, передача электроэнергии через реки и другие препятствия с помощью ЛГИ, встроенных в мосты или транспортные туннели, если передаваемая мощность составляет 1000— 4000 МВт.

4. Разработанные международные и отечественные нормативно-технические документы в области ЛГИ регламентируют требования по применению газоизолированных линий в электрических сетях Российской Федерации.