

Тяговое электроснабжение железнодорожной связи через пролив Эресунн

Для автомобильно-железнодорожного перехода между Данией и Швецией через пролив Эресунн потребовались принципиально новые решения в отношении воздушной контактной сети, в частности, в месте стыкования двух систем тягового электроснабжения. Линия снабжается энергией от двух тяговых подстанций однофазного переменного тока 25 кВ 50 Гц, одна из которых оснащена фильтром для подавления гармоник.

История вопроса

Южная часть Швеции (лены Шонен и Блекинге) до 1658 г. принадлежала Дании. После периода войн между этими странами территориальные споры были решены. В дальнейшем Дания и Швеция накопили богатый опыт мирного сотрудничества, в связи с чем в центре внимания оказался вопрос улучшения транспортных сообщений между этими северными странами.

Уже в XIX в. появились первые планы создания постоянной транспортной связи между Данией и Швецией. Наилучшей трассой для этого считалось самое узкое место пролива Эресунн между Хельсингёром и Хельсингборгом. Именно по ней были проложены маршруты железнодорожных и автомобильных паромов. Позднее возникла идея связи между Копенгагеном и Мальмё, хотя расстояние между ними значительно больше.

Первое предложение по созданию постоянной связи появилось в 1936 г. В 1954 г. рассматривался проект строительства тоннеля в западной части и моста в восточной. Это предложение оказалось ближе всего к выбранному впоследствии окончательно варианту транспортного перехода.

В 1991 г. правительства Швеции и Дании приняли решение об организации смешанных автомобильно-железнодорожных сообщений по тоннельно-мостовому переходу, который был открыт 1 июля 2000 г. после 4,5 года строительных работ.

Вел строительство консорциум Oresundbron, который и является владельцем этого перехода. В консорциуме на равных правах представлены оба государства.

Электрификация железных дорог Швеции и Дании

История развития электрификации железных дорог Швеции и Дании имеет значительные различия. Швеция вместе с Норвегией была одной из первых стран, начавших электрифицировать железнодорожные линии на однофазном переменном токе пониженной частоты. Первой среди главных магистралей в 1913 – 1922 гг. была электрифицирована рудовозная линия Нарвик – Кируна – Йелливаре – Лулео с использованием однофазного переменного тока напряжением 16 кВ и частотой 15 Гц. Обратный ток отводился по рельсам и земле. Энергия с гидроэлектростанции Порьёс подавалась на тяговые подстанции по линии электропередачи с двумя однофазными системами напряжением 80 кВ.

Для дальнейшей электрификации было выбрано децентрализованное электроснабжение от машинных синхронных преобразователей. Для отвода обратного тока предусматривалась отдельная линия (обратный провод) с отсасывающими трансформаторами. Это решение было выбрано по следующим причинам:

- наличие мощной общегосударственной высоковольтной сети общего пользования частотой 50 Гц;
- удобство применения вращающихся преобразователей из-за простого соотношения числа полюсов;
- возможность присоединения к системе электрификации на частоте 16,7 Гц, принятой в германоязычных европейских странах;
- проблемы в эксплуатации железных дорог, связанные с помехами и перенапряжениями в линиях связи.

Впоследствии рудовозная линия также была оснащена обратным проводом.

Последующие новые разработки характеризовались переходом к статическим преобразователям частоты, возвратом к централизованному электроснабжению путем создания однофазной тяговой сети напряжением 132 кВ, а также началом применения многосистемного подвижного состава.

В 1956 г. железные дороги Дании по решению правительства были полностью переведены на тепловозную тягу. Исключение составила городская железная дорога Копенгагена, электрифицирован-

ная на постоянном токе напряжением 1,5 кВ. Однако рост цен на топливо после первого нефтяного кризиса, снятие с эксплуатации устаревших тепловозов, начатое в 1980 г., а также планирование регулярного сообщения через проливы Большой Бельт и Эресунн внесли свои коррективы. За последние 20 лет в Дании электрифицированы многие линии. В отличие от соседних Германии и Швеции, здесь в связи с недостаточностью инвестиций была выбрана система однофазного переменного тока напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц. Решение было принято даже несмотря на то, что при этом возникает необходимость замены локомотивов на границе или использования в международном сообщении двухсистемного электроподвижного состава. Как и в Швеции, была применена система с обратным проводом и отсасывающими трансформаторами для ограничения электромагнитных помех. Кроме того, для уменьшения помех, вызываемых асимметрией, подключаемые участки контактной сети равномерно распределяли по фазам сети первичного электроснабжения.

Транспортная связь через пролив Эресунн

Линия транспортной связи через пролив Эресунн состоит из трех основных частей:

- тоннеля длиной 4 км со стороны Дании;
- искусственного острова Пеппархольмен длиной 4 км;
- моста длиной 8 км со стороны Швеции с повышенным участком над фарватером.

Тоннель состоит из четырех труб, расположенных в одной плоскости (рис. 1). В двух проходят двухполосные автомагистрали, в двух других — однопутные железнодорожные линии. Трубы, состоящие из бетонных секций длиной 175 м, уложены в подготовленный в морском дне канал и засыпаны гравием таким образом, что тоннель проходит ниже уровня дна.

Искусственный остров насыпан из грунта, извлеченного при подготовке канала и углублении фарватера, а также при проведении других работ, связанных с выемкой грунта. Автомобильная и железная дороги сначала проходят по острову параллельно друг другу в одном уровне, но затем в восточной час-

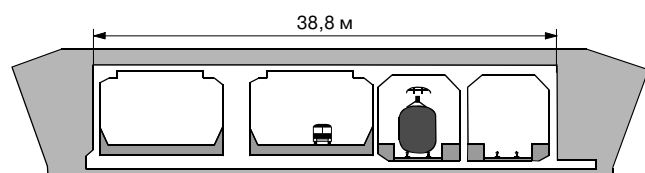


Рис. 1. Поперечное сечение тоннеля на трассе транспортного сообщения через пролив Эресунн

ти автомобильная дорога уходит на верхний ярус моста, а железная линия — на нижний.

Пролетные строения обеих концевых частей моста собраны из предварительно подготовленных стальных секций длиной от 120 до 140 м с залитым в них автодорожным полотном, которые установлены на опорах небольшой высоты. Бетонные лотки для железнодорожных путей монтировали позднее. Высокая часть моста имеет полностью стальные пролетные строения.

Территориальная граница между Данией и Швецией проходит примерно по середине западной низкой части моста.

На шведской стороне железнодорожная линия и автомагистраль снова переходят на один уровень, причем железная дорога оказывается посередине между встречными полосами автомобильного движения.

Стыкование датской и шведской систем СЦБ происходит на искусственном острове. Переход с принятого в Швеции левостороннего движения поездов на принятое в Дании правостороннее можно осуществлять не только на главном вокзале Мальмё, но и в нескольких других местах линии.

Непосредственным предшественником транспортной связи через пролив Эресунн было открытое в июне 1988 г. сообщение через пролив Большой Бельт между островами Зеландия и Фюн. Оба эти проекта имеют много общего, и некоторые позиции заслуживают особого внимания:

- примерно на середине пути находится небольшой остров Спрогё. Двухпутная железнодорожная линия переходит здесь с моста Фюн — Спрогё в тоннель Спрогё — Зеландия, состоящий из двух параллельных труб. Автомобильная трасса здесь также проходит по мосту;

- сети электроснабжения общего пользования, расположенные с обеих сторон перехода, между собой не сфазированы. В связи с этим изолирующая вставка сети тягового электроснабжения, расположенная на острове Спрогё, во многом аналогична пунктам стыкования тяговых систем с заземленным промежуточным участком;

- в отличие от используемой на всей сети Дании схемы тягового электроснабжения с отсасывающими трансформаторами, на рассматриваемом переходе Зеландия — Фюн применена линия обратного тока, непосредственно связанная с рельсами. Это стало возможным благодаря тому, что здесь линии связи и передачи данных выполнены с использованием невосприимчивого к электромагнитным помехам волоконно-оптического кабеля;

- с учетом высокой концентрации соли в воздухе для контактной сети выбраны изоляторы, в которых длина пути тока утечки увеличена до 1700 мм (вместо 1040 мм).

Контактная сеть

Общие сведения

При проектировании и строительстве воздушной контактной сети для железнодорожного сообщения через пролив Эресунн следовало руководствоваться официальными положениями, действующими в Дании и Швеции. В качестве тяговой была выбрана система однофазного переменного тока напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц, так как резервированное тяговое электроснабжение на частоте 16,7 Гц со стороны Дании обеспечить было невозможно. Пункт стыковки для перехода на частоту 16,7 Гц расположен на материковой части Швеции.

Вся линия и, следовательно, ее контактная сеть рассчитаны на скорость движения до 200 км/ч. При расчете параметров контактной сети учитывались усиленные нагрузки от ветра и гололеда, применение изоляторов с увеличенной длиной пути утечки, а также возможность очистки изоляторов от загрязнений и соли. Путем моделирования была доказана пригодность выбранного типа контактной сети для движения поездов с максимально допустимой скоростью и несколькими поднятыми токоприемниками, а именно:

- моторвагонных поездов Х2 с двумя токоприемниками на расстоянии 44 м;
- специально разработанных поездов для перехода через Эресунн с тремя токоприемниками на расстоянии 41 + 112 м или в обратной последовательности.

Для всей линии выбраны контактный провод поперечным сечением 120 мм², несущий трос сечением 70 мм² с натяжением 15 кН и рессорный трос. При этих параметрах общая системная высота цепной подвески не превышает 800 мм.

В местах перехода между различными элементами линии через Эресунн потребовалось много новых технических решений.

Параметры контактной сети

Тоннель. Секции труб тоннеля прямоугольного сечения имеют высоту в свету 6050 мм над УГР. В связи с этим системная высота цепной контактной подвески была уменьшена до 450 мм, а высота расположения контактного провода над УГР принята равной 5230 мм. Зигзаг контактного провода ограничен величиной ± 200 мм при длине пролета 40 м. В середине каждого пролета установлена дополнительная консоль, предназначенная только для подвешивания несущего троса.

На линии использованы консоли нескольких типов. В параллельных пролетах консоли из соображений экономии места закреплялись не на одной общей стойке, а на отдельных кронштейнах с обеих сторон пути (рис. 2).

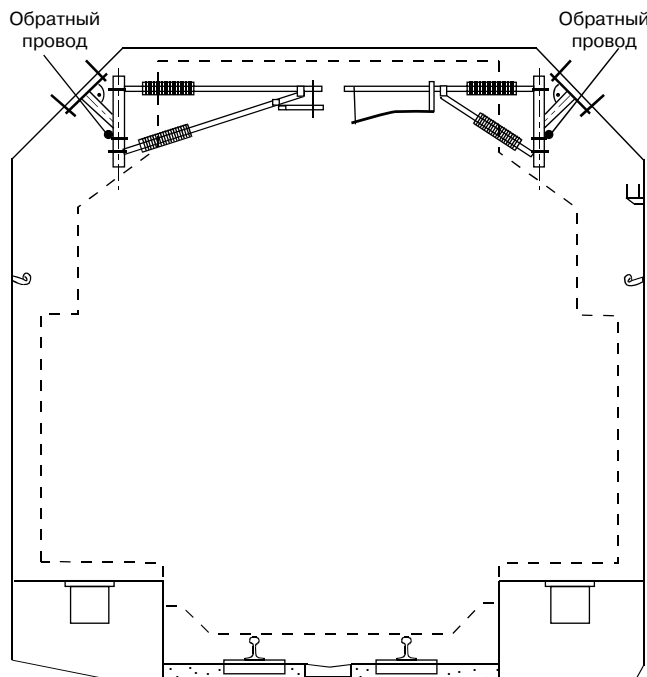


Рис. 2. Расположение консолей контактной подвески в тоннеле

Анкерные участки длиной 635 м имеют полукompенсированную цепную подвеску с грузовыми компенсаторами, установленными в тоннельных нишах. Несмотря на небольшую длину анкерных участков, простые электрические соединители в параллельных пролетах не смогли компенсировать температурные изменения длины контактного провода в диапазоне температур от -20 до $+80$ °С из-за ограниченной системной высоты контактной подвески. Эта проблема решена путем использования подвижных клемм на несущем тросе (рис. 3).

Остров. Выбранная контактная подвеска в основном соответствует шведской SYT 15/15 и модифицированной немецкой Re250 с некоторыми отклонениями:

- для консолей используются композитные изоляторы на напряжение 25 кВ с длиной пути тока утечки 1800 мм;
- системная высота подвески составляет 1550 мм вместо 1800 мм;

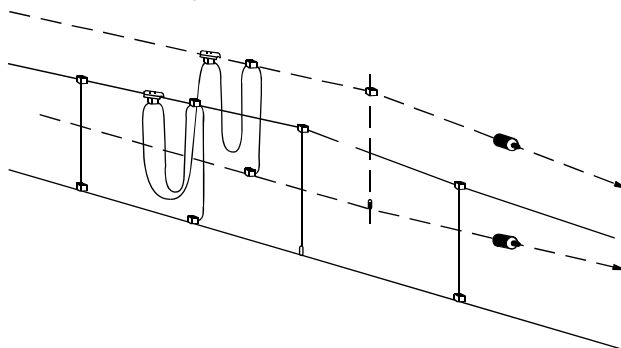


Рис. 3. Электрический соединитель с подвижными клеммами

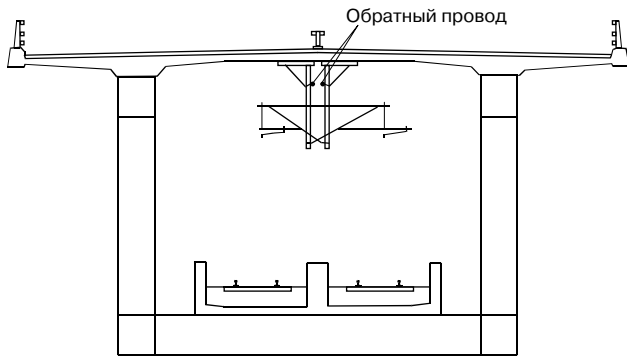


Рис. 4. Расположение опорных конструкций и консолей контактной подвески на мосту

• высота расположения контактного провода над УГР выбрана равной 5330 мм, чтобы избежать слишком больших перепадов высоты на переходах от одного элемента линии к другому (от тоннеля к мосту и наоборот).

Мост. Из-за малой высоты габарита на мосту высота расположения контактного провода выбрана равной 5230 мм над УГР. Зигзаг здесь также не превышает 200 мм. В анкерных участках большой длины (от 1080 до 1440 мм) с полностью компенсированной подвеской точка расположения средней анкеровки не всегда совпадает с серединой участка из-за особенностей конструкции моста. Системная высота контактной подвески на мосту определена равной 750 – 1200 мм. При высоте менее 800 мм рессорный трос отсутствует (например, в местах, близких к точке анкеровки). Поскольку расположение последних совпадает с расширительными стыками моста, консоли должны иметь конструкцию, позволяющую

компенсировать температурные изменения длины моста и контактной подвески. В связи с этим устройства анкеровки монтируют на разных опорных устройствах (рис. 4). Консоли закрепляют специальными самотормозящимися винтами.

В точках перехода между элементами линии использованы специальные технические решения, особенно на острове. Речь идет о применении опор специального типа, новом способе расположения обратного провода и уменьшении системной высоты контактной подвески на путепроводах до 500 мм.

Схема секционирования. На рис. 5 показана принципиальная схема секционирования линии.

В обоих концах тоннеля установлены разрядники и секционные выключатели, а также разъединители, с помощью которых контактную сеть можно заземлять на рельсы. Эти коммутационные устройства установлены во исполнение требований службы безопасности Дании и соответствуют стандарту компании Banestyrelsen, являющейся пользователем инфраструктуры с датской стороны.

На западном конце тоннеля от основной трассы ответвляется однопутная грузовая линия, которая идет в обход станции Каструп. В тоннеле расположены обгонный пункт для одностороннего отклонения на боковой путь и соответствующий секционный выключатель.

На острове Пеппархольмен уложены четыре стрелочных перевода для двустороннего отклонения на боковые пути. Этот отдельный пункт также оснащен необходимыми секционными выключателями. Здесь смонтированы дополнительные выключатели, используемые в случае необходимости для параллель-

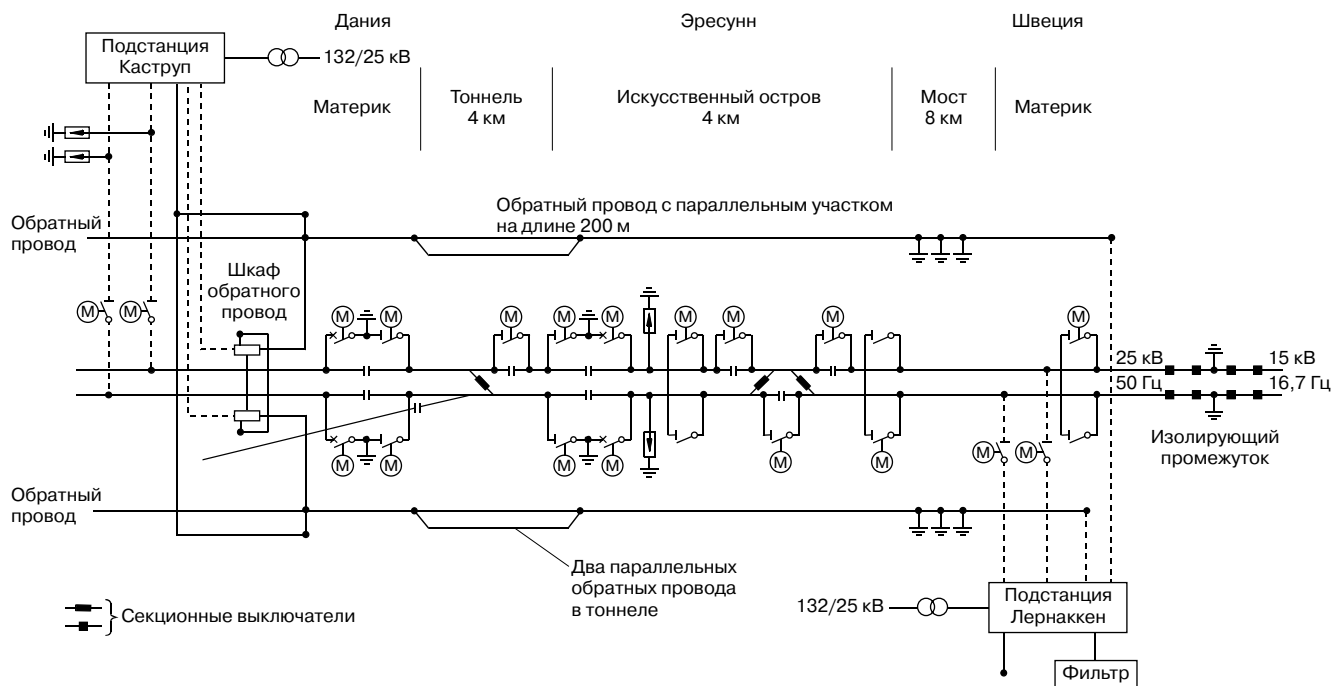


Рис. 5. Схема секционирования линии через пролив Эресунн

ного соединения путей. Аналогичные устройства поперечного секционирования имеются также на шведской стороне.

Для управления устройствами контактной сети и контроля на станции Лернаккен построен энергодиспетчерский пункт, оснащенный устройствами телеуправления и телесигнализации.

Пункт стыкования двух систем тягового электроснабжения. В сообщении через пролив Эресунн используется двухсистемный электроподвижной состав (электровозы и электропоезда). В пункте стыкования на станции Лернаккен в контактную сеть включена трехсекционная нейтральная вставка, причем одна из секций (средняя) заземлена на рельсы. Поезда должны проходить эту вставку общей длиной 160 м со скоростью до 200 км/ч с поднятыми токоприемниками без потребления тяговой мощности. После прохождения всех трех секций нейтральной вставки на подвижном составе осуществляется автоматическая идентификация напряжения и частоты, после чего также автоматически производятся соответствующие переключения в тяговых цепях.

Отвод обратного тока и система заземления. Как и на линии через Большой Бельт, на линии через Эресунн для отвода обратного тока не используется система с отсасывающими трансформаторами, принятая на сетях обеих стран. Здесь применена линия обратного тока, через определенные промежутки подключенная к одному из рельсов. При этом второй рельс изолируется от тягового тока и используется системой СЦБ.

Поскольку удельная проводимость верхнего строения пути на бетонных шпалах приблизительно равна 0,5 См/км, уже на относительно коротком участке может иметь место опасный для человека потенциал рельса. При максимальной величине тока в контактной сети, равной 920 А, потенциал рельса может достигать 239 В, в то время как допустимой величиной является 120 В. Уменьшение интервалов между точками подсоединения обратного провода к рельсу, устройство поперечных рельсовых соединителей, а также подключение тягового рельса к токопроводящей арматуре тоннельных секций и пролетных строений мостов позволяют успешно решить эту проблему.

В тоннелях каждого пути в качестве линии обратного тока проложены двойные сталеалюминиевые тросы поперечным сечением 157 мм². Эти четыре провода с интервалом 160 м соединены между собой и с тяговыми рельсами обоих путей, а на выходах из тоннеля и с арматурой тоннельных секций.

На искусственном острове и на мосту для каждого пути проложен сталеалюминиевый трос сечением 234 мм². Расстояние между соединениями обратного провода с рельсом на острове составляет 200 м, а на

мосту с учетом особенностей его конструкции — 240 м. Здесь провода закрепляются на расположенных по центру опорных стойках (см. рис. 3). Стальная конструкция моста также подключается равномерно по всей длине к линии обратного тока.

Тяговые подстанции и фильтр

Тяговые подстанции

Для питания участка длиной 20 км достаточно одной тяговой подстанции. Однако в целях обеспечения резервирования к нему подключены две подстанции, а именно Каstrup и Лернаккен. Первая из них расположена на расстоянии 1 км перед входом в тоннель, вторая — примерно на таком же удалении от конца моста. В нормальном режиме они работают попеременно, каждая в течение одной недели для выравнивания расходов.

Обе тяговые подстанции имеют одинаковую конструкцию. Они подключены к государственной высоковольтной сети однофазного тока напряжением 132 кВ через закрытое распределительное устройство с двухполюсными газоизолированными выключателями. Основным элементом подстанции является однофазный тяговый трансформатор наружной установки. К его вторичной стороне подключено закрытое распределительное устройство напряжением 25 кВ, в котором использованы однополюсные выключатели с воздушной изоляцией.

Основные технические данные тягового трансформатора

Коэффициент трансформации.....	5,27 (145 кВ/27,5 кВ)
Кажущаяся мощность, МВА.....	23
Система охлаждения.....	ONAN
Относительное напряжение короткого замыкания, %.....	12

Собственные нужды подстанции обеспечиваются трансформатором внутренней установки с вторичным напряжением 0,4 кВ. По первичной стороне он подключен к отдельной трехфазной линии напряжением 22 кВ и частотой 50 Гц, которая проложена вдоль всей линии сообщения через пролив Эресунн.

Обе тяговые подстанции и все относящиеся к ним устройства построили компании København Belysningsvæsen и Malmö Energi, которые являются владельцами подстанций и осуществляют их техническое обслуживание.

Фильтр

Так как тяговая сеть частотой 50 Гц через трансформатор тяговой подстанции непосредственно связана с государственной высоковольтной сетью, возникают очевидные обратные влияния электрической тяги на сеть в результате воздействия генерируемых

Т а б л и ц а 1

Токи гармоник на стороне 25 кВ, относительные напряжения и их допустимые значения на стороне 132 кВ

Номер гармоники	Частота, Гц	Ток гармоники, А	Относительное напряжение гармоники в сети 132 кВ, %	
			Расчетное	Предельно допустимое
3	150	15	0,09	0,1
5	250		0,22	
7	350	9,5	0,14	
9	450	4	0,15	
11	550	1,6	0,33	
13	650		0,05	
15	750		0,03	
17	850	3	0,04	
19	950	5	0,11	
21	1050	6	0,2	0,7
23	1150	9	0,51	
25	1250	7	0,38	
27	1350	6	0,22	
29	1450	5	0,13	0,6
31	1550	7		
33	1650	8	0,1	
35	1750	6	0,05	
37	1850	4,2	0,04	0,5
39	1950	1,6	0,03	
41	2050		0,28	
43	2150		0,03	
45	2250	3,2	0,1	
47	2350	4,8	0,29	
49	2450	6,4	0,71	

преобразователями высших гармоник и асимметрии, обусловленной однофазной нагрузкой и неравномерным распределением последней во времени.

Электрические компании, эксплуатирующие электрические сети общего пользования, во избежание снижения качества своих услуг выдвигают ряд требований к железнодорожным компаниям-операторам.

Еще до сдачи в эксплуатацию тяговой подстанции Лернаккен местная сеть напряжением 132 кВ была в значительной степени загружена высшими гармониками. Временами их коэффициент достигал предельного значения 1,5 %. Это обстоятельство послужило причиной разработки и строительства фильтрующей системы.

Основные параметры. Для расчета параметров фильтра достаточной мощности и высокой эффективности необходимы определенные исходные данные. На их основании были проведены:

- расчет различных конфигураций фильтров, удовлетворяющих техническим требованиям;
- сравнение и выбор конфигураций;
- измерение спектра гармоник;
- окончательное определение параметров фильтра;
- изготовление и монтаж контуров фильтра;
- приемо-сдаточные испытания.

В расчетах использовали следующие исходные данные:

- предельные значения уровней гармоник, уровень напряжения в контактной сети, колебания напряжения в сети при изменениях нагрузки;
- импедансы контактной сети и тягового трансформатора;
- уровни гармоник тока, генерируемых тяговыми преобразователями подвижного состава под нагрузкой;
- максимально допустимую реактивную мощность фильтра, необходимую для компенсации недопустимых емкостных перенапряжений;
- необходимый монтажный объем;
- уровень гармоник после фильтра.

Условия. Основным источником гармоник на подвижном составе являются входные модули тяговых преобразователей. Амплитуды нечетных гармоник в их спектре (150, 250, 350 Гц и т. д.) затухают очень медленно, причем между различными типами подвижного состава имеет место большая разница. Для оценки общей суммы амплитуд гармоник с частотами выше 350 Гц использовали не простое арифметическое сложение их значений, а суммирование их усредненных квадратов.

В зависимости от переключений, выполненных между уровнями 132 кВ и 400 кВ в различных узловых точках высоковольтной сети общего пользования, линия напряжением 132 кВ, питающая тяговую подстанцию Лернаккен, может приобретать шесть различных значений импеданса, которые имеют важное значение для частотного спектра и уровня гармоник.

В табл. 1 приведены значения токов гармоник на стороне 25 кВ, генерируемых поездом для самой неблагоприятной схемы высоковольтной сети, а также вытекающие отсюда значения относительных напряжений гармоник на стороне 132 кВ (до установки фильтра) и допустимые значения этих напряжений.

Расчет схемы фильтра. Эффективность фильтра зависит от его реактивной мощности и числа контуров. Увеличение реактивной мощности и числа контуров повышает общую эффективность фильтрации, но в то же время ведет к повышению емкостных перенапряжений и обуславливает необходимость больших инвестиций. Величина реактивной мощности фильтра для подстанции Лернаккен была определена равной 5 Мвар.

Для проведения расчетов в качестве источника гармоник был принят ток, потребляемый поездом.

Расчетная схема с соответствующими обозначениями приведена на рис. 6. Токи гармоник распределяются между фильтром и трансформатором в зависимости от соотношения их импедансов на каждой из частот.

Относительные значения напряжения гармоник в сети 132 кВ приблизительно могут быть рассчитаны с помощью уравнений, причем коэффициент трансформации для упрощения принят равным 1:

$$I_n(f) = I_z(f) \frac{Z_f(f)}{Z_f(f) + Z_t(f) + 2Z_n(f)}, \tag{1}$$

$$U_{ph}(f) = I_n(f)Z_n(f), \tag{2}$$

$$U_{rel}(f) = \frac{U_{ph}(f)}{132/\sqrt{3}} 100\%, \tag{3}$$

где $I_n(f)$ — ток гармоники в сети; $I_z(f)$ — ток гармоники, генерируемый поездом; $Z_f(f)$ — импеданс фильтра; $Z_t(f)$ — импеданс трансформатора; $Z_n(f)$ — импеданс одной фазы сети; $U_{ph}(f)$ — напряжение гармоники в одной фазе сети; $U_{rel}(f)$ — относительное напряжение гармоники; $132/\sqrt{3}$ — фазовое напряжение сети в киловольтах.

Принятое решение. Существуют два типа фильтров: полосовой и широкополосный (рис. 7).

Полосовой фильтр подавляет гармоники только определенной частоты, но в некоторых неблагоприятных случаях может усилить низкочастотные гармонические составляющие.

Широкополосный фильтр из-за наличия активного сопротивления имеет более мягкую характеристику и предотвращает нежелательные параллельные резонансы. Его недостатком являются более высокие активные потери. Резонанс возникает, когда сумма $Z_f(f) + Z_t(f) + 2Z_n(f)$ в уравнении (1) для какой-то частоты стремится к нулю, в результате чего ток данной гармоники $I(f)$ в сети возрастает до величины, значительно превышающей предельно допустимую.

На практике путем изменения номинала резистора в схеме может быть достигнут плавный переход от полосового фильтра к широкополосному.

Расчет фильтра следует начинать с решения проблемы подавления самой низкой частоты. В противном случае возможно возникновение параллельного резонанса на этой частоте в контурах фильтра, предназначенных для более высоких частот. Так нельзя подавлять одну только пятую гармонику, если имеется еще и третья.

На рис. 8 показаны расчетные исходные значения относительного напряжения гармоник на стороне 132 кВ тяговой подстанции Лернаккен до включения фильтра и допустимые предельные величины этого напряжения. Непревышение последних может быть обеспечено лишь при условии использования фильтров. Необходимы были отдельные резонансные кон-

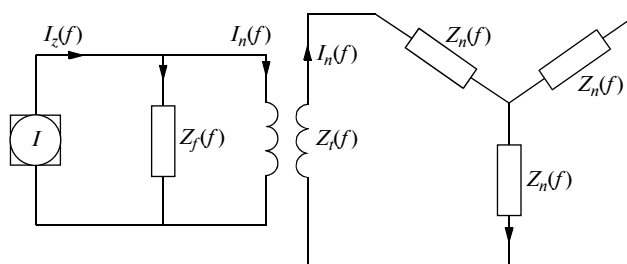


Рис. 6. Схема для расчета высших гармоник в сети напряжением 132 кВ

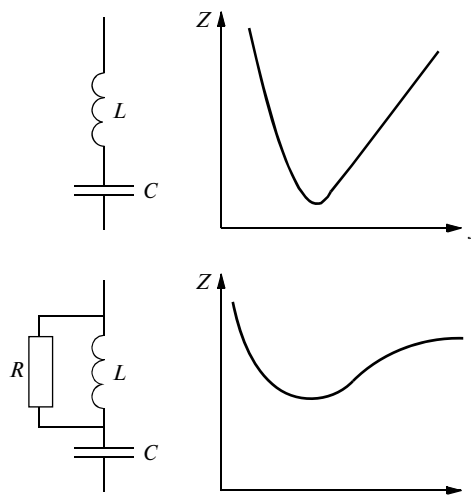


Рис. 7. Схемы и кривые изменения импеданса в функции частоты полосового фильтра (вверху) и широкополосного (внизу): L — индуктивность; C — емкость; R — активное сопротивление; Z — импеданс; f — частота

туры, настроенные на частоты 150, 250, 350 Гц, а также один контур на диапазон частот 450 – 550 Гц. Таким образом, четвертый контур имел широкополосное исполнение. По согласованию с заказчиком в

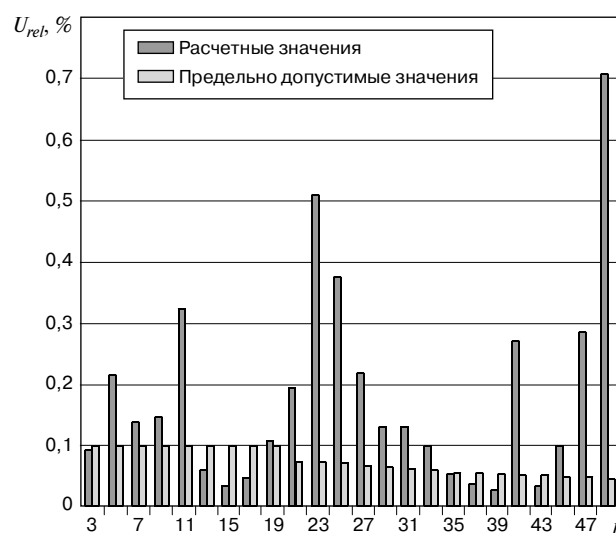


Рис. 8. Расчетные величины и предельно допустимые значения относительного напряжения гармоник в сети 132 кВ без фильтра: U_{rel} — относительное напряжение гармоники; n — номер гармоники

Таблица 2

Выбранные параметры фильтра

Параметр	Номер контура			
	1	2	3	4
Кратность гармоники относительно 50 Гц	2,9	4,9	6,9	9 ÷ 11
Реактивная мощность, Мвар	1,09	1,04	0,98	1,93
Индуктивность, мГн	266	94	47	9,3
Емкость, мкФ	4,52			9
Активное сопротивление, кОм	4,2	1,5	0,75	0,016

первые три контура также были включены резисторы, но большего номинала, поэтому эти контуры рассчитаны на более узкие частотные полосы. Высокий импеданс контактной сети в результате параллельного резонанса нескольких контуров недопустим из-за опасности мешающих воздействий на устройства СЦБ.

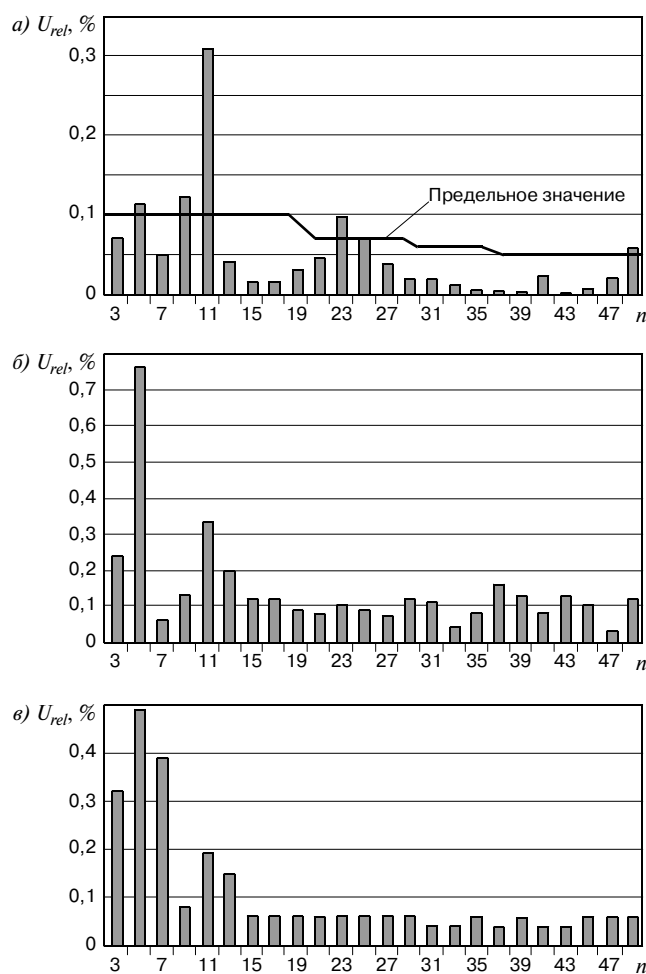


Рис. 9. Расчетные и измеренные относительные значения напряжения гармоник в сети 132 кВ с фильтром и без фильтра:

a — расчетные величины с фильтром; *b* — значения, измеренные до начала эксплуатации при отключенном фильтре; *c* — расчетные величины, измеренные при наличии поездной нагрузки и с подключенным фильтром. Обозначение остальных позиций, как на рис. 8

Выбранные в конечном итоге параметры фильтра показаны в табл. 2.

Расчетные относительные напряжения гармоник для наиболее неблагоприятной схемы в сети напряжением 132 кВ без фильтра, а также измеренные значения этого параметра до и после включения фильтра при наличии поездной нагрузки показаны на рис. 9. Для частоты 550 Гц расчетная величина значительно превышает допустимое значение. Измеренные значения на этой частоте также выходят за пределы допуска. С помощью дополнительных контуров фильтрующей системы эти проблемы можно было бы решить, но, учитывая, что вероятность сочетания наиболее неблагоприятного высокого импеданса сети и интенсивного генерирования гармоник невелика, а имеющаяся в распоряжении площадь для монтажа фильтрующей системы ограничена размером $3,5 \times 8,5$ м, решили (по согласованию с заказчиком) ограничиться схемой из четырех контуров.

Измерения. Еще до разработки, изготовления и поставки оборудования фильтра, а также до начала движения поездов на линии были проведены измерения фона гармоник в сети 132 кВ, т. е. определены исходные параметры. Псофометрический коэффициент оказался равным 1 %.

После подключения фильтра и начала движения поездов были проведены повторные измерения при интервале между поездами 20 мин в обоих направлениях, так что как минимум один поезд всегда находился в пределах фидерной зоны. В этом случае псофометрический коэффициент составил 0,8 %, что значительно ниже предельного значения, равного 1,5 %, а также ниже измеренного исходного фона гармоник. Таким образом, действие фильтра компенсирует мешающие воздействия электрической тяги и улучшает качество сети напряжением 132 кВ.

Результаты эксплуатации

Как и в любом другом крупном проекте, в сообщении через пролив Эресунн также имели место трудности начального периода, особенно когда выяснилось, что спрос на перевозки за короткое время оказался значительно выше прогнозируемого. В автомобильных перевозках по этому маршруту наблюдалась обратная картина.

Однако через год после открытия линии при переходе на более плотный летний график движения поездов 2001 г. появились проблемы, связанные с опозданиями поездов. Наибольшие первоначальные трудности были связаны с новыми поездами, специально разработанными для перехода через Эресунн, и шведскими электропоездами X2, переоборудованными в двухсистемные.

Основным источником проблем с точки зрения инфраструктуры был пункт стыкования двух систем тягового электроснабжения. Сначала он был оборудован линейными секционными выключателями, полимерные изоляторы которых быстро разрушались под воздействием механических нагрузок и электрической дуги. В качестве срочной меры были установлены другие, более мощные выключатели и снижена максимальная скорость до 80 км/ч (в дальнейшем она была увеличена до 120, а затем до 140 км/ч). Это ограничение скорости при наличии подъема на мосту в 15 ‰ приводило к опозданию поездов. В перспективе после дальнейшей доработки устройств секционирования максимальная скорость вновь будет повышена до проектной, равной 200 км/ч.

В начальный период эксплуатации при переключении тягового подвижного состава с частоты 50 Гц на частоту 16,7 Гц нередко срабатывала система автоматического торможения поездов. Как оказалось, причиной этого были переходные процессы в момент переключения, при которых генерировались высокочастотные помехи. Последние воспринимались поездными антеннами системы обеспечения безопасности движения, которая подавала команду на включение принудительного торможения. После теоретических и экспериментальных исследований было принято решение подключить на одной из опор контактной сети между контактным проводом и заземлением RC-фильтр ($R = 100 \text{ Ом}$, $C = 100 \text{ нФ}$). Это позволило полностью решить возникшую проблему.

Выводы и перспективы

Сообщение через пролив Эресунн, вероятно, будет не последним транспортным переходом в этом регионе. Наиболее узкое место пролива Эресунн,

ширина которого равна 4 км, расположено между датским Хельсингёром и шведским Хельсингборгом. В последнее время нередко возникают дискуссии о целесообразности сооружения тоннеля и в этом месте.

Ближе к практической реализации находится проект соединения перехода через Эресунн с городским транспортным тоннелем в Мальмё. Благодаря этому станция превратится из тупиковой в проходную.

Актуальной является также проблема прямой транспортной связи между Германией и Данией через пролив Фемарн-Бельт шириной 19 км, так как обходной маршрут через Фленсбург, Падборг, остров Фюн и переход через пролив Большой Бельт получается слишком длинным. Этот проект уже находится в разработке. Для его реализации потребуется на территории Дании электрифицировать участок Рингстед — Нюкёбинг — Рёдбю по системе 25 кВ, 50 Гц, а на территории Германии участок Любек — Путтгарден по системе 15 кВ, 16,7 Гц.

Немалый интерес представляет решение вопроса о выборе системы тока на участке Путтгарден — Рёдбю. Высокое содержание соли в воздухе, обусловленное близостью моря, вызывает необходимость применения изоляторов с увеличенным путем тока утечки. Это легче реализовать при более низком напряжении, т. е. использовать не 25, а 15 кВ. Для резервирования тягового электроснабжения можно подключить один или два синхронно-синхронных преобразователя, расположенных в Германии или Швеции. Электроснабжение на частоте 16,7 Гц в этом регионе может быть реализовано с большим экономическим и экологическим эффектом за счет дополнительного использования ветросиловых электростанций.

A. Bawer et al. Elektrische Bahnen, 2002, № 10, S. 376 – 384.

Редакция журнала «Железные дороги мира»

приглашает на внештатную работу переводчиков с английского, немецкого и французского языка, имеющих опыт работы на железнодорожном транспорте и проживающих в Москве или Московской области.

Обращаться по телефону (095) 317-55-65.