

то время как на электровозе серии 185 его длина 3,4 м. В левой части шкафа размещены разъемы и коммутационная аппаратура. Справа находятся четыре компактных тяговых блока SRBG: регуляторы 4QS1 и 4QS2, вспомогательный преобразователь HBU и тормозной регулятор, инверторы WR1 и WR2. В одном SRBG смонтировано на водоохлаждаемой панели до 12 силовых модулей HVIM.

Для обеспечения минимальной паразитной индуктивности часть конденсаторов промежуточного звена размещена в блоках SRBG. Остальные, а также батарея конденсаторов поглощающей цепи размещены в задней части шкафа. В случае необходимости к ним возможен доступ и спереди. Все SRBG имеют расположенные сзади в нижней части соединительные устройства, которые при вдвигании блока автоматически подключают водяную магистраль охлаждения.

Дальнейшее применение преобразователь MITRAC TC 3300 нашел на 44 концевых моторных вагонах поездов HST 250 железных дорог Испании, развивающих скорость до 250 км/ч и могущих эксплуатироваться на переменном токе напряжением 25 кВ, 50 Гц и постоянном напряжением 3 кВ.

## Выводы и перспективы

Как видно из приведенных данных, тяговый преобразователь на транзисторах IGBT может заменить преобразователь на запираемых тиристорах в любом из случаев применения. Благодаря низким потерям, особенно в режиме низких нагрузок, он значительно экономит затраты энергии на тягу. Повышенная тактовая частота позволяет использовать более компактное тяговое оборудование. Применяемая в схеме преобразователя концепция защиты является более щадящей по отношению к тяговым двигателям и другим компонентам привода.

После появления запираемых тиристоров прошло 20 лет. В связи с этим возникает вопрос о том, насколько продолжительной будет эпоха транзисторов IGBT и что придет им на смену. Большие ожидания связаны с вентилями на основе карбида кремния. Их повышенная устойчивость против термических нагрузок позволит значительно упростить схему охлаждения.

*W. Runge. Eisenbahntechnische Rundschau, 2005, № 7/8, S. 443 – 453.*

# Передвижные преобразовательные подстанции железных дорог Германии

*В 1960-е годы бывшие Государственные железные дороги ФРГ (DB) построили две передвижные преобразовательные подстанции, позволявшие в случае необходимости обеспечивать питание контактной сети однофазного переменного тока напряжением 15 кВ, 16,7 Гц от трехфазной электрической сети общественного пользования напряжением 110 кВ, 50 Гц. Их оборудование было таким же, как и стационарных подстанций с машинными преобразователями. Обе подстанции находились в эксплуатации в различных пунктах сети в течение 35 лет.*

После 1950 г. Государственные железные дороги ФРГ (DB) возобновили электрификацию железнодорожных линий по системе однофазного переменного тока напряжением 15 кВ, частотой 16,7 Гц. При этом питание тяговых подстанций осуществлялось от собственной однофазной сети первичного тягово-

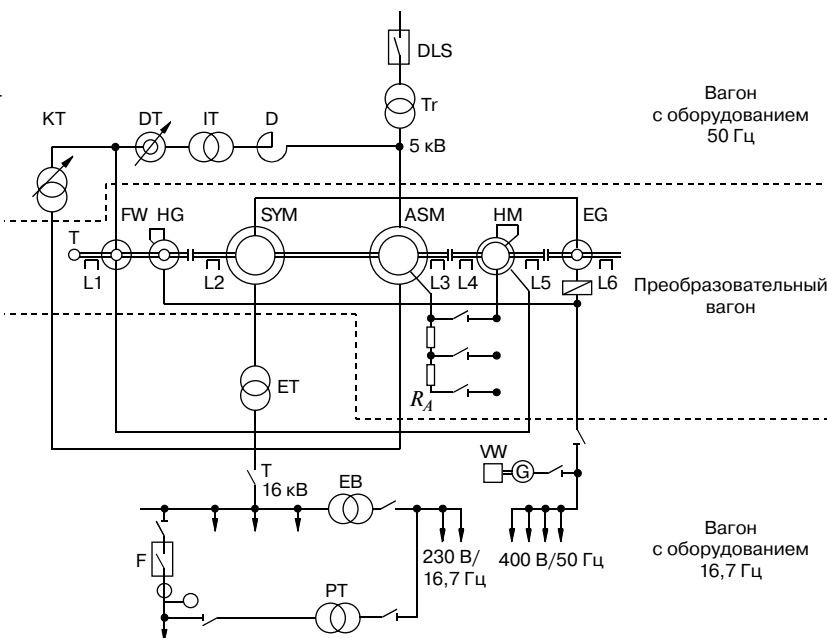
го электроснабжения напряжением 110 кВ, частотой 16,7 Гц.

С 1954 до конца 1961 г. было вновь переведено на электрическую тягу 2500 км пути. При этом потребовались также новые тяговые и преобразовательные подстанции.

В этот период появились не только новые тепловые электростанции, но и преобразовательные подстанции. В соответствии с техническим уровнем того времени на них применялись машинные преобразователи, которые потребляли мощность из трехфазной сети общественного пользования частотой 50 Гц и преобразовывали ее в мощность однофазного переменного тока частотой 16,7 Гц, напряжением 110 кВ. Поскольку мощность таких преобразователей легко регулировалась, они были особенно удобны для компенсации пиков нагрузки. Для обеспечения надежности электроснабжения на железных дорог Германии применялись также передвижные тяговые подстанции.

Рис. 1. Однолинейная схема передвижной преобразовательной подстанции:

КТ — компаундирующий трансформатор; ДТ — двойной трехфазный трансформатор; ИТ — изолирующий трансформатор; D — дроссель; Тг — сетевой трехфазный трансформатор; DLS — силовой выключатель; Т — тахогенератор; L1 — L6 — подшипники машинного комплекса; FW — преобразователь частоты; HG — вспомогательный генератор; SYM — главный синхронный генератор; ASM — главная асинхронная машина (двигатель); HM — машина Siemens-Lydall; EG — генератор возбуждения; R<sub>1</sub> — пусковые резисторы; ET — однофазный трансформатор; EB — трансформатор собственных нужд; VW — дизель-генераторный агрегат; PT — испытательный трансформатор; F — фидерная ячейка для питания контактной сети



### Концепция передвижной подстанции

Центральная служба DB, располагавшаяся в Мюнхене (BZA), приняла решение о разработке передвижных преобразовательных подстанций в 1962 г. Было исследовано несколько технических вариантов. Приняли проект подстанции мощностью 10 МВ·А, размещающейся на подвижном составе с габаритом П и осевой нагрузкой, не выходящей за пределы допуска. Эта подстанция должна была обеспечивать возможность подключения в максимальном числе точек контактной сети напряжением 15 кВ. Такими точками являются места, где высоковольтные линии трехфазного тока напряжением 110 кВ, частотой 50 Гц проходят в непосредственной близости от электрифицированных железнодорожных линий.

Передвижная электростанция с газотурбинным агрегатом могла бы иметь значительные преимущества перед преобразовательной подстанцией, поскольку ввиду своей автономности не имела бы ограничений по числу точек подключения. Однако ее существенным недостатком является ограничение по установленной мощности, которая не могла быть выше 6 МВ·А. Кроме того, потребовалось бы решать достаточно важные проблемы шума и вредных выбросов.

На подстанциях со статическими преобразователями, которые в то время работали на ртутных выпрямителях, невозможно было обеспечить режим работы с регулируемой частотой, хотя исследования по этой тематике в Германии велись до 1930 г.

Передвижные преобразовательные подстанции, как и стационарные, могли работать в режимах фиксированной и регулируемой частоты. Проведенные

исследования показали, что на сети DB питание контактной сети с помощью передвижных подстанций, подключаемых к трехфазной сети напряжением 110 кВ и частотой 50 Гц, в тот период было возможно в 30 точках.

В конце 1963 г. BZA заключила контракт на разработку и изготовление двух передвижных преобразовательных подстанций с двумя компаниями. Fried Krupp Maschinenfabriken должна была изготовить необходимые железнодорожные платформы, а Siemens-Schuckertwerke — электротехническое оборудование.

В связи с тем что передвижные электростанции могут быть использованы также в кризисных и аварийных ситуациях, проект был инвестирован из федерального бюджета в рамках плана Einzelplan 36 по гражданской обороне.

Преобразователи имели такое же исполнение, как на стационарных подстанциях, т. е. представляли собой машинный комплекс, состоящий из главной машины — однофазного синхронного генератора (SYM) частотой 16,7 Гц, асинхронного трехфазного двигателя частотой 50 Гц (ASM) с фазным ротором и коллекторной машины трехфазного тока Siemens-Lydall. Последняя с помощью преобразователя частоты, также представляющего собой трехфазную коллекторную машину, возбуждает асинхронный трехфазный двигатель ASM и обеспечивает его питание, подавая в обмотку ротора напряжение регулируемой частоты. Это дает возможность управления мощностью при осуществлении межсистемной связи с регулируемой частотой.

На рис. 1 приведена принципиальная схема преобразовательной подстанции.

Технические данные передвижной преобразовательной подстанции	
<i>Общие характеристики</i>	
Максимальная высота, м. . . . .	4,65
Максимальная ширина, м. . . . .	3
Общая длина по буферам, м. . . . .	66
Общая масса, т. . . . .	≈ 400
Допустимая скорость, км/ч. . . . .	50
Напряжение питания, кВ. . . . .	3 × 110
Частота питающей сети, Гц. . . . .	50
Выходное напряжение, кВ. . . . .	15
Частота на выходе, Гц. . . . .	16,7
КПД при номинальной мощности, %:	
преобразователя. . . . .	93,4
всей установки. . . . .	92
<i>Вагон с оборудованием частотой 50 Гц</i>	
Длина, м. . . . .	24,2
Общая масса, т. . . . .	84
Осевая формула. . . . .	3'3'
Средняя осевая нагрузка, т. . . . .	16
Разрывная мощность главного трехфазного выключателя напряжением 110 кВ, частотой 50 Гц, ГВ·А. . . . .	5
Мощность трехфазного понижающего трансформатора с естественным охлаждением напряжением 110/5 кВ, МВ·А. . . . .	8,75
<i>Преобразовательный вагон</i>	
Длина, м. . . . .	22,6
Общая масса, т. . . . .	226
Осевая формула. . . . .	6'6'
Средняя осевая нагрузка, т. . . . .	19
Мощность вспомогательного генератора трехфазного тока напряжением 380 В, частотой 50 Гц, кВ·А. . . . .	50
Возбудитель постоянного тока:	
напряжение, В. . . . .	103 – 164
номинальная мощность, кВт. . . . .	73
Асинхронная машина ASM частотой 50 Гц:	
номинальное напряжение, кВ. . . . .	5
номинальная мощность, МВт. . . . .	8,5
Коллекторные машины трехфазного тока:	
мощность преобразователя частоты, кВ·А. . . . .	9,5
то же, машины Siemens-Lydall, кВ·А. . . . .	382
Синхронная машина SYM частотой 16,7 Гц:	
число пар полюсов. . . . .	2
номинальная частота вращения, об/мин. . . . .	500
номинальное напряжение, кВ. . . . .	6,6
номинальная мощность МВ·А. . . . .	10
номинальный коэффициент мощности. . . . .	0,75
Перегрузка преобразователя сверх номинальной мощности, %:	
в течение 2 мин. . . . .	50
то же, 3 мин. . . . .	30
Масса электрической части преобразовательного вагона, т. . . . .	150
<i>Вагон с оборудованием 16,7 Гц</i>	
Длина, м. . . . .	19,2
Общая масса, т. . . . .	84
Осевая формула. . . . .	3'3'
Средняя осевая нагрузка, т. . . . .	16
Мощность однофазного трансформатора напряжением 6,6/16 кВ ± 7,5 %, МВ·А:	
с естественным охлаждением. . . . .	7,5
с принудительным охлаждением. . . . .	10
Разрывная мощность однофазного выключателя напряжением 15 кВ, частотой 16,7 Гц, ГВ·А. . . . .	3,5
Мощность трансформатора собственных нужд напряжением 17 250/230 В, кВ·А. . . . .	75
Мощность испытательного трансформатора напряжением 230/17 250 В, кВ·А. . . . .	75
Напряжение аккумуляторной батареи, В. . . . .	110
Вспомогательный агрегат:	
мощность дизеля, л.с. . . . .	34
мощность трехфазного генератора напряжением 380/220 В, частотой 50 Гц, кВ·А. . . . .	18

## Конструктивное исполнение

### Общая конфигурация

Обе подстанции имели в своем составе по три вагона длиной от 19 до 24 м. В результате длина каждого поезда была около 66 м (рис. 2). По высоте и ширине все вагоны не выходили за пределы габарита приближения. Их осевые нагрузки также были в пределах допуска. Это позволяло пропускать их к местам подключения как обычные поезда без рассылки по линии специальных указаний.

Электрические межвагонные соединения цепей среднего напряжения выполнены в виде медной шины, проходящей над крышами вагонов, и перемычек из медной ленты над зонами сцепок и буферов.

### Вагон с оборудованием частотой 50 Гц

В передней части этого вагона расположена кабина с элементами управления, защиты, регулирования и измерения. Здесь располагается пост дежурного по подстанции. Отсюда в автоматическом режиме или вручную посылаются различные команды:

- включение вспомогательных устройств;
- включение и разгон ASM с помощью пусковых резисторов в цепи фазного ротора;
- переключение цепи ротора ASM по окончании разгона на питание от машины Siemens-Lydall;
- активизация системы регулирования частоты вращения;
- возбуждение синхронной машины SYM и синхронизация ее с системой тягового электроснабжения вручную или с помощью блока параллельного подключения.

Рядом с кабиной смонтирован безмасляный силовой выключатель, разрывная мощность которого согласована с мощностью трехфазной сети в точке подключения. Далее по длине вагона расположены трансформаторы тока и напряжения для всех трех фаз. После них установлен трехфазный трансформатор с естественным охлаждением, который понижает напряжение 110 кВ для подачи его на ASM. В конце платформы размещена вторая кабина, где смонтированы дроссели, конденсаторные батареи, вспомогательные трансформаторы, в основном относящиеся к схеме питания преобразователя частоты. Здесь же размещен компрессор, питающий пневмопривод силового выключателя.

### Преобразовательный вагон

Машинный агрегат преобразователя занимает почти всю длину вагона. Требования габарита обусловили чрезвычайно экономное использование свободного пространства при размещении генератора SYM, кото-



Рис. 2. Размещение оборудования передвижной подстанции на платформах

рый является самой крупной машиной и в четырехполюсном исполнении имеет мощность 10 МВ·А/7,5 МВт. Для его охлаждения с обоих торцов статора установлено по пять осевых вентиляторов.

Машина ASM рассчитана на номинальную мощность 8,5 МВт. Номинальная частота вращения общего вала, на котором размещены все машины, составляет 500 об/мин. Все роторы опираются на подшипники скольжения. Из конструктивных соображений машины размещены не в том порядке, в каком они взаимодействуют между собой, а по принципу максимально равномерного распределения массы между обеими тележками.

На переднем конце вала смонтирован тахогенератор. После подшипника L1 (см. рис. 1) установлены преобразователь частоты и трехфазный вспомогательный генератор с фиксированной величиной напряжения. Далее идут контактные кольца роторной обмотки генератора SYM. Между подшипниками L2 и L3 смонтированы основные машины SYM и ASM, а после подшипника L3 установлены контактные кольца роторной обмотки машины ASM. Участок вала между L2 и L3 выполнен максимально коротким, что позволило отказаться от установки между ними промежуточного подшипника.

Между подшипниками L4 и L5 установлена машина Siemens-Lydall, а на заднем конце ее вала смонтирован генератор постоянного тока, используемый для возбуждения главной машины SYM. Этот генератор имеет дополнительную опору в виде подшипника L6. Все корпуса выполнены неразъемными.

Оборудование преобразователя массой 150 т размещено на платформе, имеющей массу 76 т.

После того как весь машинный комплекс достигнет номинальной частоты вращения, вспомогательный генератор берет на себя электроснабжение собственных нужд подстанции напряжением с частотой 50 Гц. Прежде всего он подает напряжение для питания двигателей привода вентиляторов и масляных насосов в системе смазки подшипников, а также системы регулирования частоты и мощности, магнитного усилителя в схеме возбуждения машины-возбудителя, компрессора и агрегата для зарядки аккумуляторной батареи.

В связи с тем что частота 33,3 Гц, генерируемая однофазной машиной SYM, создает пульсирующий момент, статор этой машины по бокам на уровне прохождения вала должен быть подрессорен. Однако дефицит свободного пространства не позволяет

реализовать такую конструкцию. Взамен этого статор снабжен гасителями колебаний, изготовленными из стальных полос, которые расположены сверху и снизу.

#### Вагон с оборудованием частотой 16,7 Гц

На платформе этого вагона к аппаратной кабине с устройствами системы питания собственных нужд примыкает однофазный трансформатор, который повышает напряжение, вырабатываемое генератором SYM. Его мощность составляет 7 МВ·А при естественном охлаждении и повышается до 10 МВ·А с использованием охлаждающих вентиляторов.

За этим трансформатором размещены два других — трансформатор собственных нужд (ТСН) для потребителей однофазного тока напряжением 220 В, частотой 16,7 Гц и испытательный трансформатор. Последний используется совместно с испытательным резистором для идентификации устойчивого короткого замыкания в контактной сети и определения места его возникновения.

В конце вагона расположена кабина распределительного устройства 15 кВ (РУ-15 кВ) с рабочими и испытательными шинами, а также с четырьмя фидерными ячейками для питания контактной сети. Эти ячейки, как и на стационарных подстанциях, оборудованы современными элегазовыми силовыми выключателями, разъединителями, трансформаторами тока и напряжения. Здесь смонтирована также нулевая шина для подключения линии отсоса.

Одна из фидерных ячеек имеет усиленное исполнение, чтобы через нее можно было в случае необходимости питать с полной мощностью сборные шины стационарной преобразовательной подстанции.

Дополнительная пятая фидерная ячейка служит для подключения к шинам испытательного трансформатора и ТСН, питающего потребителей тока частотой 16,7 Гц.

В кабине распределительного устройства РУ-15 кВ также размещены аккумуляторная батарея напряжением 110 В, компрессор для пневматического привода силовых выключателей и вспомогательный агрегат, состоящий из дизеля и трехфазного генератора с фиксированной величиной напряжения. С помощью этого агрегата при отсутствии посторонней стационарной сети напряжением 380 В можно питать вспомогательные приводы и осуществлять пуск тягового преобразователя.

### Вспомогательный вагон

В состав обеих передвижных подстанций входит вспомогательный вагон длиной 17 м, в котором размещены пост управления с передвижным пультом, мастерская со складом запасных частей, бытовые помещения и три спальных купе.

Пульт управления обычно подключается к приборной панели в вагоне с оборудованием 50 Гц. Однако в случае необходимости он может быть подключен с помощью четырехжильного кабеля-удлинителя к панели пульта управления стационарной тяговой или преобразовательной подстанцией.

### Монтаж, подготовительные работы, ввод в эксплуатацию

Осенью 1965 г. вагоны передвижной подстанции fUfw1 и в начале 1966 г. — подстанции fUfw2 были доставлены из Эссена на территорию предприятия компании Siemens (Берлин-Гартенфельд) для монтажа электрооборудования. До этого на заводе Dupaonwerk компании Siemens на вагоны-платформы был установлен лишь машинный комплекс преобразователя. По окончании монтажа на заводе в Берлине-Гартенфельде провели все испытания и функциональные проверки, которые были возможны без подключения напряжения 110 кВ, 50 Гц и 15 кВ, 16,7 Гц.

#### Подстанция fUfw1

Первым местом ее подключения стала пущенная в 1957 г. стационарная подстанция в Карлсруэ с преобразователем мощностью 25 МВт. Передвижная подстанция fUfw1 была установлена там в 1965 г. с целью усиления тягового электроснабжения линии Rheintalbahn в направлении Базеля. Важнейшими подготовительными работами после прибытия на место были:

- изготовление электрических соединителей для подключения устройств высокого, среднего и низкого напряжения;
- монтаж медных ленточных и штекерных межвагонных соединителей;
- подключение к зарядному агрегату аккумуляторной батареи напряжением 110 В;
- подключение системы отопления вагонов и устройств обогрева машинного комплекса в нерабочем состоянии;
- снятие транспортных блокировок и стопорных устройств на валах и подшипниках машинного комплекса;
- устройство воздухоподводов с фильтрами и выпускных отверстий с жалюзи в кабинах вагонов;

- устройство межвагонных соединений и укрепление их с помощью стальных опорных элементов.

Эти соединения с опорами были необходимы для разгрузки рессорного подвешивания вагонных тележек и букс, а в преобразовательном вагоне — с целью исключения возможности передачи колебаний от машинного комплекса на грунт и окружающие здания. Для обеспечения этого контролировали строгую горизонтальность межвагонных мостиков и отсутствие скручивающих нагрузок. Кроме того, для стальных опорных элементов заливали бетонные фундаменты.

Прежде всего проводили те работы, которые были крайне необходимы для пуска передвижной подстанции в период максимальных нагрузок перед рождественскими праздниками.

Измерения вибраций, проведенные на подшипниках машинного преобразовательного комплекса и вагонных буксах, показали, что наибольший уровень имеют колебания частотой 33,3 Гц, которые, однако, были наиболее низкими, когда преобразовательный вагон оснащали опорами с тарельчатыми пружинами. Измеренные величины не превышали предельных значений во всем диапазоне мощностей. Это относится к колебаниям кузова вагона при запуске машины ASM и в случае близкого короткого замыкания контактной сети.

В январе 1966 г. вагоны подстанции вновь были отправлены в Эссен для устранения недоделок. В марте 1966 г. работы по вводу передвижной подстанции в эксплуатацию в Карлсруэ были продолжены и завершены.

Пробная четырехнедельная эксплуатация с номинальной нагрузкой 10 МВ·А протекала без осложнений. В октябре 1966 г. все вагоны fUfw1 на территории подстанции в Карлсруэ переставили на другой путь. Здесь ввиду отсутствия фундаментов под опоры использовали основания из деревянных шпал. Измерения показали, что даже при таких простейших опорах вибрация вагонов оставалась в пределах допуска. Более того, было принято решение всегда использовать именно такой метод опирания.

#### Подстанция fUfw2

По окончании монтажных работ в Берлине вагоны подстанции fUfw2 в начале 1966 г. были направлены в исследовательский центр (BZA) в Миндене для ходовых испытаний. Если концевые шестиосные вагоны имели такую же массу, как четырехосные локомотивы того времени, то у преобразовательного вагона имели место превышение осевой нагрузки и неравномерное распределение массы. В связи с этим пятиосные тележки этого вагона пришлось заменить шестиосными. Сразу после этого в ноябре 1966 г. подстанция fUfw2 была отправлена в Лерте, где на

территории стационарной преобразовательной подстанции ее подключили и сдали в эксплуатацию. Четырехнедельная пробная эксплуатация проведена в феврале и марте 1967 г. Она проходила без каких-либо проблем, как и в случае с подстанцией fUfw1. Преобразовательная подстанция в Лерте, где начала свою работу fUfw2, сдана в эксплуатацию в 1963 г. На тот момент она обеспечивала преобразовательную мощность 25 МВт.

### Приемочные испытания

Для обеих передвижных подстанций в рамках приемочных мероприятий был проведен широкий комплекс измерений. На fUfw1 измерения проводились в августе 1966 г., а на fUfw2 — в апреле 1967 г. При этом проверяли перегрузочную способность оборудования и контролировали его температуру. Проводили также автоматический запуск машинного агрегата с выходом на номинальный режим и отключением под номинальной нагрузкой.

Форму кривой напряжения на выходе генератора контролировали с помощью осциллограмм, снимали характеристики машин ASM и SYM в режимах холостого хода и короткого замыкания, а также U-образную характеристику синхронного генератора SYM.

Кривые регулирования мощности строили при различных граничных условиях, а также во всем диапазоне мощности при колебаниях частоты в сети от  $-2,5$  до  $+3,5$  %. При отключенной схеме регулирования частота — мощность в режиме параллельной работы со стационарным преобразователем были сняты характеристики компаундирования. При этом изменяли положение переключателя ступеней компаундирующего трансформатора и для реализации разных режимов работы регулировали ток в обмотке статора машины ASM.

В процессе измерения мощности определяли КПД преобразователя и всей подстанции при номинальной нагрузке.

Приемочные испытания проводили параллельно с пробной эксплуатацией и пришли к выводу, что обе передвижные подстанции по своим характеристикам отвечают всем предъявленным к ним требованиям.

### Эксплуатация

#### *Передвижная подстанция fUfw1*

Эксплуатация этой подстанции в Карлсруэ дважды прерывалась: первый раз для замены тележек преобразовательного вагона (до мая 1967 г.) на ре-

монтном заводе в Шверте, второй — в феврале 1972 г., когда потребовалась резервная мощность на период замены ротора главного стационарного преобразователя подстанции в Кёльне. К тому времени на передвижной подстанции fUfw1 обмотка ротора машины ASM была существенно усилена, в связи с тем что перед этим аналогичная обмотка на подстанции fUfw2 получила серьезные повреждения.

После того как на стационарной преобразовательной подстанции в Карлсруэ был введен в строй второй агрегат мощностью 25 МВт, использование здесь fUfw1 уже перестало быть актуальным. Тем не менее эта передвижная подстанция оставалась в работе в Карлсруэ до января 1975 г., а затем после 9 лет эксплуатации была подвергнута ревизии. Для этого преобразовательный вагон отправили на стационарную подстанцию Марль, а оба концевых вагона — на подстанцию Лерте. На этой подстанции была продолжена эксплуатация fUfw1 после завершения ревизии в августе 1975 г.

В январе 1980 г. подстанция fUfw1 была направлена на сортировочную станцию Машен, расположенную к югу от Гамбурга. Эксплуатировавшаяся здесь до этого передвижная подстанция fUfw2 была на короткое время отправлена в Швейцарию. Эксплуатация fUfw1 на станции Машен началась в марте 1980 г. и прерывалась лишь для следующей ревизии, которая была проведена в 1986 г.

В период 1990 — 1994 гг. компания АBB разработала электронную систему Minidur, предназначенную для регулирования на fUfw1 напряжения и реактивной мощности в системе 15 кВ, 16,7 Гц, а также для электронной защиты машинного комплекса. Наряду с этим была создана система телеуправления агрегатами стационарной преобразовательной подстанции в Харбурге с пульта управления fUfw1.

В 1994 г. была проведена большая ревизия подстанции. Однако после ее пуска произошла авария, в результате которой была повреждена обмотка возбуждения машины SYM. Для ее ремонта пришлось демонтировать ротор машины и отправлять на завод компании Starkstromgerätebau в Регенсбурге.

В 1995 г. была завершена электрификация участка Ноймюнстер — Фленсбург длиной 102 км. На первом этапе эксплуатации этот участок с одного конца получал питание от тяговой подстанции Ноймюнстер, а с другого — от преобразовательной подстанции Юбек, расположенной к югу от Фленсбурга. Такая схема была принята в связи с тем, что продление высоковольтной линии железнодорожного тягового электроснабжения напряжением 110 кВ, частотой 16,7 Гц от Ноймюнстера до Фленсбурга затягивалось. Для того чтобы трудности начального периода эксплуатации не привели к повреждению и выходу из строя новой преобразовательной техники, было решено обеспечить резерв с помощью передвиж-

ной подстанции fUfw1, которая в августе 1995 г. была перебазирована со станции Машен на станцию Юбек. Здесь преобразовательный вагон дополнительно экранировали специальной шумогасящей обшивкой в связи с близким расположением жилого массива. После того как линия напряжением 110 кВ достигла Фленсбурга, передвижная подстанция fUfw1 в марте 1999 г. была возвращена на станцию Машен.

В августе 2001 г. в преобразовательном вагоне произошел сильный пожар, в связи с чем подстанция fUfw1 была выведена из эксплуатации. Несмотря на модернизированное оборудование и наличие современной электронной системы управления, дальнейшая эксплуатация подстанции стала экономически нерентабельной. Кроме того, машинный комплекс невозможно было доставить на ремонтный завод в связи с тем, что в результате пожара ходовая часть вагона полностью вышла из строя.

Вывод об экономической неэффективности fUfw1 основывался на том, что ее мощность стала недостаточной для питания современного тягового подвижного состава. Мощность электровозов с 3 МВт (1966 г.) выросла до 10 МВт, а установленная мощность тяговой сети за этот период увеличилась с 900 МВт до 3 ГВт. Кроме того, надежность тяговой сети напряжением 110 кВ значительно возросла благодаря увеличению ее густоты и наличию многочисленных соединительных линий. В связи с этим в августе 2001 г. передвижная подстанция fUfw1 была списана.

#### *Передвижная подстанция fUfw2*

Пуск передвижной подстанции fUfw2 на станции Лерте в феврале 1967 г. позволил решить проблемы тягового электроснабжения железнодорожного узла Ганновера и линий, идущих от него в направлении Касселя и Фульды, а также в сторону Гамбурга и Бремена. В 1968 г. fUfw2 была вновь возвращена на станцию Машен, так как в регионе Лерте решено было использовать дешевую избыточную энергию, поступающую от гидроэлектростанций Швеции и предоставляемую железной дороге через сеть компании Preussag.

Когда в 1971 г. началось строительство крупнейшей и самой современной в Европе сортировочной станции Машен, потребовалось освободить место, где размещалась передвижная подстанция fUfw2. В связи с этим ее перебазировали в район подстанции Ротенбург на линии Гамбург — Бремен. Когда вскоре после этого была повреждена роторная обмотка машины ASM, преобразовательный вагон пришлось отправить на стационарную преобразовательную подстанцию Кёльн. Демонтированный там ротор отправили на ремонтный завод компании Siemens в Берлине. Повреждение произошло в результате об-

разования водяного конденсата и перекрытия изолированных концов обмотки под действием максимального напряжения, которое в момент пуска достигает 4500 В. Эксплуатация подстанции fUfw2 была возобновлена в Регенсбурге в декабре 1972 г. В середине 1974 г. потребность в ней на этой станции отпала и ее вернули на модернизированную сортировочную станцию Машен.

В период, предшествовавший зиме 1979/1980 г., швейцарская частная железная дорога Rhätische Bahn (RhB), проводившая неотложные работы по ревизии устройств тягового электроснабжения, была вынуждена обратиться к руководству железных дорог Германии за помощью, так как опасалась сбоев в электроснабжении при отсутствии резерва во время ревизии оборудования. В связи с этим в Швейцарию была доставлена передвижная преобразовательная подстанция fUfw2, которую установили в городе Домат (Эмс), где стыкуется одна из линий с шириной колеи 1000 мм и питанием от контактного рельса, идущая от станции Кур, с линией нормальной колеи.

Для подключения подстанции fUfw2 пришлось монтировать согласующие промежуточные трансформаторы, так как напряжение в контактной сети составляло 11 кВ, а в питающей трехфазной сети частотой 50 Гц — 50 кВ. Вспомогательная работа подстанции на сети RhB, обеспечившая бесперебойное тяговое электроснабжение, длилась с начала февраля до начала марта 1980 г.

В 1977 г. линия Халтинген — Зинген — Констанц была переведена на электрическую тягу. Электроснабжение ее осуществлялось тяговой подстанцией Зинген, которая на отпайках была подсоединена к линии тягового электроснабжения напряжением 110 кВ. Для обеспечения более надежного электроснабжения сюда в августе 1980 г. была доставлена передвижная подстанция fUfw2 после проведения ревизии на подстанции Кёльн и ремонтных работ на заводе в Падерборне. Ее эксплуатация на станции Зинген продолжалась до 1990 г. с перерывом на большую ревизию. С 1990 по 1993 г. на fUfw2 так же, как и на fUfw1, была смонтирована электронная система регулирования напряжения, активной и реактивной мощности машины SYM, а также электронная защита электрических машин преобразователя.

После того как подстанция Зинген была подключена к системе 110 кВ, 16,7 Гц Швейцарии и был расторгнут договор о поставке энергии с электростанцией Лауфенбург для питания передвижной подстанции, потребность в использовании здесь fUfw2 отпала. В 1999 г. она была выведена из эксплуатации и затем списана по тем же причинам, что и fUfw1.

*S. Groß, Ch. Linder. Elektrische Bahnen, 2005, № 6, S. 291 – 298.  
U. Behmann. Elektrische Bahnen, 2005, № 8, S. 407 – 408.*