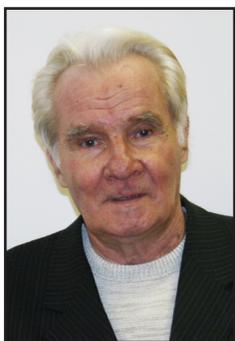




Система электроснабжения с трёхфазными трансформаторами для ВСМ



Юрий ЧЕРНОВ
Yuri A. CHERNOV

Наталья ДМИТРИЕВА
Natalia Yu. DMITRIEVA



Олеся КОКОРИНА
Olesya Yu. KOKORINA

Чернов Юрий Антонович – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Дмитриева Наталья Юрьевна – ведущий инженер проектно-исследовательского института «Мосгипротранс», Москва, Россия.

Кокорина Олеся Юрьевна – инженер института «Мосгипротранс», Москва, Россия.

Power Supply System with Three-Phase Transformers for HSR

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 57)

В статье предложена принципиальная схема тяговой подстанции системы электроснабжения 2х25 кВ с трёхфазными трансформаторами и векторной диаграммой напряжений для высокоскоростных магистралей. Проведено сравнение систем электроснабжения 2х25 кВ с однофазными и трёхфазными трансформаторами, рекомендована мощность трёхфазных трансформаторов для высокоскоростных магистралей. И всё это с учётом новых специальных технических условий, которые выработаны под задачи проектирования, строительства и эксплуатации российских ВСМ.

Ключевые слова: железная дорога, высокоскоростная магистраль, тяговая подстанция, система электроснабжения 2х25 кВ, трёхфазный трансформатор, однофазный трансформатор, специальные технические условия.

Высокоскоростные пассажирские перевозки прибыльны и окупают себя, принося государству прямую экономическую выгоду, а также развитие регионов, по которым проходит трасса магистралей, и определённый статус в мировом сообществе.

В нашей стране запущена и функционирует первая высокоскоростная магистраль (ВСМ) Москва–Санкт-Петербург. Она электрифицирована на постоянном токе напряжением 3 кВ. К сожалению, практика показывает, что возникает множество проблем при эксплуатации электрифицированной на постоянном токе скоростной магистрали. Это, в первую очередь, серьёзные «просадки» напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС) в середине фидерной зоны и, как следствие, необходимость использования громоздких вольтодобавочных устройств на тяговых подстанциях, да еще и вынужденное ограничение скорости на определенных участках. Но для этой магистрали не выбрали род тока, а лишь

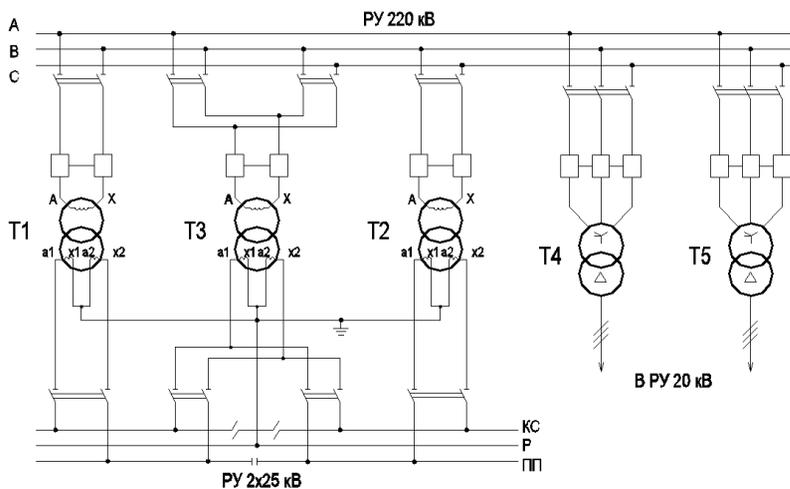


Рис. 1. Принципиальная схема тяговой подстанции с однофазными трансформаторами.

модернизировали имеющиеся тяговые подстанции.

Опыт электрификации высокоскоростных магистралей в Японии показал, что при мощности электропоезда порядка 16 МВт наиболее целесообразно использовать автотрансформаторную систему электроснабжения, получившую у нас название система тягового электроснабжения 2x25 кВ (СТЭ 2x25 кВ). Если в Японии на первой скоростной магистрали Токио—Осака при системе электроснабжения 25 кВ расстояние между тяговыми подстанциями было порядка 20 км, то при продолжении электрификации магистрали по системе 2x25 кВ это расстояние увеличилось до 50 км [1].

На данный момент ведутся работы по проектированию ВСМ-2 Москва—Казань—Екатеринбург и сделано обоснование инвестиций для ВСМ-3 Москва—Адлер. При отсутствии в начале проектирования российских нормативных документов, регламентирующих требования по строительству и эксплуатации специализированных железнодорожных линий со скоростью движения пассажирских поездов до 400 км/ч, по заказу ОАО «Скоростные магистрали» Петербургским государственным университетом путей сообщения (ПГУПС) и рядом других организаций под руководством профессора А. Т. Буркова разработаны «Специальные технические условия «Железнодорожное электроснабжение участка Москва—Казань—Екатеринбург. Технические нормы и требования

к проектированию и строительству» (далее СТУ). В СТУ указано, что при проектировании должны быть рассмотрены варианты схем тяговых подстанций с использованием однофазных, трёхфазных силовых трансформаторов, трансформаторов с симметрирующим эффектом, устройств повышения качества электроэнергии.

В обосновании инвестиций ВСМ-2 предлагается построить систему электроснабжения из участка постоянного тока (Москва—Ногинск) и участка переменного тока 2x25 кВ (Ногинск—Казань), что рекомендовано СТУ.

Статья посвящена выбору рационального варианта схемы трансформаторов тяговых подстанций системы электроснабжения 2x25 кВ магистрали. Вопрос возник не случайно. По результатам тяговых расчетов, сделанных ОАО «Ленгипротранс» на стадии обоснования инвестиций, было рекомендовано применение однофазных тяговых трансформаторов мощностью 48 МВА, что не соответствует требованию СТУ выбирать оборудование из ряда номинальных значений, установленных стандартом. К тому же ни один из отечественных заводов не выпускает однофазные трансформаторы такой мощности.

1.

Как правило, в нашей стране на тяговых подстанциях для питания тяговой сети системы 2x25 кВ устанавливаются однофазные трансформаторы с расщеплённой вторичной обмоткой [2]. Имеется опыт



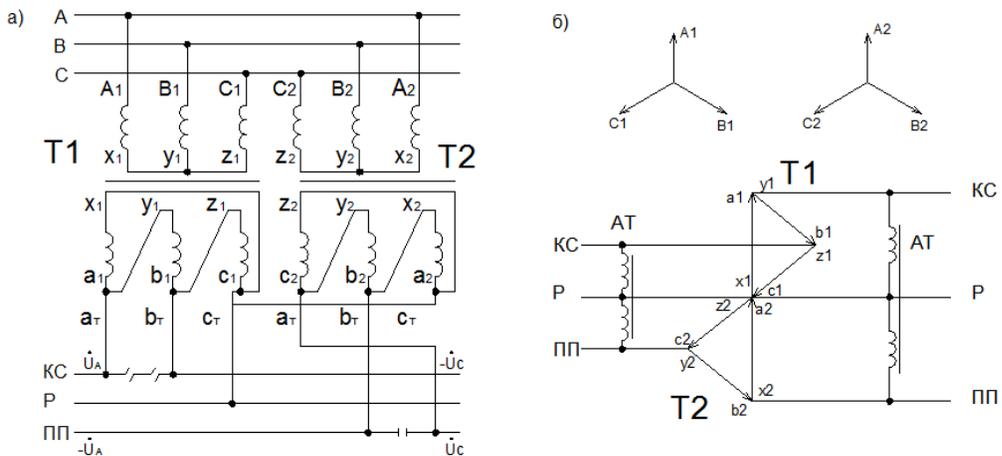


Рис. 2. Принципиальная схема тяговой подстанции системы электроснабжения 2х25 кВ с трёхфазными трансформаторами (а), справа – векторная диаграмма напряжений (б).

использования на Приволжской железной дороге и ранее на БАМ трёхфазных трансформаторов в системе 2х25 кВ.

На рис. 1 приведена схема тяговой подстанции с однофазными трансформаторами, учитывающая рекомендации СТУ: стопроцентное резервирование силовых трансформаторов и питание нетяговых потребителей от двух дополнительных трёхфазных двухобмоточных трансформаторов с высшим напряжением 220 кВ и вторичным напряжением 20 кВ. Такая схема рассмотрена и в обосновании инвестиций ВСМ-2. Первичные обмотки двух трансформаторов Т1 и Т2 соединены в открытый треугольник. Дополнительный трансформатор Т3 является резервным. Для питания трёхфазных потребителей с целью резервирования предусмотрены два трёхфазных трансформатора Т4 и Т5. На рисунке КС – контактная сеть, ПП – питающий провод, Р – рельсы.

Существенным недостатком схемы с однофазными трансформаторами стала ненадёжная работа устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Скорость движения поезда зависит от напряжения на токоприёмнике ЭПС. В СТУ установлено минимальное значение напряжения на токоприёмнике не менее 21 кВ. Номинальное напряжение в тяговой сети, при котором выполняются тяговые расчёты, 25 кВ. Снижение напряжения на ВСМ до минимально допустимого приводит к потере мощности ЭПС на 15 %

и к уменьшению среднетехнической скорости на 7–8 % [3].

Одним из средств обеспечения необходимого уровня напряжения в тяговой сети, в том числе и за счет изменения напряжения на первичных шинах тяговых подстанций, является автоматическое регулирование напряжения (АРПН) на трансформаторах тяговых подстанций. В первый же год эксплуатации системы электроснабжения 2х25 кВ с однофазными трансформаторами на Вяземской дистанции электроснабжения Московской железной дороги на одной из подстанций вышли из строя обмотки тонкого регулирования напряжения, осуществляющие ступенчатое регулирование напряжения. В результате их пришлось зашунтировать [4].

Выходило из строя устройство РПН на тяговой подстанции Мухолово Горьковской железной дороги. На подстанции Сергач работают только нечётные позиции такого регулятора напряжения. По запросу авторов получен ответ от ЦЭТ ОАО «РЖД», что АРПН в системе 2х25 кВ не используется по причине ненадёжной его работы.

Ненадёжная работа устройств РПН обусловлена следующими причинами. По условиям изоляции эти устройства, предназначенные для регулирования числа витков в нейтрали первичной трехфазной обмотки, включены в две секции расщеплённой вторичной обмотки низкого напряжения со стороны рельсов. При низком напряжении резко увеличиваются токи,

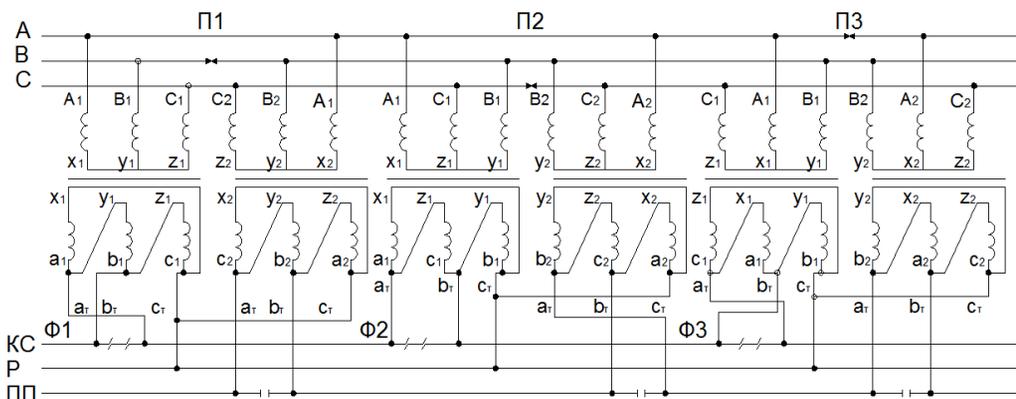


Рис. 3. Схема фазировки трёх подстанций (П1-П3) со стандартными трёхфазными трансформаторами в системе 2х25 кВ.

протекающие только через две фазы схемы. При этом через переключающее устройство, подключённое к контактной сети, протекает существенно больший ток, чем через устройство, подключённое к питающему проводу, из-за большего сопротивления контура, питающего провод-рельсы, в который последовательно включены сопротивления линейных автотрансформаторов. Кроме того, на надёжность работы устройств РПН, особенно с низкой стороны, при питании тяговой нагрузки существенно влияют более частые короткие замыкания в тяговой сети по сравнению со стационарной энергетикой. Большая частота коротких замыканий вызывается воздействием посторонних тел (части вагонов, птицы), повреждениями на ЭПС, неисправностью токоприёмников, метеоусловиями (грозы, сильный ветер), неисправностями контактной сети.

Эти обстоятельства привели к тому, что в системе 2х25 кВ с однофазными трансформаторами автоматическое регулирование напряжения под нагрузкой, по данным Московской и Горьковской железных дорог, не практикуется. Однако в [3] для усиления системы электроснабжения ВСМ рекомендуется автоматическое поддержание напряжения на токоприёмнике за счёт регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций.

2.

При разработке первых тяговых подстанций системы 2х25 кВ для Байкало-Амурской магистрали МИИТ, ВНИИЖТ и Трансэлектропроект предложили схему

соединения трансформаторов подстанции, которую можно назвать (по аналогии со схемами Скотта и Вудбриджа) схемой Чернова, с использованием трёхфазных трансформаторов с группой соединения обмоток У/Д-11, выпускаемых серийно для системы тягового электроснабжения 25 кВ [5].

В этой схеме, показанной на рис. 2а, последовательно соединены две фазы вторичных обмоток двух трёхфазных трансформаторов, один из которых имеет группу соединения обмоток У/Д-11, а другой – группу соединения обмоток У/Д-1. При этом один трансформатор подключается к контактным проводам и справа, и слева от тяговой подстанции, а второй – к проводам и правого, и левого плеч питания. Группа соединения обмоток У/Д-1 образуется путем одноимённой двойной перемаркировки двух выводов стандартного трансформатора. Начало вторичной обмотки «а» соединяется с концом вторичной обмотки «z».

Векторные диаграммы первичных и вторичных напряжений приведены на рис. 2б, где дополнительно обозначены автотрансформаторы (АТ).

С целью симметрирования нагрузки фаз питающей сети, что предусмотрено в СТУ, следует чередовать присоединение наименее нагруженных фаз подстанций к высоковольтной линии (схема фазировки). При этом схема подключения трансформаторов, присоединённых к контактным проводам, такая же, как и в СТЭ 25 кВ. Схема фазировки трансформаторов, подключённых к питающим проводам, получается автоматически, что показано на рис. 3.



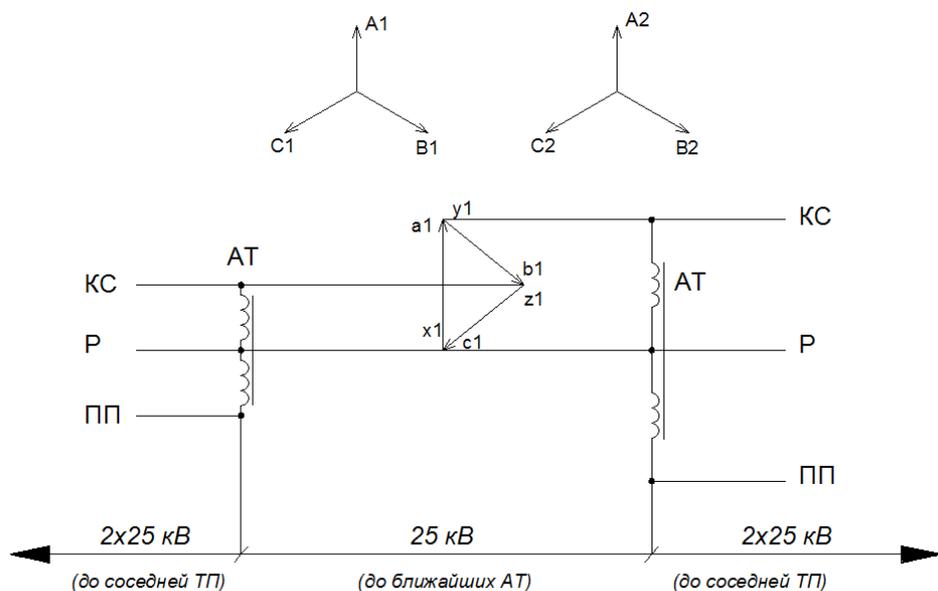


Рис. 4. Принципиальная схема работы тяговой подстанции системы 2х25 кВ в аварийном режиме.

Схема тяговой подстанции с трёхфазными трансформаторами, соединенными последовательно, уступила схеме с однофазными трансформаторами, потому что первоначально была предложена как схема с двумя трёхфазными трёхобмоточными трансформаторами. Резервирование предполагалось осуществлять следующим образом. При выходе из строя трансформатора, присоединенного к питающим проводам, осуществляется питание контактной сети с обеих сторон подстанции до ближайших автотрансформаторов по СТЭ 25 кВ (рис. 4).

Ближайший к подстанции автотрансформатор повышает напряжение до 50 кВ, и в результате на всем участке за ним до следующей тяговой подстанции работает система 2х25 кВ с двусторонним питанием тяговой сети. При выходе из строя трансформатора, присоединенного к контактным проводам, он заменяется трансформатором, присоединенным к питающим проводам, путём оперативных переключений. Во время оперативных переключений продолжится питание тяговой сети от двух подстанций.

При реализации СТЭ 2х25 кВ с однофазными трансформаторами на БАМ отошли от идеи двухтрансформаторной подстанции. Для резервирования любого из однофазных трансформаторов устанавливается резерв-

ный. Для питания трёхфазных потребителей на территории тяговой подстанции предусматриваются два трёхфазных трансформатора. В результате, если мощность одного тягового трансформатора достаточна для питания тяговой нагрузки плеча питания, на подстанции устанавливается минимум пять трансформаторов.

Отход от идеи двухтрансформаторной тяговой подстанции в системе 2х25 кВ позволил предложить и в системе с трёхфазными трансформаторами установку на подстанции третьего (резервного) тягового трансформатора [6]. Схема резервирования показана на рис. 5.

По системе 2х25 кВ с трехфазными трансформаторами предполагалось электрифицировать на ЮВЖД линию Кочетовка—Ртишево. С этой целью в 1987 году Харгипротранс выполнил проект электрификации этой линии по СТЭ 2х25 кВ с трехфазными трансформаторами на четырёх тяговых подстанциях: Никифоровка, Рассказово, Кирсанов, Вертуновская. Проект был утвержден и получил средства. Но в связи с ухудшившимся экономическим положением в стране так и не был воплощен в жизнь. В последние годы вернулись к электрификации этой линии, и Трансэлектропроектом был выпущен проект уже с пятью тяговыми подстанциями.

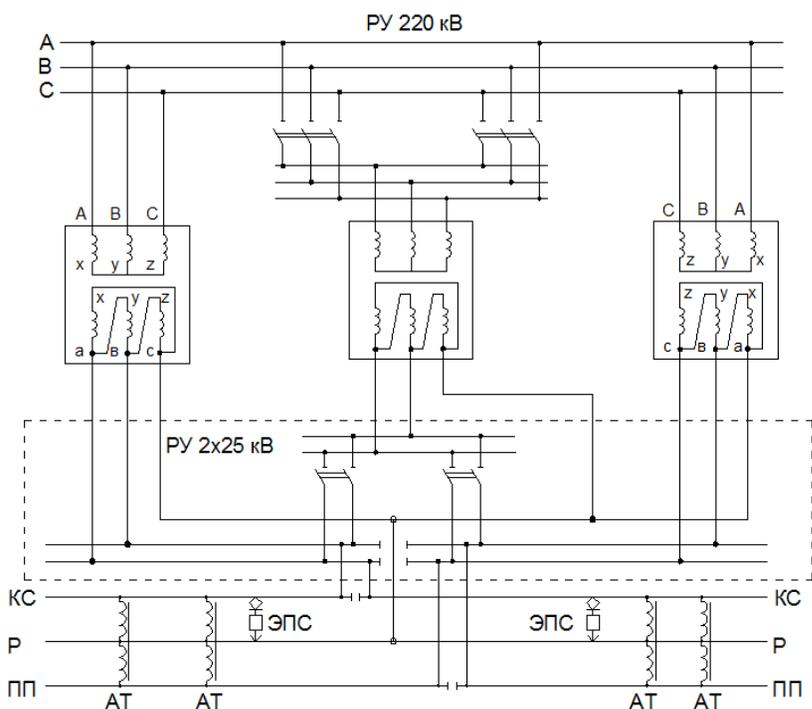


Рис. 5. Принципиальная схема подключения резервного тягового трансформатора в СТЭ 2х25 кВ с трёхфазными трансформаторами.

Система 2х25 кВ с трёхфазными трансформаторами позволяет просто организовать прохождение высокоскоростной железнодорожной магистрали крупных городов (Владимир, Нижний Новгород, Чебоксары, Казань), опираясь на существующую в них систему тягового электропитания 25 кВ с трёхфазными трансформаторами. При этом возможно отвлечение для пассажирских поездов со скоростью до 200 км/ч на магистрали с прежней системой 25 кВ.

3.

На ВСМ профессором А. Т. Бурковым предложен оригинальный способ снижения потерь напряжения в тяговой сети введением пакетного графика движения высокоскоростных поездов с интервалом не менее времени хода поезда по наиболее длинной межподстанционной зоне, что обеспечивает нахождение на одном пути между тяговыми подстанциями только одного поезда [3]. В этом случае при средних расстояниях между подстанциями в Японии и Франции соответственно 50 и 55 км межпоездной интервал равен 9–12 минутам. Подобный интервал существенно

снижает пиковую нагрузку проводов тяговой сети, трансформаторов тяговых подстанций, потери электроэнергии во всех элементах системы электроснабжения и повышает качество электроэнергии на шинах тяговых подстанций. При такой организации движения поездов пиковая нагрузка подстанций будет одноплечей, когда два встречных поезда находятся между двумя подстанциями, и двухплечей — при нахождении встречных поездов по разные стороны от подстанции.

При реализации предложенного в [3] интервала пакетного графика движения применение симметрирующих трансформаторов Скотта и Вудбриджа в системе 2х25 кВ на ВСМ в основном из-за одноплечей нагрузки тяговых подстанций практически не даёт им преимущества по снижению токов обратной последовательности в питающей сети. Возможен обратный результат при обеспечении требования СТУ о необходимости параллельной работы тяговых подстанций. Если при однофазных и трёхфазных трансформаторах за счёт чередования нагрузок фаз от параллельно работающих подстанций токи обратной последовательности источников питания



от нагрузок разных подстанций складываются векторно под углом 120° , то при одноплечей нагрузке токи обратной последовательности источников питания от симметрирующих трансформаторов складываются арифметически со сдвигом на 180° от нагрузок с одной и другой стороны тяговой подстанции. Только при равенстве нагрузок с двух сторон, что возможно на ВСМ в единичных случаях, реализуется симметрирующий эффект.

В работе [3] четко показано, что в схеме для системы 2х25 кВ Скотта–Вудбриджа трансформатор не присоединен к рельсу. И тогда на стороне 50 кВ требуется основное оборудование на этот класс напряжения. В России нет такого класса напряжения. Реализация схемы возможна только при использовании в ней основного оборудования класса 110 кВ, что значительно дороже. С целью использования оборудования класса 35 кВ в РУ 2х25 кВ в нашей стране трансформаторы присоединяются к рельсам, что определяет неравенство нагрузок обмоток трансформаторов, присоединенных к контактной сети и питающему проводу.

Предложение профессора А. Т. Буркова позволяет просто оценить необходимую мощность трёхфазных трансформаторов в системе 2х25 кВ на ВСМ. Анализ основных параметров высокоскоростных поездов [3] показывает, что максимальную мощность 18,24 МВт имеет поезд, выпущенный в Японии в 1995 году. На основании этого для оценки мощности трёхфазных трансформаторов в системе 2х25 кВ принята наибольшая мощность электропоезда 20 МВт, потребляющая от обмоток трансформаторов тяговых подстанций ток 727 А. Учтём, что в случае нахождения поезда между автотрансформаторами трёхфазный трансформатор, включённый между контактным проводом и рельсом, нагружен на 10 % больше, чем трансформатор, подключённый между питающим проводом и рельсами [7]. Последнее определяется большим сопротивлением нерасщеплённого питающего провода и последовательно включённого с ним автотрансформатора. В результате нагрузка плеча питания, подключённого к наиболее нагруженному трансформатору между контактным проводом и рельсом, от одного

поезда составит 400 А (55 % от тока поезда) при одностороннем питании тяговой сети. В дальнейшем под нагрузкой плеча питания понимается нагрузка, приходящаяся на трансформатор, присоединённый к контактным проводам.

Оценим возможность использования при мощности электропоезда 20 МВт двух последовательно включенных трёхфазных трансформаторов мощностью 40 МВА при одностороннем питании тяговой сети. Оценка проведена для наиболее нагруженного трансформатора.

Стандартный трёхфазный трансформатор мощностью 40 МВА с напряжением вторичной обмотки 27,5 кВ имеет номинальный ток обмотки 485 А. Поскольку на обмотку трёхфазного трансформатора приходится не весь ток плеча питания (в отличие от однофазного трансформатора), а $2/3$ его, то номинальный ток фазы достигается при одноплечей нагрузке 727 А, что равно току поезда при его мощности 20 МВт. При одинаковой нагрузке с двух сторон номинальный ток двух наиболее нагруженных фаз трансформатора достигается при токах 550 А на каждом плече.

При расположении двух поездов с токами 400 А по разные стороны от подстанции токи двух наиболее нагруженных фаз будут меньше их номинальных значений.

В случае нахождения двух поездов между подстанциями следует рассмотреть два варианта их взаимного расположения. Более легкий вариант – когда поезда находятся между автотрансформаторами. Тогда одноплечая нагрузка от двух поездов 800 А превысит номинальный ток наиболее нагруженной фазы трансформатора на 10 %. Максимальный кратковременный пик одноплечей нагрузки наиболее нагруженной фазы трансформатора будет, когда встречные поезда окажутся с одной стороны непосредственно у тяговой подстанции. При этом возникает одноплечая нагрузка от двух поездов. Между последовательно включёнными трансформаторами она распределяется обратно пропорционально относительно сопротивления трансформатора, подключённого к контактным проводам, и суммарного сопротивления контура, состоящего из сопротивления контактной сети–рельсы до ближайшего автотрансформатора, сопротивления самого

**Сравнение капитальных затрат на трансформаторное
оборудование тяговых подстанций СТЭ 2х25 кВ**

Схемное решение	Тип трансформатора	Стоимость трансформатора, отн. ед.	Кол-во, шт.	Итого, отн. ед.
Подстанция с тремя однофазными и двумя трёхфазными трансформаторами	ОР ДНЖ-25000/220	1	3	4,313
	ТДН-10000/220	0,656	2	
Подстанция с пятью трёхфазными трансформаторами	ТДНЖ-25000/220	0,937	3	4,123
	ТДН-10000/220	0,656	2	

АТ, сопротивления контура, питающего провод—рельсы до ближайшего АТ, и сопротивления трансформатора, подключённого к питающим проводам. Поскольку сопротивление от поезда в сторону трансформатора, подключённого к питающим проводам, существенно больше, то значительная часть нагрузки двух поездов придётся на трансформатор, подключённый к контактным проводам.

Как показано в [7], два ближайших к подстанции АТ передадут на трансформатор между питающим проводом и рельсом по 15 % нагрузки каждого поезда. В результате одномоментная нагрузка трансформатора, подключенного между контактной сетью и рельсом, составит 70 % от суммы двух поездов, что превысит на 40 % номинальный ток наиболее нагруженной фазы. Продолжительность этого пика — секунды, так как встречный поезд перейдёт на другую фидерную зону, а второй поезд достигнет ближайшего к подстанции АТ. На температуру обмоток и на старение изоляции рассмотренный случай не повлияет, поскольку он маловероятен и происходит при недогрузке двух других фаз трансформатора, находящихся с наиболее нагруженной фазой в общей масляной ванне.

Следует иметь в виду, что приведенные перегрузки будут только у трансформатора мощностью 40 МВА, подключенного между контактной сетью и рельсами при мощности электропоездов 20 МВт, когда между подстанциями находятся два поезда в случае питания тяговой сети от одной подстанции. При мощности электропоездов 12 МВт перегрузки не будет, как и в случае одностороннего питания.

При двустороннем питании тяговой сети перегрузки трансформатора не будет и при двух поездах мощностью 20 МВт, когда они находятся между автотрансформаторами. В случае одновременного нахождения двух поездов мощностью 20 МВт с одной стороны непосредственно у подстанции возможна кратковременная перегрузка трансформатора и при двустороннем питании тяговой сети, но менее 40 %. Такая перегрузка кратковременно допустима для трансформатора даже при одновременной перегрузке трёх фаз. Отметим, что при трёхфазных трансформаторах вероятность одностороннего питания тяговой сети в 2 раза меньше, чем при однофазных.

При необходимости перегрузку трансформатора, подключенного к контактной сети, при двух поездах с одной стороны от подстанции можно устранить увеличением загрузки трансформатора, подключенного к питающему проводу, путём уменьшения сопротивления контура тяговой сети между последовательно включенными трансформаторами. Это можно осуществить расщеплением питающего провода на участке между подстанцией и ближайшим АТ, установкой продольной компенсации на подстанции в контур питающий провод—рельсы, а также уменьшением расстояния от подстанции до ближайшего АТ.

Таким образом, мощности двух трёхфазных трансформаторов по 40 МВА, соединённых последовательно, достаточно для питания высокоскоростных поездов мощностью до 20 МВт при интервале между ними не менее времени хода поезда по наиболее длинной межподстанционной зоне.

По заказу авторов заводом-изготовителем трансформаторного оборудования



ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург)—Урал-электротряжмаш» проведена оценка относительной стоимости трансформаторов ОРДНЖ-25000/220; ТДН-10000/220; ТДТНЖ-25000/220. Поскольку на данный момент завод не выпускает однофазные трансформаторы типа ОРДНЖ мощностью более 25000 кВА, за единицу принята известная стоимость однофазного трансформатора мощностью 25000 кВА. Исходя опять же из известной стоимости трехфазных трансформаторов, определена их стоимость в относительных единицах. Поскольку в обеих схемах РУ 2х25 кВ можно выполнить одинаково, с использованием отечественного оборудования, то проведено сравнение двух схем только по стоимости трансформаторов. Два трансформатора ТДН-10000/220 необходимы для питания нетяговых потребителей на тяговых подстанциях в обоих случаях. Результаты относительной оценки стоимости трансформаторов тяговых подстанций СТЭ 2х25 кВ приведены в таблице 1.

Результаты в таблице показывают, что при одинаковой стоимости трансформаторов для питания нетяговых потребителей вариант с однофазными трансформаторами несколько дороже варианта с трёхфазными при одинаковой мощности силовых трансформаторов. При этом следует учесть, что однофазный трансформатор с предлагаемой мощностью 48 МВА будет дороже трёхфазного мощностью 40 МВА.

ВЫВОДЫ

1. Учитывая размеры нашей страны и размещение народонаселения по сравнению с Японией и странами Западной Европы, а также численность населения России по сравнению с Китаем, проектировать систему электроснабжения ВСМ с интервалом движения 5 минут на ближайшие 25 лет (срок службы трансформаторов) представляется нецелесообразным. Более рационально и экономично для России при проектировании системы электроснабжения ВСМ исходить из предложенной схемы организа-

ции движения поездов, когда интервал попутного следования определяется временем хода поезда по наиболее длинной межподстанционной зоне. В зависимости от скорости поезда этот интервал будет равен 9–14 минутам.

2. Принимая во внимание ряд существенных преимуществ рассмотренной схемы с трёхфазными трансформаторами и особенно надёжную работу устройств РПН трёхфазных трансформаторов, авторы предлагают для системы электроснабжения высокоскоростных магистралей России схему с двумя рабочими, серийно выпускаемыми для системы тягового электроснабжения 25 кВ трёхфазными трансформаторами мощностью 40 МВА, соединёнными последовательно, и одним резервным трансформатором такой же мощности. При этом если в обычной системе 25 кВ установленная мощность трансформаторов на подстанциях равна 80 МВА, то на ВСМ она станет 120 МВА, что соответствует мировой практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скоростные железные дороги Японии: Синкансэн / Под ред. В. Г. Альбрехта. — М.: Транспорт, 1984. — 200 с.
2. Бородулин Б. М., Векслер М. И., Марский В. Е., Павлов И. В. Система тягового электроснабжения 2х25 кВ. — М.: Транспорт, 1989. — 247 с.
3. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие в 2 т. / И. П. Киселёв и др. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. — Т. 1. — 308 с., Т. 2. — 372 с.
4. Сапронов Ю. Д., Сарафанов В. И., Чернов Ю. А. Опыт эксплуатации системы электроснабжения 2х25 кВ на Вяземской дистанции электроснабжения Московской железной дороги // Электрификация и энергетическое хозяйство. — 1987. — Вып. 4. — С. 9–15.
5. Авторское свидетельство 516551 СССР, МКИ В60 М 3/00. Система энергоснабжения электрических железных дорог переменного тока / Чернов Ю. А., Бородулин Б. М., Павлов И. В.: МИИТ (СССР) № 1979639/07. Заявл. 27.12.1973 // Открытия. Изобретения. — 1976. — № 21.
6. Авторское свидетельство 1782795 СССР, МКИ В60 М 3/00. Устройство энергоснабжения электрических железных дорог переменного тока / Чернов Ю. А., Гуков А. И., Павлов И. В.: МИИТ (СССР) № 48086377/11. Заявл. 02.04.90 // Открытия. Изобретения. — 1992. — № 47.
7. Чернов Ю. А. Электроснабжение железных дорог: Учеб. пособие. — М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. — 430 с. ●

Координаты авторов: **Чернов Ю. А.** — 8(495) 684–2277, **Дмитриева Н. Ю.** — Yudinany@ya.ru, **Кокорина О. Ю.** — Brusentsova_Olesya@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 14.07.2016, принята к публикации 20.10.2016.