

УДК 621.311.42

В.З. Манусов, П.В. Морозов

## Снижение несимметрии в трехфазной сети, питающей двухфазную сеть тяговых подстанций скоростных железных дорог переменного тока

Дан анализ структуры и схем трансформаторных тяговых подстанций скоростных железных дорог переменного тока. Основное внимание уделяется подстанциям с трансформаторными преобразователями на основе схемы Скотта. Эти преобразователи обладают нулевой несимметрией по току при равномерной нагрузке двухфазной сети. Предложено автоматическое устройство уравнивания мощности, которое обеспечивает полную симметрию трехфазной и двухфазной сети при любых режимах.

**Ключевые слова:** трехфазная сеть, трансформаторный преобразователь Скотта, несимметрия, автоматическое управление, уравнивание мощности.

### Задача снижения несимметрии в трехфазной сети, питающей несимметричную нагрузку с числом фаз, не кратным трем

Для питающей трехфазной сети тяговая сеть ( $2 \times 25$  кВ) двухпутной скоростной железной дороги переменного тока является несимметричной нагрузкой с количеством фаз, не кратным трем, что создает значительную токовую несимметрию в трехфазной сети. Как правило, тяговую сеть с трехфазной сетью связывают тяговые подстанции с трансформаторными преобразователями числа фаз, структура которых влияет на токовую несимметрию в трехфазной сети. Кроме того, на несимметрию влияет соотношение между нагрузками тяговых плеч на вторичной стороне трансформаторного преобразователя.

#### Постановка задачи

Цель настоящей работы – проанализировать основные структуры трансформаторных преобразователей тяговых подстанций и предложить схемное решение, которое обеспечит минимальную токовую несимметрию в трехфазной сети. Кроме того, для снижения несимметрии при неравномерных нагрузках необходимо обеспечить уравнивание мощностей на вторичных обмотках трансформаторного преобразователя.

### Включение трансформаторного преобразователя между автотрансформаторной системой тягового электроснабжения и трехфазной сетью

Устройство автотрансформаторной системы тягового электроснабжения [1] определяет основные требования к структуре трансформаторного преобразователя на тяговой подстанции (рис. 1).

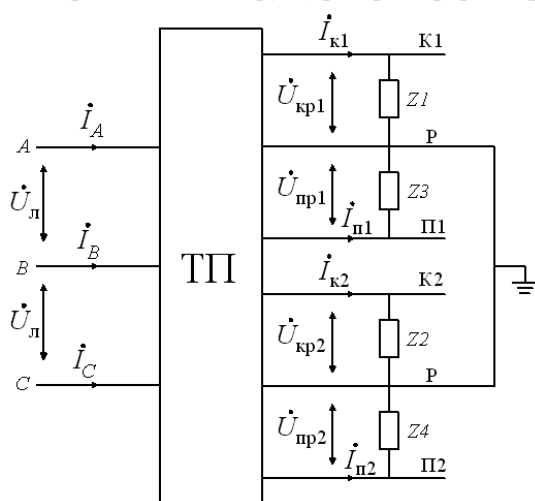


Рис. 1. Обобщенная схема включения трансформаторного преобразователя на тяговой подстанции

Первичная сторона преобразователя подключена к трехфазной сети. Ей соответствуют три фазных провода:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , через которые текут токи  $I_A, I_B, I_C$ . Фазные напряжения обозначены  $U_A, U_B, U_C$ , а межфазные –  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ . Вторичная сторона подключена к системе тягового электроснабжения с четным количеством фаз, не кратным трем, например двухфазной системе. Каждой из фаз соответствует пара линий: контактный провод ( $k1, k2$ ) и питающий провод ( $п1, п2$ ). Для удобства анализа режима работы подстанции система тягового электроснабжения представлена в виде четырех одинаковых комплексных активно-индуктивных нагрузок между каждым из упомянутых проводов и рельсом ( $p$ ):  $Z_{k1} = Z_{п1} = Z_{k2} = Z_{п2} = Z$ , что соответствует равномерной нагрузке фаз на вторичной стороне трансформаторного преобразователя.

ля. На нагрузках падают напряжения соответственно  $U_{кр1}, U_{пр1}, U_{кр2}, U_{пр2}$ , а через них текут токи  $I_{к1}, I_{п1}, I_{к2}, I_{п2}$ , которые отстают на одинаковый угол от своих напряжений. Структура трансформаторного преобразователя и соотношение витков между его обмотками влияют на связь между токами на вторичной стороне ( $I_{к1}, I_{п1}, I_{к2}, I_{п2}$ ) и токами на первичной стороне ( $I_A, I_B, I_C$ ). По токам на первичной стороне определяется коэффициент несимметрии [1].

**Анализ структур трансформаторных преобразователей на тяговых подстанциях**

Базовыми ячейками трансформаторных преобразователей являются трехфазный трансформатор, включенный по схеме «звезда–треугольник», и однофазный трансформатор. На основе этих ячеек существуют следующие варианты построения трансформаторных преобразователей: преобразователь с двумя однофазными трансформаторами, преобразователь из двух трехфазных трансформаторов, комбинированный преобразователь из трехфазного и однофазного трансформатора.

В настоящее время на российских железных дорогах с автотрансформаторной системой электроснабжения наибольшее распространение получил преобразователь с двумя однофазными трансформаторами на тяговой подстанции [1], расчетная схема которого приведена на рис. 2.

В качестве одного из способов симметрирования токов в трехфазной сети является применение на тяговых подстанциях трехфазных трансформаторов типа «звезда–треугольник» с каскадным включением (рис. 3) [1]. Для этого на выводах вторичных обмоток трехфазного трансформатора  $T$  или устанавливаются автотрансформаторы  $AT$ , которые формируют напряжение между питающим и контактным проводами в два раза больше, чем между контактным проводом и рельсом [1]. Как видно из рис. 3, трансформаторы  $T1$  и  $T2$  подключают к линиям электропередачи 110 (220) кВ по-разному – один с обратным чередованием фаз по сравнению с другим. Такое подключение трансформаторов позволяет получить необходимое напряжение между контактным и питающим проводами для обоих плеч питания.

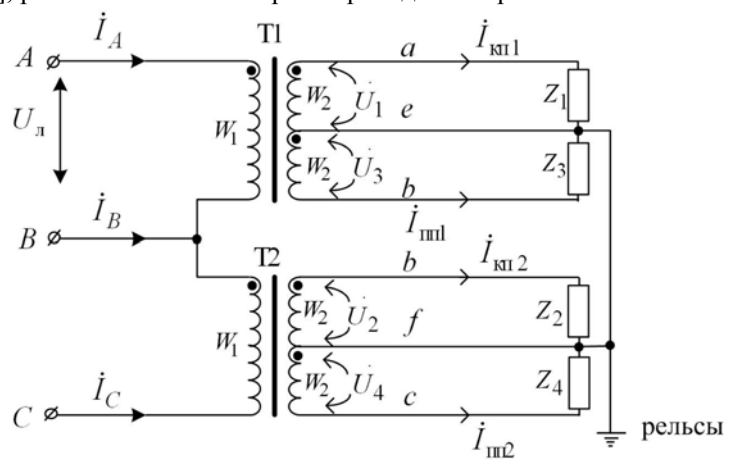


Рис. 2. Расчетная схема трансформаторного преобразователя с двумя однофазными трансформаторами

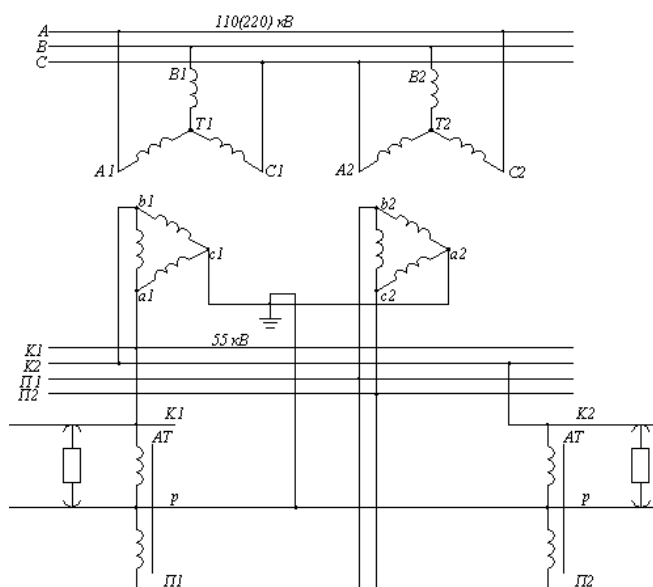


Рис. 3. Схема включения трехфазных трансформаторов на тяговой подстанции

При использовании нескольких трехфазных трансформаторов в автотрансформаторной системе электроснабжения остаются недостатки, имеющие место и в системе без автотрансформаторов: невозможность высококачественного регулирования напряжения по плечам питания из-за существенного различия потерь напряжения в отстающих и опережающих фазах трансформаторов; неполное использование мощности трансформаторов [1].

Первичная система обмоток трехфазного трансформатора, получающая питающее напряжение от трехфазной сети, соединена в звезду, а система вторичных обмоток, работающая на нагрузку, соединена в треугольник (см. рис. 3).

При этом для питания первого и второго контактных проводов и соответственно для питания первого и второго питаю-

ших проводов используются напряжения, снимаемые только с двух из трех вторичных обмоток. Таким образом, вторичная обмотка каждого трехфазного трансформатора, соединенная треугольником, является элементом двухфазной цепи, напряжения в которой сдвинуты на  $120^\circ$  ( $60^\circ$ ).

Как показали исследования, при каскадном включении трехфазных трансформаторов при равномерной нагрузке фаз на вторичной стороне всего трансформаторного преобразователя сохраняется несимметрия 50%.

Для уменьшения несимметрии токов в линиях высокого напряжения, питающих трехфазные и однофазные трансформаторы, последние следует подключить к этим линиям так, чтобы угол между напряжениями плеч был равен  $90^\circ$ . В этом случае несимметрия токов будет минимальной.

Чтобы перераспределить токи в трехфазной линии передачи, авторами в [1] было предложено одновременно с трехфазным трансформатором использовать однофазный (рис. 4), который позволил таким образом перераспределить токи в фазах, чтобы они были загружены равномерно и сдвинуты на угол  $120^\circ$ . Как показали расчеты такого схемного решения, коэффициент несимметрии в трехфазном трансформаторе составляет 100%. Это означает, что одна из фаз трансформатора перегружена, а остальные две недоиспользуются.

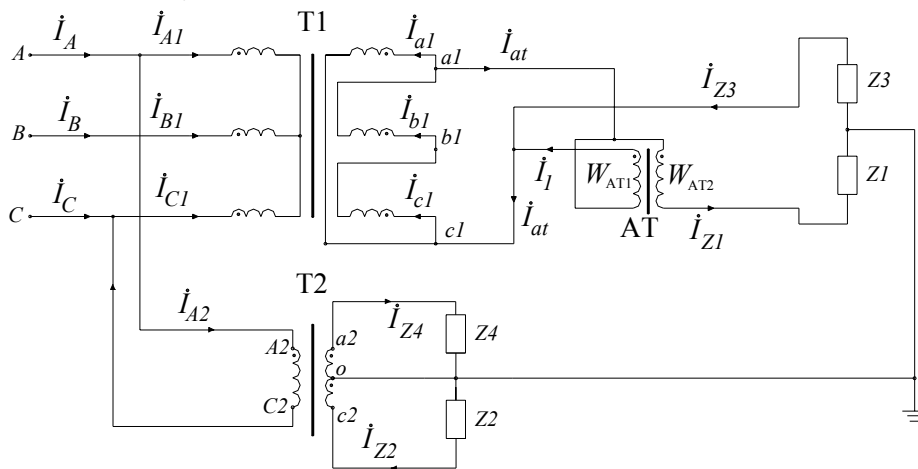


Рис. 4. Расчетная схема тяговой подстанции с комбинированным включением трехфазных трансформаторов

Для достижения наиболее симметричной загрузки трехфазной сети, подходящей к подстанции электрической железной дороги переменного тока с системой электроснабжения  $2 \times 25$  кВ в [2], было предложено применить преобразователь из трёх фаз в четыре на базе схемы Скотта. Векторная диаграмма для такого преобразователя приведена на рис. 5.

Из представленных векторных диаграмм видно, что наилучшую симметрию в трехфазной сети обеспечивает трансформаторный преобразователь на основе схемы Скотта. Однако при этом следует иметь в виду, что трансформатор Скотта обеспечивает полную симметрию при равномерных нагрузках на его вторичных обмотках.

#### Заключение

В статье выполнены исследования различных вариантов построения трансформаторных преобразователей в системах тягового электроснабжения переменного тока  $2 \times 25$  кВ скоростных железных дорог.

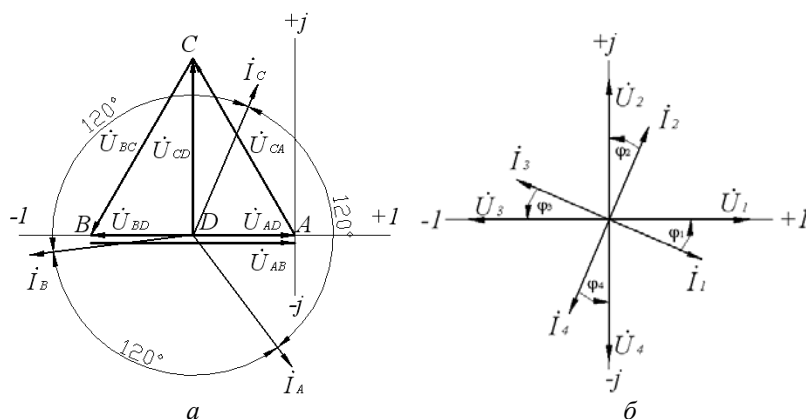


Рис. 6. Векторные диаграммы преобразователя трёх фаз в четыре на основе схемы Скотта: а – векторные диаграммы первичной цепи; б – векторные диаграммы вторичных цепей трансформаторов

Показано, что наиболее предпочтительным является трансформаторный преобразователь, выполненный по схеме Скотта, который обеспечивает токовую симметрию при условии равномерной загрузки вторичных обмоток.

*Литература*

1. Бородулин Б.М. Система тягового электроснабжения 2×25 кВ / Б.М. Бородулин, М.И. Векслер, В.Е. Марский, И.В. Павлов. – М.: Транспорт, 1989. – 247 с.
2. Применение трансформаторов Скотта на тяговых подстанциях электрических железных дорог / Г.Н. Ворфоломеев, С.А. Евдокимов, П.В. Морозов, В.И. Сопов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 6. – С. 273–276.

---

**Манусов Вадим Зиновьевич**

Профессор каф. систем электроснабжения предприятий  
Новосибирского государственного университета (НГТУ)  
Тел.: 8 (383-3) 46-15-51  
Эл. почта: manusov36@mail.ru

**Морозов Павел Владимирович**

Ассистент каф. теоретических основ электротехники НГТУ  
Тел.: 8 (383-3) 46-07-58  
Эл. почта: kettle@ngs.ru

Manusov V.Z., Morozov P.V.

**Investigation of three-phase grid unbalance decrease methods at high-speed train AC traction substations**

The paper studies high-speed AC traction substations structures. It is mainly focused on the sub-station based on Scott transformer with zero unbalance of equal traction loads. The automatic power equalization device is proposed to provide zero unbalance at uneven traction loads.

**Keywords:** three-phase grid, Scott transformer, automatic control, power equalization, current unbalance.

---