

УДК 621.316.11

Мясоедова Лариса Анатольевна
Амурский государственный университет
г. Благовещенск, Россия
E-mail: lo.myasoedova@gmail.com
Myasoedova Larisa Anatolievna
Amur State University
Blagoveschensk, Russia
E-mail: lo.myasoedova@gmail.com

ПРИНЦИПЫ ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, ИМЕЮЩИХ ТЯГОВУЮ НАГРУЗКУ, ПРИ ИСКАЖЕНИЯХ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

PRINCIPLES OF EQUIVALENTATION OF THE ELECTRIC NETWORK CIRCUITS HAVING TRACTION LOAD WITH DISTORTION OF THE POWER QUALITY

Аннотация. В работе представлены подходы к эквивалентированию сопротивлений элементов в схемах замещения электрических сетей. Получены типовые эквивалентные схемы замещения для тяговых подстанций при нескольких источниках и рецепторах искажения качества электрической энергии. Приведены выражения для определения сопротивлений элементов схем замещения, используемые при расчете несинусоидальных и несимметричных режимов.

Abstract. The paper presented the principles of equivalent resistance of the elements of equivalent circuits of electrical networks. Typical equivalent circuits for traction substations with several sources and receptors of distortion of the quality of electrical energy have been obtained. Expressions are given for determining the resistance of equivalent circuit elements used in the calculation of non-sinusoidal and asymmetric modes.

Ключевые слова: электрическая сеть, тяговая подстанция, схема замещения, сопротивление, несинусоидальность, несимметрия.

Key words: electrical network, traction substation, equivalent circuit, resistance, non-sinusoidality, asymmetry.

DOI: 10.22250/20730268_2022_97_86

Введение

В современных условиях успешная эксплуатация электрических сетей подразумевает постоянный контроль показателей качества электрической энергии (ПКЭ) и управление параметрами режима, особенно при наличии подстанций, имеющих нагрузку в виде электрифицированной тяги переменного тока [1]. В первую очередь персоналу необходимо знать значения ПКЭ, характеризующих несинусоидальность и несимметрию напряжения, в точках общего присоединения и на шинах 220 кВ тяговых подстанций. Поэтому следует определить основной подход при эквивалентировании схем электрических сетей энергокомпаний, формализовать этапы преобразования этих схем и, как итог, получить типовые эквивалентные схемы замещения для тяговых подстанций и сетей с целью исследовать параметры качества электрической энергии.

Краткая характеристика системы электроснабжения тяги переменного тока

Первый шаг при преобразовании схем электрической сети – получение эквивалентной схемы замещения для тяговой подстанции. С этой целью необходимо рассмотреть систему электроснабжения тяговой подстанции и произвести ее оценку.

Главная схема электрических соединений тяговой подстанции определяется в зависимости от схемы электрической сети, питающей данную подстанцию. При этом по назначению схемы тяговых подстанций подразделяются на опорные, промежуточные, транзитные и тупиковые. На Дальнем Востоке встречаются в основном промежуточные и тупиковые тяговые подстанции, схемы которых реализованы по типовым схемам подстанций, рекомендуемых Стандартом ПАО ФСК [1].

Ходовые рельсы и контактные провода – это составляющие тяговой сети, которые предназначены как для передачи электрического тока непосредственно от тяговой подстанции к локомотиву, движущемуся по железнодорожным путям, так и для отвода тока обратно на подстанцию. Дополнительными составляющими контактной сети служат контактная подвеска, опорные и поддерживающие конструкции [2].

Потребители электрической энергии на тяговой подстанции подразделяются на стационарные (нетяговые), к которым можно отнести электроустановки всех служб железнодорожного транспорта, кроме объектов электротяги, и подвижные (тяга переменного тока). Питание объектов железнодорожной станции или узла осуществляется от трансформаторных подстанций напряжением 10/0,4 кВ, которые связаны между собой распределительными сетями, подключенными к распределительному устройству тяговой подстанции или подстанции энергосистемы напряжением 10 кВ.

Все железнодорожные линейные и районные потребители получают электроэнергию по линиям продольного электроснабжения. Эти линии предназначены только для электроснабжения любых стационарных потребителей, расположенных недалеко от электрифицированных железных дорог. Для электроснабжения собственно тяговой нагрузки на электрифицированных железных дорогах, использующих переменный ток напряжением 27,5 кВ, применяется система два провода-рельс (ДПР) [2,3,4].

На основе анализа системы электроснабжения тяговой подстанции переменного тока, рассмотренной выше, целесообразно получить ее эквивалентную (обобщенную) схему замещения, которая может служить в качестве типовой для тяговых подстанций Дальнего Востока (рис. 1).

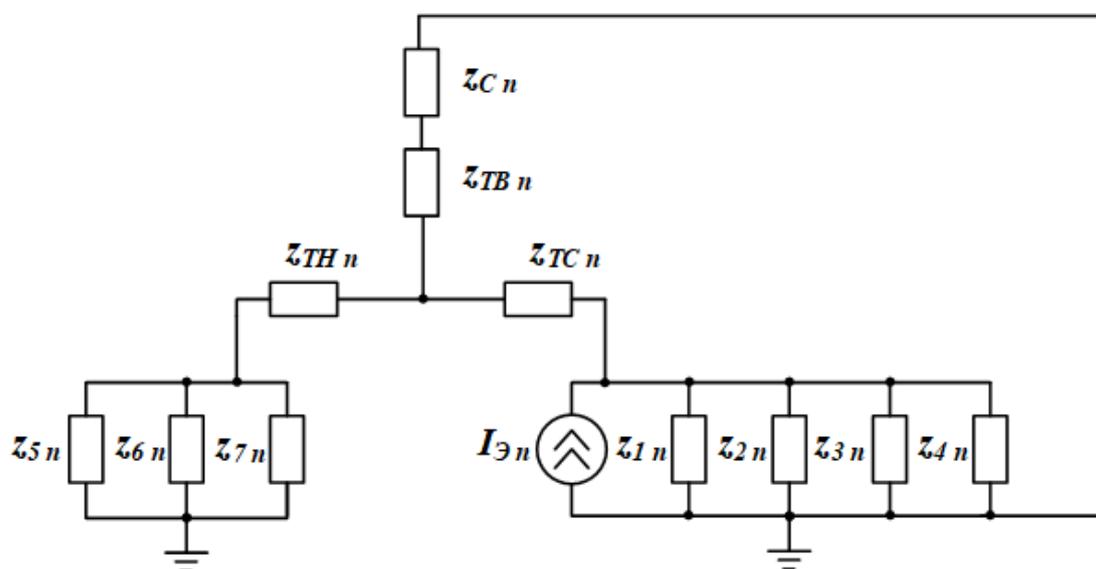


Рис. 1. Эквивалентная (обобщенная) схема замещения для тяговой подстанции (ТП).

На схеме замещения используются следующие обозначения:

I_n – эквивалентный источник тока для n -й гармоники напряжения и искажения качества электроэнергии;

Z_{1n} – эквивалентное сопротивление для системы два провода-рельс; Z_{2n} – эквивалентное сопротивление рассматриваемой контактной сети; Z_{3n} – эквивалентное сопротивление для системы продольного электроснабжения; Z_{4n} – эквивалентное сопротивление для всех устройств, улучшающих качество электроэнергии, для примера рассматриваются силовые резонансные фильтры и(или) фильтросимметрирующие устройства и др.; Z_{5n} – эквивалентное сопротивление всей распределительной сети, которая подключена к шинам напряжением 10 кВ тяговой подстанции; Z_{6n} – эквивалентное сопротивление высоковольтных двигателей, подключенных к шинам напряжением 10 кВ тяговой подстанции; Z_{7n} – эквивалентное сопротивление компенсирующих устройств, подключенных к шинам напряжением 10 кВ тяговой подстанции; Z_{Cn} – эквивалентное сопротивление питающей системы; $Z_{ТВ_n}$, $Z_{ТС_n}$, $Z_{ТН_n}$ – соответственно эквивалентные сопротивления обмоток силового трансформатора, подключенных к шинам высшего, среднего и низшего напряжения тяговой подстанции [2].

Рассматриваемые эквивалентные сопротивления в данной схеме приведены для частоты n -й гармоники [5,6,7].

Определение сопротивлений элементов схем замещения при несинусоидальных и несимметричных режимах

Для оценки несинусоидальности в рассматриваемой схеме необходимо определить сопротивление ее элементов на частоте соответствующей гармоники. Основными элементами обобщенной схемы замещения являются воздушная и кабельная линии, силовые трансформаторы напряжением 27,5 и 10 кВ, двигатели напряжением 10 кВ, батареи конденсаторов и реакторы, поэтому были определены их сопротивления на частоте n -й гармоники.

Сопротивление системы

$$Z_{Cn} = j \cdot \frac{U^2}{S_{КЗ}} \cdot n. \quad (1)$$

Сопротивление линии

$$Z_{ln} = r_0 \cdot l \cdot k_{rn}^{\wedge} + j \cdot x_0 \cdot l \cdot n, \quad (2)$$

где k_{rn}^{\wedge} – коэффициент увеличения активного сопротивления линии от номера высших гармоник (ВГ).

Сопротивление двухобмоточного трансформатора обмотки ВН (СН и на НН)

$$Z_{Tn} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U^2}{S_{Tном}^2} \cdot k_{rn}^{\wedge} + j \cdot \frac{U_{к} \cdot U^2}{S_{Tном}^2} \cdot n, \quad (3)$$

где k_{rn}^{\wedge} – коэффициент увеличения активного сопротивления трансформатора от номера ВГ.

Сопротивление двигателя

$$Z_{д_n} = R_{д(1)} \cdot \sqrt{n} + j \cdot X_{д(1)}, \quad (4)$$

где $R_{д(1)}$, $X_{д(1)}$ – соответственно активное и реактивное сопротивление двигателя на промышленной частоте.

Сопротивление батарей конденсаторов

$$Z_{БК} = j \cdot \frac{U^2}{Q_{БК} \cdot n}. \quad (5)$$

Сопротивление реакторов

$$Z_p = R_p \cdot (1 + \theta, 1 \cdot n^{1.2}) + j \cdot X_p \cdot n. \quad (6)$$

Эквивалентирование сопротивлений элементов схемы замещения для определения параметров, входящих в эквивалентную схему замещения Z_i (где $i=1 \div 7$), проводится посредством последовательно-параллельного сложения [4].

По таким же принципам можно составить и схемы замещения для анализа несимметрии в рассматриваемой сети. Отличием будет то, что в этих схемах указаны эквивалентные сопротивления для обратной последовательности.

Эти сопротивления элементов схемы замещения для обратной последовательности определяются следующим образом:

$$\text{сопротивление системы } Z_{2U} = \frac{U^2}{S_{кз}};$$

$$\text{сопротивление линии электропередачи } Z_{2U} = Z_{1U};$$

$$\text{сопротивление двухобмоточного трансформатора } Z_{2U} = \frac{U_{к} \cdot U^2}{S_{Тном}};$$

$$\text{сопротивление трехобмоточного трансформатора } Z_{2U}^{BH} = \frac{U_{кВ} \cdot U^2}{S_{Тном}}, \quad Z_{2U}^{CH} = \frac{U_{кС} \cdot U^2}{S_{Тном}},$$

$$Z_{2U}^{HH} = \frac{U_{кН} \cdot U^2}{S_{Тном}};$$

$$\text{сопротивление электродвигателя } Z_{2U} = \frac{U^2}{K_{II} \cdot S_{ном}} \quad (\text{где } K_{II} \text{ – кратность пускового тока});$$

$$\text{сопротивление батареи конденсаторов } Z_{2U} = \frac{U^2}{Q_{БК}};$$

$$\text{сопротивление реактора } Z_{2U} = \frac{X_p \cdot U^2}{S_{ном}}.$$

Типовая схема замещения для тяговой подстанции при оценке несинусоидальности и несимметрии напряжения

Упрощенная эквивалентная схема замещения для тяговой подстанции, необходима при анализе несинусоидальных режимов, представлена в следующем виде (рис. 2) [4,7].

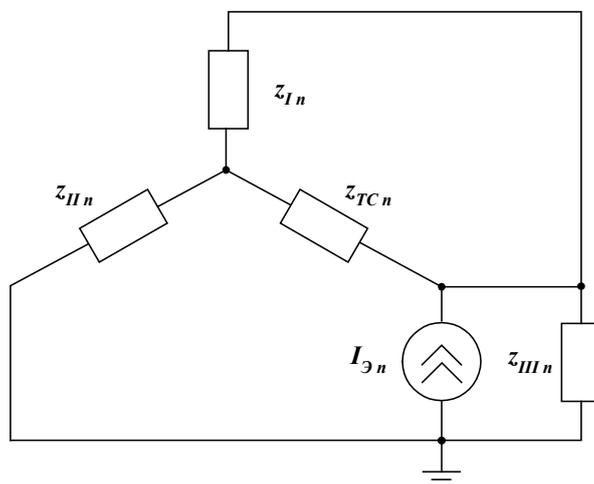


Рис. 2. Упрощенная (эквивалентная) схема замещения тяговой подстанции.

Эквивалентные сопротивления элементов, показанные в упрощенной схеме замещения, были получены путем последовательного и параллельного преобразования элементов [2]:

$$Z_{I n} = Z_{C n} + Z_{T B n};$$

$$Z_{II n} = Z_{T H n} + Z_{5 n} // Z_{6 n} // Z_{7 n};$$

$$Z_{III n} = Z_{1 n} // Z_{2 n} // Z_{3 n} // Z_{4 n}.$$

Эквивалентная схема электрической сети при наличии источников и рецепторов искажения качества электрической энергии

Теперь на основе упрощенных схем замещения для тяговых подстанций можно составить эквивалентную (обобщенную) схему замещения сети, которая содержит источники и рецепторы возможных искажений (рис. 3).

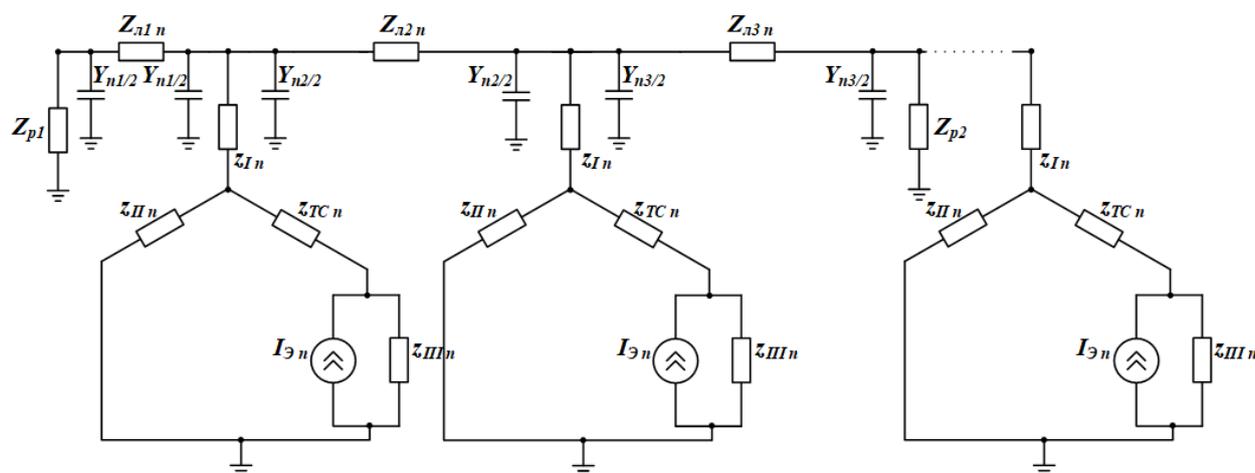


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения сети при наличии тяговых подстанций.

В представленной эквивалентной схеме замещения можно осуществить учет эквивалентного сопротивления любого рецептора искажений, которым может быть не только тяговая, но и любая сетевая подстанция, входящая в энергосистему или промышленное предприятие [4,7,8].

Заключение

На основе оценки системы электроснабжения тяги переменного тока получена типовая схема замещения для тяговой подстанции с целью анализа несинусоидальности и несимметрии в питающей сети. Получены выражения для определения сопротивлений элементов схем замещения, используемых при расчете несинусоидальных и несимметричных режимов. Проведен анализ электрической сети при низком качестве электроэнергии и разработана ее эквивалентная схема, содержащая несколько источников искажения качества электроэнергии тяговых подстанций и несколько рецепторов искажения, которые позволяют определить количественные значения ПКЭ, характеризующие несинусоидальность и несимметрию в сети.

1. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кв. Типовые решения. Дата введения – 2007-12-20 [Электронный ресурс]: URL: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.30.010-2008.pdf> (дата обращения: 15.03.2022г).

2. Савина, Н. В. Системный анализ потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях в условиях неопределенности: специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: автореф. дис. ... д-ра техн. наук – Иркутск, 2010. – 49 с.

3. Myasoedov, Y. V. Evaluation of influence of low of the electric power quality on the account of electric power consumption in networks with the tractive load / Y. V. Myasoedov, N.V Savina // 6th International Conference "Electrical power quality and utilisation". – Cracow, 2001. – P.451-458.

4. Myasoedov, Y. V. Równoważność rezystancji czynnych i biernych w modach niesinusoidalnych i

asymetrycznych / Y. V. Myasoedov, N.V Savina // III Miedzynarodowe seminarium «Problemy elektroenergetyki». – Lodz, 2002. – P.129-135.

5. Myasoedov, Y. V. Wyznaczenie proporcji wkładów wyższych harmoniczných do wspólnego punktu połączenia z kilku źródeł zniekształceń / Y. V. Myasoedov, N.V Savina // III Miedzynarodowe seminarium «Problemy elektroenergetyki». – Lodz, 2002. – P.123-128.

6. Myasoedov, Y. V. Load currents modeling for distributed sources of power quality disturbances / Y. V. Myasoedov, N.V Savina // 8th International Conference «Electrical power quality and utilization». – Cracow, 2005. – P.213-220.

7. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 г. № 1523-р [Электронный ресурс]: URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/> (дата обращения: 15.03.2022г).

8. Myasoedova, L. A. Influence of Quality of the Electric Energy on Reliability of Electrical Supply Systems / N. V. Savina, Y. V. Myasoedov, L. A. Myasoedova // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, 03-04 октября 2018 г. – Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. – P. 8602690. – DOI 10.1109/FarEastCon.2018.8602690.