

УДК 621.316.11

**Мясоедов Юрий Викторович**

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

*E-mail:* [myv@amursu.ru](mailto:myv@amursu.ru)**Myasoedov Yuriy Victorovich**

Amur State University

Blagoveschensk, Russia

*E-mail:* [myv@amursu.ru](mailto:myv@amursu.ru)**ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
ПРИ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКАХ ИСКАЖЕНИЯ****EVALUATION OF THE MUTUAL INFLUENCE OF POWER QUALITY INDICATORS  
UNDER SEVERAL SOURCES OF DISTORTION**

*Аннотация.* Рассмотрен комплексный метод расчета несинусоидальных и несимметричных режимов, позволяющий учитывать взаимное влияние показателей качества электрической энергии. Получены и определены количественные значения искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициентов несимметрии по обратной последовательности при нескольких источниках искажения. Произведена оценка влияния каждой тяговой подстанции в искажении качества электрической энергии в точках общего присоединения.

*Abstract.* The paper considers a complex method for calculating non-sinusoidal and asymmetric modes, which makes it possible to take into account the mutual influence of electric energy quality indicators. The quantitative values of the distortion of the sinusoidality of the voltage curve and the coefficients of asymmetry in the reverse sequence are obtained and determined for several sources of distortion. An assessment was made of the impact of each traction substation on the distortion of the quality of electrical energy at the points of common connection.

*Ключевые слова:* электрическая сеть, тяговая подстанция, коэффициент токораспределения, несинусоидальность, несимметрия.

*Key words:* electrical network, traction substation, current distribution coefficient, non-sinusoidality, asymmetry.

DOI: 10.22250/20730268\_2022\_97\_92

**Введение**

Несинусоидальные и несимметричные режимы в сетях электроэнергетических систем (ЭЭС), питающих тяговую нагрузку, имеют большее число источников искажения качества электрической энергии, территориально удаленных друг от друга, но электрически связанных, что делает принципиально невозможным применение к ним классических методов расчета [1]. В то же время нагрузка тяговых подстанций непостоянна и меняется во времени в весьма широких пределах, поэтому коэффициент искажения синусоидальности напряжения описывается случайным процессом. Кроме того, сопротивления и проводимости линий электропередачи, трансформаторов и автотрансформаторов, реакторов при наличии высших гармонических составляющих резко отличаются от их значений на промышленных частотах.

Учитывая отмеченные факторы, а также то, что каждая тяговая подстанция, являясь источником искажения качества электроэнергии, т.е. генератором высших гармоник (ВГ), в то же время принимает (приемник ВГ) высшие гармоники от соседних тяговых подстанций, был разработан комплексный метод расчета несинусоидальных режимов в сетях ЭЭС с тяговой нагрузкой.

### **Комплексный метод расчета несинусоидальных режимов в сетях ЭЭС с тяговой нагрузкой**

При разработке данного метода использовались теория случайных функций, теория системных исследований, методы эквивалентирования.

В результате получены практические инженерные выражения, описывающие закономерности изменения показателей качества электрической энергии (ПКЭ) во времени в различных узлах ЭЭС, питающей тягу переменного тока. Разработана методика учета высших гармонических составляющих в параметрах схемы замещения элементов сети. Разработаны принципы и алгоритмы эквивалентирования сетей для расчета несинусоидальных и несимметричных режимов при нескольких территориально удаленных источниках искажения качества электроэнергии.

На основе специального анализа получен комплексный метод расчета несинусоидальных и несимметричных режимов при произвольном законе распределения коэффициента искажения качества электроэнергии, включающий оригинальные методы математического описания схем любой конфигурации при оценке доли вклада в искажение качества электроэнергии каждой тяговой подстанцией и выбора способа их эквивалентирования [2].

Сущность комплексного метода расчета несинусоидальных и несимметричных режимов состоит в следующем: разработка математической модели токовой нагрузки [4], источника искажения тяги переменного тока; составление схемы замещения сети для расчета несинусоидальных и несимметричных режимов и сведение ее к обобщенным схемам тяговой подстанции их сети, содержащей источники и рецепторы искажений; определение эквивалентных параметров схем замещения; определение коэффициентов токораспределения от каждого источника, т. е. каждой тяговой подстанции (ТП), для точки общего присоединения; определение доли эквивалентного несинусоидального и несимметричного тока от каждого источника искажения (каждой ТП); определение напряжения прямой последовательности  $n$ -й гармоники, вносимой каждой тяговой подстанцией; определение напряжения обратной последовательности  $n$ -й гармоники, вносимого каждой тяговой подстанцией; определение эквивалентных напряжений прямой и обратной последовательностей  $n$ -й гармоники, вносимых всеми источниками питания; определение коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициентов несимметрии по обратной последовательности в ТОП (точках общего присоединения); определение доли вклада каждой тяговой подстанции в искажение качества электроэнергии в ТОП.

### **Реализация комплексного метода расчета несинусоидальных режимов в сетях ЭЭС с тяговой нагрузкой**

Так как тяга переменного тока является источником несинусоидальности и несимметрии, то необходимо определить эквивалентный ток прямой последовательности с учетом  $n$ -х гармонических составляющих, который для одного электровоза, описывается выражением:

$$I_1(\tau) = \sum_{n=1}^N \left( I_{1,1}(\tau) \cdot \frac{1}{n} \right), \quad (1)$$

где  $I_{1,1}(\tau)$  – эквивалентная модель тока прямой последовательности первой гармоники;  $n$  – номер гармоники;  $N$  – количество учитываемых гармоник.

Эквивалентный ток прямой последовательности для группы электровозов определяется по формуле:

$$I_{I_{\text{экв}}} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_I(\tau))^2}, \quad (2)$$

где  $N$ - количество электровозов в фидерной зоне.

Несимметрию трехфазной системы напряжений принято характеризовать напряжением обратной и нулевой последовательности. Так как обмотка среднего напряжения трансформаторов, установленных на тяговых подстанциях, соединена в треугольник, то токи нулевой последовательности будут замыкаться в ней и не будут вносить искажение в сеть 10 кВ общепромышленных электроприемников в точке общего присоединения, поэтому в дальнейшем нулевая последовательность не рассматривается.

Ток обратной последовательности для тяговой сети определяется по выражению:

$$I_2(\tau) = \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \sqrt{3 \cdot I_{\text{зас}}^2(\tau) + (I_{\text{зас}}(\tau) - 2 \cdot I_{\text{зсв}}(\tau))^2}, \quad (3)$$

где  $I_{\text{зас}}(\tau), I_{\text{зсв}}(\tau)$  – эффективные линейные токи.

$$I_{\text{зас}}(\tau) = \sqrt{3} \cdot \left( I_{aa} + I_{ap} + \frac{I}{3 \cdot n_m} \cdot \sqrt{4 \cdot D[I]_{\text{ла}} + D[I]_{\text{на}} + 4 \cdot D[I]_{\text{лр}} + D[I]_{\text{нр}}} \right), \quad (4)$$

где  $I_{aa}, I_{ap}$  – активные и реактивные составляющие средних токов в тяговых обмотках трансформатора при их соединении в треугольник;

$D[I]_{\text{ла}}, D[I]_{\text{на}}, D[I]_{\text{лр}}, D[I]_{\text{нр}}$  – дисперсии активной и реактивной составляющих тока плеча.

$$I_{aa} = \frac{I}{6 \cdot n_T} \cdot (4 \cdot I_{\text{ла}} + I_{\text{на}} \pm \sqrt{3} \cdot I_{\text{нр}}), \quad (5)$$

$$I_{ap} = \frac{I}{6 \cdot n_T} \cdot (4 \cdot I_{\text{лр}} + I_{\text{нр}} \pm \sqrt{3} \cdot I_{\text{на}}),$$

где  $I_{\text{ла}}, I_{\text{на}}, I_{\text{лр}}, I_{\text{нр}}$  – активные и реактивные составляющие средних токов левого и правого плеча.

$$\bar{I}_{\text{на}} = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{q=1}^S \bar{I}_{\text{жа}} + \gamma_{y1} \cdot \bar{U}_y - \gamma_{y2} \cdot \bar{U}_{y+1} \right) \cdot \frac{I}{n}, \quad (6)$$

где  $q$  – номер пути;  $n_q$  – число условных перегонов в фидерной зоне (на пути  $q$ ).

Тогда математическая модель токовой нагрузки присоединения при несинусоидальности и несимметрии будет иметь следующий вид:

$$I_{\text{экв}\Sigma}(\tau) = \sqrt{I_{\text{экв}}^2(\tau) + I_2^2(\tau)}, \quad (7)$$

где  $I_{\text{экв}}(\tau)$  – эквивалентный ток прямой последовательности с учетом несинусоидальности;  $I_2(\tau)$  – эквивалентный ток обратной последовательности с учетом несимметрии.

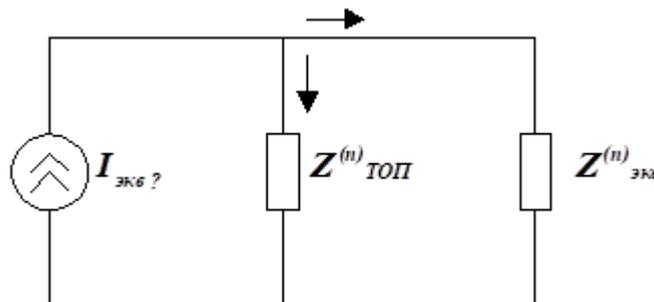


Рис.1. Схема для определения коэффициентов токораспределения.

Для определения коэффициентов токораспределения эквивалентная схема замещения относительно каждого источника искажения для каждой рассматриваемой ТОП путем последовательных преобразований сводится к виду, представленному на рис. 1.

Здесь  $Z_{ТОП}^{(n)}$  – эквивалентное сопротивление  $n$ -й гармонической составляющей прямой и обратной последовательности потребителей, подключенных к ТОП;  $Z_{э\kappa\text{в}}^{(n)}$  – эквивалентное сопротивление  $n$ -й гармонической составляющей оставшейся части сети относительно рассматриваемого источника искажения.

Коэффициент токораспределения для ТОП определяется по выражению

$$K_I = \frac{Z_{э\kappa\text{в}}^{(n)}}{Z_{ТОП}^{(n)}}. \quad (8)$$

Доля эквивалентного несинусоидального и несимметрического тока от каждого источника искажения в ТОП определяется через коэффициент токораспределения следующим образом:

$$I_{э\kappa\text{в}\Sigma}^{ТОП}(\tau) = I_{э\kappa\text{в}\Sigma}(\tau) \prod_{i=1}^m K_{Ii}, \quad (9)$$

где  $K_{Ii}$  –  $i$ -й коэффициент токораспределения, полученный при последовательном преобразовании схемы с целью сведения ее к виду, показанному на рис. 1;  $m$  – число преобразований схемы.

Напряжение прямой последовательности  $n$ -й гармоники в ТОП, создаваемые каждой тяговой подстанцией, находится по выражению:

$$U_{(1)n} = I_{э\kappa\text{в}\Sigma}^{ТОП}(\tau) \cdot Z_{ТОП}(n). \quad (10)$$

Напряжение обратной последовательности  $n$ -й гармоники в ТОП, создаваемые каждой тяговой подстанцией, находится по выражению:

$$U_{(2)n} = I_{э\kappa\text{в}\Sigma}^{ТОП}(\tau) \cdot Z_{2ТОП}(n). \quad (11)$$

Эквивалентное напряжение  $n$ -ой гармонической составляющей в ТОП будет:

$$U_{э\kappa\text{в}}(n) = \sqrt{\sum_{j=1}^K U_{(1)nj}^2 + \sum_{j=1}^K U_{(2)nj}^2}, \quad (12)$$

где  $K$  – число тяговых подстанций;  $j$  – номер ТП.

Эквивалентное напряжение обратной последовательности в ТОП равно:

$$U_{э\kappa\text{в}(2)} = \sqrt{\sum_{j=1}^k U_{(2)nj}^2}. \quad (13)$$

Коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения ( $K_u$ ) и несимметрии по обратной последовательности ( $K_{2u}$ ) соответственно рассчитываются по формулам:

$$K_U = \frac{U_{э\kappa\text{в}}(n)}{U_{(1)}}; \quad K_{2U} = \frac{U_{э\kappa\text{в}(2)}}{U_{(1)}}, \quad (14)$$

где  $U_{(1)}$  – напряжение в ТОП.

Доля вклада каждой тяговой подстанции в искажение качества электроэнергии в части несинусоидальности и несимметрии напряжения определяется по выражениям:

$$\text{по несинусоидальности напряжения} \quad \delta_{ТПj}^{нес} = \frac{U_{(1)nj}}{U_{э\kappa\text{в}}(n)},$$

$$\text{по несимметрии напряжения} \quad \delta_{ТПj}^{nc} = \frac{U_{(2)nj}}{U_{э\kappa\text{в}(2)}}.$$

### Заключение

Получен комплексный метод расчета несинусоидальных и несимметрических режимов, позволяющий учитывать взаимное влияние ПКЭ и определять количественные значения  $K_U$  и  $K_{2U}$  при нескольких источниках искажения, а также долю вкладов каждой тяговой подстанции в искажение качества электрической энергии в ТОП [4.5].

---

1. 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).

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 utilization». – Cracow, 2001. – P.451-458.

4. 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.

5. 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.