

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСА НА ВЫСШИХ ГАРМОНИКАХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, ПИТАЮЩЕЙ НЕЛИНЕЙНУЮ НАГРУЗКУ

Зубова Е.В., Федосов Д.С.

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия
zubova@ex.istu.edu

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Увеличение в энергосистемах доли мощных нелинейных нагрузок, вызывающих несинусоидальность токов и напряжений, приводит к негативным техническим последствиям и экономическому ущербу для энергосистемы и неискажающих потребителей. В настоящее время отсутствуют практические рекомендации по выбору длин питающих линий электропередачи для подключения мощных нелинейных нагрузок с учётом их негативного влияния на показатели качества электрической энергии. **ЦЕЛЬ.** В работе выполняется анализ условий возникновения резонансных перенапряжений на высших гармонических составляющих в схеме электроснабжения нелинейной нагрузки. **МЕТОДЫ.** В качестве основных методов для исследования использованы составление схем замещения элементов электрической сети и расчёт токов и напряжений в электрических цепях с сосредоточенными параметрами. Для анализа несинусоидальных токов и напряжений применено разложение в ряд Фурье. С помощью имитационных моделей в MATLAB Simulink определены условия возникновения резонансов на высших гармониках при различных длинах линий электропередачи 35, 110 и 220 кВ и разных мощностях питающей системы. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Получены расчетные значения резонансных длин воздушных линий электропередачи 35-220 кВ, питающих нелинейную нагрузку, при которых в электрической сети возникают резонансные перенапряжения на высших гармониках с номерами от 3 до 49. Резонансные длины линий электропередачи на отдельных гармониках получены с учётом влияния сопротивления питающей системы. Полученные сочетания резонансных длин линий и сопротивлений систем предлагается учитывать при проектировании схем внешнего электроснабжения нелинейных нагрузок для исключения гармонических перенапряжений. Проведённые в работе расчёты позволили дать объяснение аномальным уровням токов и напряжений 35-й и 37-й гармоник в схеме внешнего электроснабжения алюминиевого завода. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Сформулированы практические рекомендации по выбору длин линий электропередачи 35-220 кВ в системах электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками для исключения резонансных перенапряжений. Результаты определения резонансных длин линий электропередачи согласуются с данными натурных экспериментов в действующей энергосистеме.

Ключевые слова: *качество электрической энергии; несинусоидальность напряжения; высшие гармонические составляющие; резонанс; нелинейная нагрузка; воздушные линии электропередачи; MATLAB.*

Для цитирования: Зубова Е.В., Федосов Д.С. Исследование условий возникновения резонанса на высших гармониках в электрической сети, питающей нелинейную нагрузку // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 83-95. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95.

STUDY OF RESONANCE CONDITIONS ON HIGHER HARMONICS IN AN ELECTRICAL NETWORK SUPPLYING A NONLINEAR LOAD

Zubova E.V., Fedosov D.S.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
zubova@ex.istu.edu

Abstract: *RELEVANCE.* The increase in the share of high nonlinear loads in power systems, causing non-sinusoidal currents and voltages, leads to negative technical consequences and economic losses for the power system and non-distorting consumers. Currently, there are no practical recommendations on choosing the lengths of power lines for supplying high nonlinear loads considering their negative impact on power quality indicators. *THE PURPOSE.* The study analyzes the conditions for the occurrence of harmonic resonant overvoltages in a power supply scheme of a nonlinear load. *METHODS.* The main methods used for the study include the compilation of equivalent diagrams of the electrical network elements and calculation of currents and voltages in lumped-element circuits. The Fourier series decomposition is applied to analyze non-sinusoidal currents and voltages. Using simulation models in MATLAB Simulink environment, the conditions for the occurrence of higher harmonic resonances at different lengths of 35, 110, and 220 kV power transmission lines and different power ratings of the power system are determined. *RESULTS.* Calculated resonant lengths of overhead power lines 35-220 kV, supplying a nonlinear load, at which resonant overvoltages occur in the electrical network on higher harmonics with numbers from 3 to 49, were obtained. The resonant lengths of power transmission lines on particular harmonics were determined taking into account the impact of the power supply system reactance. The obtained combinations of resonant line lengths and system reactances are proposed to be considered in the design of external power supply schemes for nonlinear loads to eliminate harmonic overvoltages. The calculations in this study provided an explanation for the abnormal levels of currents and voltages of the 35th and 37th harmonics in the external power supply scheme of an aluminum plant. *CONCLUSION.* Practical recommendations are given for choosing the lengths of 35-220 kV power transmission lines in power supply systems with high nonlinear loads to eliminate resonant overvoltages. The results of determining the resonant lengths of power transmission lines agree with the data from measuring experiments in an operating power system.

Keywords: power quality; voltage waveform distortion; higher harmonics; electrical resonance; nonlinear load; overhead power lines; MATLAB.

For citation: Zubova E.V., Fedosov D.S. Study of resonance conditions on higher harmonics in an electrical network supplying a nonlinear load. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (3): 83-95. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95.

Введение (Introduction)

Электрическая энергия является товаром и обладает определёнными характеристиками качества электроэнергии (КЭЭ). Стандарт ГОСТ 32144-2013 устанавливает набор нормируемых свойств электрической энергии и допустимые значения показателей качества электрической энергии (ПКЭ). Анализ источников [1-3] показывает, что несоответствия ПКЭ требованиям стандарта могут привести к преждевременному выходу из строя конденсаторных батарей, электрооборудования, неправильной работе устройств защиты, увеличению потерь энергии и мощности в элементах электрической сети и т. д.

Как отмечают исследователи [4-7], к числу основных свойств электрической энергии относится синусоидальность формы кривой напряжения. Отклонение формы напряжения и тока от синусоидальной принято оценивать наличием высших гармоник (ВГ), получаемых разложением несинусоидальных сигналов в ряд Фурье. Главной причиной повышенного содержания ВГ в токах и напряжениях является работа электроприёмников с нелинейными вольтамперными характеристиками [6]. В электроэнергетических системах (ЭЭС) со значительной долей нелинейных нагрузок при определённом сочетании параметров схемы замещения элементов сети возможно возникновение резонансов на ВГ, сопровождающихся увеличением напряжений ВГ в

узлах сети и токов ВГ в элементах сети [7-8].

На большинстве производств нелинейные потребители представлены выпрямителями, работающими по 6- или 12-пульсной схеме [9-10]. Схемы выпрямления большей пульсности либо не реализованы, либо работают только в нормальном режиме, когда все агрегаты схемы находятся в работе. Так, при выводе в ремонт хотя бы одного из выпрямительных агрегатов во внешнюю сеть генерируются те же гармоники, что и при работе выпрямителя, собранного по 6- или 12-пульсной схеме [11-12]. В таком случае в качестве мероприятий, которые исключают появление резонанса на ВГ, могут быть рассмотрены анализ параметров электрической сети, питающих мощную нелинейную нагрузку, или установка фильтров ВГ непосредственно в узле подключения нелинейной нагрузки. Однако исследование эффективности фильтров для улучшения ПКЭ не входит в задачи данной работы – предлагается рассмотреть влияние параметров схемы внешнего электроснабжения нелинейной нагрузки на уровни ВГ и возможные резонансные процессы в электрической сети.

Цель исследования заключается в получении условий возникновения резонансных перенапряжений в узле подключения нелинейной нагрузки к питающей линии электропередачи (ЛЭП) при помощи анализа электрических режимов для нечетных гармоник с номерами от 3 до 49. Проводится анализ зависимости величины входного полного сопротивления в узле подключения искажающей нагрузки от номера гармоники для выявления частот ВГ, при которых данное сопротивление максимально. При большом входном сопротивлении даже незначительный уровень тока ВГ приводит к перенапряжению в данном узле электрической сети, что является признаком резонанса токов на рассматриваемой ВГ.

Научная значимость исследования состоит в разработке модели электрической сети с ЛЭП 35-220 кВ и искажающей нагрузкой, которая позволяет определять условия возникновения резонансных перенапряжений на ВГ при разных сочетаниях длины ЛЭП и сопротивления ЭЭС.

Практическая значимость исследования заключается в обоснованном выборе длин ЛЭП и схемы питания нелинейной нагрузки, исключающем возможность появления резонансных перенапряжений на ВГ.

В связи с этим были сформированы следующие задачи исследования: анализ параметров электрической сети и составление расчётных моделей для исследования влияния параметров ЛЭП и ЭЭС на уровень напряжений ВГ, исследование резонансных явлений в электрической сети при различных параметрах питающей ЭЭС и ЛЭП, анализ результатов исследования и выработка рекомендаций по исключению перенапряжений на ВГ.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве расчётной электрической схемы для анализа условий появления резонанса использована схема на рисунке 1.

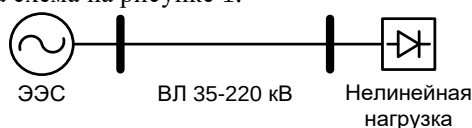


Рис.1. Расчётная схема для анализа условий появления резонанса

Fig.1. Electrical scheme for analyzing the conditions of resonance appearance

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Схема, приведённая на рисунке 1, в частности, является типичной схемой электроснабжения для питания мощных производств алюминия, тяговой нагрузки [7-11]. Однолинейная схема замещения для расчётной схемы представлена на рисунке 2.

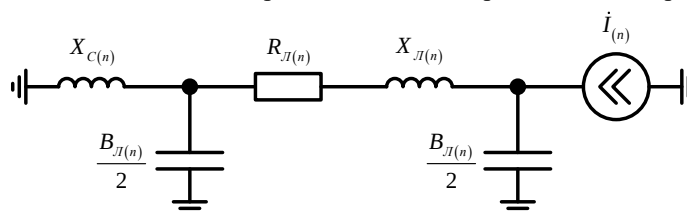


Рис. 2. Схема замещения для анализа условий появления резонанса

Fig. 2. Equivalent circuit for analyzing the conditions of resonance appearance

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Как правило, в таких случаях для расчёта уровней ВГ используют модель ЛЭП с распределенными по длине параметрами, что позволяет получить картину распределения напряжений и токов ВГ вдоль всей длины ЛЭП. Однако, при анализе ВГ, как и других ПКЭ, используются напряжения только по концам ЛЭП – в узлах периодического или непрерывного контроля ПКЭ. Поэтому в данном исследовании применена упрощенная П-образная схема замещения. Для ЛЭП длиной l , имеющей погонные продольные активное r_0 и индуктивное x_0 сопротивления и погонную поперечную емкостную проводимость b_0 , использована схема замещения без учёта потерь активной мощности на корону. Параметры воздушной линии (ВЛ) на основной частоте рассчитаны по формулам:

$$R_{\text{Л}} = r_0 l; X_{\text{Л}} = x_0 l; B_{\text{Л}} = b_0 l. \quad (1)$$

Нелинейная нагрузка представлена в схеме замещения источником тока ВГ $\dot{I}_{(n)}$. ЭЭС представлена в схеме замещения упрощенно – только индуктивным сопротивлением, величина которого на основной частоте может быть приближённо определена по выражению:

$$X_C = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} I_K^{(3)}},$$

где $U_{\text{ср.ном}}$ – среднее номинальное напряжение ЭЭС, $I_K^{(3)}$ – ток трёхфазного короткого замыкания на шинах ЭЭС.

В соответствии с [12-13], параметры схемы замещения на ВГ определяются по формулам:

$$\begin{aligned} R_{\text{Л}(n)} &= \sqrt{n} R_{\text{Л}} = \sqrt{n} r_0 l; X_{\text{Л}(n)} = n X_{\text{Л}} = n x_0 l; \\ B_{\text{Л}(n)} &= n B_{\text{Л}} = n b_0 l; X_{\text{C}(n)} = n X_C. \end{aligned} \quad (2)$$

В схеме замещения на рисунке 2 теоретически возможны резонансы при:

- 1) равенстве реактивной проводимости ЭЭС $1/X_{\text{C}(n)}$ и емкостной проводимости половины ВЛ $B_{\text{Л}(n)}/2$;
- 2) равенстве индуктивного сопротивления ЛЭП $X_{\text{Л}(n)}$ и эквивалентного сопротивления $\frac{2X_{\text{C}(n)}}{X_{\text{C}(n)}B_{\text{Л}(n)} - 2}$ (имеет место при соотношении $X_{\text{C}(n)}B_{\text{Л}(n)} > 2$);
- 3) равенстве проводимости $B_{\text{Л}(n)}/2$ и реактивной составляющей эквивалентной проводимости остальных элементов схемы замещения в случае активно-индуктивного характера результирующей проводимости.

Анализ каждого условия возникновения резонанса в отдельности затруднителен, поэтому исследуем полное сопротивление сети относительно точки подключения нелинейной нагрузки. Напряжение n -ой гармонической составляющей на шинах нелинейной нагрузки:

$$\dot{U}_{(n)} = \dot{I}_{(n)} \underline{Z}_{\text{эв}(n)}, \quad (3)$$

где $\underline{Z}_{\text{эв}(n)}$ – эквивалентное сопротивление внешней сети для ВГ с номером n . Очевидно, что при постоянном токе искажения именно величина сопротивления $\underline{Z}_{\text{эв}(n)}$ определяет модуль напряжения ВГ на шинах нелинейной нагрузки.

Эквивалентное сопротивление схемы замещения на рис.2:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{эв}(n)} &= \frac{1}{j \frac{B_{\text{Л}(n)}}{2} + \frac{1}{R_{\text{Л}(n)} + jX_{\text{Л}(n)} + \frac{1}{j \frac{B_{\text{Л}(n)}}{2} + \frac{1}{jX_{\text{C}(n)}}}} = \\ &= \frac{1}{j \frac{B_{\text{Л}(n)}}{2} + \frac{2 - X_{\text{C}(n)}B_{\text{Л}(n)}}{2R_{\text{Л}(n)} + 2jX_{\text{Л}(n)} - R_{\text{Л}(n)}X_{\text{C}(n)}B_{\text{Л}(n)} - jX_{\text{Л}(n)}X_{\text{C}(n)}B_{\text{Л}(n)} + 2jX_{\text{C}(n)}}} = \\ &= \frac{4R_{\text{Л}(n)} - 2R_{\text{Л}(n)}X_{\text{C}(n)}B_{\text{Л}(n)} + j(4X_{\text{Л}(n)} - 2X_{\text{Л}(n)}X_{\text{C}(n)}B_{\text{Л}(n)} + 4X_{\text{C}(n)})}{4 - 4X_{\text{C}(n)}B_{\text{Л}(n)} + B_{\text{Л}(n)}^2X_{\text{Л}(n)}X_{\text{C}(n)} - 2B_{\text{Л}(n)}X_{\text{Л}(n)} + j(2B_{\text{Л}(n)}R_{\text{Л}(n)} + B_{\text{Л}(n)}^2R_{\text{Л}(n)}X_{\text{C}(n)})}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для получения в общем виде условия возникновения резонанса следует определить модуль сопротивления $|Z_{\text{экв}(n)}|$ и найти его частные производные по аргументам:

1) $\frac{\partial Z_{\text{экв}(n)}}{\partial l}$, если необходимо определить длину ЛЭП, при которой возникнет резонанс на ВГ с известным номером;

2) $\frac{\partial Z_{\text{экв}(n)}}{\partial n}$, если необходимо определить номер гармоники, на которой может возникнуть резонанс при известной длине ЛЭП.

После этого необходимо приравнять к нулю частную производную и решить уравнение относительно переменной l или n . Очевидно, что полученное уравнение будет нелинейным уравнением высокого порядка, которое решается численными методами [14]. Это практически исключает получение условий резонанса на ВГ в общем виде.

Вывод условия для резонансной длины ЛЭП из выражения (4) при сопротивлении ЭЭС, отличном от нуля, будет громоздким для инженерных расчётов. Однако если пренебречь сопротивлением питающей ЭЭС и принять $X_{C(n)} = 0$ (система бесконечной мощности), то выражение (4) упростится:

$$Z_{\text{экв}(n)} = \frac{1}{j \frac{B_{Л(n)}}{2} + \frac{1}{R_{Л(n)} + jX_{Л(n)}}} \quad (5)$$

Одним из условий резонанса токов будет равенство емкостной проводимости половины ВЛ $B_{Л(n)} / 2$ мнимой части эквивалентной проводимости остальных элементов сети:

$$\frac{B_{Л(n)}}{2} = \left| \text{Im} \left[\frac{1}{R_{Л(n)} + jX_{Л(n)}} \right] \right| = \frac{X_{Л(n)}}{R_{Л(n)}^2 + X_{Л(n)}^2} \quad (6)$$

С учётом (2) параметры схемы замещения могут быть выражены через длину ВЛ и номер гармоники:

$$\frac{nb_0 l}{2} = \frac{nx_0 l}{nr_0^2 l^2 + n^2 x_0^2 l^2} \quad (7)$$

Из (7) выражение для длины ВЛ, при которой наблюдается резонанс на ВГ с номером n :

$$l_{\text{рез.}} = \sqrt{\frac{2x_0}{nb_0(r_0^2 + nx_0^2)}} \quad (8)$$

С помощью выражения (8) может быть определена резонансная длина ВЛ $l_{\text{рез}}$ для гармоники с номером n . При длине ВЛ равной $l_{\text{рез}}$ наблюдается значительное увеличение напряжения ВГ в узле подключения нелинейной нагрузки и увеличение токов ВГ в ЛЭП.

Результаты (Results)

При наличии широкого спектра ВГ в электрической сети допустима вероятность возникновения резонанса на частотах, близких к частотам одной или нескольких ВГ. Возникающие резонансные режимы производят эффект усиления влияния ВГ на работу электрооборудования, в частности, на компенсирующие устройства (КУ), увеличивая перегрузку токами гармоник [9, 11]. В конечном счете, такая токовая перегрузка негативно сказывается на сроках эксплуатации конденсаторов, что приводит к перегреву и преждевременному выходу из строя КУ [2, 15-16].

Исходя из этого была поставлена задача исследования зависимости уровня ВГ от длины и заданных параметров для ЛЭП различного класса напряжения (35 кВ, 110 кВ, 220 кВ). Для расчёта использованы следующие типы ВЛ с параметрами:

- ВЛ 35 кВ с проводами АС-150/24 с погонными параметрами $r_0 = 0,204$ Ом/км, $x_0 = 0,406$ Ом/км, $b_0 = 2,7 \cdot 10^{-6}$ См/км;
- ВЛ 110 кВ с проводами АС-150/24 с погонными параметрами $r_0 = 0,204$ Ом/км, $x_0 = 0,420$ Ом/км, $b_0 = 2,707 \cdot 10^{-6}$ См/км;
- ВЛ 220 кВ с проводами АС-240/32 с погонными параметрами $r_0 = 0,118$ Ом/км,

$x_0 = 0,435 \text{ Ом/км}$, $b_0 = 2,604 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$.

Результаты расчёта резонансных длин указанных ВЛ 35-220 кВ в виде графика представлены на рисунке 3. Ввиду практически одинаковых погонных параметров ВЛ 35, 110 и 220 кВ графики зависимостей резонансных длин ВЛ от номера ВГ совпадают.

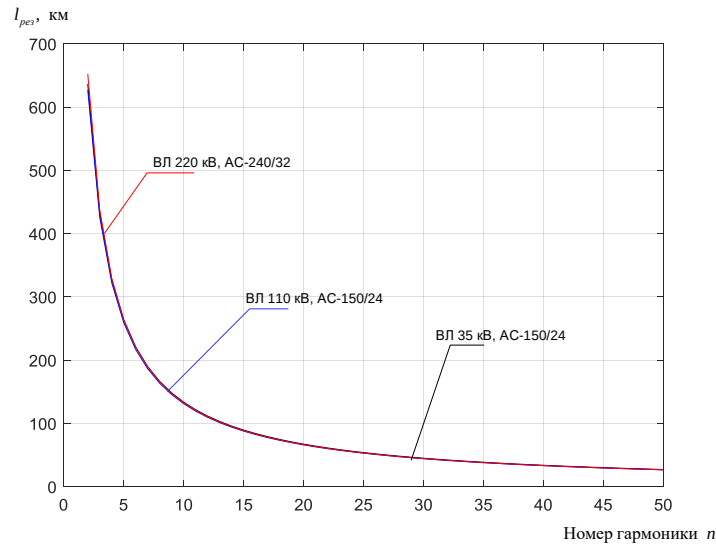


Рис. 3. Длины ВЛ $l_{\text{рез}}$, при которых наблюдается резонанс на ВГ с номером n *Fig. 3. Overhead line lengths l_{res} , at which resonance is observed for the n -th harmonic*
 *Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Для исследования условий появления резонанса при отличном от нуля сопротивлении питающей ЭЭС разработана программа в среде MATLAB. С её помощью определены зависимости активной и реактивной составляющих сопротивления $Z_{\text{экв}(n)} = R_{\text{экв}(n)} + jX_{\text{экв}(n)}$ и его модуля $|Z_{\text{экв}(n)}|$ от длины ЛЭП для заданной гармоники и от номера гармоники при известной длине ЛЭП. В качестве примера на рисунках 4 и 5 приведены графики таких зависимостей для ВЛ 220 кВ, выполненной проводом АС-240/32 при сопротивлении ЭЭС на основной частоте $X_C = 5 \text{ Ом}$.

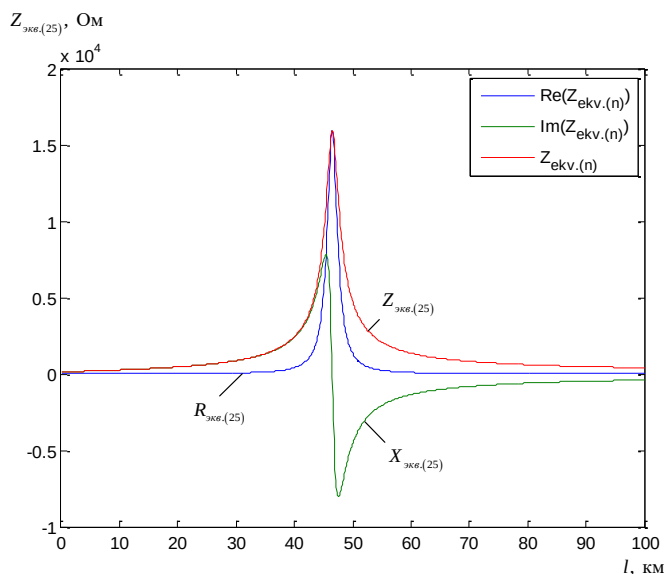


Рис. 4. График зависимости активной $R_{\text{экв}(n)}$, реактивной $X_{\text{экв}(n)}$ и полной $Z_{\text{экв}(n)}$ составляющих эквивалентного сопротивления от длины ВЛ 220 кВ, выполненной проводом АС-240, для 25-й гармоники при $X_C = 5 \text{ Ом}$ *Fig. 4. Graph of the dependence of the active $R_{\text{eq}(n)}$, reactive $X_{\text{eq}(n)}$ and apparent $Z_{\text{eq}(n)}$ components of the equivalent impedance on the length of the 220 kV overhead line, made with AS-240 wire, for the 25th harmonic at $X_s = 5 \text{ Ohm}$*

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

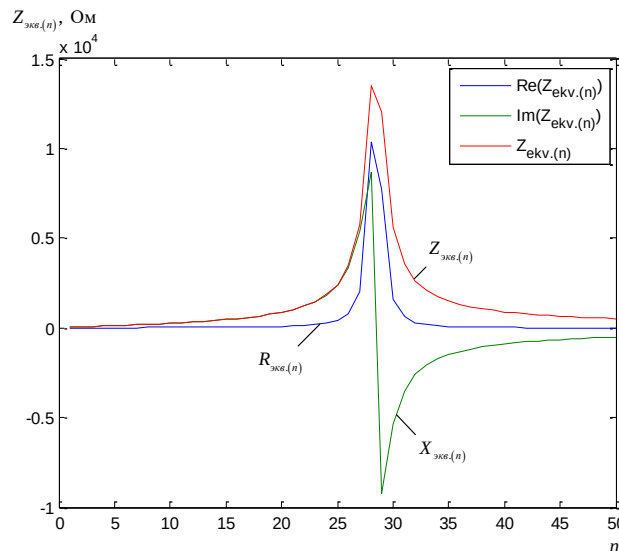


Рис. 5. График зависимости активной $R_{экв(n)}$, реактивной $X_{экв(n)}$ и полной $Z_{экв(n)}$ составляющих эквивалентного сопротивления от номера гармоники для ВЛ 220 кВ длиной 40 км, выполненной проводом АС-240, при $X_C = 5 \text{ Ом}$

Fig. 5. Graph of the dependence of the active $R_{eq(n)}$, reactive $X_{eq(n)}$ and apparent $Z_{eq(n)}$ components of equivalent impedance on the harmonic number for a 220 kV overhead line 40 km long, made with AS-240 wire, at $X_s = 5 \text{ Ohm}$

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Как видно из рисунков 4-5, наблюдается резонанс, характеризующийся многократным увеличением сопротивления и изменением при переходе точки резонанса знака реактивной составляющей эквивалентного сопротивления $X_{экв(n)}$. При этом в диапазоне выбранных для исследования длин ЛЭП и номеров гармоник не обнаружено резонансов напряжения, сопровождающихся резким уменьшением сопротивления $Z_{экв(n)}$.

Для дополнительной верификации предложенной математической модели и созданной на её основе программы для определения условий появления резонанса создана динамическая модель расчётной схемы в трёхфазном исполнении в MATLAB Simulink (рис. 6).

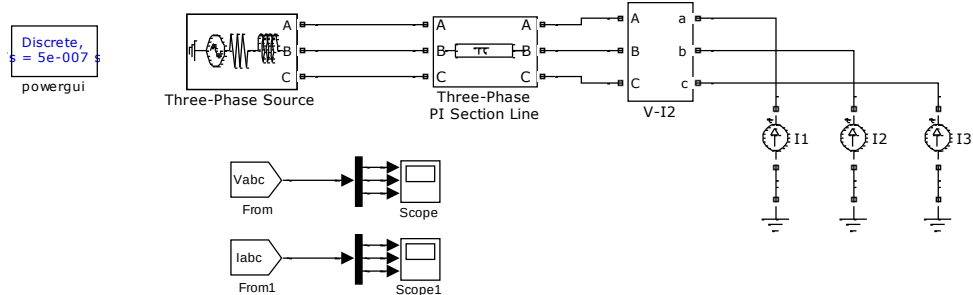


Рис. 6. Динамическая модель расчётной схемы в MATLAB Simulink

Fig. 6. Dynamic model of the analyzed circuit in MATLAB Simulink

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Результаты, полученные с использованием модели на рис. 6, совпали с результатами расчёта по формулам 5-8.

Обсуждение (Discussions)

Далее проведем расчет длин ЛЭП, при которых возможно появление резонанса на ВГ, генерируемых наиболее распространёнными 6- и 12-пульсными схемами выпрямления [10, 11, 15, 17-18], приведены в таблицах 1-2. Для расчёта использованы те же ВЛ 35, 110 и 220 кВ, что и для определения критических длин ВЛ при $X_C = 0$.

Таблица 1

Table 1

Результаты расчётного определения длин ВЛ 35, 110 кВ, при которых возникает резонанс на ВГ
 Results of the calculation of the lengths of 35, 110 kV overhead lines at which resonance occurs on the overhead line

Номер гармоники n	Длина ВЛ, при которой возникает резонанс на ВГ, км							
	ВЛ 35 кВ при сопротивлении внешней ЭЭС, Ом				ВЛ 110 кВ при сопротивлении внешней ЭЭС, Ом			
	0	5	10	20	0	1	5	10
3	441,80	436,00	430,10	417,90	431,20	425,40	419,50	407,00
5	269,10	263,10	256,90	243,60	261,30	255,40	249,20	235,80
7	193,50	187,40	181,00	166,90	187,50	181,50	175,00	160,80
9	151,10	144,90	138,20	123,50	146,20	140,10	133,40	118,60
11	123,90	117,70	110,70	95,60	119,80	113,60	106,70	91,60
13	105,00	98,70	91,60	76,30	101,50	95,20	88,10	72,80
15	91,10	84,70	77,40	62,20	88,00	81,70	74,40	59,20
17	80,50	74,00	66,60	51,50	77,70	71,30	63,90	49,00
19	72,10	65,50	58,00	43,30	69,60	63,10	55,50	41,10
21	65,20	58,60	51,00	36,80	63,00	56,40	48,80	34,90
23	59,60	52,90	45,20	31,70	57,50	50,90	43,20	30,00
25	54,90	48,10	40,30	27,50	52,90	46,20	38,50	26,00
27	50,80	44,00	36,20	24,00	49,00	42,20	34,60	22,70
29	47,30	40,40	32,70	21,20	45,60	38,80	31,20	20,00
31	44,30	37,30	29,60	18,80	42,70	35,80	28,20	17,70
33	41,60	34,60	27,00	16,80	40,10	33,20	25,70	15,80
35	39,20	32,20	24,70	15,00	37,80	30,90	23,40	14,20
37	37,10	30,00	22,60	13,60	35,80	28,80	21,50	12,80
39	35,20	28,10	20,80	12,30	34,00	26,90	19,70	11,60
41	33,50	26,30	19,20	11,20	32,30	25,20	18,20	10,60
43	32,00	24,80	17,70	10,20	30,80	23,70	16,80	9,70
45	30,50	23,30	16,40	9,40	29,40	22,30	15,60	8,90
47	29,30	22,00	15,30	8,60	28,20	21,00	14,50	8,10
49	28,10	20,80	14,20	8,00	27,00	19,80	13,50	7,50

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Таблица 2

Table 2

Результаты расчётного определения длин ВЛ 220 кВ, при которых возникает резонанс на ВГ
 Results of the calculation of the lengths of 220 kV overhead lines at which resonance occurs on the overhead line

Номер гармоники n	Длина ВЛ, при которой возникает резонанс на ВГ, км			
	ВЛ 220 кВ при сопротивлении внешней ЭЭС, Ом			
	0	1	5	10
3	441,50	435,40	429,10	415,90
5	265,20	259,00	252,50	238,40
7	189,50	183,30	176,50	161,70
9	147,40	141,10	134,10	118,80
11	120,60	114,20	107,10	91,40
13	102,10	95,60	88,30	72,50
15	88,50	81,90	74,40	58,90
17	78,10	71,50	63,80	48,60
19	69,90	63,20	55,40	40,80
21	63,20	56,50	48,60	34,60
23	57,70	50,90	43,00	29,70
25	53,10	46,20	38,30	25,70
27	49,20	42,20	34,40	22,40
29	45,80	38,80	31,00	19,80
31	42,80	35,80	28,00	17,50
33	40,20	33,10	25,50	15,60

Номер гармоники n	Длина ВЛ, при которой возникает резонанс на ВГ, км			
	ВЛ 220 кВ при сопротивлении внешней ЭЭС, Ом			
	0	1	5	10
35	37,90	30,80	23,20	14,00
37	35,90	28,70	21,30	12,60
39	34,00	26,80	19,50	11,40
41	32,40	25,10	18,00	10,40
43	30,90	23,60	16,60	9,50
45	29,50	22,20	15,40	8,70
47	28,20	20,90	14,30	8,00
49	27,10	19,70	13,30	7,40

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Приведённые в таблицах 1-2 результаты показывают, что резонанс на гармониках с номерами 5, 7, 11 и 13, преобладающих при работе 6- и 12-пульсных схем выпрямления, практически невозможен при реальных длинах ВЛ 35-220 кВ, применяемых для электроснабжения мощных нелинейных потребителей. При длинах ВЛ в диапазоне от 10 до 50 км резонанс может возникнуть на гармониках с номерами от 19 до 49 в зависимости от мощности ЭЭС. Токи этих ВГ, генерируемые нелинейной нагрузкой, незначительны [10, 19, 20] и чаще всего не учитываются при расчёте несинусоидальных режимов. Однако резонанс на ВГ может привести к многократному увеличению напряжения даже при малом токе искажения. Таким образом, увеличение пульсности схемы выпрямления, преследующее помимо прочего улучшение КЭЭ в ЭЭС за счёт компенсации токов ВГ низкого порядка, может привести к увеличению напряжения ВГ за счёт резонанса на гармониках более высокого порядка.

В частности, в [13] описаны случаи резонансных явлений на 35-й и 37-й гармонике в системе внешнего электроснабжения Братского алюминиевого завода. Завод питается от шин Братской ГЭС по 12 ВЛ 220 кВ длиной от 38,7 до 40,2 км. Представленные в таблице 2 данные для ВЛ 220 кВ при малом сопротивлении питающей ЭЭС и с учётом добротности образующегося резонансного контура подтверждают факт возникновения резонанса на указанных ВГ при таких длинах ВЛ. В 2011 году на Братской ГЭС проведён натурный эксперимент по замеру токов и напряжений ВГ со стороны ЭЭС (см. рис. 1). Выполнение замеров на стороне нелинейной нагрузки, где по результатам исследования в данной статье должны наблюдаться резонансные перенапряжения на ВГ, было невозможно организационно и технически (из-за отсутствия трансформаторов напряжения на приёмном конце ЛЭП 220 кВ). Тем не менее, на рисунке 7 представлено косвенное подтверждение корректности расчёта условий резонансных перенапряжений на ВГ в узле подключения нелинейной нагрузки.

На рисунке 7 в качестве примера приведены результаты измерений токов ВГ со стороны ОРУ 220 кВ Братской ГЭС на пяти ВЛ 220 кВ, питающих Братский алюминиевый завод. На графике хорошо виден косвенный признак резонансного процесса – аномальное увеличение 35-й и 37-й ВГ тока ВЛ 220 кВ при малом значении токов этих же ВГ, генерируемых электролизёрами алюминиевого завода на приёмной стороне ВЛ. Таким образом, наблюдается резонанс токов, сопровождающийся увеличением токов ВГ в продольном сопротивлении ЛЭП как в одном из параллельных контуров резонансной схемы. Вместе с тем измерения напряжений ВГ на конце ЛЭП 220 кВ со стороны алюминиевого завода могли бы снять последние возможные сомнения в корректности моделирования резонансных перенапряжений в рассматриваемой схеме питания искажающей нагрузки.

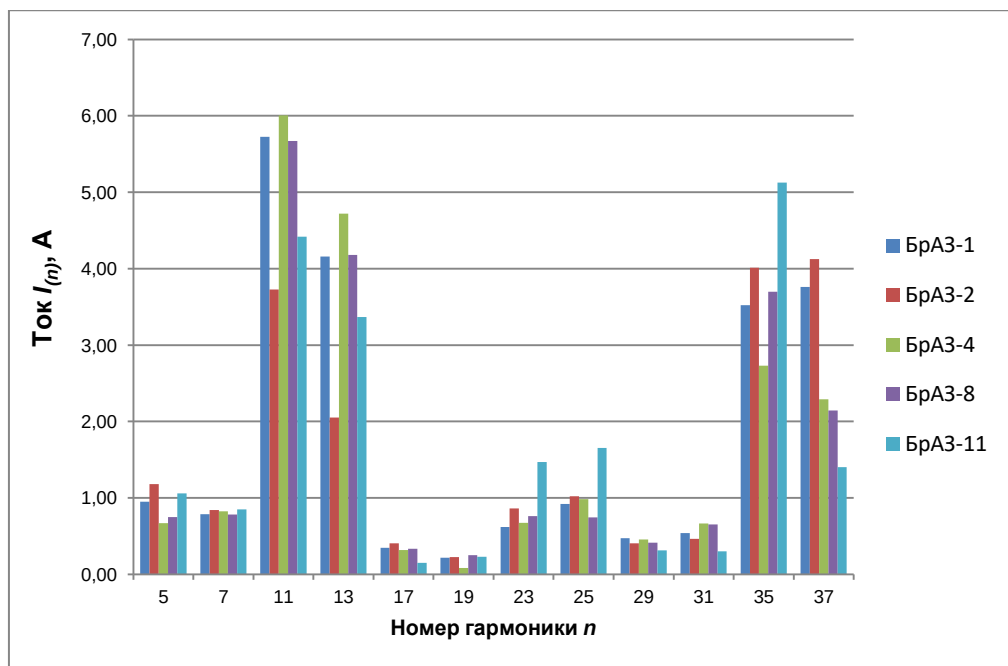


Рис. 7. Токи ВГ в ЛЭП 220 кВ, питающих Братский алюминиевый завод

Fig. 7. Currents of higher harmonics at 220 kV power lines supplying the Bratsk aluminum plant

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Исходя из полученных в таблицах 1, 2 параметров ЛЭП и ЭЭС, можно описать в общем виде порядок применения практических рекомендаций при проектировании схемы внешнего электроснабжения нелинейной нагрузки и выборе длин питающих линий 35-220 кВ:

- при наличии мощной нелинейной нагрузки, планируемой для подключения к ЭЭС через ЛЭП 35-220 кВ, определить номера ВГ, генерируемых данной нагрузкой;
- выполнить предварительный расчёт длин питающих ЛЭП 35-220 кВ для подключения мощной нелинейной нагрузки;
- по известным уровням токов трёхфазного короткого замыкания на шинах ЭЭС рассчитать эквивалентное индуктивное сопротивление ЭЭС для частоты 50 Гц;
- по табл. 1, 2 проверить, не совпадает ли длина питающей ЛЭП с резонансными длинами ЛЭП для номеров ВГ, генерируемых нелинейной нагрузкой, с учётом сопротивления внешней ЭЭС;
- в случае если длина ЛЭП попадает в интервал ± 3 км от резонансной длины по табл. 1, 2 (с учётом добротности амплитудно-частотных характеристик входных сопротивлений на рис. 4, 5), выполнить изменение длины питающей ЛЭП для выхода из резонансных интервалов по рассматриваемым ВГ.

Следует помнить, что в используемой модели есть неточности, связанные с особенностями принятой на рис. 2 П-образной схемы замещения с сосредоточенными параметрами [13, 15]. Также в табл. 1, 2 рассмотрены только 4 значения сопротивлений ЭЭС, однако модель и программа в MATLAB позволяют проводить расчет условий появления резонанса для любых сочетаний ВЛ и сопротивлений ЭЭС.

Заключение (Conclusions)

Исследован вопрос возникновения резонанса на ВГ в распространённой схеме питания мощной нелинейной нагрузки по ВЛ 35, 110, 220 кВ. В отличие от резонансов на частоте 50 Гц, описанных в учебной литературе¹ и принимаемых во внимание при проектировании дальних электропередач переменного тока, резонансы на ВГ наблюдаются при гораздо меньшей длине ЛЭП, питающих нелинейную нагрузку, и не учитываются при проектировании схемы внешнего электроснабжения мощных искажающих электроприёмников. Однако резонанс на ВГ требует учёта, поскольку опасен многократным увеличением напряжения ВГ в узле подключения искажающей нагрузки и токов ВГ в элементах сети даже при малых токах искажения потребителя. В результате исследования получено в общем виде условие возникновения резонанса на

¹ Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.

ВГ при определённой длине ВЛ, питающей нелинейную нагрузку от шин бесконечной мощности. Для анализа резонансных процессов при ненулевом сопротивлении питающей ЭЭС составлена модель статической схемы замещения с учётом зависимости её параметров от частоты, а также динамическая модель в MATLAB Simulink. С использованием разработанной программы определены длины ВЛ 35, 110, 220 кВ, при которых возможно появление резонанса на нечётных гармониках до 50-го порядка. В частности, установлено, что для ВЛ 220 кВ длина ЛЭП, при которой наблюдается резонанс на 35-й и 37-й гармониках, составляет 35,9-37,9 км при малом сопротивлении питающей ЭЭС. Это хорошо согласуется с результатами натурных экспериментов, когда в схеме питания потребителя по ВЛ 220 кВ длиной около 40 км зафиксированы резонансные явления на указанных гармониках. При этом увеличение пульсности схемы выпрямления, которое, как известно, улучшает КЭЭ, в данном случае способствует увеличению напряжений и токов ВГ за счёт резонанса.

Литература

1. Чжан, Ц. Влияние нелинейной нагрузки на конденсаторные батареи и режимы работы систем электроснабжения среднего напряжения / Ц. Чжан, В. А. Сериков, В. Н. Костин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 419-423. doi: 10.24412/2071-6168-2023-9-414-415.
2. Костин В.Н., Кривенко А.В., Сериков В.А. Влияние высших гармоник на качество напряжения и на работу конденсаторных батарей в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 431-441.
3. Badoni M., Singh A. and Singh B. Power Quality Enhancement Using Euclidean Direction Search Based Control Technique // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 67, N 3, pp. 2231-2240, March 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2905835.
4. Гилязов В.Р. Анализ наиболее важных показателей качества электрической энергии: причины ухудшения, зависимость потребителей и методы борьбы с отклонениями // Мавлютовские чтения : Материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции; 25–27 октября 2022 г. Том 3. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – С. 365-369.
5. Zhang X.-P., Yan Z. Energy Quality: A Definition // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. Vol. 7. pp. 430-440. doi: 10.1109/OAJPE.2020.3029767.
6. Макашева, С.И. Анализ качества электрической энергии в питающей сети 220 кВ с присоединенными тяговыми подстанциями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 4(72). – С. 143-151. – DOI 10.26731/1813-9108.2021.4(72).143-151..
7. Наумов, И. В. Минимизация последствий искажения качества электрической энергии при несимметрично-несинусоидальном электропотреблении / И. В. Наумов, Э. С. Федорова, М. А. Якупова // Промышленная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 52-61. doi: 10.34831/EP.2023.56.49.007.
8. Овечкин, И. С. Разработка технических решений по уменьшению искажения синусоидальности кривой напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки / И. С. Овечкин, Е. Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. №3(79). С. 112-123. doi: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).112-123.
9. Коваленко Д.В. Определение резонансной частоты системы электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности и наличии высших гармоник // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 8-1. С. 16-21.
10. Fedosov D.S. Research of multipulse rectification circuits for alternating current by the example of Taishet aluminum plant // Proceedings «Smart Grid for Efficient Energy Power System for the Future». Vol. I. Magdeburg-Irkutsk: OvGU, 2012.
11. Федосов Д.С., Пудов А.Н., Медведев Р.Ю. Исследование схем выпрямления переменного тока на алюминиевых заводах // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012.
12. Способ определения комплексного значения совокупных потерь полной мощности в системе электроснабжения / В. С. Ливенцов, С. С. Костинский, А. И. Троицкий, Н. С. Савелов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2022. Т. 65, № 4. С. 97-107. doi: 10.17213/0136-3360-2022-4-97-107.
13. Федосов Д.С., Тарасов И.А., Воронцов Д.В. Исследование резонансных явлений на высших гармониках в схеме внешнего электроснабжения нелинейной нагрузки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 4(111). С. 145-154. doi: 10.21285/1814-3520-2016-4-145-154.

14. Чадов С.Н. Численное исследование модели энергетической системы // Вестник ИГЭУ. 2009. №4. С. 49-52.
15. Мукенди К.Л., Тигунцев С.Г. Исследование несинусоидальных режимов в частной электрической сети "КАМОТО COPPER COMPANY" с выпрямительной нагрузкой // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием; 22–26 апреля 2019 года. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. Т. 2. С. 253-257.
16. Kulikov A., Ilyushin P., Suslov K., Filippov S. Organization of Control of the Generalized Power Quality Parameter Using Wald's Sequential Analysis Procedure // *Inventions*. 2023. Vol. 8, No. 1. P. 17. doi: 10.3390/inventions8010017.
17. Шепелев А.О., Шепелева Е.Ю. Исследование несинусоидальных режимов работы электрооборудования в системе электроснабжения с 6-пульсным преобразователем // Вестник Югорского государственного университета. 2022. № 2(65). С. 68-78. doi: 10.18822/byusu20220268-78.
18. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Исследование работы прогностических регуляторов установки распределенной генерации в системе электроснабжения с мощным накопителем электроэнергии // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 4. С. 448-458. doi: 10.17516/1999-494X-0325.
19. Gerasimiyuk A.Y., Smokovenko N.V., Nasyrov R.R., Kalenkin D.A. Development of a methodology for the assessment of the actual contribution of a certain consumer to the distortion of the voltage sinusoid // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2021. pp. 1-5. doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9388000.
20. Плащанский Л.А., Зарипов Ш.У. Влияние высших гармоник на состояние электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2010. № 2. С. 61-66.

Авторы публикации

Зубова Екатерина Васильевна – аспирант, специалист по учебно-методической работе кафедры электрических станций, сетей и систем Иркутского национального исследовательского технического университета. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0914-2027>. E-mail: zubova@ex.istu.edu

Федосов Денис Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем Иркутского национального исследовательского технического университета. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5989-9549>. E-mail: fedosov_ds@ex.istu.edu

References

1. Zhang Z., Serikov VA, Kostin VN. Influence of nonlinear load on capacitor batteries and operating modes of medium voltage power supply systems. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2023; 9: 419-423. (In Russ). doi: 10.24412/2071-6168-2023-9-414-415.
2. Kostin VN, Krivenko AV, Serikov VA. Influence of high harmonics on the quality of voltage and on the operation of capacitor banks in electric supply systems with non-linear load. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2020; 5: 431-441. (In Russ).
3. Badoni M., Singh A., Singh B. Power quality enhancement using Euclidean direction search based control technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020; 67(3): 2231-2240. doi: 10.1109/TIE.2019.2905835.
4. Gilyazev VR. Analiz naibolee vazhnykh pokazatelei kachestva elektricheskoi energii: prichiny ukhudsheniya, zavisimost' potrebitelei i metody bor'by s otkloneniyami. In: *Mavlyutovskie chteniya: proceedings of the XVI All-Russian youth scientific conference; 25-27 Oct 2022; Ufa, Russia*. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet, 2022. Vol. 3. Pp. 365-369. (In Russ).
5. Zhang X.-P., Yan Z. Energy quality: a definition. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. 2020; 7: 430-440. doi: 10.1109/OAJPE.2020.3029767.
6. Makasheva SI. Power quality analysis in the 220 kV supply network with connected traction substations. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2021; 4(72): 143-151. (In Russ). doi: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).143-151.
7. Naumov IV, Fedorinova ES, Yakupova MA. Minimization of the consequences of power quality distortion in case of asymmetric-non-sinusoidal power consumption. *Industrial Power Engineering*. 2023; 3: 52-61. (In Russ). doi: 10.34831/EP.2023.56.49.007.
8. Ovechkin IS, Puzina EYu. Development of technical solutions to reduce the distortion of the sinusoidal voltage curve of overhead lines feeding automatic blocking devices. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2023; 3(79): 112-123. (In Russ). doi: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).112-

123.

9. Kovalenko DV. Determining the resonance frequency of the power supply system when changing the degree of compensation of reactive power and higher harmonics. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2017; 8(1): 16-21. (In Russ.).

10. Fedosov D.S. Research of multipulse rectification circuits for alternating current by the example of Taishet aluminum plant. In: *Proceedings «Smart Grid for Efficient Energy Power System for the Future»*; 2012; Magdeburg, Irkutsk. Magdeburg: OvGU; 2012. Vol. I. Pp. 85-91.

11. Fedosov DS, Pudov AN, Medvedev RYu. Issledovanie skhem vypryamleniya peremennogo toka na alyuminiyevykh zavodakh. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*; 2012; Irkutsk, Russia. Irkutsk: ISTU Publishing House, 2012. Pp. 277-283. (In Russ.).

12. Liventsov VS, Kostinskiy SS, Troitskiy AI, et al. Method for determining the complex value of the total power losses in the power supply system. *Russian Electromechanics*. 2023; 65: 97-107. (In Russ.). doi: 10.17213/0136-3360-2022-4-97-107.

13. Fedosov DS, Tarasov IA, Vorontsov DV. Studying resonance higher harmonic phenomena in the external power supply scheme of a non-linear load. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016; 4(111): 145-154. (In Russ.). doi: 10.21285/1814-3520-2016-4-145-154.

14. Chadov SN. Numerical study of a model power system. *Vestnik IGEU*. 2009; 4: 49-52. (In Russ.).

15. Mukendi KL, Tiguntsev SG. Issledovanie nesinusoidal'nykh rezhimov v chastnoi elektricheskoi seti "KAMOTO COPPER COMPANY" s vypryamitel'noi nagruzkoi. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*; 22-26 Apr 2019; Irkutsk, Russia. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2019. Vol. 2. Pp. 253-257. (In Russ.).

16. Kulikov A., Ilyushin P., Suslov K., et al. Organization of control of the generalized power quality parameter using Wald's sequential analysis procedure. *Inventions*. 2023; 8(1): 17. doi: 10.3390/inventions8010017.

17. Shepelev AO, Shepeleva EYu. Analysis of non-sinusoidal operating modes of electrical equipment in electrical supply system with 6-pulse transducer. *Yugra State University Bulletin*. 2022; 18(2): 68-78. (In Russ.). doi: 10.18822/byusu20220268-78.

18. Bulatov YuN, Kryukov AV, Suslov KV. Research of operation of predictive controllers of distributed generation plant in power supply system with energy storage. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol*. 2021; 14(4): 448-458. (In Russ.). doi: 10.17516/1999-494X-0325.

19. Gerasimiyuk A.Y., Smokovenko N.V., Nasyrov R.R., et al. Development of a methodology for the assessment of the actual contribution of a certain consumer to the distortion of the voltage sinusoid. In: *2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*; Moscow. Moscow: MPEI; 2021. Pp. 1-5. doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9388000.

20. Plashansky LA, Zaripov ShU. Vliyanie vysshikh garmonik na sostoyanie elektricheskikh setei. *Minerals and Mining Engineering*. 2010; 2: 61-66. (In Russ.).

Authors of the publication

Ekaterina V. Zubova – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Denis S. Fedosov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы».

Получено

23.04.2024 г.

Отредактировано

03.05.2024 г.

Принято

16.05.2024 г.