

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.311

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-92-100>



Влияние параметров нагрузки и линии электропередачи на качество электрической энергии

Т.А. Мамедов¹, В.И. Загинайлов^{2✉}, А.Ю. Шелягина³, О.В. Лештаев⁴, Д.С. Карлаков⁵

¹ ООО «Объединенная электросетевая компания» (ООО «ОЭСК»); г. Москва, Россия

^{2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>

² vzaginajlov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

³ ash4002@mail.ru

⁴ leshtaev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>

⁵ karlakov@rgau-msha.ru

Аннотация. Отклонение напряжения от номинального значения негативно влияет на параметры и режимы работы электрооборудования сельскохозяйственных потребителей электрической энергии. Отклонение напряжения определяется приближенно, по продольной составляющей падения напряжения в проводах линии электропередачи (ЛЭП). Целью исследований являлась оценка влияния заданных параметров проводов ЛЭП и изменяемых параметров нагрузки на параметры работы электроэнергетической системы и определение допустимого отклонения напряжения электропитания (допустимой потери напряжения в проводах ЛЭП) через параметры источника электроснабжения, проводов ЛЭП и нагрузки. Исследования проведены с использованием основ расчета линейных электрических цепей переменного тока в электроэнергетической системе, состоящей из источника тока низкого напряжения – силового трансформатора 10/0,4 кВ с симметричной нагрузкой, расположенной в конце трехфазной ЛЭП с глухозаземленной нейтралью. Установлено, что параметры нагрузки и проводов ЛЭП оказывают непосредственное влияние на полное сопротивление системы и обратно пропорциональное – на ток системы, опосредованно через ток системы влияют на параметры ее работы, в том числе на потери напряжения в ЛЭП и отклонение напряжения электропитания. Предложено устанавливать отклонения напряжения электропитания по нормативной потере напряжения в проводах ЛЭП, определяемой по вольтамперной характеристике источника переменного тока низкого напряжения при заданных параметрах проводов ЛЭП (полном сопротивлении и их коэффициенте мощности), полном сопротивлении нагрузки и ее коэффициенте мощности, приравненном коэффициенту мощности проводов ЛЭП ($\cos \varphi_n = \cos \varphi_{\text{л}}$).

Ключевые слова: качество электрической энергии; ЛЭП; отклонение напряжения; потери напряжения; падение напряжения; коэффициент мощности; активное и индуктивное сопротивления; полное сопротивление

Для цитирования: Мамедов Т.А., Загинайлов В.И., Шелягина А.Ю., Лештаев О.В., Карлаков Д.С. Влияние параметров нагрузки и линии электропередачи на качество электрической энергии // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 92-100. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-92-100>

ORIGINAL ARTICLE

Impact of load and transmission line parameters on power quality

T.A. Mamedov¹, V.I. Zaginailov^{2✉}, A.Yu. Shelyagina³, O.V. Leshtaev⁴, D.S. Karlaikov⁵¹ United Electric Grid Company LTD, Moscow, Russia^{2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev agricultural Academy, Moscow, Russia¹ mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>² energo-viz@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>³ ash4002@mail.ru⁴ leshtaev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>⁵ karlaikov@rgau-msha.ru

Abstract. Voltage deviations from nominal values significantly degrade the performance and operational reliability of electrical equipment in agricultural power systems. Current voltage deviation calculations, often relying solely on the approximate longitudinal component of voltage drop, are frequently imprecise. This research aimed to precisely assess the influence of power line wire and variable load parameters on system operation, and to establish a robust method for determining permissible voltage deviation (or voltage loss) by integrating the characteristics of the power source, the transmission line, and the load. The study employed fundamental AC linear circuit calculations on a simulated system: a 10/0.4 kV transformer supplying a symmetrical load via a three-phase line with a solidly grounded neutral. The authors established that load and power line parameters directly influence total system impedance. This impedance, inversely proportional to the system current, subsequently dictates critical operational parameters such as voltage loss and supply voltage deviation. Consequently, they propose a method to determine supply voltage deviation based on the normative voltage loss in the power line wires. This approach utilizes the volt-ampere characteristic of a low-voltage AC source, integrating the total impedance and power factor of both the power line and the load, specifically when the power factor of the load matches that of the power line ($\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}}$).

Keywords: electric power quality; power line; voltage deviation; voltage loss; voltage drop; power factor; active and inductive resistance; total impedance

For citation: Mamedov T.A., Zaginailov V.I., Shelyagina A.Yu., Leshtaev O.V., Karlaikov D.S. Impact of load and transmission line parameters on power quality. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):92-100 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-92-100>

Введение

Отклонение показателей качества электрической энергии (ПКЭ) от номинальных негативно влияет на параметры работы электрооборудования сельскохозяйственных потребителей электрической энергии (ЭЭ) [1, 2], на качество и количество производимой сельскохозяйственной продукции [3]. ПКЭ также влияют и на параметры работы электрооборудования систем электроснабжения [4], в том числе с возобновляемыми источниками ЭЭ [5].

Одним из основных ПКЭ в сельских электрических сетях можно считать отклонение напряжения питания на зажимах электроприемников¹. По отношению к нагрузке это алгебраическая разность действующего значения $U_{\text{н}}$ и номинального падения напряжений $U_{\text{ном}}$ на нагрузке:

$$\delta U_{\text{л}} = U_{\text{н}} - U_{\text{ном}}. \quad (1)$$

Оценить нормированное отклонение напряжения в системе электроснабжения можно по нормированной потере напряжения – разности напряжений в начальной и конечной точках линии электропередачи (ЛЭП) в данный момент времени²:

$$\Delta U_{\text{л}} = U_{\text{с}} - U_{\text{н}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{с}}$ – напряжение в начальной точке ЛЭП (напряжение источника переменного тока на шинах низкого напряжения трансформатора ТР 10/0,4 кВ); $U_{\text{н}}$ – напряжение в конечной точке ЛЭП, то есть действующее значение падения напряжения на нагрузке.

Определение отклонения напряжения электропитания и потери напряжения в ЛЭП по формулам (1) и (2) не проводится, так как падение напряжения на нагрузке $U_{\text{н}}$ – неизвестная величина.

Согласно ГОСТ Р 50571.5.52-2011³ оценку отклонения напряжения в электропроводах

¹ ГОСТ Р 54130-2010. Качество электрической энергии. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. 40 с.

² ГОСТ Р 54130-2010. Качество электрической энергии. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. 40 с.

³ ГОСТ Р 50571. 5.52-2011/МЭК 60364-5-52. Электроустановки низковольтные. Часть 5.52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки. М.: Стандартинформ, 2013 72 с.

низковольтных электроустановок предлагается проводить по падению напряжения в ЛЭП:

$$U_{\text{лп}} = b \cdot I_p \cdot (R_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{н}} + X_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{н}}), \quad (3)$$

где b – соответственно коэффициент, равный 1 для трехфазных и 2 – для однофазных ЛЭП; I_p – расчетный ток в проводнике ЛЭП, А; $R_{\text{л}}, X_{\text{л}}$ – активное и индуктивное сопротивление проводника ЛЭП соответственно, Ом; $\cos \varphi_{\text{н}}$ – коэффициент мощности нагрузки, в отсутствие точных данных коэффициент мощности принимается равным 0,8 ($\sin \varphi_{\text{н}} = 0,6$).

В ГОСТе не указано, как определяется расчетный ток проводника ЛЭП I_p и почему при отсутствии точных данных $\cos \varphi_{\text{н}}$ принимается равным 0,8.

В практических расчетах определение потери напряжения в проводах ЛЭП, в одной из фаз трехфазной симметричной системы с глухозаземленной нейтралью и нагрузкой (рис. 1а), расположенной в конце ЛЭП (в конце участка ЛЭП), осуществляется приближенно, по величине продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП, без учета ее поперечной составляющей⁴:

$$\Delta U_{\text{лп}} = I_{\text{н}} \cdot (R_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} + X_{\text{л}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}}), \quad (4)$$

где $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки, А.

Величина потери напряжения в проводах ЛЭП, определенной по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП $\Delta U_{\text{лп}}$ в соответствии с векторной диаграммой системы (рис. 1б) и выражением (4), равна сумме проекций активной $IR_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{н}}$ и реактивной $IX_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{н}}$ составляющих падения напряжения в проводах ЛЭП $U_{\text{л}}$ на направление действия падения напряжения на нагрузке $U_{\text{н}}$.

Определение потери напряжения в проводах ЛЭП может проводиться и по видоизмененным выражениям расчета потери напряжения по про-

дольной составляющей падения напряжения (4), например:

$$\Delta U_{\text{лп}} = \frac{S_{\text{н}}}{U_{\text{ном}}} \cdot (R_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} + X_{\text{л}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}})$$

$$\text{или } \Delta U_{\text{лп}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot R_{\text{л}} + Q_{\text{н}} \cdot X_{\text{л}}}{U_{\text{ном}}},$$

где $S_{\text{н}}$ – полная мощность нагрузки, $S_{\text{н}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{н}}$; $P_{\text{н}}$ – активная мощность нагрузки $P_{\text{н}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}$; $Q_{\text{н}}$ – реактивная мощность нагрузки $Q_{\text{н}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{н}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}}$.

Расчет потери напряжения в ЛЭП по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП (4) производится по заданным параметрам проводов ЛЭП ($R_{\text{л}}, X_{\text{л}}$); при отсутствии точных данных – по величине коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_{\text{н}}$ ($\sin \varphi_{\text{н}}$) и току нагрузки $I_{\text{н}}$, равному номинальному, определенному при номинальном напряжении по заданной или расчетной мощности нагрузки (полной $S_{\text{расч}}$ или активной $P_{\text{расч}}$) соответственно:

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{расч}}}{U_{\text{ном}}} \text{ или } I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{расч}}}{U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}}.$$

Следовательно, определение потери напряжения в ЛЭП по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП (4) проводится по величине номинального тока, а не тока электрической сети (системы) [6], при отсутствии точных данных – по величине коэффициента мощности нагрузки.

Цель исследований: оценка влияния заданных параметров проводов ЛЭП и изменяемых параметров нагрузки на параметры работы электроэнергетической системы и определение допустимого отклонения напряжения электропитания (допустимой потери напряжения в проводах ЛЭП) через параметры источника электроснабжения, проводов ЛЭП и нагрузки.

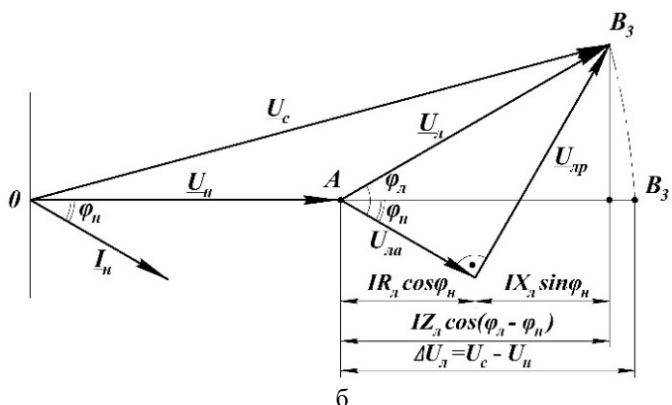
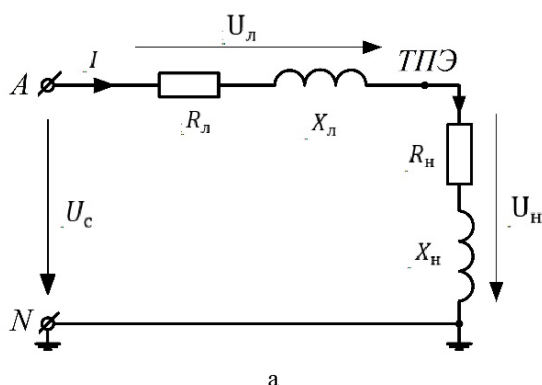


Рис. 1. Схема замещения однофазной ЛЭП (а) и ее векторная диаграмма (б)

Fig. 1. Equivalent diagram of a single-phase power line (a) and its vector diagram (b)

⁴ Лещинская Т.Б., Наумов И.В. Электроснабжение сельского хозяйства. М.: БИБИКОМ-ТРАНСЛОГ, 2015. 656 с.

Материалы и методы

Проведем исследования с использованием основ расчета линейных электрических цепей переменного тока⁵ в электроэнергетической системе, состоящей из источника тока низкого напряжения – силового трансформатора 10/0,4 кВ с симметричной нагрузкой, расположенной в конце трехфазной ЛЭП с глухозаземленной нейтралью.

Электроэнергетическая система состоит из системы электроснабжения (электрической сети) включая источник переменного тока напряжением U_c и однофазную линию электропередачи (ЛЭП) с заданными активным $R_{\text{л}}$ и индуктивным $X_{\text{л}}$ сопротивлениями и изменяемой во времени нагрузкой потребителя ЭЭ, определяемой ее активным $R_{\text{н}}$ и индуктивным $X_{\text{н}}$ сопротивлениями, соединенными последовательно с сопротивлениями ЛЭП.

Воздушные ЛЭП могут быть выполнены проводами различных марок, различного сечения и длины. Параметры проводов ЛЭП (активное и индуктивное сопротивления) определяются на стадии проектирования системы электроснабжения при выборе проводов ЛЭП. Ранее для передачи электроэнергии низкого напряжения в воздушных ЛЭП широко использовались алюминиевые провода А^{6,7}. В настоящее время воздушные ЛЭП рекомендовано выполнять с использованием самонесущих проводов СИП-2⁸. Удельные активное R_0 и индуктивное X_0 сопротивления (Ом/км) проводов определяют в соответствии с ГОСТ и справочниками⁹⁻¹¹ (табл. 1).

С увеличением сечения проводов (увеличением нагрузки) значительно уменьшаются их удельные активные сопротивления, а удельные индуктивные сопротивления проводов практически не изменяются. При расчетах потери напряжения в проводах воздушных ЛЭП можно использовать средние удельные индуктивные сопротивления проводов⁹: для ЛЭП напряжением до 1 кВ $X_0 = 0,31$ Ом/км; при напряжении 6...10 кВ $X_0 = 0,38$ Ом/км. Проведенный анализ изменения сопротивления проводов СИП-2¹⁰ показал, что их среднее удельное индуктивное сопротивление $X_0 = 0,0775$ Ом/км.

В соответствии с величиной удельных сопротивлений проводов и длиной ЛЭП $l_{\text{л}}$, км, определяются активные и индуктивные сопротивления проводов ЛЭП:

$$R_{\text{л}} = R_0 \cdot l_{\text{л}} \text{ и } X_{\text{л}} = X_0 \cdot l_{\text{л}}, \quad (5)$$

а также можно определить полное сопротивление проводов ЛЭП:

$$Z_{\text{л}} = \sqrt{R_{\text{л}}^2 + X_{\text{л}}^2} \quad (6)$$

и коэффициент мощности проводов ЛЭП:

$$\cos \varphi_{\text{л}} = \frac{R_{\text{л}}}{Z_{\text{л}}}. \quad (7)$$

Параметры нагрузки, размещенной в конце ЛЭП (участка ЛЭП), заданы полной мощностью $0 \leq S_i \leq \infty$ и коэффициентом мощности нагрузки $1,0 \geq \cos \varphi_{\text{н}} \geq 0,0$, в соответствии с которыми можно определить полное сопротивление нагрузки:

$$Z_{\text{н}} = \sqrt{R_{\text{н}}^2 + X_{\text{н}}^2}, \quad (8)$$

коэффициент мощности нагрузки:

$$\cos \varphi_{\text{н}} = \frac{R_{\text{н}}}{Z_{\text{н}}}, \quad (9)$$

полное сопротивление системы:

$$Z_{\text{с}} = \sqrt{(R_{\text{л}} + R_{\text{н}})^2 + (X_{\text{л}} + X_{\text{н}})^2}. \quad (10)$$

и коэффициент мощности системы:

$$\cos \varphi_{\text{с}} = \frac{R_{\text{с}}}{Z_{\text{с}}} = \frac{R_{\text{л}} + R_{\text{н}}}{Z_{\text{с}}}, \quad (11)$$

где $R_{\text{с}}$ – активное сопротивление системы, Ом.

Результаты и их обсуждение

Для достижения поставленной цели определим параметры проводов ЛЭП и нагрузки через их полные сопротивления и коэффициенты мощности. Согласно (7) активное сопротивление проводов ЛЭП $R_{\text{л}} = Z_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\text{л}}$, а индуктивное $X_{\text{л}} = Z_{\text{л}} \cdot \sin \varphi_{\text{л}}$. Согласно (9) активное сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = Z_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}$, а индуктивное $X_{\text{н}} = Z_{\text{н}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}}$. Подставив полученные выражения в (10) и выполнив преобразования, получим зависимость полного сопротивления системы ($Z_{\text{с}}$) как от величины полных сопротивлений нагрузки и их коэффициентов

⁵ Ляпин В.Г., Загинайлов В.И., Нормов Д.А. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие. М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. 135 с. <https://doi.org/10.26897/978-5-9675-2027-3-2024-135>.

⁶ ГОСТ 839-2019. Межгосударственный стандарт. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 43 с.

⁷ РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. 149 с.

⁸ ТУ 16-705.500-2006. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. Издательство ООО ВНИИИКИП, 2006. 13 с.

⁹ Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Издательство «Мастерство», 2002. 320 с.

¹⁰ ТУ 16-705.500-2006. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. Издательство ООО ВНИИИКИП, 2006. 13 с.

мощности, так и от величины полных сопротивлений проводов ЛЭП и их коэффициентов мощности:

$$Z_c = \sqrt{Z_{\text{л}}^2 + Z_{\text{н}}^2} + \sqrt{2 \cdot Z_{\text{л}} \cdot Z_{\text{н}} \cdot (\cos \varphi_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} + \sin \varphi_{\text{л}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}})} \quad (12)$$

Формулу (12) положим в основу алгоритма определения параметров режимов системы включая отклонение напряжения электропитания, где действующее значение тока электроэнергетической системы (проводов ЛЭП, нагрузки) –

$$I = \frac{U_c}{Z_c}, \quad (13)$$

действующее значение падения напряжения на нагрузке –

$$U_{\text{н}} = I \cdot Z_{\text{н}} = \frac{U_c \cdot Z_{\text{н}}}{Z_c}, \quad (14)$$

действующее значение падения напряжения в проводах ЛЭП –

$$U_{\text{л}} = I \cdot Z_{\text{л}} = \frac{U_c \cdot Z_{\text{л}}}{Z_c}. \quad (15)$$

Относительные нормативные потери напряжения в проводах ЛЭП ($\Delta U_{\text{л}}, \%$) с учетом продольной составляющей падения напряжения в проводах $\Delta U_{\text{л1}}$ (4) и падения напряжения в проводах ЛЭП (3,15) определим по выражению:

$$\Delta U_{\text{л}} \% = \frac{\Delta U_{\text{л}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Нормативное относительное отклонение напряжения –

$$\delta U_{\text{л}} \% = \frac{\delta U_{\text{л}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (17)$$

Ошибка определения потери напряжения в проводах ЛЭП, определяемой по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП, по сравнению с нормативным значением потери напряжения –

$$\Delta U_{\text{л1}} \% = \frac{\Delta U_{\text{л}} - \Delta U_{\text{л1}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (18)$$

При заданных на стадии проектирования системы электроснабжения значениях полного сопротивления и коэффициента мощности проводов ЛЭП вначале определим изменение полного сопротивления системы и параметры режимов ее работы при заданном полном сопротивлении нагрузки $Z_{\text{н}} = \text{const}$ и изменении ее коэффициента мощности в диапазоне $0,0 \leq \cos \varphi_{\text{н}} \leq 1,0$.

Для наглядности расчет отклонения напряжения электропитания (потери напряжения в проводах ЛЭП) произведем при согласованном режиме работы нагрузки с ЛЭП, при равенстве полных мощностей,

выделяемых на нагрузке и в проводах ЛЭП и определяемых через равенство полных сопротивлений нагрузки и проводов ЛЭП ($Z_{\text{н}} = Z_{\text{л}} = \text{const}$), при изменении коэффициента мощности нагрузки от $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,0$ до $\cos \varphi_{\text{н}} = 1,0$ и постоянном коэффициенте мощности проводов ЛЭП $\cos \varphi_{\text{л}} = \text{const}$.

Количественные параметры работы энергетической системы (рис. 1а) при согласованном режиме работы определим при напряжении на шинах трансформатора $U_c = 230$ В, равных полных сопротивлениях нагрузки и проводов ЛЭП $Z_{\text{н}} = Z_{\text{л}} = 1$ Ом, постоянном коэффициенте мощности провода ЛЭП $\cos \varphi_{\text{л}} = 0,5$ ($\varphi_{\text{л}} = 60^\circ$) и изменении коэффициента мощности нагрузки ($\varphi_{\text{н}}$ – фазового угла полного сопротивления нагрузки) от 90° до 0° , через 30° (рис. 2а).

Определение параметров режимов при согласованной работе системы проведем по предложенному алгоритму (13)-(18). В соответствии с формулой (12) определим величину полного сопротивления системы в четырех точках.

Точка B_1 . При $\varphi_{\text{н}} = 90^\circ$, $\cos \varphi_{\text{н}} = 0$ и с учетом равенства полного и индуктивного сопротивлений нагрузки $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}}$ получим полное сопротивление электрической сети (системы), равное геометрической сумме полных сопротивлений проводов ЛЭП и нагрузки (рис. 2а):

$$Z_{c1} = \sqrt{Z_{\text{л}}^2 + X_{\text{н}}^2 + 2 \cdot Z_{\text{л}} \cdot X_{\text{н}} \cdot \sin \varphi_{\text{л}}}. \quad (19)$$

Получили $Z_{c1} = 1,93$ Ом (отрезок OB_1).

Отрезок OB_1 совместно с отрезком OA (полное сопротивление проводов ЛЭП) и отрезком AB_1 (полное сопротивление нагрузки) образует треугольник полных сопротивлений системы OAB_1 . Потери напряжения в проводах ЛЭП определяются по выражению $\Delta U_{\text{л}} = I \cdot Z_{\text{л}} \cdot \sin \varphi_{\text{л}}$. При этом направление реактивной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП $U_{\text{л}}$ совпадает с направлением падения напряжения на нагрузке $U_{\text{н}}$ (рис. 3а).

Точка B_2 . При $\varphi_{\text{н}} = 60^\circ$, $\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}} = 0,5$ полное сопротивление системы Z_{c2} максимально и равно алгебраической сумме полных сопротивлений проводов ЛЭП и нагрузки, отрезок OB_2 представляет собой прямую линию (рис. 2а):

$$Z_{c2} = \sqrt{Z_{\text{л}}^2 + Z_{\text{н}}^2 + 2 \cdot Z_{\text{л}} \cdot Z_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{л}}} = Z_{\text{л}} + Z_{\text{н}}. \quad (20)$$

Получили $Z_{c2} = 2$ Ом.

Отрезок OB_2 состоит из двух полных сопротивлений проводов ЛЭП (отрезок OA) и нагрузки (отрезок AB_2). Потери напряжения в проводах ЛЭП определяются по выражению $\Delta U_{\text{л}} = I \cdot Z_{\text{л}}$, а направление падения напряжения в проводах ЛЭП совпадает с направлением падения напряжения на нагрузке (рис. 3б).

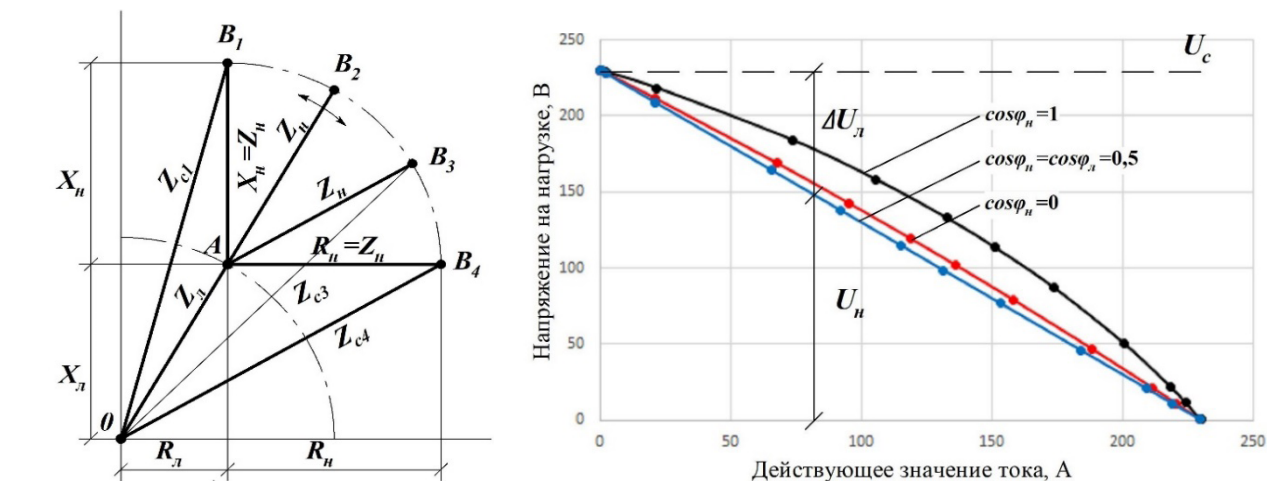


Рис. 2. Векторная диаграмма изменения полного сопротивления системы при $Z_n = Z_l = 1$ Ом (а) и ее вольт-амперная характеристика (б)

Fig. 2. Vector diagram of the change in the total resistance of the system, when $Z_n = Z_l = 1$ Ом (a) and its volt-ampere characteristic (b)

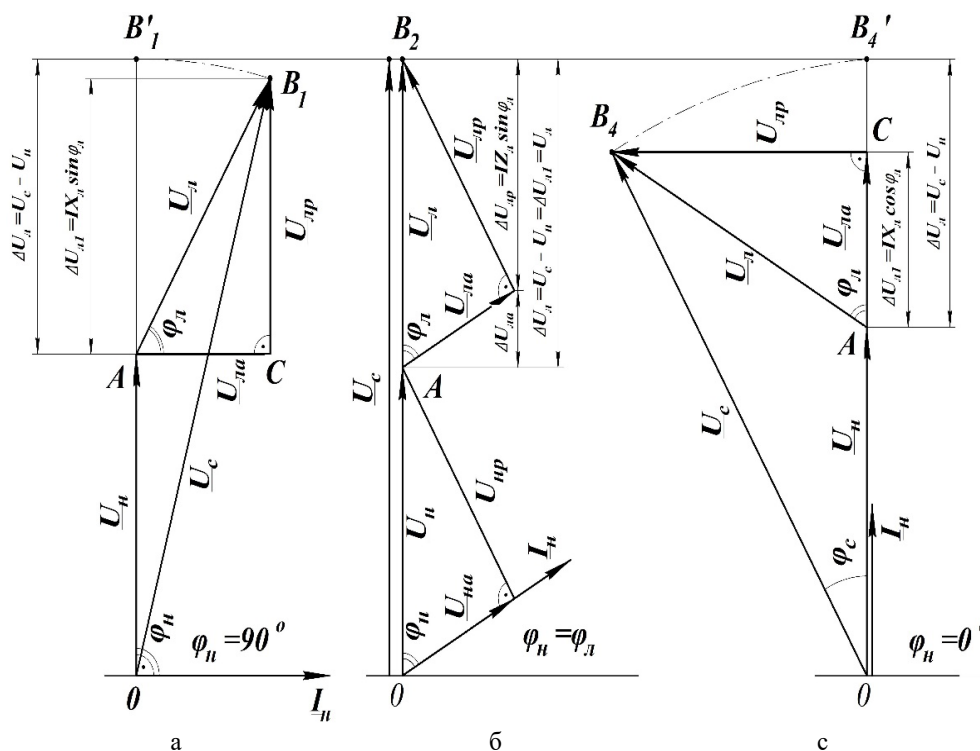


Рис. 3. Векторные диаграммы тока и напряжений системы при $\cos \varphi_n = 0$ (а); $\cos \varphi_n = \cos \varphi_l$ (б); $\cos \varphi_n = 1$ (с)

Fig. 3. Vector diagrams of current and voltage of the system at $\cos \varphi_n = 0$ (a); $\cos \varphi_n = \cos \varphi_l$ (b); $\cos \varphi_n = 1$ (c)

Точка B_3 . При $\varphi_n = 30^\circ$, $\cos \varphi_n = 0,866$ получаем модуль полного сопротивления системы, равный 1,93 Ом (рис. 2а). Отрезок OB_3 совместно с отрезком OA (полное сопротивление проводов ЛЭП) и отрезком AB_3 (полное сопротивление нагрузки) образует треугольник полных сопротивлений системы OAB_3 . Потери напряжения в проводах ЛЭП определяют по выражению (12), а вектор падения напряжения в проводах ЛЭП опережает вектор падения напряжения на нагрузке на угол $\varphi_l - \varphi_n$ (рис. 1б).

Точка B_4 . При $\varphi_n = 0^\circ$, $\cos \varphi_n = 1$ и с учетом равенства полного и активного сопротивлений нагрузки $Z_n = R_n$ (рис. 2а) получаем:

$$Z_{c4} = \sqrt{Z_l^2 + R_n^2 + 2 \cdot Z_l \cdot R_n \cdot \cos \varphi_l}. \quad (21)$$

$Z_{c4} = 1,73$ Ом. Отрезок OB_4 совместно с отрезком OA (полное сопротивление проводов) и отрезком AB_4 (полное сопротивление нагрузки) образует треугольник полных сопротивлений системы OAB_4 . Потери напряжения в проводах ЛЭП определяются

по выражению: $\Delta U_{\text{л}} = I \cdot Z_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\text{л}}$, а направление активной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП $U_{\text{ла}}$ совпадает с направлением падения напряжения на нагрузке (рис. 3в).

Величины параметров согласованного режима работы электроэнергетической системы (рис. 1а), полученных по формулам (12)-(18), представлены в таблице.

С помощью Microsoft Excel определим количественные параметры работы электроэнергетической системы (рис. 1а) при варьировании полной мощности нагрузки ($0 \leq S_{\text{н}} \leq \infty$), ее полного сопротивления ($\infty \geq Z_{\text{н}} \geq 0$) и коэффициента мощности нагрузки ($0 \leq \cos \varphi_{\text{н}} \leq 1$) и постоянных значениях напряжения на шинах трансформатора $U_{\text{с}} = 230$ В, полного сопротивления ($Z_{\text{л}} = 1$ Ом) и коэффициента мощности проводов ЛЭП ($\cos \varphi_{\text{л}} = 0,5$ ($\varphi_{\text{л}} = 60^\circ$)).

Результаты расчетов параметров режимов работы электроэнергетической системы от холостого хода ($I = 0$) до тока короткого замыкания ($I = I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{с}}}{Z_{\text{л}}}$) представлены тремя вольт-амперными характеристиками $U_{\text{н}} = f(I)$ (рис. 2б).

В результате проведенного анализа установлено, что параметры нагрузки и проводов ЛЭП оказывают непосредственное влияние на полное сопротивление системы (12, 19-21) и обратно пропорциональное воздействие на значение тока системы (13), опосредованно через ток системы влияют на параметры режимов ее работы (14-18), в том числе на потери напряжения в ЛЭП (2, 15) и отклонение напряжения электропитания потребителя (1).

Влияние параметров нагрузки и проводов ЛЭП на качество передаваемой ЭЭ может быть оценено по вольт-амперным характеристикам (рис. 2б).

При равных коэффициентах мощности нагрузки и мощности проводов ЛЭП ($\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}}$) получаем максимальное значение полного сопротивления системы (20), равное алгебраической сумме полных сопротивлений проводов ЛЭП и нагрузки: $Z_{\text{с2}} = Z_{\text{л}} + Z_{\text{н}}$ (рис. 2а); ток в системе

минимален (табл. 2); определенные по формуле (4) потери напряжения в проводах ЛЭП максимальны, равны между собой и равны нормативной потере напряжения (2) $\Delta U_{\text{л}} = \Delta U_{\text{л1}}$; падение напряжения, определенное по формулам (3) и/или (15), минимально и равно нормативной потере напряжения в проводах ЛЭП $U_{\text{л}} = \Delta U_{\text{л}}$.

Следовательно, ошибка определения потери напряжения по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП по сравнению с нормативным значением потерей напряжения равна нулю (табл. 1). Это объясняется тем, что при $\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}}$ все расчеты производятся по единому выражению $\Delta U_{\text{л}} = I \cdot Z_{\text{л}}$, а $\Delta U_{\text{л}} = \Delta U_{\text{л1}} = U_{\text{л}}$. В этот момент полное сопротивление системы равно алгебраической сумме полных сопротивлений проводов ЛЭП и нагрузки ($Z_{\text{с2}} = Z_{\text{л}} + Z_{\text{н}}$) и представляет собой прямую линию (рис. 2а), а треугольник падения напряжения на нагрузке подобен треугольнику падения в проводах ЛЭП (рис. 3б) и $U_{\text{с}} = U_{\text{л}} + U_{\text{н}}$. При отклонении $\cos \varphi_{\text{н}}$ от $\cos \varphi_{\text{л}}$ ошибка определения потери напряжения в проводах ЛЭП по продольной составляющей падения напряжения в проводах ЛЭП по сравнению с нормативной увеличивается, достигая наивысшего значения при максимальном отклонении $\cos \varphi_{\text{н}}$ от $\cos \varphi_{\text{л}}$.

При неравных коэффициентах мощности нагрузки и мощности проводов ЛЭП ($\cos \varphi_{\text{н}} \neq \cos \varphi_{\text{л}}$) полные сопротивления системы, определенные по формулам (19) и (21), снижаются по сравнению с полным сопротивлением системы (формула 20) и равны геометрическим суммам полных сопротивлений проводов ЛЭП и нагрузки (рис. 2б); ток в системе повышается (табл. 2). Потери напряжения в проводах ЛЭП относительно потерь напряжения, определенных при $\cos \varphi_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{л}}$, снижаются.

Потери напряжения, определенные по ГОСТ Р 54130-2010 (2), выше, чем определенные по приближенной формуле (4): $\Delta U_{\text{л}} > \Delta U_{\text{л1}}$. Падение напряжения, определенное по формулам (3), (15), при этом увеличивается и не является равным потере напряжения в проводах ЛЭП.

Таблица

Результаты расчета влияния коэффициента мощности нагрузки на параметры электроэнергетической системы

Table

Results of the analysis of the load power factor impact on the power system parameters

Параметры системы и нагрузки	Параметры электроэнергетической системы при согласованном режиме ее работы							
$\cos \varphi_{\text{н}}$	$Z_{\text{с}}$	$I, \text{А}$	$U_{\text{н}}, \text{В}$	$U_{\text{л}}, \text{В}$	$\Delta U_{\text{л}}, \text{В}$	$\Delta U_{\text{л}}, \%$	$\Delta U_{\text{л1}}, \text{В}$	$\Delta U_{\text{л1}}, \%$
0,000	1,93	119,2	119,2	119,2	110,8	50,4	103,2	3,5
$\cos \varphi_{\text{л}}$	2,0	115,0	115,0	115,0	115,0	52,3	115,0	0,0
0,866	1,93	119,2	119,2	119,2	110,8	50,4	103,2	3,5
1,000	1,73	132,90	132,90	132,90	97,1	44,1	66,5	13,9

При изменении $\cos \varphi_n$ от 0 до 1 ($0 \leq \cos \varphi_n \leq 1$) вектор полного сопротивления нагрузки поворачивается на 90° по часовой стрелке (рис. 2а), что приводит к повороту вектора тока нагрузки (системы, проводов ЛЭП) против часовой стрелки на 90° (рис. 3) и повороту треугольника напряжений проводов ЛЭП (АСВ) вокруг точки А против часовой стрелки на 90° (рис. 3).

В соответствии с разработанной методикой влияние параметров нагрузки и проводов ЛЭП на качество передаваемой энергии оценивается по вольт-амперной характеристике (ВАХ) источника переменного тока – силовых трансформаторов ТР 10/0,4 при заданных значениях напряжения источника переменного тока на шинах трансформатора ($U_c = 230$ В), удельных сопротивлений (активного R_0 и индуктивного X_0 , Ом/км), длины (l_n , км) проводов ЛЭП, коэффициентов мощности нагрузки в диапазоне ($0 \leq \cos \varphi_n \leq 1$) и при изменении полной мощности нагрузки в диапазоне $\infty \geq S_n \geq 0$, то есть соответственно сопротивлению нагрузки в диапазоне $\infty \geq Z_n \geq 0$.

Разработанную методику определения потери напряжения в проводах ЛЭП (отклонения напряжения питания) можно использовать для выбора сечения проводов ЛЭП по заданной (расчетной) полной

мощности объекта электроснабжения и/или для оценки влияния параметров нагрузки и проводов ЛЭП на качество электрической энергии.

Пример определения потери напряжения в ЛЭП, выполненной проводом СИП-23 $\times 50+1 \times 50$, в диапазоне нагрузки от тока холостого хода $I = I_{xx} = 0$ до тока короткого замыкания $I = I_{xx} = \frac{U_c}{Z_n} = 356$ А, при заданных коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_n = \cos \varphi_n = 0,992$, $\cos \varphi_n = 0,6$ и $\cos \varphi_n = 1,0$ показан на рисунке 4а.

Пример определения допустимого тока нагрузки (допустимой мощности нагрузки) по допустимому отклонению напряжения и/или допустимой потере напряжения в ЛЭП, выполненной проводами СИП-2 различного сечения, представлен на рисунке 4б.

Допустимый ток нагрузки определен при допустимом относительном отклонении напряжения $\delta U_n \% = -10\%$, в точке передачи ЭЭ потребителю¹¹, при номинальном фазном напряжении на шинах низкого напряжения трансформатора ТР 10/0,4 кВ $U_c = 230$ В и номинальном фазном напряжении на нагрузке $U_{ном} = 220$ В¹².

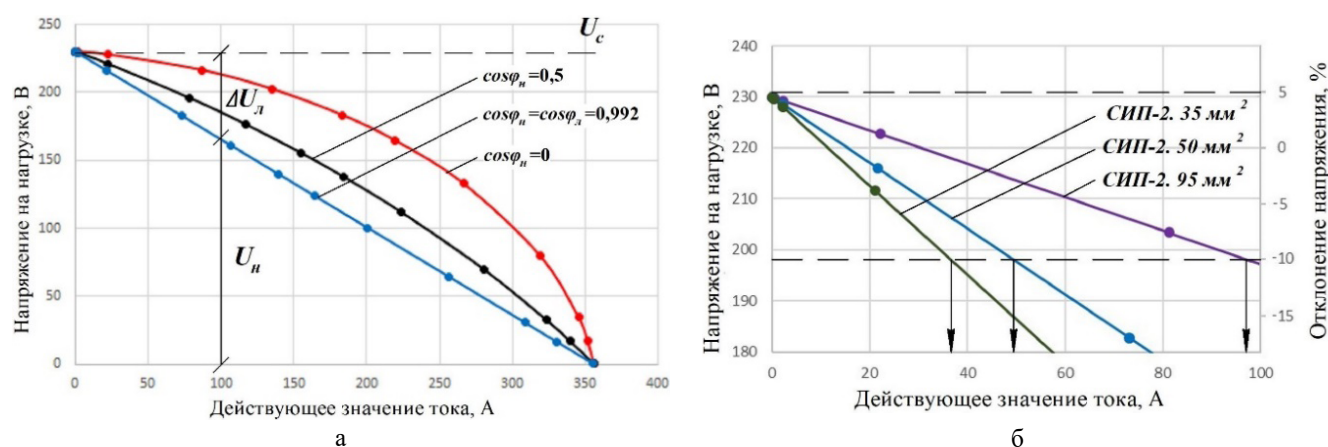


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика проводов СИП 2:

а) $\cos \varphi_n = 0$; $\cos \varphi_n = \cos \varphi_n$ и $\cos \varphi_n = 1,0$; б) $\cos \varphi_n = \cos \varphi_n$

Fig. 4. Volt-ampere characteristic of self-supporting insulated wires SIP 2:

а) $\cos \varphi_n = 0$; $\cos \varphi_n = \cos \varphi_n$ and $\cos \varphi_n = 1,0$; б) $\cos \varphi_n = \cos \varphi_n$

Выводы

1. Оценку влияния параметров нагрузки и линии электропередачи по качеству ЭЭ в однофазной ЛЭП трехфазной симметричной системы с нейтральным проводником и нагрузкой, расположенной в конце ЛЭП, питаемой от силового трансформатора ТР

10/0,4 кВ, предлагается проводить по вольт-амперной характеристике источника переменного тока (силового трансформатора ТР 10/0,4 кВ) при заданных постоянных параметрах полного сопротивления проводов ЛЭП и их коэффициента мощности, при изменении полного сопротивления нагрузки (полной мощности

¹¹ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 27 с.

¹² ГОСТ 21128-83 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В. М.: Издательство стандартов, 1995. 5 с

нагрузки) и изменении ее коэффициента мощности от нуля до единицы.

2. Определение отклонения напряжения электропитания предлагается проводить при коэффициенте мощности нагрузки, равном коэффициенту

мощности проводов ЛЭП ($\cos \varphi_n = \cos \varphi_n$), то есть по величине максимальной нормативной потери напряжения в проводах ЛЭП и/или по минимальному падению напряжения в проводах ЛЭП.

Список источников

1. Исаева О.А. Обзор влияния уровня напряжения на работу электрооборудования и электроприемников // Вестник науки. 2025. Т. 4, № 2. С. 662-665. EDN: CVEXQV
2. Турдуев И.Э. Качество электроэнергии и влияние электроэнергии на работу электроприемников // Бюллетень науки и практики. 2024. Т. 10, № 2. С. 359-364. EDN: QPUQZU
3. Ефременко В.М., Савинкина О.А., Наумкин Р.Б. Анализ потерь напряжения в распределительных электрических сетях // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 3 (79). С. 69-72. EDN: MQHKSU
4. Наумов А.А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 1. С. 85-92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>
5. Лештаев О.В., Стушкина Н.А., Загинайлов В.И. Анализ показателей качества электроэнергии в системах электропитания с сетевыми солнечными электростанциями малой мощности // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 5. С. 48-53. EDN: ZMGGEV
6. Загинайлов В.И., Мамедов Т.А., Лештаев О.В., Манько В.Э. Определение качества и энергоэффективности передачи электрической энергии низкого напряжения // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 80-88. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-80-88>

Информация об авторах

- ¹ Мамедов Тимур Азерович, советник генерального директора; mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>
- ² Загинайлов Владимир Ильич, д-р техн. наук, профессор; vzaginajlov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>; SPIN-код: 5230-0756
- ³ Шелягина Алена Юрьевна, студент; ash4002@mail.ru
- ⁴ Лештаев Олег Валерьевич, канд. техн. наук, доцент; oleg-leshtae@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>; SPIN-код: 1803-2881
- ⁵ Карлаков Дмитрий Сергеевич, аспирант, ассистент; karlakov@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4331-3870
- ¹ ООО «Объединенная электросетевая компания» (ООО «ОЭСК»); 115114, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Дербеневский переулок, 5
- ^{2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Вклад авторов

Т.А. Мамедов – формулирование основной концепции исследований;
В.И. Загинайлов – описание результатов и формирование выводов исследований, подготовка начального варианта текста;
А.Ю. Шелягина – разработка графических зависимостей;
О.В. Лештаев – разработка методологии исследований;
Д.С. Карлаков – представление результатов, подготовка графических материалов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 17.07.2025, после рецензирования и доработки 07.11.2025; принята к публикации 17.11.2025

References

1. Isaeva O.A. Review of the influence of voltage level on the operation of electrical equipment and electrical receivers. *Science Bulletin*. 2025;4(2):662-665. (In Russ.)
2. Turduev I.E. The quality of electricity and the effect of electricity on the operation of electric receivers. *Bulletin of Science and Practice*. 2024;10(2):359-364. (In Russ.)
3. Efremenko V.M., Savinkina O.A., Naumkin R.B. Analysis of voltage losses in power distribution networks. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2010;3:69-72. (In Russ.)
4. Naumov A.A. The required quality of electrical energy provision. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):85-92. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>
5. Lestayev O.V., Stushkina N.A., Zaginaylov V.I. Analysis of power quality indicators in power supply systems with grid-connected solar power plants of small capacity. *International Technical and Economic Journal*. 2021;5:48-53. (In Russ.)
6. Zaginaylov V.I., Mamedov T.A., Lestayev O.V., Manko V.E. Identification of quality and energy efficiency of low-voltage power transmission. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):80-88. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-80-88>

Author Information

- Timur A. Mamedov¹, Advisor to General Director; mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>
- Vladimir I. Zaginailov², DSc (Eng), Professor; vzaginajlov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>
- Alena Yu. Shelyagina³, student; ash4002@mail.ru
- Oleg V. Leshtayev⁴, CSc (Eng), Associate Professor; oleg-leshtayev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>
- Dmitry S. Karlakov⁵, postgraduate student, Assistant Professor; karlakov@rgau-msha.ru
- ¹ United Electric Grid Company LTD; 115114, Russian Federation, Moscow, 1st Derbenevsky Lane, 5
- ^{2, 3, 4, 5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Street, 49

Author Contribution

T.A. Mamedov – conceptualization;
V.I. Zaginailov – formal analysis; validation, writing – original draft;
A.Yu. Shelyagina – visualization;
O.V. Leshtayev – methodology;
D.S. Karlakov – validation, visualization.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this article and are equally responsible for plagiarism

Received 17. 07.2025; Revised 07.11.2025; Accepted 17.11.2025