

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.311:621.315

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-80-88>

Определение качества и энергоэффективности передачи электрической энергии низкого напряжения

В.И. Загинайлов^{1✉}, Т.А. Мамедов², О.В. Лештаев³, В.Э. Манько⁴

^{1,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

² ООО «Объединенная электросетевая компания» (ООО «ОЭСК»); г. Москва, Россия

⁴ ООО «Энергетическое партнерство»; г. Москва, Россия

¹ energo-viz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

² mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>

³ oleg-leshtaev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>

⁴ valentin.manko@gmail.com

Аннотация. Обеспечение потребителей высококачественной электрической энергией при минимальных потерях на её передачу является одной из проблем передачи электроэнергии по электрическим сетям. Потери электроэнергии увеличиваются, а качество ухудшается с увеличением реактивной мощности электроприемников, оцениваемой по коэффициенту мощности нагрузки. С целью оценки влияния коэффициента мощности нагрузки на передачу активной мощности нагрузки и определения качества и энергоэффективности передачи электроэнергии по ЛЭП авторами проведен анализ изменения параметров одной фазы трёхфазной сети без компенсации и с компенсацией реактивной мощности. Поставленная задача решалась с использованием методов расчёта линейных электрических цепей переменного тока в соответствии с заданными значениями полной или активной мощности нагрузки, её сопротивлений и сопротивлений проводов ЛЭП и моделирования процессов передачи электрической энергии по ЛЭП в электрических сетях переменного тока низкого напряжения в программе Electronics Workbench. В результате показано, что основные изменения параметров электроэнергетической системы, состоящей из электроприёмников потребителей (нагрузки), получающих электропитание по ЛЭП, подключённой к шинам низкого напряжения силового трансформатора, происходят при изменении величины тока системы, определяемого сопротивлениями нагрузки и линии электропередачи. Качество передачи электрической энергии низкого напряжения зависит от потери напряжения в проводах ЛЭП и определяется током нагрузки и её полным сопротивлением. Энергоэффективность передачи электрической энергии зависит от потери мощности в проводах ЛЭП и определяется величиной активной мощности потребляемой нагрузкой и соотношением активных сопротивлений ЛЭП и нагрузки.

Ключевые слова: электрическая энергия, однофазная ЛЭП низкого напряжения, качество передачи электрической энергии, энергоэффективность передачи электрической энергии, потери напряжения и мощности электрической энергии

Для цитирования: 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/10.26897/2687-1149-80-88>

ORIGINAL ARTICLE

Identification of quality and energy efficiency of low-voltage power transmissionV.I. Zaginaylov^{1✉}, T.A. Mamedov², O.V. Leshtayev³, V.E. Manko⁴^{1,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia² United Electric Grid Company LLC⁴ LLC “Energeticheskoe Partnerstvo”; Moscow, Russia¹ energo-viz@mail.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>² mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>³ oleg-leshtaev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>⁴ valentin.manko@gmail.com

Abstract. Providing consumers with high quality electric power with minimum transmission losses is one of the problems of electric power transmission through power grids. Increasing reactive power of electric consumers, estimated by the load power factor, results in an increase in electricity losses and quality deterioration. To evaluate the influence of the load power factor on the transmission of active load power and to determine the quality and energy efficiency of electricity transmission through power lines, the authors analyzed the change in the parameters of one phase of a three-phase network without compensation and with reactive power compensation. The set task was solved using methods of calculation of linear electric circuits of alternating current, according to the given values of total or active load power, its resistance and the resistance of power line wires. Then the processes of power transmission in low-voltage electric networks of alternating current were simulated using the Electronics Workbench software. The authors take a case of the electric power system consisting of consumers' (load) electric receptors receiving power supply through the power line connected to the low-voltage busbars of the power transformer. They prove that its parameters are mainly changed when changing the value of the system current determined by the load and transmission line resistances. The quality of low-voltage electrical energy transmission depends on the voltage loss in the power line wires and is determined by the load current and its full resistance. The energy efficiency of electrical energy transmission depends on the power loss in the power line wires and is determined by the amount of active power consumed by the load and the ratio of the active resistance of the power line and the load.

Keywords: electric energy, single-phase low-voltage transmission line, quality of electric power transmission, energy efficiency of electric power transmission, voltage and power losses of electric energy

For citation: Zaginaylov V.I., Mamedov T.A., Leshtayev O.V., Manko V.E. Identification of quality and energy efficiency of low-voltage power transmission. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):80-88. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-80-88>

Введение

Одной из современных проблем передачи электроэнергии (ЭЭ) по электрическим сетям является обеспечение потребителей ЭЭ высококачественной энергией^{1,2}. Важнейшим показателем качества электроэнергии является отклонение напряжения на зажимах электроприемников, возникающее по причине потерь напряжения при передаче ЭЭ по линии электропередачи (ЛЭП), которое приводит к нарушению работы электроприемников, снижению

производительности технологического оборудования и сроков службы электрооборудования [1-3].

Другой не менее важной проблемой передачи ЭЭ по ЛЭП являются потери мощности (энергии), относящиеся к важнейшим технико-экономическим показателям работы территориальных сетевых организаций [4-7]. Потери мощности в ЛЭП и отклонения напряжения на нагрузке возрастают с увеличением реактивной мощности, передаваемой по ЛЭП^{3,4,5} [8]. Оценку потери качества ЭЭ осуществляют

¹ Ахметшин А.Р. Методики энергосбережения и повышения качества электроэнергии в распределительных электрических сетях 0,4-10 кВ на основе глубокой компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения: Дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2013. 193 с.

² Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.

³ Геворкян М.В. Современные компоненты компенсации реактивной мощности (для низковольтных сетей). М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2003. 64 с.

⁴ Кабышев А.В. Компенсации реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 234 с.

⁵ Бирюлин В.И. Энергосберегающие технологии: Методические указания по выполнению практических работ; Сост.: В.И. Бирюлин, А.Н. Горлов, А.В. Филонович, И.В. Ворначева / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2018. 43 с.

согласно ГОСТ Р 54130-2010⁶ по отклонению напряжения, то есть по величине, отличной от его номинального или заявленного значения напряжения:

$$\delta U_n = U_n - U_{ном}, \quad (1)$$

где U_n – действующее фазное напряжение в данной точке системы электроснабжения, или действующее фазное напряжение на нагрузке потребителя ЭЭ в рассматриваемый момент времени; $U_{ном}$ – номинальное напряжение на нагрузке – на клеммах электроприёмников потребителя ЭЭ, $U_{ном} = 220$ В (здесь и далее рассматриваем фазное номинальное напряжение трёхфазной сети с глухим заземлением нейтрали).

С отклонениями напряжения на нагрузке тесно связаны потери напряжения в ЛЭП (разность напряжений в начале и в конце ЛЭП)¹:

$$\Delta U_n = U_c - U_n, \quad (2)$$

где U_c – действующее значение фазного напряжения источника ЭЭ – силового трансформатора 10/0,4 кВ (начало ЛЭП) (здесь и далее рассматриваем фазное напряжение на выходе силового трансформатора 10/0,4 кВ трёхфазной сети с глухим заземлением нейтрали, $U_c = 230$ В).

Оценку энергоэффективности осуществляют согласно ГОСТ 36107-2013 по потере мощности (разности мощностей в начале и в конце ЛЭП)⁷:

$$\Delta P_n = P_c - P_n, \quad (3)$$

где P_c , P_n – соответственно абсолютные значения мощности, выделяемой источником ЭЭ (силовым трансформатором) и потребляемой нагрузкой.

Поделив выражение (3) на мощность источника ЭЭ P_c , получим потери мощности (энергии) в ЛЭП в относительных единицах:

$$\delta P_n = 1 - \eta_n, \quad (4)$$

где δP_n – относительные потери мощности (энергии)

в ЛЭП, $\delta P_n = \frac{\Delta P_n}{P_c}$; η_n – коэффициент полезного действия передачи ЭЭ по ЛЭП, $\eta_n = \frac{P_n}{P_c}$.

Абсолютные потери мощности в ЛЭП определяются по выражению:

$$\Delta P_n = U_n \cdot I \cdot \cos \varphi_n = I^2 \cdot R_n, \quad (5)$$

где I – действующее значение тока, протекающего в ЛЭП, А; U_n – падение напряжения в проводах ЛЭП, $U_n = I \cdot Z_n$; Z_n – полное сопротивление проводов

⁶ ГОСТ Р 54130-2010 Национальный стандарт РФ. Качество электрической энергии. Термины и определения. Дата введения: 2012-07-01.

⁷ ГОСТ 31607-2012. Межгосударственный стандарт. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. Дата введения: 2015-01-01.

ЛЭП, Ом; $\cos \varphi_n$ – коэффициент мощности проводов ЛЭП, $\cos \varphi_n = \frac{R_n}{Z_n}$; R_n – активное сопротивление проводов ЛЭП, Ом.

Величина потерь мощности ЭЭ в ЛЭП (3-5) и потерь напряжения (2) зависит от величины тока, протекающего в ЛЭП (нагрузке), которая определяется заданной активной (полной) мощностью нагрузки приемников:

$$P_n = U_n \cdot I \cdot \cos \varphi_n = I^2 \cdot R_n, \quad (6)$$

где $\cos \varphi_n$ – коэффициент мощности нагрузки, $\cos \varphi_n = \frac{R_n}{Z_n}$; R_n – активное сопротивление нагрузки ЛЭП, Ом; Z_n – полное сопротивление нагрузки, Ом.

Используя (6), определяют величину тока в нагрузке, протекающего и в проводах ЛЭП:

$$I = \frac{P_n}{U_n \cdot \cos \varphi_n}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), можно определить потери мощности в ЛЭП:

$$\Delta P_n = \frac{P_n^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_n} \cdot R_n. \quad (8)$$

Принимая неизменными передаваемую мощность нагрузки по ЛЭП (P_n), напряжение на нагрузке (U_n) и активное сопротивление ЛЭП (R_n), определяют величину потерь в ЛЭП как обратно пропорциональную квадрату коэффициента мощности нагрузки [12, 13], то есть $\Delta P_n = f\left(\frac{\text{const}}{\cos^2 \varphi_n}\right)$. Однако такой расчёт потерь мощности в ЛЭП (8) вызывает сомнение, так как:

– величина тока нагрузки (7) определяется величиной не только сопротивлений нагрузки (6), но и сопротивлений проводов ЛЭП (5);

– величина действующего напряжения на нагрузке зависит как от потерь напряжения в ЛЭП (3), так и от величины тока нагрузки (7):

$$U_n = I \cdot Z_n \quad (9)$$

– величина выделяемой мощности на нагрузке (6) также зависит и от потерь напряжения в ЛЭП (2), и от величины тока нагрузки (7);

– коэффициент мощности нагрузки можно изменять только при варьировании соотношений величин активного и полного сопротивлений нагрузки (6).

Цель исследований: оценка влияния коэффициента мощности нагрузки ($\cos \varphi_n$) на передачу по ЛЭП активной мощности нагрузки; определение качества и энергоэффективности передачи электроэнергии по ЛЭП включая передачу ЭЭ по низковольтной сети с поперечной компенсацией реактивной мощности потребителя ЭЭ.

Материалы и методы

Поставленная цель решена с использованием методов расчета линейных электрических цепей переменного тока в соответствии с заданными значениями полной или активной мощности нагрузки, её сопротивлениями и сопротивлениями проводов ЛЭП и моделирования процессов передачи ЭЭ по ЛЭП в электрических сетях переменного тока низкого напряжения в программе Electronics Workbench.

Определение качества и энергоэффективности передачи электрической энергии по однофазной ЛЭП произведено в трехфазной сети напряжением 380/220 В, с глухо заземленной нейтралью и нагрузкой, размещенной в конце ЛЭП без компенсации (рис. 1а) и с компенсацией (рис. 1б) реактивной мощности.

Нагрузка потребителя электрической энергии (ПЭЭ), состоящая из электроприемников, получает питание от источника ЭЭ (силового трехфазного трансформатора) по воздушной ЛЭП и характеризуется не только активной, но и реактивной составляющей полной мощности ПЭЭ, и определяется её полным комплексным сопротивлением:

$$\underline{Z}_н = R_н + j \cdot X_н,$$

где $R_н$ и $X_н$ – соответственно активное и индуктивное сопротивления нагрузки (электроприёмники, подключённые к ЛЭП).

Сопротивление проводов ЛЭП также характеризуется активной и реактивной составляющими и определяется полным комплексным сопротивлением линии электропередачи:

$$\underline{Z}_л = R_л + j \cdot X_л,$$

где $R_л$ и $X_л$ – соответственно активное и индуктивное сопротивления проводов ЛЭП, величины которых

определяются длиной ЛЭП ($l_л$, км), удельным активным (R_0 , Ом/км) и индуктивным (X_0 , Ом / км) сопротивлением провода ЛЭП^{8,9}.

Полное комплексное сопротивление электроэнергетической системы, состоящей из электроприёмников потребителей (нагрузки), получающих электропитание по ЛЭП, подключённой к шинам низкого напряжения силового трансформатора напряжения, определяется суммой последовательно соединённых комплексных сопротивлений нагрузки и проводов ЛЭП (рис. 1а)

$$\underline{Z}_с = R_н + R_л + j \cdot (X_н + X_л)$$

и состоит из последовательно соединённых активных сопротивлений нагрузки и ЛЭП ($R_с = R_н + R_л$) и индуктивных сопротивлений нагрузки и ЛЭП ($X_с = X_н + X_л$).

Исходя из вышеизложенного параметры энергетической системы без компенсации реактивной мощности (рис. 1а) определяются модулями полного сопротивления и коэффициентами мощности нагрузки ($Z_н$), проводов ЛЭП ($Z_л$) и системы ($Z_с$):

$$Z_н = \sqrt{R_н^2 + X_н^2} \text{ и } \cos \varphi_н = \frac{R_н}{Z_н};$$

$$Z_л = \sqrt{R_л^2 + X_л^2} \text{ и } \cos \varphi_л = \frac{R_л}{Z_л};$$

$$Z_с = \sqrt{(R_н + R_л)^2 + (X_н + X_л)^2} \text{ и } \cos \varphi_с = \frac{R_с}{Z_с}. \quad (10)$$

Параметры энергетической системы с компенсацией реактивной мощности нагрузки (рис. 1б) отличаются от энергетической системы без компенсации реактивной мощности (рис. 1а) тем, что к выводам нагрузки подсоединена конденсаторная батарея с ёмкостью C , величина которой определяется величиной, компенсируемой реактивной мощностью нагрузки.

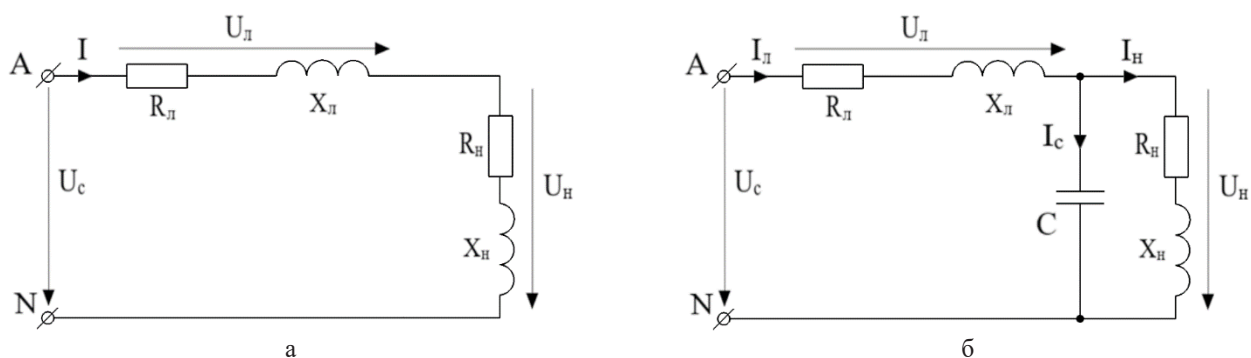


Рис. 1. Схема замещения однофазной ЛЭП:

а – без компенсации реактивной мощности; б – с компенсацией реактивной мощности

Fig. 1. Substitution diagram of a single-phase power transmission line:

a – without reactive power compensation; b – with reactive power compensation

⁸ ГОСТ 839-2019. Межгосударственный стандарт. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 40 с.

⁹ РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. М.: Издательство НИЦ ЭНАС, 2002. 149 с.

Результаты и их обсуждение

Определение параметров качества и энергоэффективности передачи ЭЭ по низковольтной сети осуществим согласно схемам замещения (рис. 1а, 1б). Рассмотрим определение параметров ЛЭП низкого напряжения на примере электроснабжения нагрузки активной мощностью $P_n = P_{ном} = 10000$ Вт от силового трансформатора с фазным напряжением $U_c = 230$ В по воздушной однофазной ЛЭП проводом А50 длиной 1 км.

При заданных номинальных параметрах $P_n = P_{ном} = 10000$ Вт = const, $U_n = U_{ном} = 220$ В = const и снижении $\cos \phi_n$ от 1 до 0,3 согласно (7) определим номинальный ток $I_{ном}$ и величину активного сопротивления нагрузки (6) $R_n = \frac{P_n}{I^2}$ в электроэнергетической системе без компенсации реактивной мощности (рис. 1а). Далее находим: полное сопротивление нагрузки $Z_n = \frac{R_n}{\cos \phi_n}$; индуктивное сопротивление нагрузки $X_n = Z_n \cdot \sin \phi_n$; индуктивность нагрузки $L_n = \frac{X_n}{\omega}$, где ω – круговая частота, $\omega = 314$ с⁻¹; полную мощность нагрузки $S_n = \frac{P_n}{\cos \phi_n}$.

Результаты расчётов номинальных параметров нагрузки при номинальной мощности и напряжении, проведенных без учёта параметров ЛЭП, представлены в таблице 1.

Параметры ЛЭП (активное сопротивление ЛЭП $R_l = 0,22$ Ом, индуктивное сопротивление ЛЭП $X_l = 0,123$ Ом, индуктивность проводов $L = 0,392$ мГн) определены исходя из потери напряжения в ЛЭП (2) при $U_c = 230$ В; $U_n = U_{ном} = 220$ В, $P_n = P_{ном} = 10000$ Вт, $\cos \phi_n = 1$ и в удельных сопротив-

лениях ЛЭП: активном $R_0 = 0,578$ Ом/км и индуктивном $X_0 = 0,325$ Ом/км.

В соответствии с результатами расчётов (табл. 1) проводим моделирование однофазной ЛЭП и её нагрузки в электронной программе Electronics Workbench (рис. 2) при снижении $\cos \phi_n$ от 1 до 0,3 и сводим результаты моделирования в таблицу 1.

В таблице 1 приняты следующие обозначения:

$I_n = I_l = I = \frac{U_c}{Z_c}$ – ток нагрузки, равный току ЛЭП и току системы;

U_c – напряжение на выходе из источника системы;

$U_l = I \cdot Z_l$, $U_n = I \cdot Z_n$ – падение напряжения в проводах ЛЭП и на нагрузке;

$P_c = I^2 \cdot R_c = I^2 \cdot (R_n + R_l)$ – активная мощность источника ЭЭ;

$\Delta P_l = I^2 \cdot R_l = P_c - P_n = P_n \cdot \frac{R_l}{R_n}$ – активная мощность, теряемая в проводах ЛЭП;

$P_n^2 = I^2 \cdot R_n$ – потребляемая нагрузка;

$\Delta U_l = U_c - U_n$ – потери напряжения в проводах ЛЭП;

$\delta U_n = U_n - U_{ном}$ – отклонение напряжения на нагрузке;

$\delta P_l = \frac{R_l}{R_n + R_l}$ – относительные потери мощности в ЛЭП ($\delta P_l = 1 - \eta_n$ (4));

$\eta_n = \frac{P_n}{P_c} = \frac{U_n \cdot I \cdot \cos \phi_n}{U_c \cdot I \cdot \cos \phi_n} = \frac{R_n}{R_n + R_l}$ – коэффициент полезного действия передачи ЭЭ по ЛЭП.

Анализируя таблицу 1, можно заключить, что:

– величина коэффициента мощности нагрузки изменяется при изменении активного, индуктивного и полного сопротивлений нагрузки;

Таблица 1

Определение параметров однофазной ЛЭП без компенсации реактивной мощности

Table 1

Identification of single-phase power transmission line parameters, without compensation reactive power

№	$\cos \phi_n$	R_n , Ом	X_n , Ом	L_n , мГн	Z_n , Ом	S_n , ВА	$I_{ном}$, А	I_n , А	U_c , А	U_l , А	U_n , А	P_c , Вт	ΔP_l , Вт	P_n , Вт	ΔU_l , В	δU_n , В	δP_l	η_n
	Расчётные параметры <i>Calculation parameters</i>						Результаты моделирования <i>Simulation results</i>											
1	1,0	4,84	0,00	0,00	4,84	10000	45,45	45,43	230	11,49	219,9	10440	453,9	9990	10,1	-0,1	0,043	0,957
2	0,9	3,92	1,90	6,05	4,36	11111	50,5	49,77	229,9	12,59	217,4	10260	545	9712	12,5	-2,5	0,053	0,947
3	0,8	3,10	2,32	7,39	3,87	12500	56,8	55,52	229,9	14,04	216,0	10230	678	9556	13,9	-3,9	0,066	0,934
4	0,7	2,37	2,42	7,71	3,39	14286	64,9	62,92	229,9	15,91	214,6	10260	870,9	9386	15,3	-5,3	0,086	0,914
5	0,6	1,74	2,32	7,39	2,90	16666	75,75	72,81	229,9	18,41	213,0	10390	1166	9229	16,9	-6,9	0,112	0,888
6	0,5	1,21	2,10	6,67	2,42	20000	90,9	86,32	229,9	21,38	210,9	10660	1639	9024	19,0	-9,0	0,154	0,846
7	0,4	0,775	1,77	5,65	1,937	25000	113,6	106,2	229,9	26,86	208,0	11240	2482	8758	22,0	-12,0	0,221	0,779
8	0,3	0,436	1,38	4,41	1,45	33333	151,5	138,2	229,9	34,97	203,2	12560	4205	8360	26,7	-16,7	0,335	0,665

– снижение коэффициента мощности нагрузки приводит к уменьшению падения напряжения и мощности нагрузки, а также к увеличению тока нагрузки, определяемого сопротивлениями нагрузки и проводов ЛЭП (10):

$$I_n = I_{л} = I = \frac{U_c}{Z_c};$$

– абсолютные потери энергии в ЛЭП увеличиваются и определяются величиной активной мощности нагрузки и отношением активного сопротивления проводов ЛЭП к активному сопротивлению нагрузки:

$$\Delta P_{л} = I^2 R_{л} = P_n \cdot \frac{R_{л}}{R_n}. \tag{11}$$

Поделив потери мощности в ЛЭП (11) на P_c , с учётом (4) определяются относительные потери мощности в ЛЭП, которые равны отношению активного

сопротивления ЛЭП к общему активному сопротивлению системы:

$$\delta P_{л} = \frac{R_{л}}{R_n + R_{л}}. \tag{12}$$

Отклонение напряжения на нагрузке при снижении коэффициента мощности нагрузки уменьшается и с учётом (1) определяются величиной тока и полного сопротивления нагрузки:

$$\delta U_n = I Z_n - U_{ном}. \tag{13}$$

Определение параметров электроэнергетической системы с компенсацией реактивной мощности (рис. 1б) произведем на примере моделирования однофазной ЛЭП и её нагрузки с помощью программы Electronics Workbench (рис. 3) при изменении коэффициента мощности системы $\cos\phi_c$ за счёт ёмкости конденсаторной батареи, подключённой к выводам нагрузки.

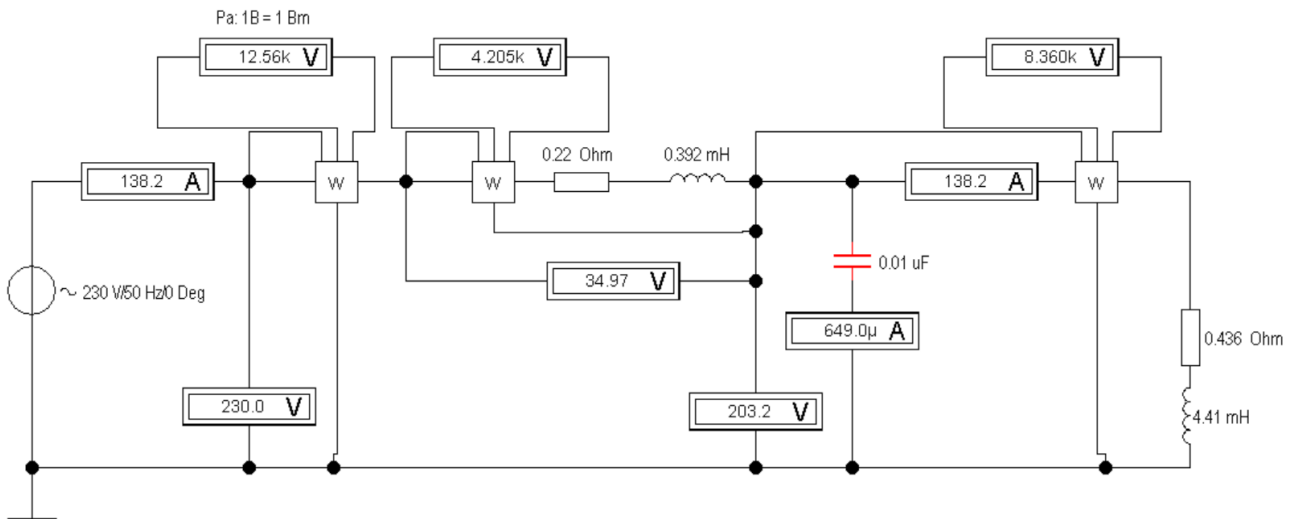


Рис. 2. Схема моделирования однофазной ЛЭП без компенсации реактивной мощности

Fig. 2. Simulation scheme of a single-phase power transmission line, without reactive power compensation

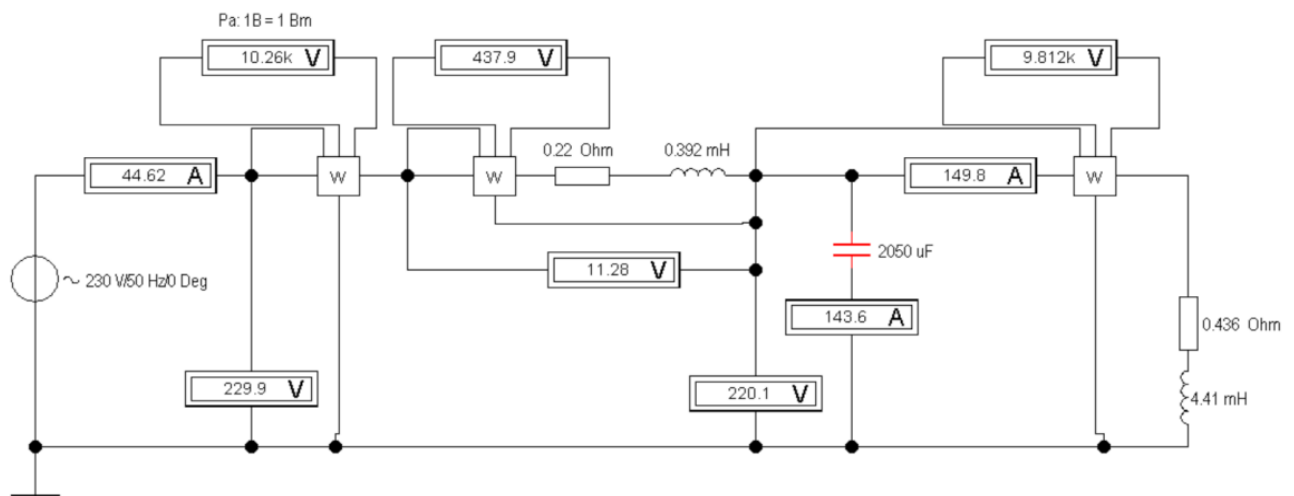


Рис. 3. Схема моделирования однофазной ЛЭП с компенсацией реактивной мощности

Fig. 3. Simulation scheme of a single-phase power transmission line with reactive power compensation

Принцип действия электроэнергетической системы с компенсацией реактивной мощности основан на явлении резонанса токов и компенсации реактивного (индуктивного) тока нагрузки I_n ёмкостным током конденсаторной батареи I_c (рис. 4). В соответствии с векторной диаграммой ток нагрузки отстаёт от напряжения нагрузки U_n на угол φ_n . При включении конденсаторной батареи на напряжение нагрузки (рис. 1б) её ток опережает напряжения нагрузки на 90 град. При суммировании токов нагрузки и конденсаторной батареи суммарный ток ЛЭП I_n , равный току электроэнергетической системы I , отстаёт от напряжения нагрузки U_n на угол электроэнергетической системы φ_c .

Сравнивая реактивные токи нагрузки I_{np} конденсаторной батареи I_c и электроэнергетической системы I_p , определим величину ёмкости конденсаторной

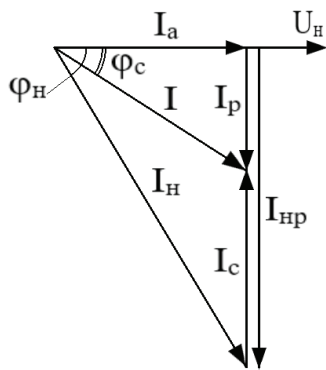


Рис. 4. Векторная диаграмма однофазной ЛЭП с компенсацией реактивной мощности

Fig. 4. Vector diagram of single-phase power transmission line with reactive power compensation

батареи, необходимой для компенсации реактивной мощности нагрузки:

$$C = \frac{P_n \cdot (\operatorname{tg}\varphi_n - \operatorname{tg}\varphi_c)}{\omega \cdot U_n^2}, \tag{14}$$

где P_n – активная мощность нагрузки при напряжении U_n и коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi_n$; $\operatorname{tg}\varphi_n$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки; $\operatorname{tg}\varphi_c$ – коэффициент реактивной мощности электроэнергетической системы, определяемый требованиями к компенсации реактивной мощности нагрузки; ω – круговая частота, $\omega = 314 \text{ c}^{-1}$.

Определяя ёмкость конденсаторной батареи (14) для компенсации реактивной мощности, полученной при заданных $P_n = P_{\text{ном}} = 10000 \text{ Вт}$ и $\cos\varphi_n = 0,3$ (табл. 1, строка 8), для требуемых коэффициентов мощности электроэнергетической системы $\cos\varphi_c$ ($\operatorname{tg}\varphi_c$) проводим моделирование однофазной ЛЭП с компенсацией её реактивной мощности (рис. 1б) в электронной программе Electronics Workbench (рис. 2) при повышении $\cos\varphi_c$ от 0,3 до 1.

Параметры однофазной ЛЭП с компенсацией реактивной мощности обозначены в таблице 2: I, I_n, I_{np} – ток системы, ЛЭП и нагрузки; U_c – напряжение на выходе из источника системы; U_n, U_{np} – падение напряжения в проводах ЛЭП и на нагрузке; $P_c, \Delta P_{np}, P_n$ – активная мощность источника ЭЭ, теряемая в проводах ЛЭП и потребляемая нагрузкой.

В таблице 2 представлены также результаты произведённого моделирования однофазной ЛЭП с компенсацией реактивной мощности и её нагрузки: ΔU_n – потери напряжения в проводах ЛЭП; δU_n – отклонение напряжения на нагрузке;

Таблица 2

Определение параметров однофазной ЛЭП с компенсацией реактивной мощности

Table 2

Identification of single-phase power transmission line parameters, with compensation reactive power

№	$\cos\varphi_c$	$\operatorname{tg}\varphi_c$	$C, \text{ мкФ}$	$I, \text{ А}$	$I_c, \text{ А}$	$I_n, \text{ А}$	$U_c, \text{ В}$	$U_{np}, \text{ В}$	$U_n, \text{ В}$	$P_c, \text{ Вт}$	$\Delta P_{np}, \text{ Вт}$	$P_n, \text{ Вт}$	$\Delta U_n, \text{ В}$	$\delta U_n, \text{ В}$	$\delta P_{np}, \text{ Вт}$	$\eta_n, \%$
	Расчётные параметры / Calculation parameters							Результаты моделирования / Simulation results								
1	0,8	+0,75	2534	57,44	180,6	152,4	230	14,53	224,0	10900	725,7	10160	6,0	-4,0	0,068	0,932
2	0,9	+0,48	2360	50,48	167,2	151,4	230	12,77	222,6	10610	560,2	10030	7,4	-2,6	0,055	0,945
3	1,0	0,0	2050	44,62	143,6	149,8	229,9	11,28	220,1	10260	437,9	9812	9,8	-0,2	0,044	0,956
4	0,9	-0,48	1741	48,76	120,6	148,1	229,9	12,32	217,7	10120	522,6	9542	12,2	+2,2	0,058	0,942
5	0,8	-0,75	1567	51,61	107,8	147,1	230	13,81	216,3	10130	656	9469	13,7	+3,7	0,065	0,935
6	0,7	-1,02	1333	62,09	95,24	146,2	230	15,70	214,8	10190	848	9344	15,2	+5,2	0,083	0,917
7	0,6	-1,33	1193	71,92	80,94	145,0	230	18,19	213,2	10340	1138	9202	16,8	+6,8	0,110	0,890
8	0,5	-1,73	935	85,68	62,80	143,6	230	21,67	211,0	10630	1615	9018	19,0	+9,0	0,151	0,848
9	0,4	-2,29	574	105,9	38,00	141,5	230	26,77	208,0	11220	2465	8759	22,0	+12,0	0,219	0,780
10	0,3	-3,18	0,01	138,2	0	138,2	230	34,97	203,2	12560	4205	8360	26,8	+16,8	0,334	0,666

η_n – коэффициент полезного действия передачи ЭЭ по ЛЭП; δP_n – относительные потери ЭЭ в ЛЭП.

Анализ полученных результатов (табл. 2) показывает, что увеличение коэффициента мощности системы от 0,3 до 1 при неизменном коэффициенте мощности нагрузки (в данном примере $\cos \varphi_n = 0,3$) приводит к изменению ряда параметров:

– варьируется величина коэффициента мощности системы $\cos \varphi_c$ за счёт изменения ёмкости конденсаторной батареи;

– ток нагрузки стремится к номинальному току нагрузки $I_{ном}$ (табл. 1, строка 8), а ток в ЛЭП I_n , равный току электроэнергетической системы I , снижается до минимального;

– падение напряжения и мощности нагрузки увеличиваются и стремятся к номинальным параметрам нагрузки $U_n = U_{ном} = 220$ В, и $P_n = P_{ном} = 10000$ Вт;

– абсолютные потери мощности (энергии) в ЛЭП снижаются до минимальных при полной компенсации реактивной мощности и определяются по уравнению (12), то есть не зависят от изменения $\cos \varphi_n$, а определяются величиной, передаваемой активной мощности нагрузки и отношением активных сопротивлений проводов ЛЭП к нагрузке;

– коэффициент полезного действия передачи ЭЭ по ЛЭП определяется по выражению $\eta_n = \frac{I_n^2 R_n}{I_n^2 R_n + I^2 R_n}$,

а потери мощности равны $\Delta P_n = \frac{I^2 R_n}{I_n^2 R_n + I^2 R_n}$.

Список литературы

1. Грачева Е.И., Наумов О.В. Оценка величины потерь электроэнергии в электрических сетях до 1000 В // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. № 1-2. С. 108-117. EDN: RACCWL
2. Полянский И.А. Оценка влияния отклонения напряжения на рабочие характеристики асинхронного электродвигателя // Fundamental Science Innovation and Technology: Сборник научных статей по материалам II Международной научно-практической конференции. Уфа: ООО Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. Ч. 1. С. 223-235. EDN: CAZNRP
3. Загинайлов В.И., Овсянникова Е.А., Попов А.И. Оценка энергоэффективности работы энергоустановок и сельскохозяйственных технологий // Доклады ТСХА. 2021. Т. 293. Ч. III. С. 23-26. EDN: BMAXRF
4. Воротицкий В.Э. Снижение потерь электроэнергии – важнейший путь энергосбережения в электрических сетях // Энергосбережение. 2014. № 4. С. 52-58. EDN: SGHVAN
5. Воротицкий В.Э., Жежеленко И.В., Трофимов Г.Г. Повышение энергетической эффективности электрических сетей // Региональная энергетика и энергосбережение. 2017. № 4. С. 50-52. EDN: ПНQKG
6. Загинайлов В.И., Мамедов Т.А., Стушклина Н.А., Лештаев О.В. Оценка эффективности работы электроэнергетической системы с распределенной генерацией // Международный технико-экономический журнал. 2022. № 4. С. 147-159. EDN: KBEEAV

Выводы

При передаче электрической энергии по однофазной ЛЭП в трёхфазной сети напряжением 380/220 В с глухо заземлённой нейтралью и нагрузкой, размещённой в конце ЛЭП без компенсации и с компенсацией реактивной мощности, установлено, что:

– изменение параметров в этих системах, в том числе параметров качества и энергоэффективности передачи электрической энергии, зависит от величины тока системы, определяемого полными сопротивлениями нагрузки и линии электропередачи;

– качество электрической энергии, передаваемой по ЛЭП и определяемое через отклонение напряжения на нагрузке или через потери напряжения в проводах ЛЭП, зависит от величины тока системы и полного сопротивления нагрузки;

– энергоэффективность передачи энергии по ЛЭП без компенсации реактивной мощности, определяемая абсолютной потерей мощности (энергии) в ЛЭП, зависит от величины тока в проводах ЛЭП в квадрате и соотношения активных сопротивлений нагрузки и ЛЭП, а относительные потери мощности (энергии) в ЛЭП равны отношению активного сопротивления ЛЭП к общему активному сопротивлению электроэнергетической системы;

– энергоэффективность передачи энергии по ЛЭП с компенсацией реактивной мощности определяется величинами токов и активными сопротивлениями ЛЭП и нагрузки.

References

1. Gracheva E.I., Naumov O.V. Estimation of the magnitude of losses in electrical networks up to 1000V. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Energetiki*. 2003;1-2:108-119. (In Rus.)
2. Polyanskiy I.A. Assessment of the effect of voltage deviation on the performance characteristics of an asynchronous electric motor. In: *Fundamental science Innovation and Technology. Proceedings of the Second International Scientific and Practical Conference*. Ufa, 2023:223-235. (In Rus.)
3. Zaginailov V.I., Ovsyannikova E.A., Popov A.I. Assessment of energy efficiency of power plants and agricultural technologies. *Doklady TSKhA*. 2021;293: III:23-26. (In Rus.)
4. Vorotnitskiy V.E. Reduction of electricity losses as the most important way of energy saving in electric networks. *Energoberezhnie*. 2014;4:45-50. (In Rus.)
5. Vorotnitskiy V.E., Zhezhelienko I.V., Trofimov G.G. Improving the energy efficiency of electric networks. *Regionalnaya Energetika i Energoberezhnie*. 2017;4:50-52. (In Rus.)
6. Zaginailov V.I., Mammadov T.A., Stushkina N.A., Lesh-taev O.V. Evaluation of the efficiency of an electric power system with distributed generation. *International Technical and Economic Journal*. 2022;4:147-159. (In Rus.) <https://doi.org/10.34286/1995-464>
7. Leshtaev O.V., Rtishcheva N.E., Rtishchev K.P. Analysis of power supply options for a stable from a solar power plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 3, Mining, Production, Transmission, Processing*

7. Leshtaev O.V., Rtishcheva N.E., Rtishchev K.P. Analysis of power supply options for a stable from a solar power plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;808:012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/808/1/012013>

8. Воронин В., Гаджиев М., Шамонов Р. Направления развития системы регулирования напряжения и реактивной мощности в ЕНЭС // Электроэнергия. Передача и распределение. 2012. № 2 (11). С. 40-47. EDN: ОУМК1В

Информация об авторах

Владимир Ильич Загинайлов¹, д-р техн. наук, профессор; energo-viz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

Тимур Азерович Мамедов², советник генерального директора; mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>

Олег Валерьевич Лештаев³, канд. техн. наук, доцент; oleg-leshtaev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>

Валентин Эдуардович Манько⁴, valentin.manko@gmail.com
^{1,3} Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

² ООО «Объединенная электросетевая компания» (ООО «ОЭСК»); 115114, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Дербеневский переулок, 5

⁴ ООО «Энергетическое партнерство»; 107076, Российская Федерация, г. Москва, пер. Колодезный, 14

Вклад авторов

В.И. Загинайлов – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, формулирование выводов
Т.А. Мамедов – анализ литературы, формулирование направлений исследования, обработка результатов исследования
О.В. Лештаев – подготовка рукописи, обработка результатов исследования

В.Э. Манько – обработка результатов исследования, формулирование выводов

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 08.11.2023; поступила после рецензирования и доработки 23.01.2024; принята к публикации 23.01.2024

and Environmental Protection, Moscow, 2021. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/808/1/012013>

8. Voronin V., Gadzhiev M., Shamonov R. Development trends of the voltage and reactive power regulation system in the UNES. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2012;2:40-48. (In Rus.)

Author Information

Vladimir I. Zaginailov¹, DSc (Eng), Professor; energo-viz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2623-760X>

Timur A. Mamedov², Adviser to Director General; mta020593@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0149>

Oleg V. Leshtayev³, CSc (Eng), Associate Professor; oleg-leshtaev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6066-1087>

Valentin E. Manko⁴, valentin.manko@gmail.com

^{1,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

² ООО “Obyedinennaya ElektroSetevaya Kompaniya (United Electric Grid Company)” (ООО “ОЭСК”); 115114 1-iy Derbenevskiy Pereulok Str., 5, Moscow, Russia

⁴ LLC “Energeticheskoe Partnerstvo”; 107076, Kolodeznyi Side-Str. 14, Moscow, Russia

Author contribution

V.I. Zaginaylov – research supervision, research administration, general conclusions

T.A. Mamedov – literature review, data curation and formal analysis

O.V. Leshtayev – data curation and formal analysis, draft preparation

V.E. Manko – processing of research results, general conclusions

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 08.11.2023; revised 23.01.2024; accepted 23.01.2024