

УДК 621.31

ББК 31.25

А.И. ОРЛОВ, И.А. САПОЖНИКОВ

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 0,95 кВ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОЙ НАГРУЗКЕ

Ключевые слова: 0,95 кВ, 0,95/0,4 кВ, коэффициент неравномерности нагрузки, устройство выравнивания нагрузки, потери электроэнергии.

Дополнительная ступень напряжения 0,95 кВ позволяет снизить потери на передачу электроэнергии в распределительных сетях большой протяженности при достаточной передаваемой мощности. Реализован пилотный проект такой сети, однако практика применения данного класса напряжения не распространена в настоящее время. В качестве дополнительного энергосберегающего средства в сетях 0,95 кВ существует возможность применения устройства выравнивания нагрузки, работающего по принципу перераспределения в узле электрической сети фаз одной из отходящих линий.

Цель исследования – оценка эффективности и технической целесообразности применения устройства выравнивания нагрузки в сетях 0,95 кВ. Новизна работы заключается в определении величины потерь электроэнергии в системе 10/0,95/0,4 кВ при использовании устройства выравнивания нагрузки.

Материалы и методы. В работе применялись методы теоретической электротехники, комбинаторики, численных экспериментов, статистической обработки данных.

Результаты. Расчеты выполнены на примере одного участка распределительной сети 10/0,95/0,4 кВ с использованием программы на языке Python. Нагрузка трансформатора 0,95/0,4 кВ состояла из 2 частей: одна часть подключена к РУ 0,4 кВ непосредственно, другая – через устройство выравнивания нагрузки. Предполагалось, что каждая фаза нагрузки с равной вероятностью может иметь одно из дискретных значений в диапазоне от нуля до максимального значения. В численном эксперименте рассматривались все возможные варианты распределения фазных нагрузок линий, отходящих от ТП 0,95/0,4 кВ, при разбиении нагрузки каждой фазы на 21 уровень по величине.

Выводы. В качестве дополнительного энергосберегающего средства в распределительных сетях 0,95 кВ возможно применение устройства выравнивания нагрузки, которое позволяет снизить добавочные потери электроэнергии от неравномерности нагрузки в среднем на 10%.

Введение. Дополнительная ступень напряжения 0,95 кВ может применяться в распределительных сетях 10/0,4 кВ большой протяженности с целью снижения потерь электроэнергии. Филиалом «Нижновэнерго» ПАО «Россети Центр и Приволжье» в 2016 г. реализован пилотный проект по сооружению линии 0,95 кВ в г. Богородск Нижегородской области [1, 2, 5].

Ряд публикаций посвящен оценке энергетической эффективности применения напряжения 0,95 кВ в системе электроснабжения с распределенной нагрузкой. Так, в работе [3] на примере распределительной сети показан эффект от применения дополнительной ступени напряжения 0,95 кВ. Известны зарубежные исследования, посвященные преимуществам и ограничениям использования дополнительной ступени низкого напряжения. Так, авторы из Лапшеэнрантского технологического университета (Финляндия) в работе [6]

рассматривают положительный опыт внедрения трехуровневой распределительной системы 20/1/0,4 кВ в электрических сетях компании Suur-Savon Sähkö Limited (Восточная Финляндия) взамен существующей системы 20/0,4 кВ. В работе [7] рассматриваются методология и опыт пилотного применения сети 1 кВ в Турции как альтернативы сетям среднего напряжения для решения проблемы избыточной потери напряжения. В отличие от традиционного подхода, предусматривающего установку нового трансформатора СН/НН и строительство линии среднего напряжения, внедрение класса напряжения 1 кВ позволяет передавать электроэнергию по существующим линиям низкого напряжения, что экономически оправдано. В работе [8] авторы обосновывают требования к оборудованию для сетей 1 кВ. Показано, что современные провода и кабели могут непосредственно использоваться при напряжении 1 кВ. Однако существующие трансформаторы малой мощности (до 70 кВА), представленные на рынке Швеции, со схемой соединения Y/Z_0 не подходят для систем 1 кВ по причине низкого сопротивления нулевой последовательности.

Несмотря на преимущества применения дополнительной ступени напряжения, а также на подтвержденный на практике технико-экономический эффект, сети 10/0,95/0,4 кВ не имеют в настоящее время широкого распространения в России. Так, ОАО «Минский электротехнический завод им. В.И. Козлова», производивший трансформаторы 10/0,95 кВ для пилотного проекта филиала «Нижно-энерго» в г. Богородск, с 2016 г. не производит данное оборудование.

Эффективным средством снижения потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения, в том числе в сетях 0,95 кВ, может быть устройство выравнивания нагрузки (УВН) [4]. Устройство предназначено для выравнивания фазных нагрузок трехфазной линии электропередачи, которая имеет два или более ответвления от узловой точки. Выравнивание нагрузки происходит за счет перераспределения фазных нагрузок на одной из трехфазных отходящих линий. Устройство может устанавливаться в РУ 0,4 кВ трансформаторной подстанции или на опоре воздушной линии электропередачи в месте разветвления линии. Устройство разработано ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет» в рамках НИОКР по заказу филиала «Нижноэнерго» ПАО «Россети Центр и Приволжье», имеет сертификат соответствия техническим регламентам таможенного союза¹, запланировано к внедрению в филиалах организации.

Цель работы заключается в оценке эффективности и технической целесообразности применения устройства выравнивания нагрузки, работающего по принципу перераспределения фаз отходящих линий от узла электрической сети, в распределительной сети 10/0,95/0,4 кВ.

Новизна работы заключается в определении величины потерь электроэнергии в системе 10/0,95/0,4 кВ при использовании устройства выравнивания нагрузки.

¹ Сертификат соответствия требованиям технического регламента Евразийского экономического союза (технического регламента Таможенного союза) ЕАЭС RU C-RU.AB04.B.00494/22 от 13.05.2022. URL: <https://pub.fsa.gov.ru/rss/certificate/view/3092530/baseInfo>.

Материалы и методы. В работе применяются методы теоретической электротехники, комбинаторики, статистической обработки данных. Расчеты выполнены на примере одного участка распределительной сети 10/0,95/0,4 кВ с использованием разработанной авторами программы на языке Python.

Результаты исследования. Степень неравномерности трехфазной нагрузки оценивается коэффициентом неравномерности

$$k_{\text{н\text{е}р}} = \frac{3(A^2 + B^2 + C^2)}{(A + B + C)^2},$$

где A, B, C – величины, характеризующие нагрузку фаз, например, фазные токи или проводимости I_{ϕ}/U_{ϕ} .

Коэффициент неравномерности нагрузки характеризует увеличение потерь в 3-фазных симметричных элементах системы электроснабжения, таких как линии или трансформаторы, при несимметрии токов (проводимостей) по величине. Так, в случае равенства нагрузок фаз $A = B = C$, $k_{\text{н\text{е}р}} = 1$. Наибольшая неравномерность нагрузки, когда любые две величины из трех A, B или C , равны нулю, соответствует $k_{\text{н\text{е}р}} = 3$. В работе рассматривается система бесконечной мощности, значения напряжений которой остаются практически неизменными при любых значениях фазных токов, поэтому в качестве величин A, B, C приняты токи. Большинство потребителей 0,4 кВ работают с коэффициентом мощности, близким к единице, поэтому несимметрия фазных токов по углам нагрузки в работе не рассматривается.

Схема замещения 3-фазного симметричного элемента системы электроснабжения, например линии электропередачи 0,95 кВ, при неравномерной нагрузке показана на рис. 1, б, где R – активное сопротивление фазы; I_a, I_b, I_c – токи в линейных проводниках. Сравнивая потери при неравномерной $\Delta P_{\text{н\text{е}р}}$ и равномерной $\Delta P_{\text{равн}}$ нагрузке, можно показать, что потери $\Delta P_{\text{н\text{е}р}}$ растут пропорционально величине коэффициента неравномерности $k_{\text{н\text{е}р}}$:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{н\text{е}р}} &= RI_a^2 + RI_b^2 + RI_c^2 = R \cdot (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) = \\ &= \frac{3 \cdot (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)}{(I_a + I_b + I_c)^2} \cdot \frac{R}{3} (I_a + I_b + I_c)^2 = k_{\text{н\text{е}р}} \cdot \Delta P_{\text{равн}}, \end{aligned}$$

где $\Delta P_{\text{равн}} = R/3 \cdot (I_a + I_b + I_c)^2 = R/3 \cdot (3I_{\phi})^2 = 3R I_{\phi}^2$.

С целью оценки величины потерь электроэнергии при использовании устройства выравнивания нагрузки выполнен расчет потерь электроэнергии на типовом участке Δl линии электропередачи 0,95 кВ и в трансформаторе

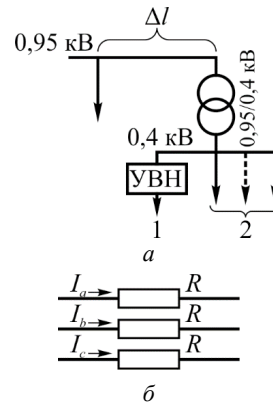


Рис. 1. Фрагмент распределительной сети 0,94/0,4 кВ с УВН (а); схема замещения 3-фазного симметричного элемента системы электроснабжения (б)

на типовом участке Δl линии электропередачи 0,95 кВ и в трансформаторе 0,95/0,4 кВ, как показано на рис. 1, а. Часть потребителей (1) подключена к трансформатору 0,95/0,4 кВ через устройство выравнивания нагрузки (УВН), другая часть (2) – непосредственно. Предполагалось, что нагрузка каждой фазы потребителей 1 и 2 может принимать значение в диапазоне от 0 до $P_{\text{ф.макс}}$. Общая нагрузка линии

$$\begin{aligned} P_a + P_b + P_c = \\ = P_* \cdot P_{\text{макс}} = P_* \cdot (3P_{\text{ф.макс}}) \end{aligned}$$

может быть выражена в относительных единицах P_* как доля от максимально допустимой мощности $P_{\text{макс}} = 3P_{\text{ф.макс}}$.

Для каждого случая распределения нагрузки рассчитывался коэффициент неравномерности $k_{\text{нер}}$ до (1) и (2) после применения устройства (рис. 1, а). Значения коэффициента неравномерности в зависимости от мощности нагрузки P_* в этих случаях показаны на рис. 2, а. Разница коэффициентов неравномерности $\Delta k_{\text{нер}} = k_{\text{нер1}} - k_{\text{нер2}}$ непостоянна во всем диапазоне нагрузок $P_* = 0-1,0$. Количество вариантов распределения фазных нагрузок для каждого значения P_* показано на рис. 2, б. Внешний вид кривой близок к нормальному распределению. Конкретные числовые значения данной кривой зависят от детализации разбиения нагрузки каждой фазы по уровню. В рассматриваемом численном эксперименте нагрузка каждой фазы разбивалась на 21 уровень от 0 до $P_{\text{ф.макс}}$, что соответствует $21^6 = 85\,766\,121$ возможной комбинации мощностей 3-фазных нагрузок линий, отходящих от УВН, и 3-фазных нагрузок других отходящих линий – соответственно 1 и 2 на рис. 2, а. Общее количество уровней мощности $P_* - 120$, наибольшее число комбинаций $n_{\text{макс}} = 2\,248\,575$ соответствует $P_* = 0,5$. При $P_* = 0$ значения $k_{\text{нер1}}$ и $k_{\text{нер2}}$ равны 3, так как по мере снижения диапазона P_* возрастает количество комбинаций с большим коэффициентом неравномерности. Наоборот, при значении P_* , близком к 1, вариативность возможных фазных нагрузок снижается и $k_{\text{нер}}$ приближается к 1. При $P_* = 1$ коэффициент $k_{\text{нер}} = 1$.

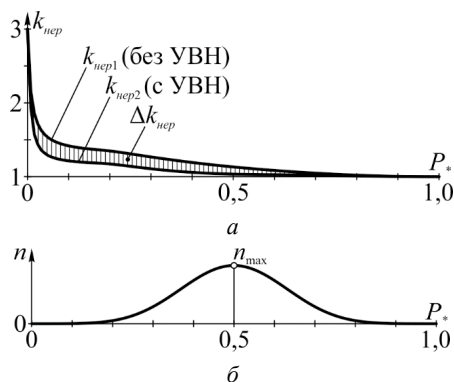


Рис. 2. Значения коэффициента неравномерности нагрузки от мощности без применения и с применением УВН (а); количество вариантов распределения фазных нагрузок в зависимости от мощности (б)

Считая, что каждая комбинация нагрузки равновероятна, средневзвешенное значение коэффициента неравномерности без УВН $k_{\text{нер.1}} = 1,1462$, с УВН – $k_{\text{нер.2}} = 1,0477$. Допущение о равной вероятности каждой комбинации фазных нагрузок принято с целью оценки принципиальной возможности снижения потерь от неравномерности нагрузки. Разница средневзвешенных значений коэффициентов неравномерности, возникающая в результате применения устройства, которая соответствует степени снижения потерь от несимметрии, равна $\Delta k_{\text{нер}} = 0,0985$.

Дополнительная степень напряжения 0,95 кВ в случае электроснабжения

рассредоточенно расположенных потребителей снижает общие потери электроэнергии. Распределительные сети данного класса напряжения не распространены, сооружаются и используются в основном в рамках пилотных проектов сетевых организаций, поэтому они могут стать испытательной площадкой для практической проверки перспективных технических решений, таких как устройство выравнивания нагрузки. Уточнение эффекта применения устройства выравнивания нагрузки в результате его опытно-промышленной эксплуатации в сетях 0,95 кВ может составлять перспективу дальнейших исследований по теме работы.

Выводы. 1. Дополнительная ступень напряжения 0,95 кВ позволяет снизить потери на передачу электроэнергии в распределительных сетях большой протяженности при достаточной передаваемой мощности. Реализован пилотный проект такой сети. В качестве дополнительного энергосберегающего средства в сетях 0,95 кВ возможно применение устройства выравнивания нагрузки.

2. С целью оценки влияния устройства выравнивания нагрузки в распределительной сети 0,95 кВ на величину дополнительных потерь, возникающих при неравномерности нагрузки, использован статистический подход. Рассматривались все возможные варианты распределения фазных нагрузок линий, отходящих от ТП 0,95/0,4 кВ, с заданной степенью детализации с учетом равновероятного характера фазных нагрузок.

3. Установлено, что применение устройства выравнивания нагрузки позволяет снизить дополнительные потери электроэнергии от неравномерности нагрузки в линии 0,95 кВ в среднем до 10%.

Литература

1. Князев В. Напряжение выше – затраты ниже [Электронный ресурс]. URL: <http://www.energyland.info/analytic-show-99870>.
2. Комбин Н.Н. Инновационная распределительная сеть напряжением 0,95 кВ* [Электронный ресурс] // *Электротех.* 2016. № 1. URL: <https://panor.ru/articles/innovatsionnaya-raspredelitel'naya-set-napryazheniem-095-kv/70704.html>.
3. Лоскутов А.Б., Фитасов А.Н., Петрицкий С.А. Оценка энергетической эффективности применения напряжения 0,95 кВ в системе электроснабжения с распределенной нагрузкой // *Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева.* 2019. № 3(126). С. 73–79.
4. Орлов А.И., Волков С.В., Гарипов И.Х., Савельев А.А. Конструкция силовой части устройства выравнивания нагрузки для трехфазных электрических сетей 0,4 кВ // *Материалы Пятнадцатой международной научной школы «Наука и инновации-2020»* ISS «SI-2020». Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2020. С. 58–63.
5. Реконструкция ТП-6/0,4 кВ, строительство первой в России инновационной сети 6/0,95/0,4 кВ в г. Богородск [Электронный ресурс]. URL: <https://nipom.ru/solutions/industry/rekonstrukciya-tp-6/0,4-kv,-stroitelstvo-pervoj-v-rossii-innovacziionnoj-seti-6/0,95/0,4-kv-v-g.-bogorodsk/>
6. Söderberg D. System topologies and transformers for 1 kV networks. In: *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, pp. 1–4. DOI: 10.1049/cp.2013.1230.
7. Lohjala J., Kaipia T., Lassila J., Partanen J. The three voltage level distribution using the 1000 V low voltage system. In: *CIRED 2005 – 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, 2005, pp. 1–5, doi: 10.1049/cp:20051299.
8. Özen K., Cebeci M.E., Tör O.B. et al. Implementation of 1 kV on LV feeders: A smart alternative to MV line investments to solve voltage drop problems at LV systems. In: *2017 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG)*, 2017, pp. 27–31. DOI: 10.1109/SGCF.2017.7947630.

ОРЛОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент заведующий кафедрой электромеханики электроэнергетического факультета, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (a.i.orlov@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

САПОЖНИКОВ ИЛЬЯ АЛЕКСЕЕВИЧ – студент II курса электроэнергетического факультета, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (shumkenrp@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9768-9574>).

Alexandr I. ORLOV, Ilya A. SAPOZHNIKOV
REDUCTION OF ELECTRICITY LOSSES
IN THE 0,95 kV DISTRIBUTION NETWORK
WITH UNBALANCED LOAD

Key words: 0,95 kV, 0,95/0,4 kV, load unbalance coefficient, load balancing device, power loss.

An additional voltage stage of 0,95 kV allows to reduce losses for the transmission of electricity in long-distance distribution networks with sufficient transmitted power. A pilot project of such network has been implemented. However, the practice of using this voltage class is not widespread at present. As an additional energy-saving means in 0,95 kV networks, it is possible to use a load equalization device operating on the principle of redistribution of phases of one of the outgoing lines in the node of the electrical network.

The purpose of the study is to evaluate the effectiveness and technical feasibility of using a load balancing device in 0,95 kV networks. The novelty of the work is due to determining the magnitude of power losses in the 10/0,95/0,4 kV system when using a load balancing device.

Materials and methods. Methods of theoretical electrical engineering, combinatorics, numerical experiments, and statistical data processing are used in the work.

Results. Calculations were made on the example of the section of the 10/0,95/0,4 kV computer network using Python programs. The load of 0,95/0,4 kV transformer consists of 2 parts: one part is connected to the 0,4 kV switchgear directly, the other part is connected through a load balancing device. It was assumed that each phase of the load with equal probability can have one of the discrete values in the range from zero to the maximum value. In the numerical experiment, all possible options for the distribution of phase loads of lines extending from the 0,95/0,4 kV transformer substation were considered when the load of each phase was divided into 21 levels in magnitude.

Conclusions. As an additional energy-saving tool in distributed networks of 0.95 kV, it is possible to use a load balancing device, which makes it possible to reduce additional energy losses from load unevenness by an average of 10%.

References

1. Knyazev V. *Napryazhenie vyshe – zatraty nizhe* [Voltage is higher – costs are lower]. Available at: <http://www.energyland.info/analytic-show-99870>.
2. Kombin N.N. *Innovatsionnaya raspredelitel'naya set' napryazheniem 0,95 kV*. [Innovative 0.95 kV distribution network]. *Elektrotsekh*, 2016, no. 1. Available at: <https://panor.ru/articles/innovatsionnaya-raspredelitel'naya-set-napryazheniem-095-kv/70704.html>.
3. Loskutov A.B., Fitasov A.N., Petritskii S.A. *Otsenka energeticheskoi effektivnosti primeneniya napryazheniya 0,95 kV v sisteme elektrosnabzheniya s raspredelennoi nagruzkoi* [Evaluation of the energy efficiency of the application of 0.95 kV voltage in a distributed load power supply system]. *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*, 2019, no. 3(126), pp. 73–79.
4. Orlov A.I., Volkov S.V., Garipov I.Kh., Savel'ev A.A. *Konstruktivnaya silovoi chasti ustroistva vyvaznaniya nagruzki dlya trekhfaznykh elektricheskikh setei 0,4 kV* [The design of the power part of the load equalization device for three-phase 0.4 kV electrical networks]. In: *Materialy Pyatnadtsatoi*

mezhdunarodnoi nauchnoi shkoly «Nauka i innovatsii-2020» ISS «SI-2020» [Materials of the Fifteenth International Scientific School "Science and Innovation-2020" ISS "SI-2020"]. Yoshkar-Ola, 2020, pp. 58–63.

5. *Rekonstruktsiya TP-6/0,4 kV, stroitel'stvo pervoi v Rossii innovatsionnoi seti 6/0,95/0,4 kV v g. Bogorodsk* [Reconstruction of TP-6/0.4 kV, construction of Russia's first innovation network 6/0.95/0.4 kV in Bogorodsk]. Available at: <https://nipom.ru/solutions/industry/rekonstruktsiya-tp-6/0,4-kv,-stroitelstvo-pervoj-v-rossii-innovatsionnoj-seti-6/0,95/0,4-kv-v-g.-bogorodsk>.

6. Söderberg D. System topologies and transformers for 1 kV networks. In: 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), 2013, pp. 1–4. DOI: 10.1049/cp.2013.1230.

7. Lohjala J., Kaipia T., Lassila J., Partanen J. The three voltage level distribution using the 1000 V low voltage system. In: CIRED 2005 – 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2005, pp. 1–5, doi: 10.1049/cp:20051299.

8. Özen K., Cebeci M.E., Tör O.B. et al. Implementation of 1 kV on LV feeders: A smart alternative to MV line investments to solve voltage drop problems at LV systems. In: 2017 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG), 2017, pp. 27–31. DOI: 10.1109/SGCF.2017.7947630.

ALEXANDR I. ORLOV – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Electromechanics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (a.i.orlov@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

ILYA A. SAPOZHNIKOV – 2nd Year Student, Electric Power Faculty, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (shumkenrp@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9768-9574>).

Формат цитирования: Орлов А.И., Сапожников И.А. Снижение потерь электроэнергии в распределительной сети 0,95 кВ при неравномерной нагрузке // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 2. – С. 121–127. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-2-121-127.