

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.1.1>



ВЫБОР МОЩНОСТИ СТАТИЧНОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧНО ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ НАГРУЗКИ

Антон Васильевич Петров¹, Виталий Евгеньевич Мартусенко^{2*},
Расул Азнаурович Магаев³, Владислав Евгеньевич Мартусенко⁴

^{1, 2, 3, 4} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)

¹ pav-75@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6274-0851>

² vmartusenko@ncfu.ru; <https://orcid.org/0009-0008-8564-8143>

³ rasul_0090908@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-3590-395X>

⁴ sirvladik@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-7444-8161>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Несимметрия токов и напряжений является одним из постоянно действующих факторов в работе электрических сетей. При этом перераспределение нагрузок по фазам не всегда оказывается достаточной мерой для снижения несимметрии. В определенных условиях снижение несимметрии может быть достигнуто только за счет применения симметрирующих устройств. Однако в условиях переменного характера симметрируемой нагрузки применение симметрирующих устройств может вызывать ряд технических трудностей, связанных с необходимостью регулирования параметров симметрирующего устройства. **Цель.** Определение оптимального значения мощности реактивных элементов статического симметрирующего устройства на базе схемы Штейнметца при симметрировании переменной нагрузки. **Материалы и методы.** Исследование построено на проведении серии вычислительных экспериментов, позволяющих формировать различные графики нагрузок с возможностью подбора оптимальных параметров симметрирующего устройства. **Результаты и обсуждение.** Определена величина оптимальной мощности симметрирующего устройства в условиях переменного графика симметрируемой нагрузки. **Заключение.** По итогам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что вне зависимости от формы графика симметрируемой нагрузки оптимальная мощность статического симметрирующего устройства соответствует среднеинтегральному значению переменной мощности нагрузки.

Ключевые слова: трехфазная сеть, несимметрия, симметрирующее устройство, схема Штейнметца, переменная нагрузка
Для цитирования: Выбор мощности статического симметрирующего устройства в условиях динамично изменяющейся нагрузки / А. В. Петров, В. Е. Мартусенко, Р. А. Магаев, В. Е. Мартусенко // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2025. № 1 (106). С. 9–20. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.1.1>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.09.2024;

одобрена после рецензирования 22.10.2024;

принята к публикации 31.10.2024.

Research article

POWER SELECTION OF A STATIC SYMMETRICAL DEVICE UNDER DYNAMICALLY CHANGING LOAD CONDITIONS

Anton V. Petrov¹, Vitaliy E. Martusenko^{2*}, Rasul A. Magayayev³,
Vladislav E. Martusenko⁴

^{1, 2, 3, 4} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin str., Stavropol, 355017, Russian Federation)

¹ pav-75@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6274-0851>

² vmartusenko@ncfu.ru; <https://orcid.org/0009-0008-8564-8143>

³ rasul_0090908@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-3590-395X>

⁴ sirvladik@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-7444-8161>

* Corresponding author

Abstract. Introduction. Imbalance of currents and voltages is one of the constantly operating factors in the operation of electric networks. Redistribution of loads by phases is not always a sufficient measure to reduce asymmetry. Under certain conditions, asymmetry reduction can be achieved only by using symmetrical devices. However, in conditions of variable character of the symmetrized load the application of symmetrical devices can cause a number of technical difficulties connected with the necessity to regulate the parameters of the symmetrical device. **Goal.** Determination of the optimum value of the reactive elements power of the static symmetrizing device on the basis of the Steinmetz scheme at symmetrization of the variable load. **Materials and methods.** The research is based on a series of computational experiments allowing to form different load schedules with the possibility of selecting the optimal parameters of the symmetrizing device. **Results and discussion.** The value of the optimum power of the symmetrizing device under conditions of variable schedule of the symmetrized load has been determined. **Conclusion.** According to the results of the conducted research it is possible to draw a conclusion that regardless of the shape of the schedule of the symmetrized load the optimal power of the static symmetrical device corresponds to the average integral value of the variable power of the load.

Keywords: three-phase network, asymmetry, symmetrizing device, Steinmetz scheme, variable load

For citation: Petrov AV, Martusenko VE, Magayayev RA, Martusenko VE. Power selection of a static symmetrical device under dynamically changing load conditions. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2025;1(106):9-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.1.1>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 11.09.2024;

approved after reviewing 22.10.2024;

accepted for publication 31.10.2024.

Введение / Introduction. Несимметрия напряжений является постоянно присутствующим явлением при работе низковольтных распределительных сетей. Причина тому – значительное количество однофазных электроприемников (ОЭП) относительно большой мощности [1–3]. Помимо увеличения потерь в элементах низковольтной сети [4, 5], несимметрия токов влечет за собой появление несимметрии напряжений, что негативно сказывается на работе отдельных электроприемников (ЭП), таких как трехфазные двигатели [6, 7], батареи конденсаторов [5], трансформаторы [7–9] и др. Нагрузочная несимметрия, возникая в низковольтных распределительных сетях, привносится и в сети более высоких классов напряжения, снижая эффективность их работы.

Самым простым и распространенным способом снижения несимметрии токов является перераспределение нагрузок относительно фаз сети, т. е. внутреннее симметрирование. Это низкочастотный и относительно простой в исполнении способ. Однако внутреннее симметрирование зачастую не позволяет существенно снизить несимметрию из-за того, что потребители имеют свои индивидуальные графики включения, которые чаще всего не совпадают [5]. В результате внутреннее симметрирование может не только не улучшить картину несимметрии токов, но даже ухудшить ее на отдельных участках совокупного графика нагрузки [10].

В отдельных случаях, когда искажающая нагрузка имеет достаточно большую единичную мощность, внутреннее симметрирование вообще не может быть осуществлено. В такой ситуации единственным способом снижения несимметрии является использование специальных симметрирующих устройств (СУ), которые позволяют перераспределить токи несимметричной (как правило, однофазной) нагрузки, снизив их несимметрию до заданного уровня [5, 11, 12].

Одним из наиболее известных вариантов построения СУ является т. н. схема Штейнметца [5, 13]. Данная схема представлена на рис. 1, там же представлена векторная диаграмма, поясняющая принцип работы устройства. Отметим, что СУ на базе схемы Штейнметца наиболее эффективно при чисто активной симметрируемой нагрузке [14].

Мощность емкостного и индуктивного элемента в этом случае выбирается из соотношения [5, 13]:

$$Q_L = Q_C = \frac{P_H}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

где P_H – мощность симметрируемой активной нагрузки.

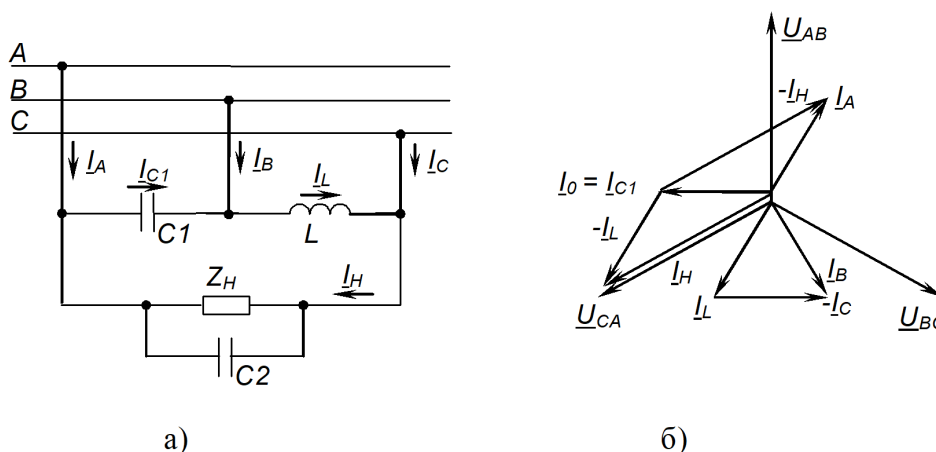


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и векторная диаграмма токов и напряжений (б) СУ на базе схемы Штейнметца / Fig. 1. Schematic diagram (a) and vector diagram of currents and voltages (b) of the control system based on the Steinmetz scheme

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

В случае когда симметрируемая нагрузка имеет активно-индуктивный характер, симметрирование возможно посредством добавления компенсирующего конденсатора в цепь нагрузки (конденсатор C2 на рис. 1), т. е. в повышении коэффициента мощности нагрузки до единицы.

Теоретически схема Штейнметца позволяет добиться полного симметрирования токов нагрузки, включенной на линейное напряжение сети. Однако это требует достаточно точного подбора мощности реактивных элементов, входящих в ее состав. В том виде, в каком схема Штейнметца приведена на рис. 1, она предназначена для симметрирования статичной нагрузки. Если же нагрузка с течением времени может изменяться, регулирование мощностью реактивных элементов схемы Штейнметца может быть осуществлено различными способами, например, такими, как показаны на рис. 2.

Способ регулирования, приведенный на рис. 2а, предполагает дискретное регулирование как емкостных, так и индуктивных элементов посредством подключения дополнительных конденсаторов и дросселей в плечи схемы. На рис. 2б приведен способ, использующий только один дроссель, имеющий отпайки. Мощность индуктивного элемента в этом случае регулируется переключением отпайки.

В разрезе применения СУ в условиях динамично изменяющейся нагрузки следует упомянуть, что схема Штейнметца имеет один существенный недостаток, а именно относительную сложность регулирования. В частности, к технологическим ограничениям ее использования следует отнести достаточно высокую дискретность регулирования, особенно в части емкостной со-

ставляющей. Кроме этого, процесс регулирования неизбежно связан с появлением переходных процессов и, как следствие, возможностью возникновения разного рода нежелательных процессов (импульсные и резонансные перенапряжения, броски токов и т. д.).

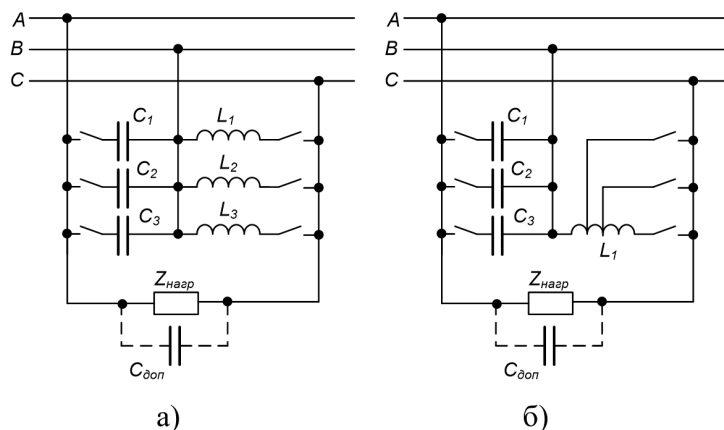


Рис. 2. Способы регулирования мощностью реактивных элементов схемы Штейнметца /
Fig. 2. Methods of power control of reactive elements of Steinmetz scheme

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

При этом симметрируемая нагрузка может иметь переменный характер (в т. ч. и стохастический). Таким образом, процесс регулирования параметров СУ может оказаться технически трудновыполнимым. При высокой динамике изменения нагрузки регулирование может оказаться вообще невозможным, особенно в том случае, когда темп процесса изменения нагрузки соизмерим с постоянными времени переходных процессов, возникающих при переключении реактивных элементов СУ.

Таким образом, появляется задача выбора таких статичных параметров СУ, при которых процесс симметрирования динамически изменяющейся нагрузки будет наиболее эффективным. Данная задача поясняется рисунком 3, на котором приведен график изменяющейся симметрируемой нагрузки (кривая 1 на рис. 3) и показан уровень нагрузки, для которой статичные параметры СУ обеспечивают полное симметрирование токов (прямая 2 на рис. 3).

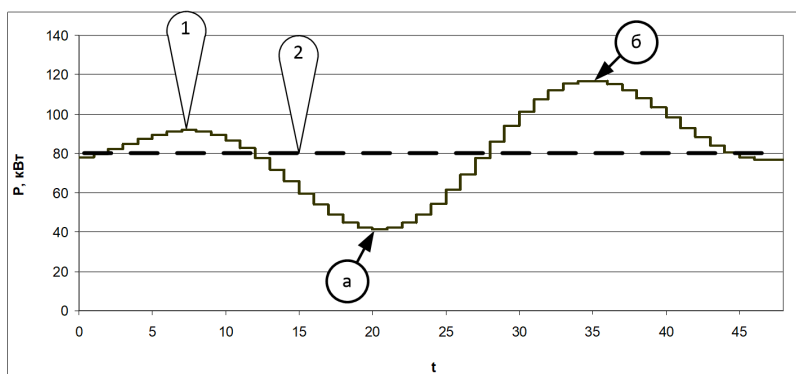


Рис. 3. К вопросу о выборе оптимальной симметрируемой мощности / Fig. 3. On the choice of optimal symmetrized power

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

В качестве критерия оптимальности можно выбрать, например, минимум коэффициента несимметрии токов. Однако данный критерий может быть интересен только при точечной оценке.

В данном случае следует перейти к некоему интегральному критерию, который позволит оценить эффективность симметрирования на всем протяжении заданного графика нагрузки. В качестве такого критерия может выступать величина потерь энергии за заданный период изменения нагрузки:

$$\Delta W = \int_T \Delta P(t) dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $\Delta P(t)$ – функция изменения потерь активной мощности, обусловленных токами симметрируемой нагрузки; T – длительность рассматриваемого графика нагрузки.

Для дискретно заданного ступенчатого графика нагрузки формула (2) может быть преобразована к виду

$$\Delta W = \tau \sum_{i=1}^N \Delta P_i \rightarrow \min, \quad (3)$$

где ΔP_i – потери активной мощности, обусловленных токами симметрируемой нагрузки на i -й ступени графика нагрузки; τ – фиксированная длительность ступеней графика нагрузки.

При этом потери активной мощности на i -й ступени графика нагрузки будут определяться законом Джоуля – Ленца:

$$\Delta P_i = I_{(A)i}^2 R_{(A)} + I_{(B)i}^2 R_{(B)} + I_{(C)i}^2 R_{(C)}, \quad (4)$$

где $I_{(A)}, I_{(B)}, I_{(C)}$ – соответственно токи в фазах А, В и С; $R_{(A)}, R_{(B)}, R_{(C)}$ – сопротивление фазных проводников линии, питающей симметрируемую нагрузку.

Считая питающую сеть абсолютно симметричной, а также приняв сопротивления фаз сети единичными ($R_{(A)} = R_{(B)} = R_{(C)} = 1 \text{ Ом}$), можно преобразовать выражение (4), приведя его к виду

$$\Delta P_i = I_{(A)i}^2 + I_{(B)i}^2 + I_{(C)i}^2, \quad (5)$$

С учетом того, что после симметрирования энергия потерь в пределах графика нагрузки должна снизиться, то целесообразнее будет рассмотреть в качестве критерия оптимизации абсолютное значение снижения потерь:

$$\Delta = \Delta W' - \Delta W'' \rightarrow \max, \quad (6)$$

здесь $\Delta W'$ – величина потерь энергии до симметрирования; $\Delta W''$ – величина потерь энергии после симметрирования.

Априори можно предположить, что оптимальная симметрируемая мощность будет находиться в диапазоне между минимальным (точка «а» на рис. 3) и максимальным (точка «б» на рис. 3) значением переменной несимметричной нагрузки. Однако следует отметить, что даже при выборе параметров СУ для мощности симметрируемой нагрузки меньше минимального значения в пределах графика (мощность симметрирования меньше мощности в точке «а» на рис. 3), критерий Δ будет иметь положительное значение, т. е. будет иметь место эффект снижения потерь.

Это можно объяснить следующим образом. Применим принцип декомпозиции симметрируемой нагрузки, выделив из ее совокупной мощности соответствующую параметрам СУ мощность. Таким образом, мы фиктивно получаем две нагрузки, сумма мощностей которых равна мощности исходной несимметричной нагрузки. И без симметрирования сумма формируемых их токами потерь равна потерям, формируемым токами исходной нагрузки. После подключения СУ одна из фиктивных нагрузок полностью симметрируется и ее участие в формировании потерь снижается, тогда как потери, формируемые несимметрированной фиктивной нагрузкой, остаются неизменными. Это и приводит к снижению результирующих суммарных потерь.

Здесь же следует отметить еще одну деталь: если параметры симметрирующего устройства будут выбраны для нагрузки, превышающей максимальную (точка «б» на рис. 3), то следует ожидать роста потерь в сравнении с несимметрированным режимом (критерий Δ становится отрицательным). Это будет обусловлено завышенными токами реактивных элементов СУ.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Как уже упоминалось ранее, симметрируемый электроприемник может иметь переменный график нагрузки, вплоть до стохастического. Для дальнейшего рассмотрения остановимся на трех видах стохастических графиков нагрузки. Первый вид – график случайной нагрузки с равномерным законом распределения (рис. 4а). Второй и третий виды – графики нагрузок с распределениями, подчиняющимися усеченным нормальным (гауссовым) законам распределения с разными пределами усечений (рис. 4б и 4в).

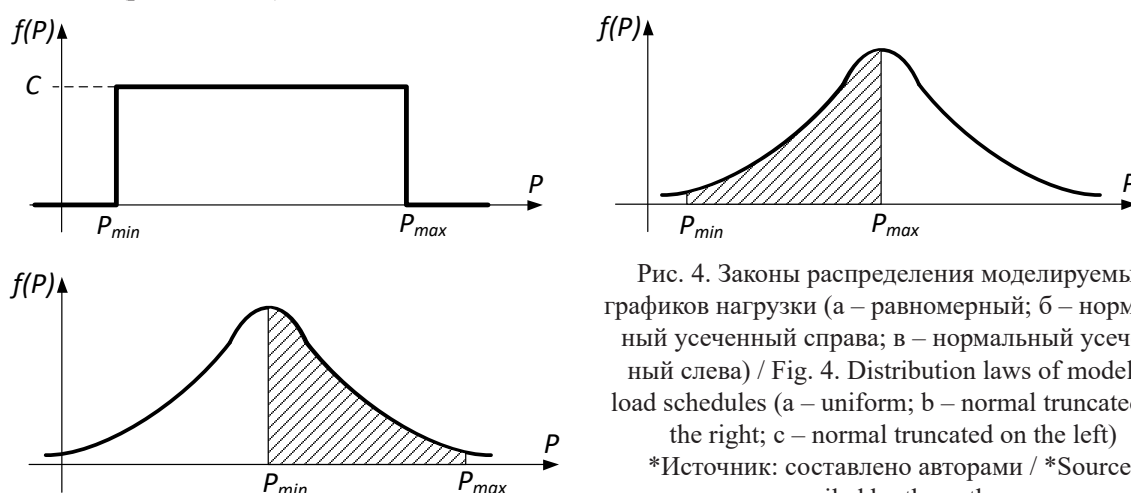


Рис. 4. Законы распределения моделируемых графиков нагрузки (а – равномерный; б – нормальный усеченный справа; в – нормальный усеченный слева) / Fig. 4. Distribution laws of modeled load schedules (a – uniform; b – normal truncated on the right; c – normal truncated on the left)

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Для принятых законов распределения характерно следующее;

– для равномерного закона (рис. 4а) появление любого значения в диапазоне $[P_{min}; P_{max}]$ равновероятно;

– для нормального закона, усеченного справа (рис. 4б), частота появления нагрузок, близких к P_{max} , более высока, нежели частота появления нагрузок близких к P_{min} ;

– для нормального закона, усеченного слева (рис. 4в), выше частота появления нагрузок, близких к P_{min} , и ниже частоты появления нагрузок, близких к P_{max} .

Таким образом, мы можем получить семейства графиков с различными характеристиками, в том числе с преобладающими повышенными нагрузками и относительно редким снижением нагрузки, а также с преобладающими минимальными нагрузками и редкими пиками нагрузок.

В рамках реализованного вычислительного эксперимента осуществлялась работа по определенному алгоритму.

Шаг 1. Моделируется заданный график симметрируемой нагрузки. При этом энергия графика нагрузки приводится к заданному значению посредством пересчета мощности на каждой ступени графика по формуле

$$P_i = P_i^* \cdot \frac{W}{\tau \cdot \sum_N P_i^*}, \quad (7)$$

где W – заданная энергия графика нагрузки; P_i^* – смоделированная в произвольном масштабе мощность нагрузки на i -й ступени графика; N – количество ступеней моделируемого графика нагрузки; τ – длительность ступени графика нагрузки.

Шаг 2. Производится расчет токов несимметричной нагрузки на каждой ступени графика без подключения СУ. Для каждой ступени определяется значение ΔP_i по формуле (5), после чего определяется ΔW по формуле (3).

Шаг 3. Принимается стартовое значение параметров СУ на базе схемы Штейнметца, соответствующее симметрированию активной нагрузки, равной P_{min} ($P_{сумм} = P_{min}$).

Шаг 4. Производится расчет ΔP_i и ΔW аналогично шагу 2, но с учетом подключенного СУ.

Шаг 5. По формуле (6) производится расчет критерия оптимальности Δ .

Шаг 6. Производится пересчет параметров СУ для симметрирования нагрузки ($P_{сумм}$) больше стартовой на заданное значение. После чего осуществляется переход к шагу 4. Процесс повторяется до тех пор, пока критерий Δ не поменяет свой знак (станет отрицательным).

Шаг 7. По полученной статистике строится зависимость $\Delta = f(P_{сумм})$ и определяется оптимальное значение $P_{сумм}$.

Использование данного алгоритма позволяет определить оптимальные фиксированные параметры реактивных элементов схемы Штейнметца при использовании ее для симметрирования переменной нагрузки.

Моделирование графиков нагрузки с использованием указанных законов распределения позволяет получить графики, которые при определенном преобразовании будут иметь весьма характерные формы. Под преобразованием в данном случае понимается ранжирование ступеней графика по возрастанию мощности ступеней без учета порядка их следования в исходном графике.

Так, для графиков, сформированных с использованием равномерного закона распределения, ранжированный график в общем виде будет иметь характерную форму, представленную на рис. 5.

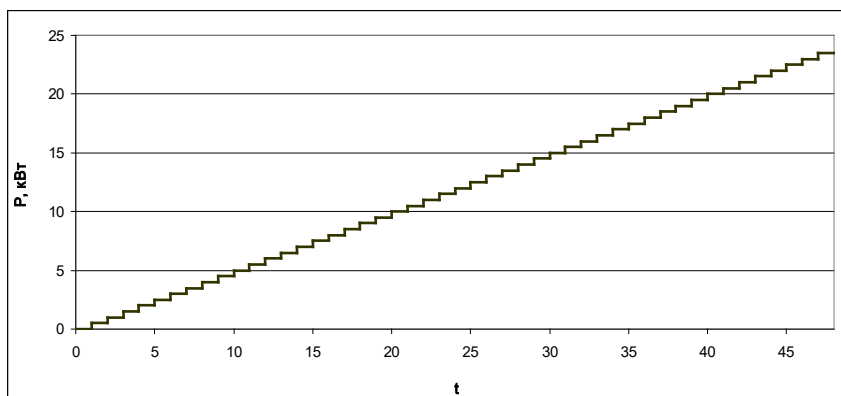


Рис. 5. Общий вид ранжированного графика нагрузки при равномерном распределении /

Fig. 5. General view of the ranked load schedule under uniform distribution

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Как можно видеть из рис. 5, при равномерном распределении стохастической нагрузки, ранжированный график представляет собой линейную возрастающую функцию.

В случае использования при моделировании нормального закона с усечением справа характерная форма графика будет в общем виде выглядеть так, как показано на рис. 6.

Для графиков, смоделированных при помощи нормального закона с усечением слева, характерный ранжированный график показан на рис. 7.

При этом следует отметить, что для всех графиков (рис. 5–7) энергия потребления одна и та же.

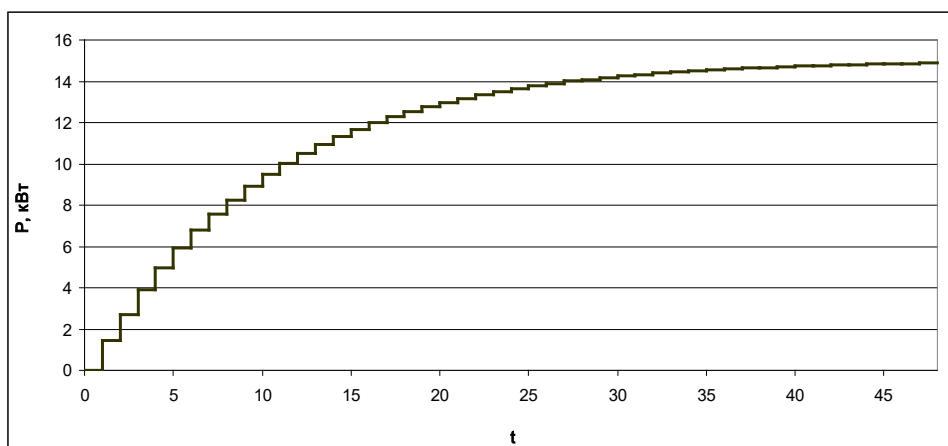


Рис. 6. Общий вид ранжированного графика нагрузки при нормальном распределении с усечением справа / Fig. 6. General view of the ranked load schedule under normal distribution with truncation on the right-hand side

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

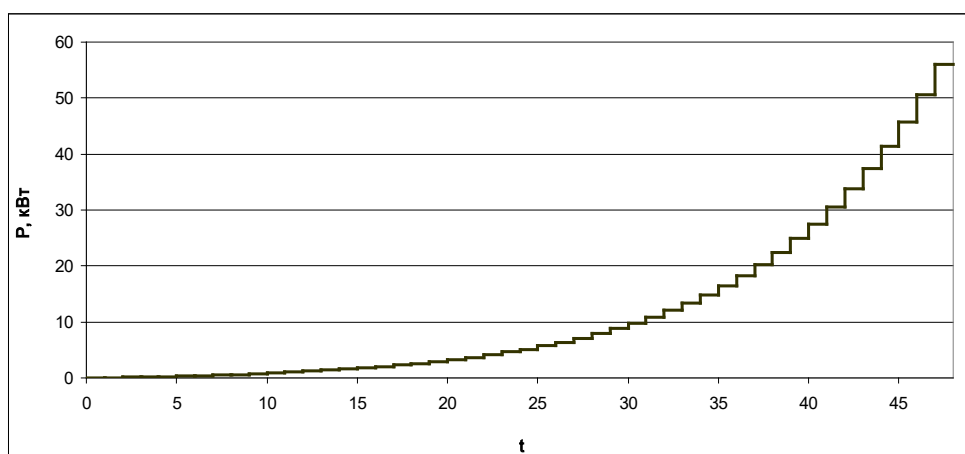


Рис. 7. Общий вид ранжированного графика нагрузки при нормальном распределении с усечением справа / Fig. 7. General view of the ranked load schedule under normal distribution with truncation on the right-hand side

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

В дальнейшем условимся называть графики, соответствующие равномерному распределению, *линейными*, для усеченного справа нормального распределения – *выпуклыми*, для нормального распределения усеченного слева – *вогнутыми*. Отметим следующую характерную особенность: для линейных графиков характерно равенство нулю второй производной, для выпуклых графиков вторая производная имеет отрицательное значение, а для вогнутых – положительное.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. В процессе исследований моделировались графики с энергией, эквивалентной действию нагрузки в 11,75 кВт за время 48 часов. Таким образом, энергия каждого графика составила 564 кВт*ч. Это позволило сформировать 3 серии вычислительных экспериментов в энергетически сопоставимых условиях.

Для каждого графика нагрузки были проведены многократные расчеты с изменяющимися параметрами СУ. Мощность элементов СУ рассчитывалась по (1) исходя из принятой в каждом эксперименте симметрируемой мощности. Симметрируемая мощность на протяжении каждой серии экспериментов менялась от 0 с шагом в 1 кВт до тех пор, пока критерий Δ не становился отрицательным.

В первой серии вычислительных экспериментов была проведена обработка *линейных* ранжированных графиков нагрузки. Зависимости потерь в режимах с симметрированием и без симметрирования приведены на рис. 8. Аналогичные серии экспериментов были проведены для *выпуклых* и *вогнутых* графиков нагрузки. Результаты представлены на рис. 9 и 10.

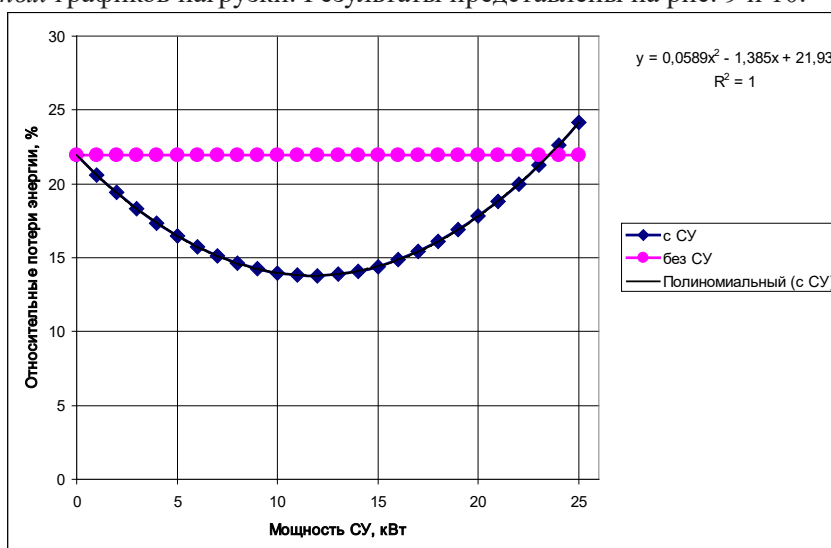


Рис. 8. Зависимость относительных потерь электроэнергии от мощности СУ при *линейном* ранжированном графике нагрузки / Fig. 8. Dependence of relative power losses on SC capacity under *linear* ranked load schedule

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

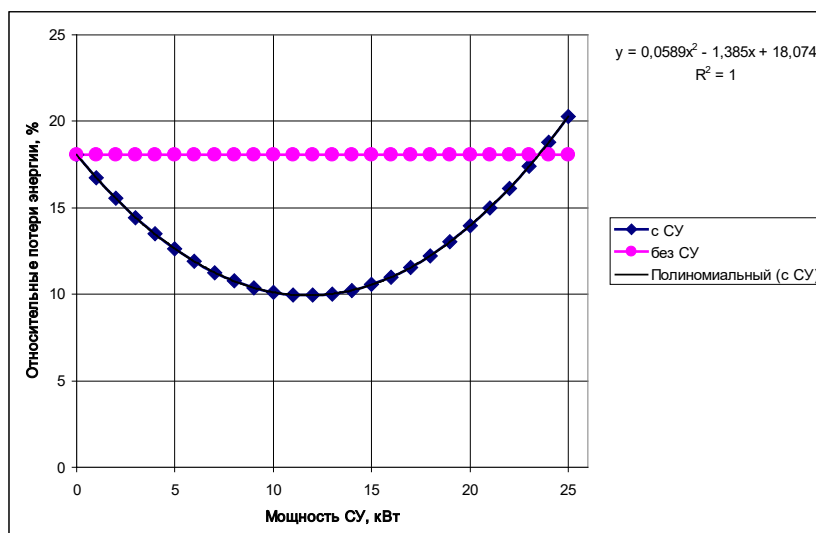


Рис. 9. Зависимость относительных потерь электроэнергии от мощности СУ при *выпуклом* ранжированном графике нагрузки / Fig. 9. Dependence of relative power losses on SC capacity at *convex* ranked load schedule

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

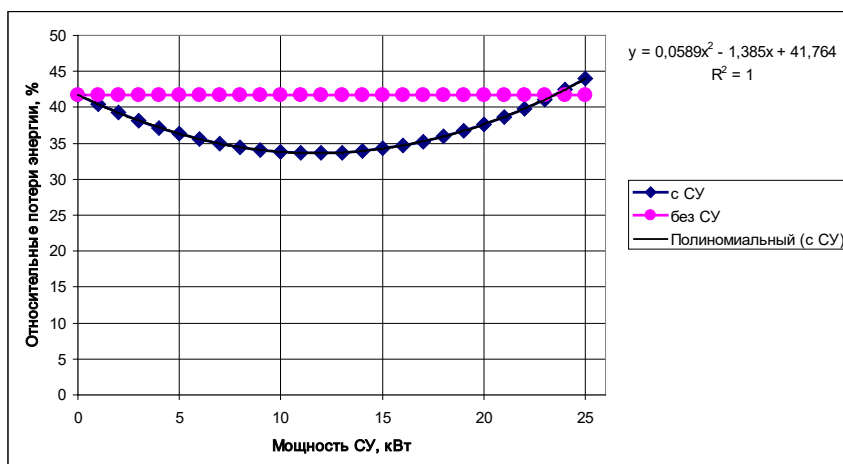


Рис. 10. Зависимость относительных потерь электроэнергии от мощности СУ при *вогнутом* ранжированном графике нагрузки / Fig. 10. Dependence of relative power losses on SC capacity at *concave* ranked load schedule

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Аппроксимация кривых зависимостей потерь от мощности СУ позволила получить следующие выражения:

– для *линейного* графика:

$$\Delta W(\%) = 0,0589 \cdot P_{CV}^2 - 1,385 \cdot P_{CV} + 21,93; \quad (8)$$

– для *выпуклого* графика:

$$\Delta W(\%) = 0,0589 \cdot P_{CV}^2 - 1,385 \cdot P_{CV} + 18,074; \quad (9)$$

– для *вогнутого* графика:

$$\Delta W(\%) = 0,0589 \cdot P_{CV}^2 - 1,385 \cdot P_{CV} + 41,764; \quad (10)$$

Можно заметить, что аппроксимирующие полиномы в выражениях (8)–(10) отличаются только значением свободного члена. Следовательно, имеет место полное равенство их производных, что свидетельствует о равенстве ординат их минимумов.

Заключение / Conclusion. Анализ позволил выявить, что минимум потерь для всех рассмотренных графиков нагрузки соответствует параметрам СУ, рассчитанным для нагрузки 11,75 кВт. Данное значение абсолютно соответствует эквивалентной постоянной мощности, принятой при моделировании графиков переменной нагрузки. Таким образом, можно сформулировать вывод о том, что оптимальная мощность статичного СУ соответствует среднеинтегральному значению переменной мощности симметрируемой нагрузки вне зависимости от закона распределения последней.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Торопов А. С. Проблема несимметрии напряжений в распределительных электрических сетях 0,4 кВ / А. С. Торопов, Е. Я. Глушкин, В. Б. Сульбереков // Высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: материалы конференции. Пенза, 2022. С. 23–25.
2. Дед А. В. К проблеме современного состояния уровней показателей несимметрии напряжений и токов в сетях 0,4 кВ / А. В. Дед // Омский научный вестник. 2017. № 2 (152). С. 63–65.

3. Костюков Д. А. Оценка долевого вклада потребителя в несимметрию напряжений по обратной последовательности в сетях с изолированной нейтралью / Д. А. Костюков, А. В. Петров, А. Е. Куш // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2018. № 5(68). С. 7–18. <https://doi.org/10.37493/2307-907X-2018-68-5-7-18>
4. Малахов П. С., Павлов А. А. О влиянии несимметрии напряжений на режимы работы городской электрической сети / П. С. Малахов, А. А. Павлов // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. 2013. С. 89–94.
5. Петров А. В. Разработка инженерных методов оценки несимметрии напряжений в сетях 10-0,4 кВ: дис. ... канд. техн. наук / Петров Антон Васильевич. Ставрополь, 2003. 200 с.
6. Шакиров В. А. Исследование влияния несимметрии напряжений на работу асинхронных двигателей / В. А. Шакиров, А. М. Сыровешкин, О. А. Буянина // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2011. Т. 2. С. 8–11.
7. Стрижиченко А. В. Оценка влияния коэффициента несимметрии напряжений на нагрев асинхронного двигателя / А. В. Стрижиченко, М. Д. Губин // Управление качеством электрической энергии: сборник трудов Международной научно-практической конференции. М., 2018. С. 167–171.
8. Харламов К. Д. Влияние несимметрии токов на работу трансформаторов // Аллея науки. 2018. Т. 1. № 6 (22). С. 507–511.
9. Гринкрug М. С., Гордин С. А. Влияние несимметрии нагрузок на параметры работы трансформаторов // Энергетик. 2011. № 7. С. 10–12.
10. Использование схемы Штейнметца для симметрирования трехфазной нагрузки / А. В. Петров, Д. А. Костюков, В. Е. Мартусенко, А. С. Вахтин // Электроэнергетика глазами молодежи. 2020. Т. 2. С. 254–257.
11. Дулепов Д. Е. Определение оптимального количества ступеней регулируемого симметрирующего устройства / Д. Е. Дулепов, Ю. М. Дулепова, Т. Е. Кондраненкова // Вестник НГИЭИ. 2020. № 8 (111). С. 26–35. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10071>
12. Петров А. В. Использование круговой диаграммы для определения параметров дроссельно-трансформаторного симметрирующего устройства / А. В. Петров, А. А. Легкий, Р. А. Сахно // Актуальные проблемы инженерных наук. 2018. С. 384–386.
13. Вахтин А. С. Определение параметров трехфазного симметрокомпенсирующего устройства в сетях 6-10 кВ / А. С. Вахтин, Р. А. Звездилин // Энергетика и энергосбережение: теория и практика. 2020. С. 207-1–207-5.

REFERENCES

1. Toropov AS, Glushkin EYa, Sulberekov VB. The problem of voltage asymmetry in distribution electric networks 0,4 kV. In High technologies, science and education: current issues, achievements and innovations: conference materials. Penza; 2022. P. 23-25. (In Russ.).
2. Ded AV. To a problem of levels of indicators of asymmetry of tension and currents in networks of 0,4 kV. Omsk scientific bulletin. 2017;2(152):63-65. (In Russ.).
3. Kostyukov DA, Petrov AV, Kushch AE. Assessment of the proportional contribution of the consumer to the voltage unbalance negative sequence networks with isolated neutral. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2018;5(68):7-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X-2018-68-5-7-18>
4. Malakhov PS, Pavlov AA. About the influence of voltage asymmetry on the operation modes of the urban electric network. In Culture, science, education: problems and prospects. Proceedings of the II All-Russian scientific and practical conference. 2013. P. 89-94. (In Russ.).
5. Petrov AV. Development of the engineering methods of the voltage asymmetry estimation in the 10-0,4 kV networks: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Stavropol; 2003. 200 p. (In Russ.).
6. Shakirov VA, Syroveshkin AM, Buyanina OA. Investigation of the influence of voltage asymmetry on the operation of induction motors. In Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences – development of Siberian regions. 2011;2:8-11. (In Russ.).
7. Strizhichenko AV, Gubin MD. Evaluation of the influence of the voltage asymmetry factor on the induction motor heating. In Management of the electrical energy quality: proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Moscow; 2018. P. 167-171. (In Russ.).
8. Kharlamov KD. Influence of the current asymmetry on the transformers operation. Alleya nauki = Alley of Science. 2018;6(22):507-511. (In Russ.).
9. Grinkrug MS, Gordin SA. Influence of the load asymmetry on the transformers operation parameters. Energetik = Power engineer. 2011;7:10-12. (In Russ.).
10. Petrov AV, Kostyukov DA, Martusenka VE, Vakhtin AS. Using the Steinmetz scheme for symmetrization of three-phase load. Electric power engineering through the eyes of youth. 2020;2:254-257. (In Russ.).
11. Dulepov DE, Dulepova YuM, Kondranenkova TE. Determination of the optimal number of stages of the regulated symmetrizing device (in Russian). Bulletin NGIEI. 2020;8(111):26-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10071>

12. Petrov AV, Legky AA, Sakhno RA. Use of the circular diagram to determine the parameters of the throttle-transformer symmetrizing device. Actual problems of engineering sciences: proceedings of the VI annual scientific and practical conference of teachers, students and young scientists of the North-Caucasus Federal University "University Science for the Region". 2018:384-386. (In Russ.).
13. Vakhtin AC, Zvezdilin RA. Determination of the three-phase symmetric compensating device parameters in the 6-10 kV networks. Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika = Energy and energy saving: theory and practice. 2020:207-1-207-5. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Антон Васильевич Петров – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения факультета нефтегазовой инженерии Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57210523416, Researcher ID: ITT-8942-2023.

Виталий Евгеньевич Мартусенко – магистр факультета математики и компьютерных наук имени профессора Н. И. Червякова Северо-Кавказского федерального университета, Researcher ID: ISS-8247-2023.

Расул Азнаурович Магаев – аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения факультета нефтегазовой инженерии Северо-Кавказского федерального университета, Researcher ID: LOS-4443-2024.

Владислав Евгеньевич Мартусенко – студент факультета математики и компьютерных наук имени профессора Н. И. Червякова Северо-Кавказского федерального университета, Researcher ID: LOS-0678-2024.

ВКЛАД АВТОРОВ

Антон Васильевич Петров. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Виталий Евгеньевич Мартусенко. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Расул Азнаурович Магаев. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

Владислав Евгеньевич Мартусенко. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton V. Petrov – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Faculty of Petroleum Engineering, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57210523416, Researcher ID: ITT-8942-2023.

Vitaliy E. Martusenko – Master of the Faculty of Mathematics and Computer Science named after Prof. N.I. Cherviakov, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: ISS-8247-2023.

Rasul A. Magayayev – Postgraduate Student of the Department of Automated Power Systems and Electricity Supply, Faculty of Petroleum Engineering, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: LOS-4443-2024.

Vladislav E. Martusenko – Student of the Faculty of Mathematics and Computer Sciences named after Prof. N.I. Cherviakov, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: LOS-0678-2024.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anton V. Petrov. Conducting research – data collection, analysis and interpretation. Approval of the final manuscript – acceptance of responsibility for all types of the work, integrity of all parts of the paper and its final version.

Vitaliy E. Martusenko. Conducting research – data collection, analysis and interpretation. Approval of the final manuscript – acceptance of responsibility for all types of the work, integrity of all parts of the paper and its final version.

Rasul A. Magayayev. Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.

Vladislav E. Martusenko. Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.