

УДК 621.31

ББК 31.2

А.И. ОРЛОВ, И.А. КАРПОВ, В.Т. СИДОРОВА

## АНАЛИЗ СИММЕТРИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО АППАРАТА ДЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЕЙ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ

**Ключевые слова:** отклонение напряжения, несимметрия, электромагнитный аппарат, симметрирующее устройство, потери электроэнергии, линия электропередачи 0,4 кВ, распределительная сеть.

Наиболее распространенными проблемами качества электроэнергии в линиях электропередачи 0,4 кВ являются отклонения напряжения и несимметрия напряжения, заметно проявляющиеся на конечных участках длинных линий при неравномерном распределении потребителей по фазам. К техническим средствам решения обозначенных проблем относятся устройства для равномерного распределения однофазных потребителей по фазам трехфазной сети на базе электромеханических реле, статических полупроводниковых устройств и электромагнитные аппараты.

**Цель исследования** заключается в анализе работы симметрирующего электромагнитного аппарата, состоящего из одной трехфазной обмотки, расположенной на общем магнитопроводе. Научная новизна состоит в определении условий функционирования симметрирующего электромагнитного аппарата, получении качественных и количественных характеристик его работы.

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследования рассматривается статический электромагнитный аппарат, проявляющий свойства симметрирования напряжений и токов при подключении к неравномерно нагруженной по фазам трехфазной электрической сети. Используются методы теоретической электротехники, в частности, метод симметричных составляющих, общепринятые методы анализа электромагнитных процессов в электрических машинах, методы математического и компьютерного моделирования, анализа и обобщения. При моделировании приняты следующие допущения: синусоидальность напряжений и токов; линейность кривой намагничивания материала магнитопровода и отсутствие электрических и магнитных потерь в электромагнитном аппарате.

**Результаты исследования.** Установлено, что эффект выравнивания токов в линии и симметрирования напряжений при подключении электромагнитного аппарата, содержащего одну трехфазную обмотку на общем магнитопроводе, возникает в случае одновременного выполнения условий: а) применение трехфазного магнитопровода, в котором магнитный поток нулевой последовательности не может замыкаться в пределах магнитопровода; б) соединения обмоток трансформатора по схеме, допускающей протекание токов нулевой последовательности в линейных проводниках. Рассмотрены модели линии 0,4 кВ с сосредоточенной и распределенной нагрузкой. Показано, что при несимметричной нагрузке токи симметрирующего электромагнитного аппарата приобретают составляющую нулевой последовательности, а линейные токи выравниваются по сравнению с токами нагрузки. Коэффициент несимметрии напряжения нулевой последовательности снижается практически до нуля, обратной последовательности – практически не изменяется. Эффект симметрирования напряжений при подключении симметрирующего электромагнитного аппарата возникает как до, так и после места его установки. Продемонстрировано снижение суммарных потерь электроэнергии в линии вследствие выравнивания токов.

**Выводы.** Электромагнитный аппарат, содержащий одну трехфазную обмотку на общем магнитопроводе, оказывает эффект симметрирования напряжений и токов трехфазной линии электропередачи с нулевым проводом, если конструкция магнитопровода не допускает возможности замыкания магнитного потока нулевой последовательности в его пределах, а схема соединения обмотки содержит нейтральный вывод, соединенный с нулевым проводом сети, по которому могут протекать

*токи нулевой последовательности. Действие рассмотренного электромагнитного аппарата проявляется в выравнивании токов линии по величине и, как следствие, в снижении суммарных потерь в ней. Электромагнитный аппарат симметрирует напряжения до и после места его установки, наибольший эффект проявляется при размещении предлагаемого электромагнитного аппарата в конце линии или в точке подключения наиболее мощного потребителя.*

**Введение.** Электрические сети 0,4 кВ являются конечным звеном в цепи передачи электроэнергии от источников к потребителям. Порядок включения потребителей, многие из которых однофазные, не регламентируется и имеет практически случайный характер, в связи с чем в длинных линиях 0,4 кВ показатели качества электроэнергии могут выходить за пределы, нормируемые стандартом<sup>1</sup>. К наиболее распространенным проблемам качества электроэнергии относятся отклонения напряжения и несимметрия напряжения, проявляющиеся на конечных участках длинных линий по причине падений напряжения в них и неравномерного распределения потребителей по фазам. Техническими средствами решения обозначенных проблем являются:

- а) устройства для равномерного распределения однофазных потребителей по фазам трехфазной сети на базе электромеханических реле;
- б) статические полупроводниковые устройства;
- в) электромагнитные аппараты.

К первой группе относятся устройства выбора фазы, устройства выравнивания нагрузки, выполняющие изменение схемы подключения потребителей к трехфазной сети за счет электромеханических реле.

К статическим полупроводниковым устройствам относятся статические компенсаторы и функционально близкие к ним параллельные активные фильтры гармоник. Такие устройства обладают широкими возможностями по минимизации несимметрии токов и, как следствие, напряжений в точке присоединения потребителей, минимизации несинусоидальности токов в линии, обеспечения заданного коэффициента мощности. Однако недостатки таких устройств ограничивают их распространение. К ним относятся: высокая стоимость, сложность системы управления, меньший срок службы по сравнению с трансформаторами, чувствительность компонентов к импульсным воздействиям. Статические устройства содержат реакторы, ограничивающие амплитуду пилообразных кривых мгновенных значений тока, что отражается на их габаритных размерах.

К электромагнитным аппаратам, предназначенным для минимизации отклонений напряжения удаленных потребителей в длинных линиях 0,4 кВ, относятся вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ) (рис. 1). Эти устройства представляют собой автотрансформаторы, повышающие напряжение в линии за местом его установки (рис. 2).

---

<sup>1</sup> ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.

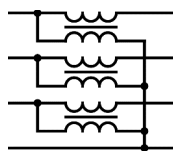


Рис. 1. Схема нерегулируемого трехфазного ВДТ

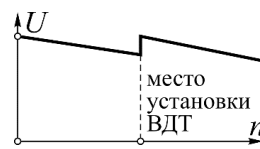


Рис. 2. Напряжение вдоль линии электропередачи при установке ВДТ

Большинство авторов рассматривают ВДТ лишь как временное решение проблемы отклонения напряжения, которое не отменяет необходимости реконструкции линии с увеличением сечения проводников. Так, авторы работ [3, 12] отмечают, что ВДТ целесообразно применять лишь как завершающее решение проблемы низкого напряжения на воздушных линиях (ВЛ) 0,4 кВ большой протяженности, в случае отсутствия возможности разукрупнения ВЛ или подвода линии 6(10) кВ с установкой комплексной трансформаторной подстанции при наличии экономической целесообразности. Авторы работы [5] указывают, что основная задача ВДТ заключается в поддержке районов с удаленными потребителями, которых не затрагивает реконструкция сетей.

Авторы работы [11], обобщая результаты технико-экономического расчета линии с ВДТ, выражают противоположное мнение о том, что использование современных устройств продольного регулирования напряжения в сетях 10 кВ и 0,4 кВ позволяет во многих случаях отказаться от дорогостоящей реконструкции ВЛ и обеспечить требуемый уровень напряжения у потребителей районных распределительных электрических сетей, а также уменьшить потери электроэнергии.

ВДТ могут применяться не только с целью повышения напряжения, но и для увеличения максимальной передаваемой мощности. Так, автор работы [4] на примере участка линии электропередачи «Докшицы – Вилейка», расположенной на территории Белоруссии, сообщает, что ВДТ позволяет увеличить максимальную передаваемую мощность на 18%. Аналогичные выводы приведены в работе [8] на примере компьютерной модели системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги.

В работе [1], посвященной выбору параметров устройств продольного регулирования, авторы отмечают, что при выборе коэффициента трансформации у вольтодобавочных устройств необходимо учитывать их влияние на увеличение потерь напряжения в питающей сети. Пренебрежение этими величинами может приводить к грубым ошибкам в расчетах диапазона регулирования напряжения удаленных потребителей.

Известны специальные трансформаторы, предназначенные для симметрирования вторичных напряжений, обмотки которых соединены по схемам «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» и «звезда – треугольник с зигзагом». Авторами монографии [7] приводятся результаты экспериментальных исследований таких трансформаторов, согласно которым трансформатор со схемой соединения  $Y/2Z_n$  при 1-фазной нагрузке обеспечивает коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности вторичной обмотки

не более 1,74%, по нулевой последовательности – не более 2,98%. Схема соединения  $Y/\Delta$  с зигзагом в этих же условиях обеспечивает коэффициент несимметрии вторичных напряжений по обратной последовательности, равный 1,91%.

Минимизация отклонений напряжения в отдельных фазах, возникающих по причине неравномерного распределения однофазных потребителей по фазам, может быть достигнута применением специализированных трансформаторов для подключения однофазных потребителей к трехфазной электрической сети. Существуют различные схемы таких устройств. Так, трансформатор [10], схема которого показана на рис. 3, имеет плоский трехстержневой магнитопровод. Анализ работы данного трансформатора показывает, что при подключении нагрузки в фазах  $B$  и  $C$  возникают равные по величине, но противоположные по фазе токи, в фазе  $A$  ток отсутствует. К недостаткам применения подобных трансформаторов относятся возрастающие капитальные затраты на сооружение электрической сети, неустраняемые дополнительные потери в трансформаторах, снижение надежности электроснабжения. Такие специализированные трансформаторы могут найти применение для подключения мощных однофазных потребителей к линии 0,4 кВ, а также в качестве абонентских трансформаторов в линиях класса напряжения 0,95–1,0 кВ.

Известны электромагнитные аппараты, предназначенные для симметрирования напряжений и включаемые параллельно в сеть. Так, в описании к изобретению [2] рассматривается фильтросимметрирующее устройство (ФСУ) на основе трехфазного электромагнитного аппарата со схемой соединения обмоток «встречный зигзаг с нулевым проводом». Устройство выполняет симметрирование фазных напряжений сети благодаря исключительно малому сопротивлению нулевой последовательности. Так, согласно описанию изобретения, сопротивление нулевой последовательности ФСУ меньше равных по величине сопротивлений прямой и обратной последовательности в 20 000 раз и более. В связи с этим токи нулевой последовательности, созданные несимметричной нагрузкой, замыкаются через данное устройство. Изобретение [2] является прототипом других изобретений и полезных моделей. Так, в описании патента [6] приводится конструкция симметрирующего устройства, состоящего из трех трехфазных электромагнитных аппаратов, силовая часть которых повторяет изобретение [2].

Известно устройство автоматической балансировки (УАБ) [9], относящееся к устройствам поперечной компенсации. УАБ предназначено для решения проблемы несимметрии напряжения и включается в конце линии параллельно потребителю без разрыва цепи. Производители не раскрывают конструкцию и технические характеристики устройства, однако, согласно имеющемуся описанию [9], можно предположить, что устройство и принцип действия силовой части УАБ аналогичен электромагнитному аппарату, описанному в работах [2, 6]. Производители имеют сертификат соответствия техническим регламентам

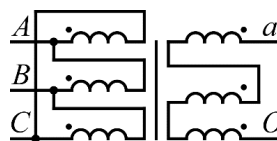


Рис. 3. Схема трансформатора для подключения однофазной нагрузки в трехфазную сеть

Таможенного союза<sup>1</sup>, устройство прошло опытно-промышленную эксплуатацию на объектах ПАО «Россети».

**Цель исследования** заключается в анализе работы симметрирующего электромагнитного аппарата (СЭА), состоящего из одной трехфазной обмотки, расположенной на общем магнитопроводе.

Научная новизна состоит в определении условий функционирования СЭА, получении качественных и количественных характеристик его работы.

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследования рассматривается статический электромагнитный аппарат, проявляющий свойства симметрирования напряжений и токов при подключении к неравномерно нагруженной по фазам трехфазной электрической сети. Использовались методы теоретической электротехники, в частности метод симметричных составляющих, общепринятые методы анализа электромагнитных процессов в электрических машинах, методы математического и компьютерного моделирования, анализа и индукции (обобщения). Компьютерное моделирование режимов работы рассматриваемых в работе схем электрических сетей и электромагнитного аппарата выполнено с использованием разработанных авторами программ на языке Python, реализующих модифицированный метод узловых потенциалов, расчет матрицы индуктивностей силовых трансформаторов, обработку данных. Верификация моделей в отдельных режимах выполнялась с использованием ПО MATLAB Simulink. При моделировании приняты следующие допущения: синусоидальность напряжений и токов; линейность кривой намагничивания материала магнитопровода и отсутствие электрических и магнитных потерь в электромагнитном аппарате.

**Результаты исследования.** Рассмотрим электромагнитный аппарат, имеющий одну трехфазную обмотку, соединенную по схеме «звезда с нулевым проводом». Устройство данного электромагнитного аппарата не отличается от трехфазного трансформатора без вторичной обмотки или с разомкнутой вторичной обмоткой. Трехфазная обмотка электромагнитного аппарата расположена на симметричном пространственном магнитопроводе, конструктивная схема которого показана на рис. 4. В таком случае магнитный поток нулевой последовательности  $\Phi_0$  замыкается через немагнитные промежутки, выходя за пределы магнитопровода.

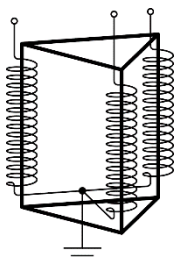


Рис. 4. Конструктивная схема магнитопровода СЭА

При симметричном напряжении на выводах обмотки по ее фазам протекают небольшие намагничивающие токи, как правило, не превышающие 2%, магнитные потоки фаз не содержат составляющих нулевой и обратной последовательностей и в сумме равны нулю. При несимметричном напряжении, содержащем в общем случае составляющие всех последовательностей, в стержнях магнитопровода возникают несимметричные магнитные потоки, содержащие составляющие только прямой

<sup>1</sup> Сертификат соответствия Таможенного союза ЕАЭС RU C-RU.ME68.B.00256/22 [Электронный ресурс]. URL: <https://nevacert.ru/reestr/rss/3186120?tab=product>.

и обратной последовательностей  $\Phi_1 + \Phi_2$ , так как магнитный поток нулевой последовательности  $\Phi_0$ , замыкающийся через немагнитные промежутки, пренебрежимо мал. Электродвижущие силы (ЭДС) взаимной индукции, создаваемые этими потоками, практически уравнивают составляющие напряжений прямой и обратной последовательности. Однако напряжение нулевой последовательности оказывается практически нескомпенсированным соответствующей составляющей ЭДС взаимной индукции, что вызывает проявление значительного тока нулевой последовательности в каждой фазной обмотке. Эти составляющие тока, складываясь с относительно небольшими намагничивающими токами прямой и обратной последовательностей, образуют результирующие фазные токи электромагнитного аппарата.

Если в конце длинной линии электропередачи параллельно электромагнитному аппарату подключена неравномерно распределенная по фазам нагрузка, вызывающая несимметрию напряжений в точках их присоединения, токи электромагнитного аппарата, складываясь с токами нагрузки, выравнивают токи линии, что приводит к симметрированию напряжений.

Симметрирующий эффект при использовании электромагнитного аппарата рассматриваемой конструкции возникает в случае одновременного выполнения следующих условий:

а) применения трехфазного магнитопровода, в котором магнитный поток нулевой последовательности не замыкается в пределах магнитопровода, например, симметричного пространственного или трехстержневого типа;

б) соединения обмоток трансформатора по схеме, допускающей протекание токов нулевой последовательности в проводниках линии: «звезда с нулевым проводом» или «зигзаг с нулевым проводом».

Если токи нулевой последовательности не протекают в линейных проводниках, например, в случае соединения обмоток по схеме «звезда без нулевого провода» или «треугольник», или магнитный поток нулевой последовательности может замыкаться в пределах магнитопровода, например, в случае магнитопроводов группового, бронестержневого (пятистержневого) или броневые типы, эффекта симметрирования не возникает.

Явление симметрирования напряжений качественно демонстрирует упрощенная модель несимметрично нагруженной линии электропередачи, схема замещения которой представлена на рис. 5, с параллельно подключенным к ней СЭА. Источник электроэнергии представлен на схеме источниками ЭДС  $\underline{E}_s$  и сопротивлениями  $\underline{Z}_s$ , нагрузка – сопротивлениями  $\underline{Z}_н$ . Числовые значения элементов схемы:  $\underline{E}_{sA} = 219,39$  В,  $\underline{E}_{sB} = \underline{E}_{sA} \cdot e^{-j2\pi/3}$ ,  $\underline{E}_{sC} = \underline{E}_{sA} \cdot e^{+j2\pi/3}$ ,  $\underline{Z}_s = 2$  Ом;  $\underline{Z}_н = 50$  Ом. СЭА задан матрицей индуктивных сопротивлений (Ом)

$$\mathbf{X}_T = \begin{pmatrix} j282,47 & -j141,18 & -j141,18 \\ -j141,18 & j282,47 & -j141,18 \\ -j141,18 & -j141,18 & j282,47 \end{pmatrix},$$

рассчитанной по методике<sup>1</sup> и соответствующей обмотке 0,4 кВ трансформатора  $S_n = 25$  кВА,  $i_0 = 0,02$ ,  $u_k = 0,045$ ,  $P_0 = 105$  Вт,  $P_k = 600$  Вт. Потери

<sup>1</sup> Описание методики см. в статье: Орлов А.И., Волков С.В., Гарипов И.Х. Расчет матрицы индуктивных силовых трансформатора // Вестник Чувашского университета. 2023. № 4. С. 120–129.

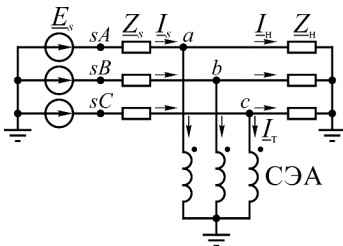


Рис. 5. Расчетная схема замещения нагруженной линии 0,4 кВ и СЭА

электроэнергии в СЭА в данной модели не учитывались, так как качественно не искажают полученные результаты, нагрузка принята чисто активной.

На рис. 6, а показана векторная диаграмма напряжений относительно Земли: тройка векторов  $\underline{U}_s$  изображает напряжения в узлах  $sA, sB, sC$ ;  $\underline{U}$  и  $\underline{U}'$  – напряжения в узлах  $a, b, c$  при наличии и отсутствии СЭА соответственно. На рис. 6, б показана диаграмма токов в случае симметричной нагрузки; на рис. 6, в – при увеличении проводимости фазы А. Сравнение этих диаграмм показывает, что при несимметричной нагрузке (рис. 6, в) токи СЭА приобретают составляющую нулевой последовательности, смещающую все векторы токов  $\underline{I}_T$  в данном примере в сторону, противоположную  $\underline{U}_a$ . В результате линейные токи  $\underline{I}_s$  выравниваются по сравнению с токами нагрузки  $\underline{I}_n$ .

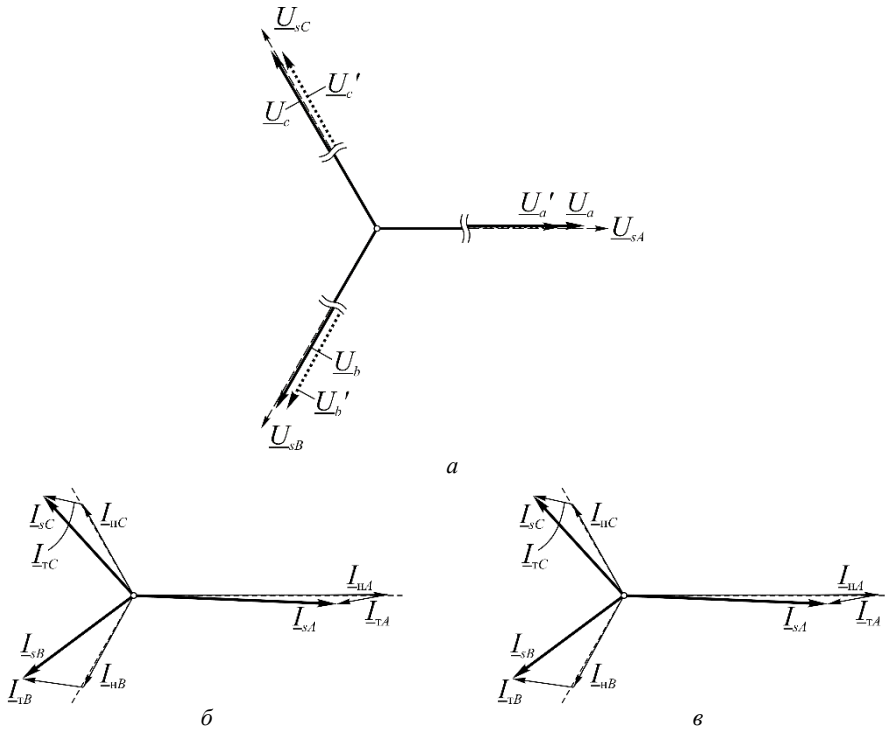


Рис. 6. Векторные диаграммы напряжений относительно Земли и токов при несимметричной нагрузке:

- а –  $\underline{U}_s$  – напряжения в узлах  $sA, sB, sC$ ;  $\underline{U}$  и  $\underline{U}'$  – напряжения в узлах  $a, b, c$  при наличии и отсутствии СЭА соответственно;
- б – диаграмма токов при симметричной нагрузке;
- в – диаграмма токов при увеличении проводимости нагрузки  $Z_{н.А}$  фазы А

Модули напряжений в узлах линии на практике достаточно близки друг к другу по величине, поэтому мощности нагрузок практически пропорциональны проводимостям  $S_n = G_n \cdot U^2$ . Рассмотрим различные варианты распределения

фазных проводимостей при условии  $G_{\Sigma} = G_{na} + G_{nb} + G_{nc} = \text{const}$  или  $S_{\Sigma} = \text{const}$ . Геометрическая интерпретация данного соотношения в декартовой системе координат показана на рис. 7. Здесь три координатных оси соответствуют значениям проводимостей фаз нагрузки. Множество значений проводимостей  $G_{na}, G_{nb}, G_{nc}$  при  $G_{\Sigma} = \text{const}$  образуют плоскость, линии пересечения трех координатных плоскостей первого октанта образуют равносторонний треугольник с центром в точке  $N$ , в которой нагрузка фаз равномерная  $G_{н.ср} = G_{na} = G_{nb} = G_{nc}$ . Фазы равнозначны, поэтому для оценки роли СЭА при различных соотношениях проводимостей фазных нагрузок достаточно рассмотреть множество значений фазных проводимостей вдоль линии  $AN$ , для которой  $G_{na} = G_{н.ср} (3 - 2x)$ ,  $G_{nb} = G_{nc} = G_{н.ср} x$ , где  $x \in [0; 1]$ .

Модули токов линии  $I_s$ , показанные на рис. 8, при отсутствии СЭА совпадают с токами нагрузки  $I_n$ . СЭА выравнивает по величине токи в линии  $I_s$ . Потери в проводниках линии пропорциональны сумме квадратов токов, поэтому выравнивание линейных токов приводит к снижению потерь электроэнергии в линии, несмотря на то, что сумма модулей токов  $|I_{sA}| + |I_{sB}| + |I_{sC}|$  оказывается несколько выше, чем до использования СЭА. На рис. 9 показаны графики потерь электроэнергии при подключении СЭА  $P$  и без него  $P'$  по отдельным фазам и в сумме. Соотношение суммарных потерь  $P_{\Sigma} < P_{\Sigma}'$  сохраняется практически при любом соотношении проводимостей нагрузок, приближаясь к  $P_{\Sigma} \approx P_{\Sigma}'$  только при равенстве фазных проводимостей  $G_{na} = G_{nb} = G_{nc}$ .

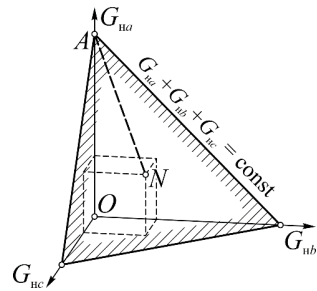


Рис. 7. Геометрическая интерпретация соотношения проводимостей  $G_{na} + G_{nb} + G_{nc} = \text{const}$

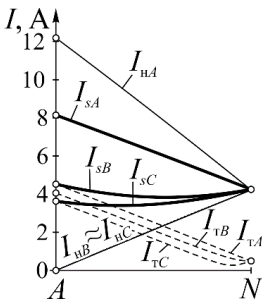


Рис. 8. Модули токов в ветвях схемы при наличии СЭА:  $I_s$  – ток источника;  $I_n$  – ток нагрузки;  $I_t$  – ток трансформатора

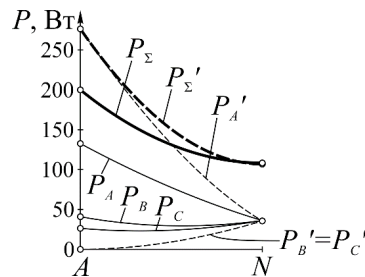


Рис. 9. Потери в линии:  $P'_A, P'_B, P'_C, P'_{\Sigma}$  – до подключения СЭА;  $P_A, P_B, P_C, P_{\Sigma}$  – после подключения СЭА

Графики напряжений, представленные на рис. 10, позволяют отметить, что использование СЭА сближает фазные напряжения по величине. Коэффициенты несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательностям



до использования СЭА равны между собой  $k_{U0}' = k_{U2}'$  (рис. 11). При включении СЭА коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности  $k_{U0}$  снижается практически до нуля, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности  $k_{U2}$  незначительно увеличивается. Таким образом, СЭА в целом симметрирует фазные напряжения путем выравнивания значений токов в линии. Приведенные результаты получены при изменении фазных проводимостей, соответствующем линейному переходу из точки  $A$  в точку  $N$ , показанному на рис. 7. Другие пути перехода из крайне неравномерной нагрузки, когда нагружена только одна фаза, к равномерной  $G_{na} = G_{nb} = G_{nc}$  при соотношении проводимостей  $G_{na} + G_{nb} + G_{nc} = \text{const}$  дают аналогичные результаты.

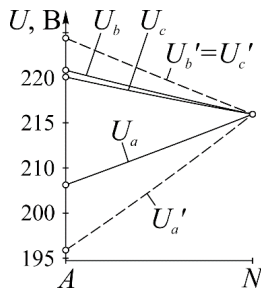


Рис. 10. Напряжения в узлах  $a, b, c$  соответственно при наличии ( $U$ ) и при отсутствии ( $U'$ ) симметрирующего трансформатора

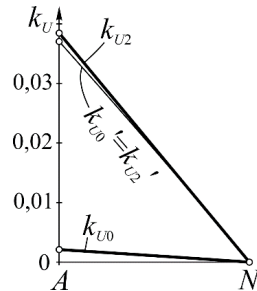


Рис. 11. Коэффициенты несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательностям при наличии ( $ku$ ) и отсутствии ( $ku'$ ) симметрирующего трансформатора

Качественно аналогичные результаты также имеют место при соединении обмоток электромагнитного аппарата по схеме «зигзаг с нулевым проводом» и/или при использовании магнитопровода трехстержневого типа.

Рассмотрим процессы, происходящие в длинной трехфазной линии электропередачи 0,4 кВ с распределенной вдоль нее нагрузкой, схема замещения которой представлена на рис. 12. Линия включает 25 опор, к каждой опоре подключен единственный однофазный потребитель. Величины сопротивлений линии  $Z_{\text{лин}}$  соответствуют участкам длиной 40 м, выполненным проводом СИП-2  $3 \times 50 + 1 \times 54,6$ . Сопротивление нагрузки каждого однофазного потребителя принято равным 48,4 Ом. Нулевой проводник заземлен на каждой опоре. Параметры схемы замещения источника и СЭА совпадают с принятыми для схемы, представленной на рис. 5.

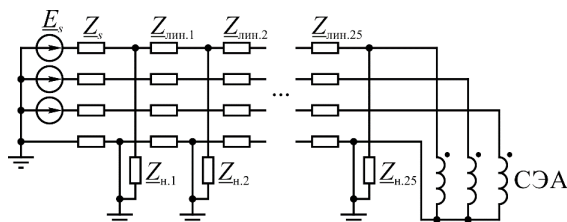


Рис. 12. Схема замещения длинной неразветвленной линии 0,4 кВ с подключенным СЭА

Все потребители подключены к одной фазе – в рассматриваемом примере к фазе *A*, СЭА подключен в конце линии на опоре № 25. Пофазное распределение напряжений на опорах вдоль линии показано на рис. 13. Эффект симметрирования напряжений линии наиболее заметно проявляется с увеличением разницы напряжений по величине, вызванной неравномерным распределением потребителей по фазам – в месте подключения СЭА. Благодаря выравниванию токов линии напряжение фазы *A* на опоре № 25 оказывается выше, чем на опорах 21–24, расположенных ближе к началу линии. По мере удаления от СЭА к началу линии доля создаваемых им составляющих токов нулевой последовательности линии снижается, и значительного сближения напряжений не возникает. На рис. 14 показаны значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям вдоль линии. Аналогично упрощенной модели, схема которой показана на рис. 5, в длинной линии с распределенной нагрузкой при наличии СЭА происходит снижение составляющих напряжения нулевой последовательности: в месте установки СЭА  $k_{U0} \approx 0,16 \cdot k_{U0}'$ , а составляющие напряжений обратной последовательности остаются практически без изменений  $k_{U2} \approx k_{U2}'$ .

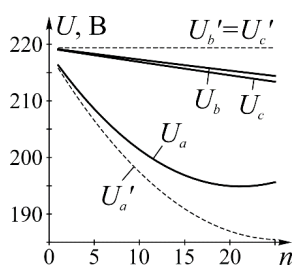


Рис. 13. Фазные напряжения вдоль длинной неразветвленной линии 0,4 кВ

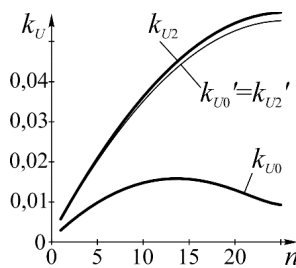


Рис. 14. Коэффициенты несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательностям вдоль линии при неравномерной нагрузке при наличии симметрирующего трансформатора  $k_{U0}$  и  $k_{U2}$  и без него  $k_{U0}'$  и  $k_{U2}'$ : *n* – номер опоры

Выравнивание токов линии приводит к снижению потерь электроэнергии в ней (таблица). При неравномерном распределении потребителей по фазам в рассматриваемой схеме применение СЭА снижает суммарные потери в линии на 19,5 % с 2228 Вт до 1793 Вт.

**Величины, характеризующие действие СЭА, подключенного в конце длинной линии электропередачи 0,4 кВ с неравномерно распределенной нагрузкой**

Параметр	Без СЭА			При наличии СЭА		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Напряжения в начале линии $U_{n1}$ , В	215,78	219,39	219,39	216,30	219,13	219,04
Токи источника $I_s$ , А	101,18	0,01	0,01	86,80	17,83	16,95
Полная мощность источника, ВА	21 885	1	1	18 775	3906	3712
Напряжения в конце линии $U_{n25}$ , В	185,49	219,39	219,39	195,63	214,40	213,38
Токи трансформатора $I_t$ , А	–	–	–	17,27	17,82	16,94
Полная мощность СЭА по фазам, ВА	–	–	–	3379	3821	3615
Мощность потерь в линии, Вт	2228	0	0	1405	204	184

В случае равномерного чередования потребителей по фазам линии значительной разницы фазных напряжений не возникает, поэтому действие СЭА проявляется менее заметно. Потери электроэнергии остаются практически без изменений, снижаясь с 889 Вт до 888 Вт.

СЭА конструктивно может быть выполнен на базе трансформатора 6 (10)/0,4 кВ без обмотки высокого напряжения. При проектировании нового СЭА по рассмотренной в данной работе конструктивной схеме за счет уменьшения размеров по сравнению с аналогичным по мощности трансформатором потоки рассеяния и сопротивление нулевой последовательности должны оказаться меньше, что положительно скажется на его характеристиках.

Практическая значимость работы заключается в формулировке требований к конструктивной схеме СЭА и оценке его технических характеристик. Результаты могут применяться при проектировании рассмотренного и аналогичных устройств.

К перспективным вопросам, требующим исследования по тематике СЭА, относятся: влияние относительной величины полей рассеяния на характеристики данного устройства, учет влияния факторов, не рассматриваемых при моделировании, таких как нелинейность кривой намагничивания, наличие высших гармоник, потерь электроэнергии в магнитопроводе и обмотках. Несмотря на то, что схема «зигзаг с нулевым проводом» дает аналогичные результаты, как и схема «звезда с нулевым проводом», детальное сравнение, анализ преимуществ и недостатков этих и аналогичных схем может оказаться перспективным для понимания электромагнитных процессов в электромагнитных аппаратах. Перспективным направлением может быть разработка электромагнитного аппарата, имеющего низкое сопротивление токам обратной последовательности, а также совмещение СЭА и ВДТ.

**Выводы.** 1. Электромагнитный аппарат, содержащий одну трехфазную обмотку на общем магнитопроводе, проявляет эффект симметрирования напряжений и токов при подключении к трехфазной линии электропередачи с нулевым проводом, если конструкция магнитопровода не допускает замыкания магнитного потока нулевой последовательности в его пределах, а схема соединения обмотки содержит нейтральный вывод, соединенный с нулевым проводом сети, по которому могут протекать токи нулевой последовательности. К наиболее распространенным типам таких магнитопроводов относятся плоский и симметричный пространственный трехстержневой магнитопроводы, схемам соединения трехфазной обмотки – «звезда с нулевым проводом» и «зигзаг с нулевым проводом».

2. За счет малого сопротивления нулевой последовательности при подключении СЭА к несимметрично нагруженной линии электропередачи токи в фазах аппарата приобретают составляющую нулевой последовательности, а токи линии выравниваются по величине, что приводит к снижению суммарных потерь в линии.

3. В отличие от последовательно включаемых в линию ВДТ, влияющих на величины напряжения со стороны потребителя, параллельно подключаемые СЭА влияют на напряжения в линии как до, так и после точки его установки. В случае неравномерно распределенной по фазам нагрузки вдоль линии электропередачи СЭА целесообразно размещать ближе к концу линии, в точке подключения наиболее мощного потребителя.

## Литература

1. Абдуллазянов Э.Ю., Кузнецов Р.В., Федотов Е.А. Выбор параметров устройств продольного регулирования напряжения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6, № 11. С. 130–132.
2. А.с. СССР № SU 1206881 А, МПК H02J3/26. Фильтрокомпенсирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом / Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Капличный Н.Н. и др.; Институт электродинамики АН УССР. № 3643941/24-07; заявл. 1983.09.23; опубл. 1986.01.23. Бюл. № 3.
3. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем электроснабжения, оснащенных бустер-трансформаторами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3(47). С. 175–180.
4. Калентионок Е.В. Применение вольтодобавочного трансформатора на участке электрической сети для регулирования напряжения // Энергетика Беларуси – 2022: материалы Республиканской науч.-практ. конф., 25–26 мая 2022 г. Минск: Белорусский нац. техн. ун-т, 2022. С. 12–17.
5. Кузнецов В.А., Роцубкин П.В., Синатулин Р.С. Основные показатели качества электроэнергии. Применение вольтодобавочных трансформаторов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 6. С. 204–207.
6. Пат. РФ № RU 2490768 С2, МПК H02J3/26. Симметрирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом / Наумов И.В., Иванов Д.А., Подъячих С.В., Гантулга Д.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутская государственная сельскохозяйственная академия». № 2010144245/07; заявл. 2010.12.28; опубл. 2013.08.20.
7. Прищепов М.А., Збродыга В.М., Зеленькевич А.И. Снижение несинусоидальности и несимметрии напряжений в сельских электрических сетях применением трехфазных трансформаторов со специальными схемами соединения обмоток. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2023. 292 с.
8. Пузина Е.Ю. Оценка эффективности применения вольтодобавочных трансформаторов в системе электроснабжения Кругобайкальской железной дороги // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 51–60.
9. Способы устранения несоответствия КЭЭ в сетях 0,4 кВ [Электронный ресурс] / ООО «Вологодский завод промышленных стабилизаторов». URL: <https://clck.ru/3Cqoi1>.
10. Трансформатор 3UI1 1000 (3×400/1×230) [Электронный ресурс]. URL: [https://www.mege.ru/catalog/transformatory\\_3ui\\_obedinyayushchie\\_3\\_fazy\\_v\\_1\\_fazu/3ui1\\_1000\\_3kh400\\_1kh230/](https://www.mege.ru/catalog/transformatory_3ui_obedinyayushchie_3_fazy_v_1_fazu/3ui1_1000_3kh400_1kh230/)
11. Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Абдрахманов Р.С. Обеспечение нормативного уровня напряжения в распределительных сетях 0,4–10 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 9–10. С. 40–45.
12. Фетисов Л.В., Рожнецова Н.В., Булатов О.А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. № 11–12. С. 99–106.

---

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

**КАРПОВ ИЛЬЯ АЛЕКСЕЕВИЧ** – аспирант кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (ilya070619997@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9768-9574>).

**СИДОРОВА ВЕРА ТАГИРОВНА** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электромеханики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (veranig@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6534-7847>).

---

Aleksandr I. ORLOV, Ilya A. KARPOV, Vera T. SIDOROVA  
ANALYSIS OF SYMMETRICAL ELECTROMAGNETIC APPARATUS  
FOR THREE-PHASE ZERO-WIRE NETWORKS

**Key words:** voltage divergence, asymmetry, electromagnetic apparatus, balancing device, power losses, 0.4 kV power transmission line, distribution network.

The most common problems of electricity quality in 0.4 kV power transmission lines are voltage deviations and voltage asymmetry, which are clearly manifested at the end sections of long lines with uneven distribution of consumers by phases. The technical means of solving these problems include devices for the uniform distribution of 1-phase consumers across the phases of a 3-phase network based on electromechanical relays, static semiconductor devices and electromagnetic devices.

**The purpose of the article** is to analyze the operation of a symmetrical electromagnetic apparatus consisting of one three-phase winding located on a common magnetic conductor. The scientific novelty consists in determining the operating conditions of a symmetrical electromagnetic apparatus, obtaining qualitative and quantitative characteristics of its operation.

**The materials and methods.** The object of the research is a static electromagnetic apparatus that exhibits properties of voltage and current symmetry when connected to a three-phase unbalanced electric network. The methods of theoretical electrical engineering are used, in particular, the method of symmetric components, including generally accepted methods of analyzing electromagnetic processes in electric machines, methods of mathematical and computer modeling, analysis and generalization. The accepted assumptions are: sinusoidal voltages and currents; the linearity of the magnetization curve of the magnetic core material and the absence of electrical and magnetic losses in the electromagnetic apparatus.

**The results of the study.** It is established that the effect of equalizing currents in the line and voltage symmetry when connecting an electromagnetic device containing one three-phase winding on a common magnetic circuit occurs in the case of simultaneous fulfillment of the conditions: a) the use of a three-phase magnetic circuit in which the zero-sequence magnetic flux cannot be closed in the magnetic circuit; b) connections of transformer windings according to a scheme that allows the flow of zero-sequence currents in linear conductors. The models of the 0.4 kV line with concentrated and distributed load are considered. It is shown that with an asymmetric load, the SEA currents acquire a component of zero sequence, and the linear currents are aligned compared to the load currents. The coefficient of voltage asymmetry of the zero sequence decreases practically to zero, the reverse sequence practically does not change. The effect of voltage symmetry when connecting the SEA occurs both before and after the place of its installation. A decrease in the total losses of electrical energy in the line due to the equalization of currents is demonstrated.

**Conclusions.** An electromagnetic device containing one three-phase winding on a common magnetic circuit has the effect of balancing the voltages and currents of a three-phase power line with a zero wire, if the design of the magnetic wire does not allow the possibility of closing the magnetic flux of zero sequence within its limits, and the winding connection circuit contains a neutral outlet connected to the zero wire of the network, through which zero-sequence currents can flow. The action of the considered electromagnetic apparatus manifests itself in equalizing the line currents in magnitude and, as a result, in reducing the total losses in it. The electromagnetic device symmetrizes the voltages before and after the place of its installation, the greatest effect is manifested when placing the proposed electromagnetic device at the end of the line or at the connection point of the most powerful consumer.

## References

1. Abdullazyanov E.Yu., Kuznetsov R.V., Fedotov E.A. *Vybor parametrov ustroystv prodol'nogo regulirovaniya napryazheniya* [Selection of parameters of longitudinal voltage regulation devices] *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 11, pp. 130–132.
2. Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G., Kaplychnyi N.N. et al. *Fil'trokompensiruyushchee ustroystvo dlya trekhfaznykh setei s nulevym provodom* [Filter compensating device for three-phase networks with zero wire]. C.c. USSR no. SU 1206881 A, 1983.
3. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Modelirovanie sistem elektrosnabzheniya, osnashchennykh buster-transformatorami* [Modeling of power supply systems equipped with booster transformers] *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*. 2015, no. 3 (47), pp. 175–180.
4. Kalentionok E.V. *Primenenie vol'todobavochnogo transformatora na uchastke elektricheskoi seti dlya regulirovaniya napryazheniya* [The use of a booster transformer on a section of the electrical network for voltage regulation]. In: *Energetika Belarusi-2022, materialy Respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 25–26 maya 2022 g. [Proc. Of Sci. Conf. «Energy of Belarus – 2022»]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ., 2022, pp. 12–17.

5. Kuznetsov V.A., Roshchubkin P.V., Singatulin R.S. *Osnovnye pokazateli kachestva elektroenergii. Primenenie vol'todobavochnykh transformatorov* [The main indicators of the quality of electricity. Application of booster transformers]. *Vestnik Belgorodskogo technologicheskogo universiteta imeni V.G. Shukhova*, 2013, no. 6, pp. 204–207.

6. Naumov I.V., Ivanov D.A., Pod'yachikh S.V., Gantulga D. *Simmetriruyushchee ustroystvo dlya trekhfaznykh setei s nulevym provodom* [A balancing device for three-phase networks with a zero wire]. Patent RF, no. RU 2490768 C2, 2010.

7. Prishchepov M.A., Zbrodyga V.M., Zelen'kevich A.I. *Snizhenie nesinusoidal'nosti i nesimmetrii napryazhenii v sel'skikh elektricheskikh setyakh primeneniem trekhfaznykh transformatorov so spetsial'nymi skhemami soedineniya obmotok* [Reduction of non-sinusoidal and voltage asymmetry in rural electric networks by using three-phase transformers with special winding connection schemes]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ., 2023, 292 p.

8. Puzina E.Yu. *Otsenka effektivnosti primeneniya vol'todobavochnykh transformatorov v sisteme elektrosnabzheniya Krugobaikal'skoi zheleznoi dorogi* [Evaluation of the effectiveness of the use of surge transformers in the power supply system of the Krugobaikal Railway]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*, 2023, no. 2(78), pp. 51–60.

9. *Sposoby ustraneniya nesootvetstviya KEE* [Ways to eliminate inconsistencies in the quality of electrical energy]. Available at: <https://clck.ru/3CqoiJ>.

10. *Transformator 3UII 1000 (3×400/1×230) BLOCK Transformatoren* [Transformer 3UII 1000 (3×400/1×230) BLOCK Transformatoren]. Available at: [https://www.mege.ru/catalog/transformatory\\_3uii\\_obedinyayushchie\\_3\\_fazy\\_v\\_1\\_fazu/3uii\\_1000\\_3kh400\\_1kh230](https://www.mege.ru/catalog/transformatory_3uii_obedinyayushchie_3_fazy_v_1_fazu/3uii_1000_3kh400_1kh230).

11. Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Abdрахmanov R.S. *Obespechenie normativnogo urovnya napryazheniya v raspredelitel'nykh setyakh 0,4–10 kV s pomoshch'yu vol'todobavochnykh transformatorov* [Provision of the standard voltage level in distribution networks of 0.4–10 kV with the help of booster transformers]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2011, no. 9-10, pp. 40–45.

12. Fetisov L.V., Rozhentsova N.V., Bulatov O.A. *Povyshenie kachestva elektricheskoi energii v setyakh nizkogo napryazheniya* [Improving the quality of electrical energy in low voltage networks]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2018, no. 11-12, pp. 99–106.

---

**ALEKSANDR 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>).

**IL'YA A. KARPOV** – Post-Graduate Student, Department of Power Supply and Technical Diagnostics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (ilya070619997@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9768-9574>).

**VERA T. SIDOROVA** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Electromechanics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (veranig@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6534-7847>).

---

**Формат цитирования:** Орлов А.И., Карпов И.А., Сидорова В.Т. Анализ симметрирующего электромагнитного аппарата для трехфазных сетей с нулевым проводом // Вестник Чувашского университета. 2024. № 4. С. 84–97. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-84-97.