

УДК 811.111'367/37

ББК 123.34

С.В. ВОЛКОВ, И.Х. ГАРИПОВ, А.И. ОРЛОВ, А.А. САВЕЛЬЕВ

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ ВЫРАВНИВАНИЯ НАГРУЗКИ

Ключевые слова: выравнивание нагрузки, симметрия, симметричные составляющие, коэффициент неравномерности, нулевая последовательность, обратная последовательность, профиль мощности, фильтрация, алгоритм управления.

Работа посвящена совершенствованию алгоритма управления устройством выравнивания нагрузки для электрических сетей 0,4 кВ, находящихся в опытно-промышленной эксплуатации. Действие устройства направлено на выравнивание нагрузки в узловой точке электрической сети, где соединяются несколько 3-фазных отходящих линий, за счет изменения схемы подключения фаз одной из них. Устройство способно реализовывать 6 комбинаций, получаемых круговой перестановкой и изменением чередования фаз. Предложена классификация аналогов устройства по типу подключения к сети. Приведена методика сбора и обработки экспериментальных данных о работе устройства. Анализ первичных данных показывает, что в числе потребителей имеются мощные энергопринимающие устройства с автоматическим двухпозиционным регулированием. В качестве критерия целесообразности того или иного способа подключения фаз отходящей линии к фазам источника принят коэффициент неравномерности проводимостей. Строгое соблюдение условия минимума коэффициента неравномерности невозможно на практике при существующем характере нагрузки из-за необходимости слишком частого срабатывания устройства. Это и другие приведенные в работе ограничения являются причиной систематизации требований к алгоритму управления устройством, одно из которых – необходимость фильтрации исходных данных перед исполнением основного алгоритма. В работе приводится обоснование применения цифрового БИХ-фильтра нижних частот. На основе частотного анализа кривых коэффициентов неравномерности проводимостей выполнено проектирование фильтра и рассчитаны коэффициенты цифровой передаточной функции. Определено разностное уравнение, подходящее для реализации в программе для управляющего микроконтроллера устройства. Разработанный фильтр универсален и подходит для применения в алгоритме управления устройством выравнивания нагрузки любой мощности и при любом типе нагрузки. Приведены результаты моделирования предложенного фильтра на примере экспериментальных данных. Перспективу исследования составляет сбор статистики по различным типам потребителей, анализ практических ситуаций с целью дальнейшего уточнения алгоритма.

Введение. Неравномерность нагрузки по фазам трехфазной электрической сети имеет особое значение в сетях низкого напряжения 0,4 кВ, поскольку является основной причиной отклонений напряжений по фазам, несимметрии напряжения в трехфазной сети. Несимметричное сетевое напряжение отрицательно сказывается на работе трехфазных энергопринимающих устройств потребителей, вызывая дополнительные потери в магнитопроводах электрических машин переменного тока и трансформаторов, понижение перегрузочной способности и перегрев асинхронных двигателей и т.д. Так, зависимости дополнительных потерь энергии в трансформаторе от различных показателей несимметрии напряжения приведены в работе [4]. Несимметрия и отклонение напряжения особенно существенны в сельских электрических сетях.

Существуют следующие подходы к решению проблемы несимметрии напряжения потребителей:

а) вольтодобавка за счет трансформаторов, включенных последовательно с нагрузкой в фазных проводниках;

б) выравнивание падений напряжения на фазных проводниках за счет выравнивания токов в них.

Выравнивание токов может выполняться путем:

– применения статических устройств, силовая часть которых построена по схеме инвертора напряжения;

– переключения части нагрузки с более нагруженной фазы на менее нагруженную.

Преимущества устройств типа (а) состоит в непосредственном воздействии на фазные напряжения нагрузки, благодаря чему действие таких устройств в малой степени зависит от несимметрии напряжения источника. Однако фазные проводники линии при этом могут быть нагружены резко неравномерно. Модель вольтодобавочного корректора напряжения, выполненная в компьютерной программе Matlab, рассмотрена в работе [5].

Применение статических преобразователей (б) способно решить большинство проблем качества электроэнергии, включая несимметрию напряжения, неравномерность нагрузки. Особенность таких устройств заключается в модульном характере тока или напряжения, что является причиной пульсаций на частотах 2–20 кГц, а также неустраняемых рабочих потерь. Распространение подобных устройств ограничивает также их высокая стоимость.

К аналогам относится симметрирующее устройство для трехфазной сети с нейтральным проводом, описанное в работе [1]. Данное устройство содержит в каждой фазе параллельно включенные конденсаторные батареи переменной емкости, соединенные звездой, а также реактор, включенный между нейтральным проводом и нулевой точкой конденсаторов.

В настоящей работе рассматривается устройство, осуществляющее выравнивание нагрузки в узловой точке электрической сети. Расположение устройства показано на рис. 1. Устройство выбирает схему соединения фаз линии 4, подключенной через устройство (УВН), к фазам узловой точки 1 таким образом, чтобы в сочетании с остальной частью нагрузки (на схеме – линии 2 и 3) в узловой точке 1 обеспечивалась максимально равномерная нагрузка по фазам. Устройство способно реализовывать 6 комбинаций, получаемых круговой перестановкой и изменением чередования фаз.

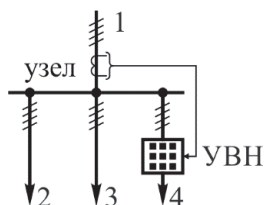


Рис. 1. Расположение устройства выравнивания нагрузки (УВН) относительно узловой точки:
1 – узловая точка; 2 и 3 – отходящие линии;
4 – отходящая линия, подключенная к устройству выравнивания нагрузки

Вопросы разработки алгоритма управления устройством выравнивания нагрузки, границы их применения, результаты анализа показателей несимметрии электрической сети рассмотрены в работах [2, 3] и др.

В настоящее время проводится опытно-промышленная эксплуатация устройства в д. Зубово Семеновского района Нижегородской области (56°51'11" с. ш. 44°07'04" в. д.) в ТП-109 10/0,4 кВ в рамках исполнения договора о выполнении НИОКР по заказу ПАО «МРСК Центра и Приволжья» – филиала «Нижновэнерго». От данной трансформаторной подстанции отходит 4 фидера, устройство подключено к фидеру № 2.

Цель настоящей работы заключается в совершенствовании алгоритма управления устройством на основе экспериментальных данных о его работе. Повсеместное снижение отклонений напряжений у конечных потребителей за счет выравнивания нагрузки по фазам, положительное влияние на энергосистему в целом при использовании простого и надежного устройства выравнивания нагрузки составляют практическую значимость работы. Научная новизна состоит в систематизации требований к алгоритму управления и разработке универсального цифрового фильтра для предварительной обработки входных данных с датчиков в алгоритме управления устройством.

Исходные данные получены эмпирическим путем. Математическая обработка результатов выполнена с применением методов теоретической электротехники, цифровой обработки сигналов, теории автоматического управления. Компьютерное моделирование и визуализация данных проводились авторами с использованием программ на языке Python и открытых библиотек; конечная реализация алгоритмов в микроконтроллере – с использованием свободно распространяемой среды разработки на языке C.

Устройство работает в режиме сбора данных, функционал по автоматическому выравниванию нагрузки временно заблокирован на период уточнения алгоритма управления, настройки параметров. Блок измерения выполняет усреднение мгновенных действующих значений фазных токов на стороне 0,4 кВ за 5 с на вводе ТП, на фидере. Измеренные значения передавались по сети Интернет на сервер, расположенный в г. Йошкар-Ола. Фазные токи совокупности остальных фидеров определялись расчетным путем как разность между фазными токами на вводе и на фидере, где установлено устройство. На рис. 2, а показаны графики действующих значений тока одной фазы на вводе (верхняя линия), тока фидера, подключенного к устройству (нижняя линия), тока остальных фидеров (средняя линия). Графики токов других фаз выглядят аналогично. На интервал 24 часа приходится 17 280 значений каждой кривой. По графикам тока видно, что в составе нагрузки имеется мощное энергопринимающее устройство, возможно, водогрейный котел с двухпозиционным автоматическим регулированием температуры.

В качестве критерия равномерности нагрузки принят коэффициент неравномерности проводимостей

$$k_{\text{нр}} = 3 \cdot (G_a^2 + G_b^2 + G_c^2) / (G_a + G_b + G_c)^2,$$

где $G = I / U$ – модуль проводимости.

Коэффициент $k_{\text{нер}}$ может принимать значения от 1 при равномерной нагрузке до 3 при неравномерной нагрузке.

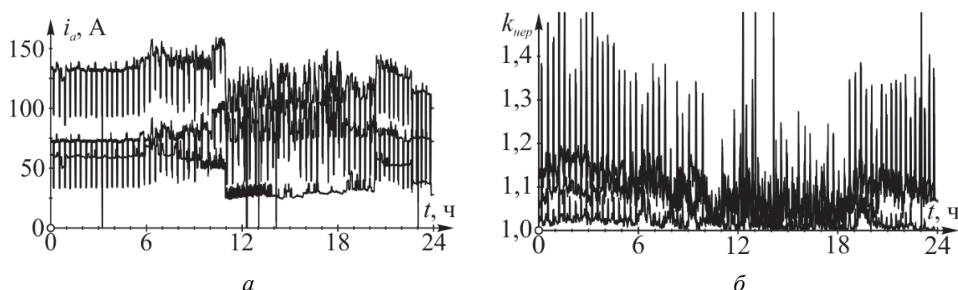


Рис. 2. Действующие значения тока одной фазы (а): верхняя кривая – ввод ТП, средняя – совокупность нагрузки остальных отходящих линий, нижняя – фидер, подключенный к устройству; коэффициент неравномерности (б)

Результаты. На рис. 2, б показаны три графика коэффициентов неравномерности $k_{\text{нер.1}}-k_{\text{нер.3}}$ от времени, соответствующие трем круговым перестановкам фаз фидера (а, б, с), подключенного к устройству выравнивания нагрузки, относительно фаз источника (А, В, С). Броски кривых коэффициентов неравномерности связаны с изменениями нагрузки по фазам фидеров ТП. Наиболее выгодное соединение фаз фидера с фазами источника соответствует минимальному коэффициенту неравномерности. В соответствии с графиком в течение суток многократно возникает необходимость круговой перестановки с целью снижения коэффициента неравномерности. Однако строгое соблюдение условия минимума коэффициента неравномерности невозможно, так как привело бы к слишком частым переключениям, которые создают опасность коммутационных перенапряжений и отрицательно влияют на энергопринимающие устройства потребителей. В связи с этим необходима разработка алгоритма управления устройством выравнивания нагрузки, удовлетворяющего следующим требованиям:

а) обеспечение выравнивания нагрузки, характеризуемое минимумом коэффициента неравномерности, и снижение связанных с этим потерь;

б) безопасность коммутаций для потребителей: сохранение текущего чередования фаз; минимизация опасности коммутационных перенапряжений для энергопринимающих устройств потребителей;

в) незаметность для потребителей при выполнении коммутаций.

Для выполнения условия (б) необходимо отказаться от изменения чередования фаз. Допустимыми остаются 3 комбинации, получаемые круговой перестановкой относительно исходной. К возможным путям исполнения условия (в) можно отнести сокращение бестоковой паузы и выполнение переключений в ночное время. На решения о переключениях не должны влиять броски нагрузки. Кроме того, важно иметь возможность простого визуального контроля за работой устройства. Соблюдение указанной совокупности факторов позволяет обеспечить сглаживание (фильтрация) исходных значений коэффициентов неравномерности.

На рис. 3, а показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) зависимости коэффициента неравномерности от времени $k_{\text{нер.1}}$, показанная на рис. 3, б при прямом подключении фаз фидера, отходящего от устройства, к фазам источника. Для дискретного преобразования Фурье взят интервал значений 24 ч, поэтому на АЧХ 24-я гармоника имеет период 1 ч. В результате анализа коэффициента неравномерности $k_{\text{нер.1}}$ во временной и частотной областях видно, что частые ступенчатые изменения тока во времени, соответствующие включению и отключению мощной нагрузки, отображаются в частотной области в виде гармоник, кратных 72 с периодом 1/3 ч. Эти изменения коэффициента $k_{\text{нер}}$ не должны влиять на работу устройства выравнивания нагрузки, поэтому гармоники с периодом выше 1-2 ч должны находиться в области подавления фильтра.

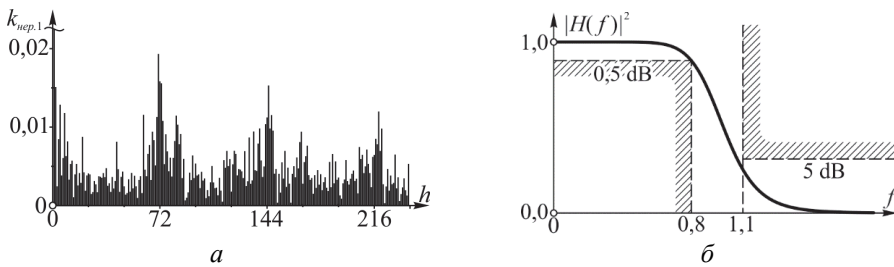


Рис. 3. АЧХ кривой коэффициента неравномерности (а); АЧХ фильтра нижних частот (б)

Алгоритм управления реализуется в устройстве в виде программы для микроконтроллера, который обладает ограниченной скоростью работы и объемом доступной памяти, в связи с этим алгоритм управления должен быть нетребователен к вычислительным ресурсам. Для реализации в устройстве целесообразно применить цифровой БИХ-фильтр нижних частот Баттерворта [6] со следующими параметрами: частота следования значений $f_s = 720 \text{ ч}^{-1}$, частота пропускания $f_{\text{pass}} = 0,8 \text{ ч}^{-1}$, частота подавления $f_{\text{stop}} = 1,1 \text{ ч}^{-1}$, максимальное подавление в полосе пропускания $A_{\text{pass}} = 0,5 \text{ dB}$, минимальное подавление в полосе подавления $A_{\text{stop}} = 5 \text{ dB}$. Данный тип фильтра прост в реализации, требует незначительное количество памяти и вычислительных ресурсов.

Величины, характеризующие глубину полос пропускания и подавления:

$$\varepsilon_{\text{pass}} = \sqrt{10^{A_{\text{pass}}/10} - 1} = 0,3493 \text{ и } \varepsilon_{\text{stop}} = \sqrt{10^{A_{\text{stop}}/10} - 1} = 1,4705 .$$

Нормализованные частоты, рассчитываемые в зависимости от частоты f как $\text{tg}(\pi \cdot f / f_s) : \Omega_{\text{pass}} = 3,4907 \cdot 10^{-3}$ и $\Omega_{\text{stop}} = 4,7997 \cdot 10^{-3}$. Порядок фильтра

$$N = \left\lceil \frac{\ln(\varepsilon_{\text{stop}} / \varepsilon_{\text{pass}})}{\ln(\Omega_{\text{stop}} / \Omega_{\text{pass}})} \right\rceil = \lceil 4,5135 \rceil = 5 .$$

Частоты среза Ω_0 и f_0 , соответствующие амплитуде $|H(\Omega)|^2 = 0,5$ или 3 dB:

$$\Omega_0 = \frac{\Omega_{\text{pass}}}{(10^{A_{\text{pass}}/10} - 1)^{\frac{1}{2 \cdot N}}} = 4,3079 \cdot 10^{-3} \text{ и } f_0 = \frac{f_s}{\pi} \arctg(\Omega_0) = 0,9873 .$$

АЧХ аналогового прототипа рассматриваемого фильтра в абсолютных единицах и децибелах, описываемая выражениями

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\operatorname{tg}(\pi \cdot f / f_s)}{\Omega_0} \right)^{2 \cdot N}} \quad \text{и} \quad A(f) = -10 \log_{10} |H(\Omega)|^2,$$

изображена на рис. 2, б.

Передаточная функция аналогового прототипа в общем виде

$$H(s) = H_0(s) \cdot H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot \dots \cdot H_K(s) = \frac{1}{1 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + \dots + a_N \cdot s^N},$$

где $H_0(s) = 1 / (1 + s/\Omega_0)$ при нечетных $N = 2 \cdot K + 1$, K – целое, или $H_0(s) = 1$ при четных N . Остальные множители $H_i(s) = 1 / (1 - 2 \cdot s/\Omega_0 \cdot \cos\theta_i + s^2/\Omega_0^2)$, $\theta_i = \pi \cdot (N - 1 + 2i) / (2N)$, $i = 1, 2, \dots, K$. В рассматриваемом случае $K = 2$. Коэффициенты a_i знаменателя передаточной функции аналогового фильтра-прототипа представлены в таблице.

Коэффициенты передаточной функции

i	$H(s): a_i$	$H(z): b_i$	$H(z): a_i$
0	1	$1,4631 \cdot 10^{-12}$	1,0
1	751	$7,3156 \cdot 10^{-12}$	-4,9721
2	282145	$1,4631 \cdot 10^{-11}$	9,8889
3	65494608	$1,4631 \cdot 10^{-11}$	-9,8339
4	9396180152	$7,3156 \cdot 10^{-12}$	4,8896
5	674011216242	$1,4631 \cdot 10^{-12}$	-0,9725

Дискретная передаточная функция

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z + b_2 \cdot z^2 + \dots + b_N \cdot z^N}{1 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2 + \dots + a_N \cdot z^N}$$

получена по аналоговому прототипу с помощью билинейного преобразования

$$s \rightarrow \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}},$$

коэффициенты b_i и a_i приведены в табл. 1.

Разностное уравнение полученного цифрового фильтра:

$$y(i) = \sum_{j=0}^N \frac{b_j}{a_0} x(i-j) - \sum_{j=1}^N \frac{a_j}{a_0} y(i-j),$$

где x – входные значения; y – значения на выходе фильтра.

Результат работы предложенного фильтра приведен на рис. 4. На рис. 4, а показано отфильтрованное значение коэффициента неравномерности $k_{\text{нер.1.ф}}$ на фоне реальных значений. Заметно отставание по фазе отфильтрованных значений от фактических на 1 ч, что является приемлемым в рассматриваемом случае. На рис. 4, б показаны значения коэффициентов неравномерности $k_{\text{нер.1.ф}} - k_{\text{нер.3.ф}}$, соответствующие трем круговым перестановкам фаз фидера, подключенного к устройству выравнивания нагрузки, относительно фаз источника (ввода ТП).

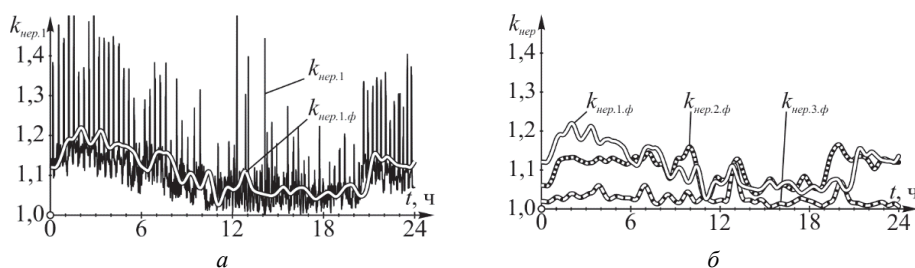


Рис. 4. Кривая коэффициента неравномерности до $k_{нep.1}$ и после $k_{нep.1.ф}$ фильтрации (а); результат фильтрации кривых коэффициентов неравномерности $k_{нep.1.ф}$ – $k_{нep.3.ф}$ (б)

Кривые коэффициентов $k_{нep.1.ф}$ – $k_{нep.3.ф}$, полученные в результате фильтрации, упрощают анализ неравномерности нагрузки и позволяют оценивать необходимость коммутаций. Разработанный фильтр универсален и подходит для применения в алгоритме управления устройством выравнивания нагрузки любой мощности и типа нагрузки.

Результат фильтрации коэффициентов неравномерности можно непосредственно использовать в алгоритме управления устройством. Целесообразно выбрать номер комбинации, соответствующий минимуму суммы коэффициентов неравномерности за сутки. В рассматриваемом примере кривая $k_{нep.3.ф}$ дает минимальную сумму коэффициентов в течение суток, поэтому целесообразно применить комбинацию № 3: A – c , B – a , C – b .

Перспективу исследования составляют сбор статистики по различным типам потребителей, анализ практических ситуаций и уточнение алгоритма.

Выводы. 1. На основе экспериментальных данных получены кривые изменения коэффициентов неравномерности нагрузки при всех допустимых комбинациях соединения фаз нагрузки с фазами источника. Установлено, что высокая частота изменения коэффициента неравномерности нагрузки не позволяет непосредственно применить условие минимизации этой величины в алгоритме управления устройством выравнивания нагрузки.

2. Сформулированы требования к алгоритму выравнивания нагрузки, основанного на минимизации коэффициента неравномерности нагрузки на вводе:

- допустимо применение трех комбинаций соединения фаз фидера, подключенного к устройству, к фазам источника (ввода ТП), получаемых круговой перестановкой без изменения чередования фаз;
- переключения допустимы лишь в ночное время;
- необходима фильтрация кривых коэффициентов неравномерности нагрузки;
- номер комбинации, применяемый устройством, должен соответствовать минимуму суммы коэффициентов неравномерности за сутки.

3. Установлено, что в качестве алгоритма цифровой фильтрации целесообразно применить БИХ-фильтр по причине нетребовательности к ресурсам ЭВМ. Определены коэффициенты и соответствующее разностное уравнение фильтра для реализации на ЭВМ.

Литература

1. Дулепов Д.Е., Дулепова Ю.М., Кондраненкова Т.Е. Результаты лабораторных исследований регулируемого симметрирующего устройства для трехфазной сети с нейтральным проводом // Вестник НГИЭИ. 2019. № 8(99). С. 44–54.
2. Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Алгоритмы управления трехфазным устройством выравнивания нагрузки электрической сети // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 162–172.
3. Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Анализ влияния устройства выравнивания нагрузки на показатели несимметрии электрической сети // Вестник Чувашского университета. 2016. № 3. С. 100–108.
4. Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Снижение потерь в трехфазных трансформаторах при выравнивании несимметричной нагрузки // Вестник Чувашского университета. 2018. № 1. С. 52–60.
5. Сугаков В.Г., Варламов Н.С., Малышев Ю.С. Вольтодобавочный корректор напряжения с использованием эталонной формы напряжения // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10, № 6. С. 1264–1276. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1264-1276.
6. *Sophocles J. Orfanidis* Introduction To Signal Processing. Available at: <https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/intro2sp/orfanidis-i2sp.pdf>.

ВОЛКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – кандидат технических наук, доцент, декан электроэнергетического факультета, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (svedin2011@mail.ru).

ГАРИПОВ ИЛЬСУР ХАЛИЛЕВИЧ – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (ilsur@bk.ru).

ОРЛОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электромеханики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (karlorlov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

САВЕЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ – ведущий инженер управления технологического развития и цифровизации, Филиал ПАО «МРСК Центра и Приволжья» – «Маринерго», Россия, Йошкар-Ола (savelich94@gmail.com).

Sergei V. VOLKOV, Ilсур Kh. GARIPOV,
Aleksandr I. ORLOV, Aleksei A. SAVELIEV

DEVELOPMENT OF A CONTROL ALGORITHM
DEVICE LOAD BALANCING DEVICE

Key words: load balancing, symmetry, symmetrical components, unevenness factor, zero sequence, reverse sequence, power profile, filtering, control algorithm.

The work is devoted to improving the control algorithm of the load balancing device for 0.4 kV electrical mains that are in pilot operation. The action of the device is aimed at balancing the load at the nodal point of the electrical network, where several 3-phase outgoing lines are connected, by changing the connection diagram of the phases of one of them. The device is capable of realizing 6 combinations obtained by circular permutation and changing the phase rotation. The classification of analogs of the device according to the type of connection to the network is proposed. The technique of collection and processing of experimental data on the operation of the device is presented. Analysis of primary data shows that among the consumers there are powerful energy receivers with automatic two-position control. As a criterion for the expediency of one or another method of connecting the phases of the outgoing line to the phases of the source, the coefficient of non-uniformity of conductivities is taken. Strict observance of the condition of the minimum coefficient of unevenness is impossible in practice with the existing nature of the load due to the need for too frequent operation of the device. This and other

limitations given in the work are the reason for the systematization of requirements for the device control algorithm, one of which is the need to filter the initial data before executing the main algorithm. The paper provides a rationale for the use of a digital IIR low-pass filter. Based on the frequency analysis of the curves of the conductivity unevenness coefficients, the filter design was carried out and the digital transfer function coefficients were calculated. A difference equation is determined that is suitable for implementation in the program for the control microcontroller of the device. The developed filter is universal and suitable for use in the control algorithm of a load balancing device of any power and for any type of load. The results of modeling the proposed filter are presented using the example of experimental data. The prospect of the research is the collection of statistics on various types of consumers, analysis of practical situations, in order to further refine the algorithm.

References

1. Dulepov D.E., Dulepova Yu.M., Kondranenkova T.E. *Rezultaty laboratornykh issledovaniy reguliruemogo simmetriruyushchego ustroystva dlya trekhfaznoi seti s neitral'nym provodom* [Results of laboratory studies of an adjustable balancing device for a three-phase network with a neutral wire] *Bulletin NGII*, 2019, no. 8(99), pp. 44–54.
2. Orlov A.I., Volkov S.V., Savel'ev A.A. *Algoritmy upravleniya trekhfaznym ustroystvom vyravnivaniya nagruzki elektricheskoi seti* [Control algorithms for a three-phase power load balancing device]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2017, no. 1, pp. 162–172.
3. Orlov A.I., Volkov S.V., Savel'ev A.A. *Analiz vliyaniya ustroystva vyravnivaniya nagruzki na pokazateli nesimmetrii elektricheskoi seti* [Analysis of the influence of the load balancing device on the unbalance indicators of the electrical network]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2016, no. 3, pp. 100–108.
4. Orlov A.I., Volkov S.V., Savel'ev A.A. *Snizhenie poter' v trekhfaznykh transformatorakh pri vyravnivanii nesimmetrichnoi nagruzki* [Reduction of losses in three-phase transformers when balancing unbalanced loads]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2018, no. 1, pp. 52–60.
5. Sugakov V.G., Varlamov N.S., Malyshev Yu.S. *Vol'todobavochnyi korrektor napryazheniya s ispol'zovaniem etalonnogo formy napryazheniya* [Voltage supplementary voltage corrector using the reference form of voltage]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2018, vol. 10, no. 6, pp. 1264–1276. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1264-1276.
6. Sophocles J. *Orfanidis Introduction To Signal Processing*. Available at: <https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/intro2sp/orfanidis-i2sp.pdf>.

SERGEI V. VOLKOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Electroenergy Faculty, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (svedin2011@mail.ru).

ILSUR Kh. GARIPOV – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Power Supply and Technical Diagnostics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (ilsur@bk.ru).

ALEKSANDR I. ORLOV – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Electromechanics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (karlorlov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

ALEKSEI A. SAVELIEV – Leading Engineer of Technological Development and Digitalization Department, Branch of IDGC of Center and Volga Region, PJSC – Marienergo, Russia, Yoshkar-Ola (savelich94@gmail.com).

Формат цитирования: Волков С.В., Гарипов И.Х., Орлов А.И., Савельев А.А. Разработка алгоритма управления устройством выравнивания нагрузки // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 1. – С. 47–55. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-47-55.