ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.311
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-115-126

Качество электрической энергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения Республики Камерун

***И.В. Наумов*[1]✉, *Н.Н.Б. Жосселин*[2], *И.В. Ямщикова*[3]**

[1, 2] Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского; г. Иркутск, Россия

[3] Иркутский национальный исследовательский технический университет; г. Иркутск, Россия

[1] professornaumov@list.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-4767-0127

[2] dimitryntsama8@gmail.com

[3] yamsirina@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6183-3255

Аннотация. Распределительные электрические сети низкого напряжения характеризуются несбалансированным электропотреблением, обусловленным несимметрично-несинусоидальными режимами работы, что приводит к ухудшению качества электрической энергии, росту дополнительных потерь активной мощности и электрической энергии (ЭЭ). Измерения и расчеты несбалансированных режимов осуществлены в распределительных электрических сетях низкого напряжения Республики Камерун города Дуала в связи с отсутствием в республике исследований несбалансированных режимов. В статье использованы методы теории электрических цепей, имитационного и численного анализа, а также технологии MATLAB и Excel. Произведена модернизация существующего специализированного балансирующего устройства (БУ) и предложено новое техническое средство балансирования, имитационная модель которого исследована в программном комплексе MATLAB/Simulink. Основой предлагаемого устройства является микроконтроллер, управляющий потоками симметричных составляющих основной частоты напряжения электропитания и дополнительными потоками, обусловленными гармоническими искажениями. На основе измерений параметров электрической энергии в действующих электрических сетях низкого напряжения г. Дуала рассчитаны показатели небаланса при отсутствии разработанной модели БУ и при имитационном моделировании интеграции этого устройства в исследуемую электрическую сеть. Показано, что в этой сети показатель качества ЭЭ по дополнительной прямой последовательности от гармонических искажений превышает допустимое значение в 2,6 раза, а показатель, характеризующий дополнительные потери мощности, – почти в 3 раза. Установлено, что при имитационном подключении балансирующего устройства качество электрической энергии повышается более чем на 97%, а ее потери снижаются на 65%. Годовая экономия при имитационном внедрении БУ в исследуемой сети может достигать более $378852. Полученные результаты могут представлять интерес для руководства сетевой компании г. Дуала, а также научных работников, занимающихся исследованиями в области качества ЭЭ.

Ключевые слова: показатели небаланса; небаланс; несинусоидальность; электропотребление; качество электрической энергии; балансирующее устройство

Благодарности. Авторы выражают признательность руководству Центральных районных электрических сетей г. Дуала за предоставленные данные измерений параметров электрической энергии в действующих электрических сетях низкого напряжения.

Для цитирования: Наумов И.В., Жосселин Н.Н.Б., Ямщикова И.В. Качество электрической энергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения Республики Камерун // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 115-126. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-115-126

© Наумов И.В., Жосселин Н.Н.Б., Ямщикова И.В., 2026

ORIGINAL ARTICLE

Power quality assessment and mitigation of unbalanced loads in low-voltage distribution grids: Case study of Douala, Cameroon

***I.V. Naumov*[1]✉, *N.N.B. Josselin*[2], *I.V. Yamshchikova*[3]**

[1,2] Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Yezhevsky; Irkutsk, Russia

[3] Irkutsk National Research Technical University; Irkutsk, Russia

[1] professornaumov@list.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-4767-0127

[2] dimitryntsama8@gmail.com

[3] yamsirina@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6183-3255

Abstract. Low-voltage distribution grids are highly susceptible to load unbalance caused by asymmetric and non-sinusoidal operating conditions. This unbalance degrades power quality and significantly increases active power and energy losses. To address the critical lack of empirical research on load unbalance in the region, the authors conducted field measurements and calculations in the operational low-voltage power distribution grids of Douala, Republic of Cameroon. This study employs electrical circuit theory, simulation, and numerical analysis, using MATLAB/Simulink and Excel spreadsheet-based modeling. A novel technical balancing device (BD) was developed by upgrading an existing design, and its performance was investigated using a MATLAB/Simulink simulation model. The proposed BD features a microcontroller-based control system that regulates the symmetrical components of the fundamental supply voltage and mitigates harmonic distortion. Based on power parameters measured in the operational low-voltage distribution grids of Douala, the authors evaluated load unbalance indicators for both the baseline scenario (without the proposed balancing device) and the simulated integration of this device into the grid. Baseline analysis revealed that the positive-sequence harmonic distortion exceeded permissible power quality limits by a factor of 2.6, while additional power losses were nearly threefold higher than standard levels. Conversely, the simulated integration of the proposed BD improved power quality indices by over 97% and reduced active power losses by 65%. Economic analysis indicates that implementing this control system could yield annual savings exceeding $378,852. The findings provide valuable practical insights for local utility operators in Douala and contribute to the broader research on power quality optimization in developing distribution networks

Keywords: load unbalance indicators; load unbalance; anharmonicity (harmonic distortion); power consumption; power quality; balancing device

Acknowledgments. The authors gratefully acknowledge the management of the Central District Electric Networks of Douala for providing the field measurement data on operational low-voltage distribution grids.

For citation: Naumov I.V., Josselin N.N.B., Yamshchikova I.V. Power quality assessment and mitigation of unbalanced loads in low-voltage distribution grids: Case study of Douala, Cameroon. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):115-126. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-115-126

Введение

Производство электрической энергии (ЭЭ) в мире растет в соответствии с ростом ее потребления. По данным 2024 г., лидерами по производству ЭЭ являются: Китай – 10161,50 ТВт·ч. (+7,15% к 2023 г.); США – 4392,55 ТВт·ч (+3,19%); Индия – 2051,78 ТВт·ч. (+3,49%).

В Республике Камерун производство ЭЭ на конец 2024 г. достигло 7,269 ТВт·ч (0,024% мирового производства ЭЭ), производство ЭЭ на душу населения составило 2,49 МВт/чел[1].

Производство ЭЭ в Республике осуществляется достаточно интенсивными темпами. Рынок электроэнергии вступает в фазу высоких темпов роста, обусловленных индустриализацией и электрификацией, что определяется наличием гибкой генерации и устойчивостью к климатическим рискам.

По уровню потребления ЭЭ[2] Республика занимает 126-е место в мире. На конец 2024 г. этот показатель составил 5,5291 ТВт·ч, что на 9,51% выше, чем в 2023 г. Основным потребителем ЭЭ в Республике является промышленность (60%). Домохозяйства

[1] Statbase. Навигатор данных. Производство электроэнергии. Камерун. [Электронный ресурс]. URL: https://statbase.org/data/cmr-electricity-generation/ (дата обращения: 19.05.2026).

[2] Statbase. Навигатор данных. Потребление электроэнергии. Камерун. [Электронный ресурс]. URL: https://statbase.ru/data/cmr-electricity-consumption/ (дата обращения: 20.05.2026).

потребляют до 20% произведенной ЭЭ, сфера услуг – 8%, сельское хозяйство – 1% (прочее – 11%). Домашние хозяйства и сельские населенные пункты нуждаются в повышении уровня электрификации [1].

Режимы нарушения качества ЭЭ, обусловленные несимметрично-несинусоидальным электропотреблением, происходят в низковольтных, многоамперных компонентах систем электроснабжения – в наиболее протяженном сегменте энергетических систем [2, 3]. Наряду с массовым подключением однофазных потребителей, распределенных случайным образом [4], использование фотоэлектрических панелей и зарядных станций для электромобилей усугубляет нарушения уровней напряжения и профили дисбаланса [5-7]. Несбалансированность конфигурации приводит к динамической и структурной нестабильности [8-10]: значительным падениям напряжения [11, 12], увеличению потерь активной мощности (ΔP) в элементах ЭС (линиях и силовых трансформаторах). При этом протекание токов нулевой последовательности вызывает чрезмерный нагрев нейтрального проводника, повышая риск возгораний [13, 14], в то время как токи обратной последовательности ускоряют преждевременное старение изоляции асинхронных двигателей [15].

Поиск публикаций по исследованию качества электрической энергии электрических сетей Камеруна не привел к результатам. Вместе с тем в статье J.G. Tamba [16] отмечается, что только 20% населения имеют доступ к национальной электрической сети. Помимо этого, в силу изношенности электрических сетей часто имеют место продолжительные аварийные отключения ЭЭ[3]. В работе M.M. Inoussah [17] определены средние значения энергетической эффективности для электростанций, работающих на сжиженном мазуте, мазуте, биотопливе и газе. Средние показатели устойчивости варьируются от 1,56 для электростанций, работающих на сжиженном мазуте, до 2,12 для электростанций, работающих на биотопливе. В статье Pendieu Kwaye [18] оценивается потенциал возобновляемых источников ЭЭ Республики. Утверждается, что при средней солнечной радиации по стране 4,9 кВт·ч/м^2/день и средней скорости ветра 6 м/с использование солнечной и ветровой энергии будет способствовать развитию Камеруна и всего Центральноафриканского региона. В статье Konchou [19] отмечается, что замена устаревших и неэффективных устройств электропотребления на современные эффективные устройства может повысить устойчивость жилищного сектора. Аналогично в работе Talla [20] установлено, что энергоэффективность жилого сектора Камеруна выше, чем в Саудовской Аравии и Норвегии, но ниже, чем в Малайзии и Турции. При этом полученные в ходе исследований значения энергетической и эксергетической эффективности (58,74 и 22,63% соответственно) могут быть использованы в качестве основы для расчета анализа затрат при реализации новых возобновляемых источников для производства в Камеруне. В исследовании Ngousssandou [21] экспериментально определен уровень искажений, вызванный гармоническими искажениями, и в результате установлено, что стоимость электроэнергии может быть снижена с $0,097/кВт·ч до $0,085 /кВт·ч, при этом общий экономический эффект достигает $0,54 млн. В работе Onanena [22] предлагается использовать метод «loop-back» (обратной связи) для учета узлов с большими падениями напряжения и сетевых ограничений, улучшения плана напряжения в сети, разгрузке трансформаторов, снижения потерь мощности и оптимизации теплового режима.

Анализируя источники литературы, можно сделать вывод об актуальности минимизации последствий несимметрично-несинусоидального электропотребления и малой изученности этой проблемы в электрических сетях Камеруна.

Цель исследований: анализ качества ЭЭ в действующих электрических сетях Республики Камерун.

Материалы и методы

Исследования качества электроэнергии осуществлялись в марте 2025 г. на шинах четырех силовых трансформаторов 0,4 кВ, питающих различные потребители. Электрическая распределительная сеть Дуалы питается от опорной подстанции LOGBABA (90/30/10 кВ, 2×36 МВА + 2×20 МВА), управляемой концессионной компанией ENEO Cameroun. Четыре исследуемые зоны получают питание от четырех отдельных фидеров СН: 10 кВ этой подстанции.

На основе существующей модели специализированного балансирующего устройства (БУ) предложено новое техническое средство, имитационная модель которого разработана в программном комплексе MATLAB Simulink. Основой предлагаемого устройства является современный микроконтроллер, управляющий потоками симметричных составляющих основной частоты напряжения электропитания и дополнительными потоками, обусловленными гармоническими искажениями. На основе реальных измерений параметров электрической энергии

[3] Больше половины Камеруна осталось без электроэнергии. [Электронный ресурс]. URL: https://dzen.ru/a/ZxTopXI3kiEDnauP (дата обращения: 20.05.2026).

в действующих электрических сетях низкого напряжения г. Дуала в Камеруне произведен расчет показателей небаланса при отсутствии разработанной модели балансирующего устройства и при имитационном моделировании интеграции этого устройства в исследуемую электрическую сеть.

Результаты и их обсуждение

Несбалансированные режимы работы электрических сетей обусловлены несимметрично-несинусоидальным электропотреблением. Стандартами разных стран, регламентирующими нормы качества ЭЭ, устанавливаются значения показателей, характеризующих несимметрию и несинусоидальность трехфазной системы напряжения[4-5]. Вместе с тем современные электроприемники в процессе электропотребления обусловливают возникновение несбалансированных режимов, объединяющих показатели качества действующего значения фундаментальной частоты напряжения электропитания (50…60 Гц), и показатели, характеризуемые воздействием напряжений гармонических компонентов, кратных основной частоте. Характеристика несбалансированных режимов представлена в работах [23-25], в соответствии с которыми определены следующие показатели небаланса [25]:

– коэффициенты небаланса напряжения по прямой, обратной и нулевой последовательностям:

$$K_{1UNB}=\frac{\left(\sum_4^{13}U_{APS}\right)}{U_1}\cdot 100\%;\ K_{2UNB}=\frac{\left(U_2+\sum_2^{11}U_{ANS}\right)}{U_1}\cdot 100\%;$$

$$K_{0UNB}=\frac{\left(U_0+\sum_3^{15}U_{AZS}\right)}{U_1}\cdot 100\%; \quad (1)$$

– суммарный коэффициент небаланса напряжения:

$$K_{UNB}=\frac{\sqrt{\left\{(U_2)^2+(U_0)^2\right\}+\sum_4^{40}(U_{APS})^2+\sum_2^{38}(U_{ANS})^2+\sum_3^{39}(U_{AZS})^2}}{U_1}\times$$

$$\times 100\%; \quad (2)$$

– коэффициент потерь мощности:

$$K_{P(HPP)}=1+(K_{APS})^2+K_{2i}^2+(K_{ANS})^2+\left\{K_{0i}^2+(K_{AZS})^2\right\}\cdot K_R. \quad (3)$$

В выражениях (1-3): $K_{2i}=\frac{I_2}{I_1}$, $K_{0i}=\frac{I_0}{I_1}$ – коэффициенты, обусловленные протеканием токов обратной и нулевой последовательностей основной частоты, определяемых либо по показаниям средств измерения, либо расчетным путем в соответствии с данными монографии Ф.Д. Косоухова[6]: $K_R = r_0 / r_1$ – коэффициент активного сопротивления ЛЭП; $r_1 = r_Ф$ – активное сопротивление прямой последовательности, равное фазному сопротивлению линии электропередачи; $r_0 = r_Ф + 3r_N$ – активное сопротивление нулевой последовательности; r_N – активное сопротивление нейтрального проводника; $K_{APS} = K_{I(4)} + K_{I(7)} + K_{I(13)}$ – суммарный коэффициент дополнительных гармоник напряжения электропитания по прямой последовательности[7]; $K_{ANS} = K_{I(2)} + K_{I(5)} + K_{I(11)}$ – суммарный коэффициент дополнительных гармоник напряжения электропитания по обратной последовательности[8]; $K_{AZS} = K_{I(3)} + K_{I(9)} + K_{I(15)}$ – суммарный коэффициент дополнительных гармоник напряжения электропитания по нулевой последовательности[9,10].

Многолетние исследования несимметрично-несинусоидальных режимов позволили установить, что наиболее эффективным средством повышения качества и снижения потерь мощности и энергии является использование специализированных, симметрирующих, фильтрокомпенсирующих и балансирующих устройств [25]. Для минимизации последствий несимметрично-несинусоидального электропотребления разработано устройство[11], параметры которого (комплексные проводимости прямой, обратной

[4] ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: введ. 2014.07.01. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200104301 (дата обращения: 20.05.2026).

[5] Standard for Power Quality and Reliability in Electric Power Systems. [Electronic resource]. URL: https://urcabahamas.bs/wp-content/uploads/2023/09/URCA-ES-06_2023-Standard-for-Power-Quality-and-Reliability-in-Electric-Power-Systems-Consultation-Document.pdf (дата обращения: 16.04.2026).

[6] Косоухов Ф.Д., Криштопа Н.Ю., Горбунов А.О. Критерии потерь мощности от несимметричных, несинусоидальных и реактивных токов в трехфазных трансформаторах и четырехпроводных линиях в низковольтных электрических сетях: Монография. Санкт-Петербург: Летопись, 2025. 180 с.

[7] APS – additional positive sequence – дополнительная прямая последовательность.

[8] ANS – additional negative sequence – дополнительная прямая последовательность.

[9] AZS – additional zero sequence – дополнительная нулевая последовательность.

[10] Стандарты на качество ЭЭ регламентируют учитывать гармонические составляющие до 40-го порядка включительно. Многочисленными измерениями, произведенными в действующих электрических сетях, установлено, что наибольшие значения имеют именно указанные составляющие по прямой, обратной и нулевой последовательностям.

[11] Наумов И.В., Подъячих С.В., Ермолаев Д.С. Комплектное балансирующее устройство для четырехпроводных электрических сетей: Патент на изобретение (19) RU (11) 2860456(13) C1. Опубл. 21.04.2026; Бюл. № 12.

и нулевой последовательностей) в соответствии с методом, представленным в работе [25], определяются выражениями:

$$\underline{Y}_{1\text{БУНРР}}\left(\left\{\underline{U}_1+\sum_4^{40}\underline{U}_{APS}\right\},\left\{\underline{I}_1+\sum_4^{40}\underline{I}_{APS}\right\},t_0,\overline{t_i}\right)=$$
$$=\frac{1}{14{,}1428\cdot\left(\overline{t_i}-t_0\right)}\cdot\int_{t_0}^{\overline{t_i}}\frac{\left\{\underline{I}_1+\sum_4^{40}\underline{I}_{APS}\right\}(t)}{\left\{\underline{U}_1+\sum_4^{40}\underline{U}_{APS}\right\}(t)}dt;$$

$$\underline{Y}_{2\text{БУНРР}}\left(\left\{\underline{U}_2+\sum_2^{38}\underline{U}_{ANS}\right\},\left\{\underline{I}_2+\sum_2^{38}\underline{I}_{ANS}\right\},t_0,\overline{t_i}\right)=$$
$$=\frac{1}{14{,}1428\cdot\left(\overline{t_i}-t_0\right)}\cdot\int_{t_0}^{\overline{t_i}}\frac{\left\{\underline{I}_2+\sum_2^{38}\underline{I}_{ANS}\right\}(t)}{\left\{\underline{U}_1+\sum_2^{38}\underline{U}_{ANS}\right\}(t)}dt; \quad (4)$$

$$\underline{Y}_{0\text{БУНРР}}\left(\left\{\underline{U}_0+\sum_3^{39}\underline{U}_{AZS}\right\},\left\{\underline{I}_0+\sum_3^{39}\underline{I}_{AZS}\right\},t_0,\overline{t_i}\right)=$$
$$=\frac{6}{\left(\overline{t_i}-t_0\right)}\cdot\int_{t_0}^{\overline{t_i}}\frac{\left\{\underline{I}_0+\sum_3^{39}\underline{I}_{AZS}\right\}(t)}{\left\{\underline{U}_0+\sum_3^{39}\underline{U}_{AZS}\right\}(t)}dt$$

где $\sum_4^{40}\underline{I}_{APS}$, $\sum_2^{38}\underline{I}_{ANS}$, $\sum_3^{39}\underline{I}_{AZS}$ и $\sum_4^{40}\underline{U}_{APS}$, $\sum_2^{38}\underline{U}_{ANS}$, $\sum_3^{39}\underline{U}_{AZS}$ – суммарные комплексные гармонические составляющие токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей соответственно.

Балансирующее устройство легло в основу имитационной представленной модели, разработанной в MATLAB Simulink на основе использования микроконтроллера STM32H743VIT6. Архитектура имитационной модели электрической сети с БУ представлена на рисунке 1.

Блок 1 представляет собой электромагнитное устройство (ЭМУ), имеющее верхнее и нижнее ярмо (разрывной сердечник) в единой трехфазной обмотке, соединенной по схеме встречного зигзага с выведенным нейтральным проводом. Отличительная особенность ЭМУ – минимальный импеданс для токов нулевой последовательности. Автоматически изменяет проводимость нулевой последовательности в функции изменяющейся несбалансированной нагрузки. Выводы ЭМУ присоединены к блокам 1 и 2.

Блок 2 представляет собой фильтр тока обратной последовательности (ФТОП) (рис. 2). Фильтр использует фазовый сдвиг между фазами для выделения составляющей обратного тока последовательности I_2:

$$V_{\text{фильтр}}=k_1\cdot\left(\underline{I_A}+\underline{a}\cdot\underline{I_B}+\underline{a^2}\cdot\underline{I_C}\right);$$
$$\underline{a}=-0{,}5+j0{,}866=e^{j2\pi/3}$$

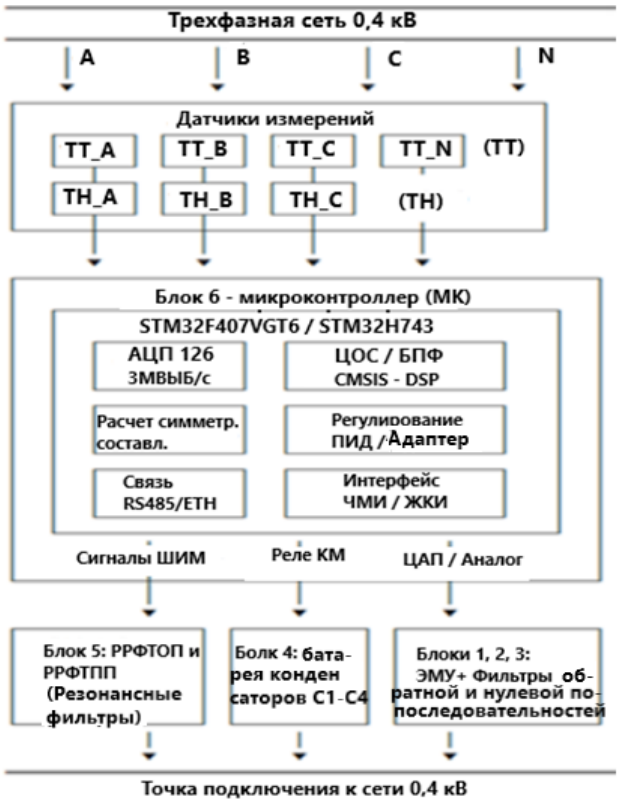


Рис. 1. Архитектура модели симуляции электрической сети 0,4 кВ с балансирующим устройством

Fig. 1. Simulation model architecture of the 0.4 kV distribution grid with the integrated balancing device

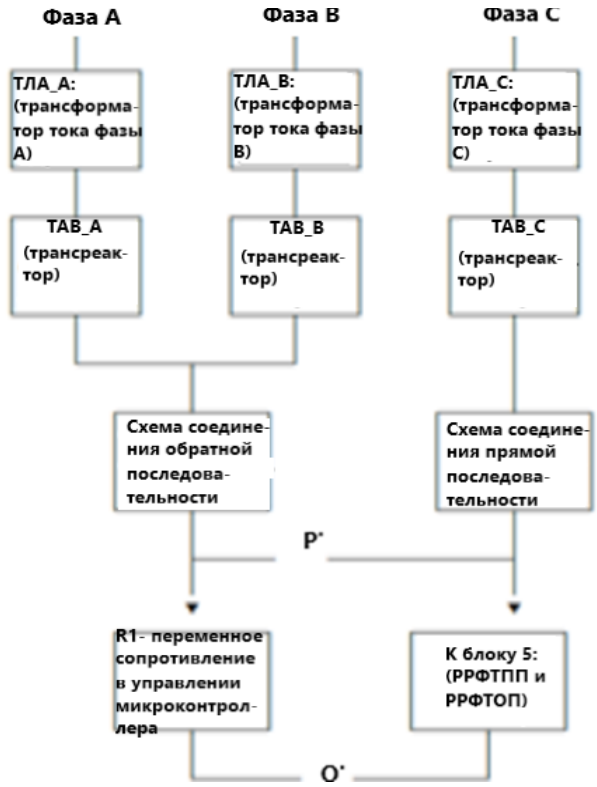


Рис. 2. Топологическая схема функционирования фильтра токов обратной последовательности

Fig. 2. Schematic diagram of the negative-sequence current filter configuration

Такая комбинация подавляет I_1 и I_0, оставляя только I_2. Трансреактор (ТАВ) вносит фазовый сдвиг 90° относительно ТТ (ТЛА). При правильном комбинировании выходов: сигнал ТЛА_А (пропорционален I_A, синфазный), сигнал ТАВ_А (пропорционален dI_A/dt, сдвинут на 90°).

Переменное сопротивление R1, управляемое микроконтроллером – (МК-блок 6), представлено фрагментарно на рисунке 3.

Альтернативой этому решению с точки зрения повышения надежности управления является использование матрицы постоянных резисторов, коммутируемых ТТР (SSR). Она представляет собой 8 резисторов в двоичной комбинации с разрешением 256 шагов: $R_{ОБЩ.} = R_0 + b_0 \cdot R + b_1 \cdot 2R + b_2 \cdot 4R + \ldots + b_7 \cdot 128R$. Управление предусмотрено от восьми GPIO[12] микроконтроллера.

Блок 3 представляет собой фильтр тока прямой последовательности (ФТПП). Структура фильтра идентична блоку 2, но с «иным» соединением вторичных обмоток для выделения тока прямой последовательности I_1: $V_{_фильтр} = k_1 \cdot \left(\underline{I_A} + \underline{a^2} \cdot \underline{I_B} + \underline{a} \cdot \underline{I_C} \right)$. В данном случае производится перестановка оператора поворота a и a^2 по сравнению с ФТОП. Сопротивление R2 управляется аналогично R1.

Блок 4 – батарея конденсаторов (БК); изображен рисунке 4 и представляет собой регулируемое устройство компенсации реактивной мощности (РУКРМ) [23].

БК подключена по схеме «Δ» к выходным клеммам ЭМУ (фазы А, В и С).

Контакторы для коммутации. $I_{NOM.} = 1{,}5 \cdot I_C$, где I_C – пусковой ток, регулируемый встроенными резисторами предвключения, ограничивающими пусковой ток. Катушка индуктивности, рассчитанная на 24 В, управляется МК через промежуточное реле.

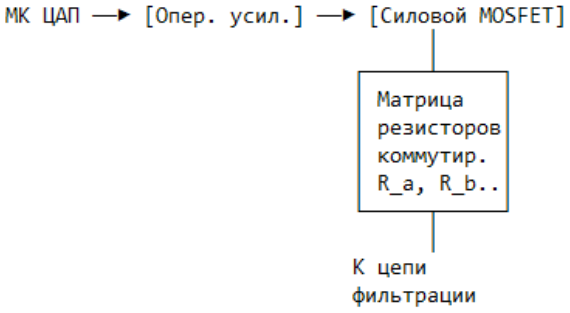


Рис. 3. Топология управляемого активного сопротивления

Fig. 3. Circuit topology of the controlled active resistance

Механический ресурс контактной группы – более 1000000 операций в соответствии со стандартом[13] МЭК 60947-4-1.

Блоки 5 – регулируемые резонансные фильтры токов прямой (обратной) последовательностей (*РРФТОП/РРФТПП*). Для РРФТПП (прямой-положительной) последовательности архитектура будет аналогичной, за исключением того, что фильтруемыми гармониками будут 7-я (350 Гц), 13-я (650 Гц), 19-я (950 Гц). Для каждой подавляемой гармоники на резонансной частоте $f_n = \mathrm{n} \cdot 50$ Гц выполняется условие:

$$x_L = x_C \rightarrow \omega_n \cdot L_n = 1 / (\omega_n \cdot C_n)$$

$$\text{или } L_n \cdot C_n = 1 / (\omega_n)^2 = 1 / (2\pi \cdot n \cdot 50)^2. \qquad (5)$$

При этом гармоники 3-я (150 Гц), 9-я (450 Гц), 15-я (750 Гц) и 21-я (1000 Гц) фильтруются блоком 1 (ЭМУ).

Архитектура РРФТОП представлена на рисунке 5.

Регулируемость фильтров является принципиально важной, поскольку уровни гармоник изменяются во времени. Если на схеме [25] это осуществляется

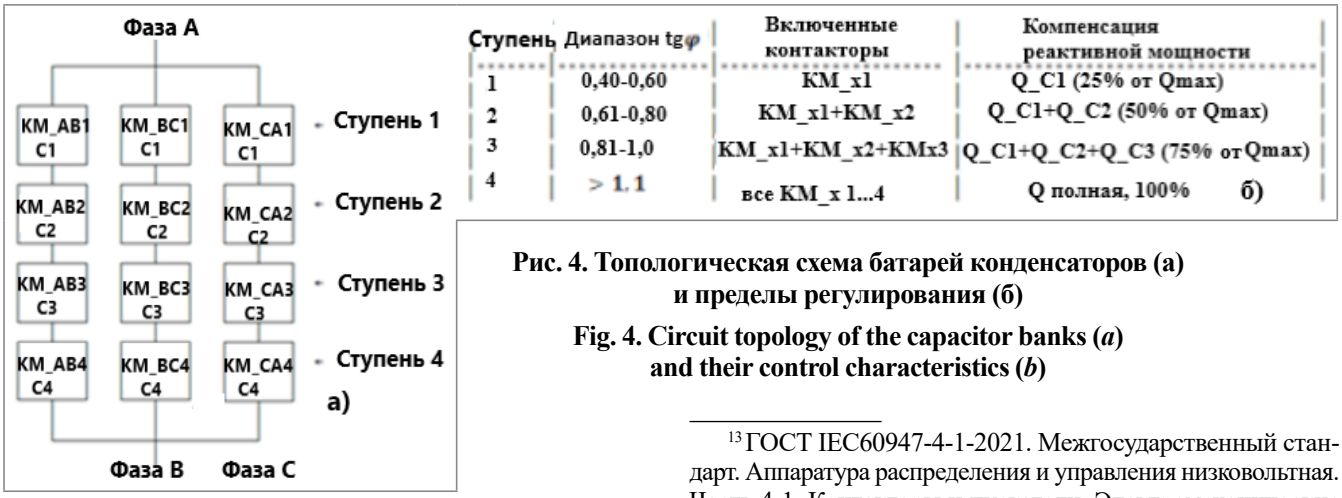


Рис. 4. Топологическая схема батарей конденсаторов (а) и пределы регулирования (б)

Fig. 4. Circuit topology of the capacitor banks (*a*) and their control characteristics (*b*)

[12] GPIO (general-purpose input/output) – интерфейс для связи между компонентами компьютерной системы.

[13] ГОСТ IEC60947-4-1-2021. Межгосударственный стандарт. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4-1. Контакторы и пускатели. Электромеханические контакторы и пускатели. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200181366 (дата обращения: 21.05.2026).

посредством пружинного сердечника, насыщение которого обеспечивается его положением внутри индуктивности в зависимости от уровня генерируемых гармоник, то в предлагаемой модели симуляции работы РРФТОП и РРФТПП регулирование может осуществляться двумя подходами.

Подход 1. Коммутация конденсаторов (рис. 6). Реализуется 16 уровней емкости, обеспечивающей настройку резонансной частоты. При этом твердотельное реле (ТТР) реализуется посредством реле SSR, управляемым GPI0 микроконтроллера (блок 6).

Подход 2. Переменная индуктивность (насыщаемый сердечник) (рис. 7). Постоянный ток в обмотке подмагничивания изменяет проницаемость сердечника, изменяя, соответственно, его индуктивность и настраивая резонансную частоту f_n.

Блок 6. Система управления на микроконтроллере (МК). Для выбора МК более предпочтительно использовать семейство STM 32. Сравним два типа МК: STM32F407VGT6[14] и STM32H743VIT6[15] (табл.).

Несмотря на несколько большую стоимость второго МК (дороже на 6€) и равенство характеристик ЦАП (цифроаналогового преобразователя), все остальные параметры у МК STM32H743VIT6 превосходят аналогичные параметры первого: в частности, FPU (Floating Point Unit – блок вычислений с плавающей точкой) – вдвое; ОЗУ у «H743» более чем в 5 раз превышает ОЗУ у «F407»; Флэш у второго МК вдвое превышает память у первого; ЦОС у второго также выше, так как CMSIS-DSP – библиотека алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) – имеет дополнительную базу данных. Плата управления МК представлена на рисунке 8.

Более подробно работа выбранного микроконтроллера, включая схему согласования аналоговых сигналов (тракт изменения токов, схема их согласования, тракт изменения напряжения), антиалиасингового фильтра[16], синхронизацию с сетью, питание

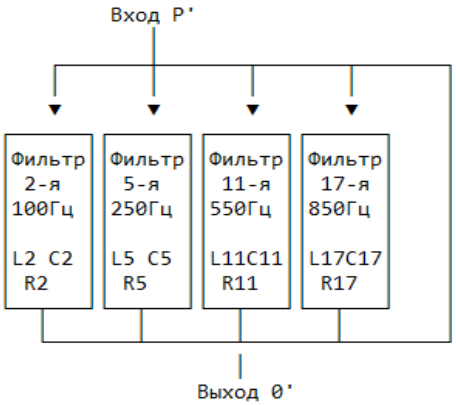


Рис. 5. Топология регулируемого резонансного фильтра токов обратной последовательности

Fig. 5. Circuit topology of the adjustable resonant negative-sequence current filter

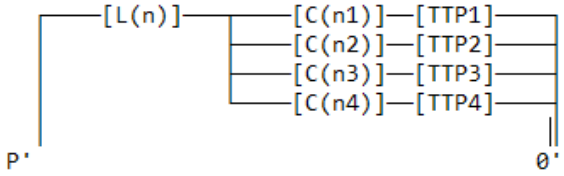


Рис. 6. Реализация первого подхода

$C_{n1} = C, C_{n2} = 2C, C_{n3} = 4C, C_{n4} = 8C$

Fig. 6. Implementation of the first design approach:

$C_{n1} = C, C_{n2} = 2C, C_{n3} = 4C, C_{n4} = 8C$

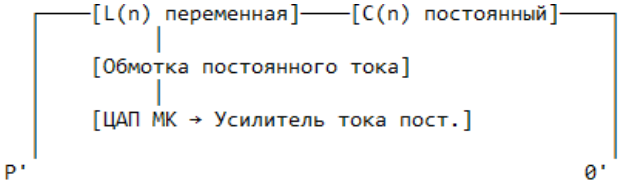


Рис. 7. Реализация второго подхода

Fig. 7. Implementation of the second design approach

Таблица

Характеристики сравниваемых микроконтроллеров

Table

Characteristics of the evaluated microcontrollers

Критерий	STM32F407VGT6	STM32H743VIT6
Ядро	Cortex-M4F, 168 МГц	Cortex-M7, 480 МГц
FPU	Одинарная точность	Двойная точность
АЦП	3×12 бит, 2,4 МВЫБ/с[17]	3×16 бит, 3,6 МВЫБ/с
ОЗУ	192 КБ	1 МБ
Флэш	1 МБ	2 МБ
ЦОС	CMSIS-DSP	CMSIS-DSP + кэш
ЦАП	2×12 бит	2×12 бит
GPIO	140	168
Цена	~12€	~18€

[14] Каталог. STM32H743VIT6. [Электронный ресурс]. URL: https://www.chipdip.ru/product/stm32h743vit6-mikrokontroller-32-bit-st-microelectronics-9000503897?ysclid=mpsdaw5i3a729493492 (дата обращения: 31.05.2026).

[15] STM32H742xI/G STM32H743xI/G. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: Datasheet – STM32H742xI/G STM32H743xI/G – 32-bit Arm® Cortex®-M7480MHz MCUs, up to 2MB Flash, up to 1MB RAM, 46 com. and analog interfaces (дата обращения: 31.05.2026).

[16] Фильтр низкой частоты (ФНЧ), который применяется на входе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для повышения качества оцифровки сигнала. Его основная задача – подавлять спектральные компоненты сигнала, частота которых превышает половину частоты дискретизации АЦП. Это предотвращает явление алиасинга (наложения спектров), при котором высокочастотные компоненты сигнала «накладываются» на низкочастотные, искажая исходный сигнал (примеч. авт.).

[17] МВЫБ/с (характеристика аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера) означает мегавыбор в секунду – единицу измерения скорости преобразования аналогового сигнала в цифровой (примеч. авт.).

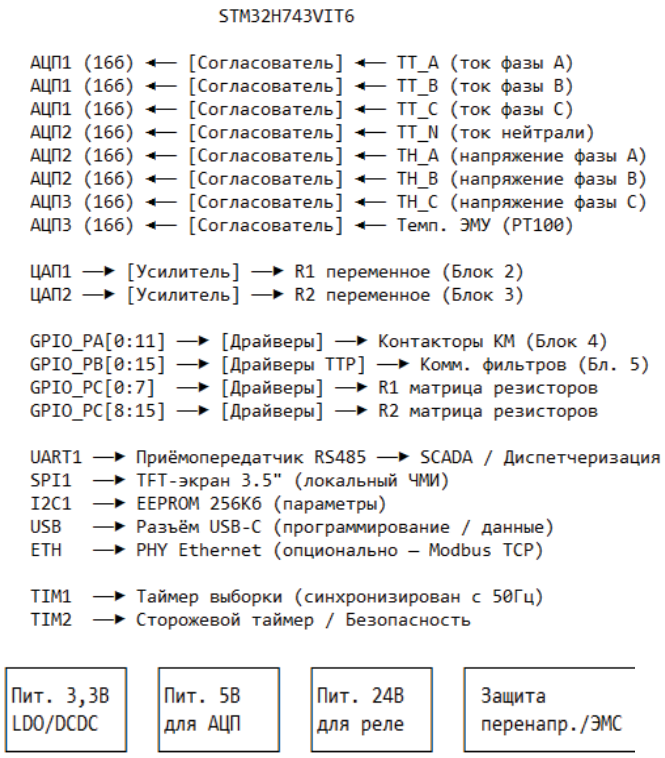


Рис. 8. Плата управления микроконтроллером STM32H743VIT6

Fig. 8. Control board based on the STM32H743VIT6 microcontroller

платы МК, расчет и проектирование, изложена в материалах заявки на изобретение в бюро патентов РФ. В основе расчета исследуемых показателей небаланса (1-4) лежат программные комплексы[18,19].

Рассмотрим качество ЭЭ в действующей электрической сети 0,4 кВ г. Дуала. Дуала – крупнейший экономический и промышленный центр Республики Камерун. По данным[20] на 2023 г., население Дуалы с пригородами достигает более 5 млн чел.

Рассмотрим электрическую сеть 0,4 кВ с подстанцией KTP-IND-BASSA-04, которая питает промышленную зону Басса. Сеть СН (10 кВ) является полностью подземной (4,2 км, 3×1×150 мм^2. Алюминий СПЭ), что гарантирует хорошую стабильность. Трансформатор мощностью 630 кВА (схема соединения – Dyn11, Uкз = 6%) питает ГРЩ на 1000 А, который распределяет электроэнергию по цехам через медные кабели большого сечения (4×240 мм^2) (рис. 10). Нагрузкой данной сети являются три цеха: в двух расположено станочное оборудование, в третьем – компрессорная. От шин силового трансформатора также получает питание и линия освещения объекта (рис. 9).

Рассмотрим, как изменяются параметры электрической энергии, характеризующие уровень несбалансированности электропотребления в исследуемой электрической сети. На рисунке 10 представлены временные диаграммы изменения фазных токов, симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей, а также суммарных гармонических токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Анализ данных рисунка 10 показал, что уровень несимметричной составляющей в составе фазных токов невелик. Токи в фазах отличаются незначительно по величине (рис. 10а): усредненные значения за период измерения составили, соответственно, I_A = 97,5 А; I_B = 97,9 А; I_C = 96,5 А. При этом среднее значение тока в нейтральном проводе составляет I_N = 13,3 А. Вместе с тем суммарные гармонические составляющие[21] прямой, обратной и нулевой последовательностей составили, соответственно, 11,9; 115,2; 112,6 А (рис. 10б). Это обусловлено наличием в производственных цехах большого количества силовой электроники, элементы которой значительно искажают гармонический состав токов за счет нелинейной вольт-амперной характеристики.

Усредненные значения коэффициентов небаланса напряжения по прямой, обратной и нулевой последовательностям, а также суммарный коэффициент небаланса напряжения (рис. 10в) составили, соответственно, 23,2; 5,4; 1,83; 4,9%. При этом коэффициент потерь мощности K_P (рис. 10г) в среднем составляет 2,9.

Таким образом, значения показателей небаланса напряжения по обратной и нулевой последовательностям, а также суммарный коэффициент небаланса напряжения не превышают установленных допустимых значений (13,5; 8,8; 12%). Но значение коэффициента небаланса напряжения по прямой последовательности (K_{1UNB}) превышает допустимое значение (9%) на 61,1% (в 2,6 раза). Значение коэффициента K_P, равное 2,9, свидетельствует о том, что реальные потери активной мощности (и электрической энергии) почти в 3 раза превышают аналогичные потери, которые могли бы иметь место только от токов прямой последовательности основной частоты.

[18] Наумов И.В. «Unbalance-3». Программа расчета несбалансированных режимов работы низковольтных электрических сетей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684122 от 13.11.2023 г.

[19] Наумов И.В., Подъячих С.В., Ермолаев Д.С. «Unbalance-4». Программа по расчету несбалансированных режимов работы в эл. сетях 0,4 кВ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: RU2023686894 от 11.12.2023 г. Бюл. № 12.

[20] Население Камеруна. [Электронный ресурс]. URL: https://countrymeters.info/ru/Cameroon (дата обращения: 20.05.2026).

[21] Здесь и далее средние значения показателей соответствуют их усреднению за период измерения в 10-минутном временном промежутке (примеч. авт.).

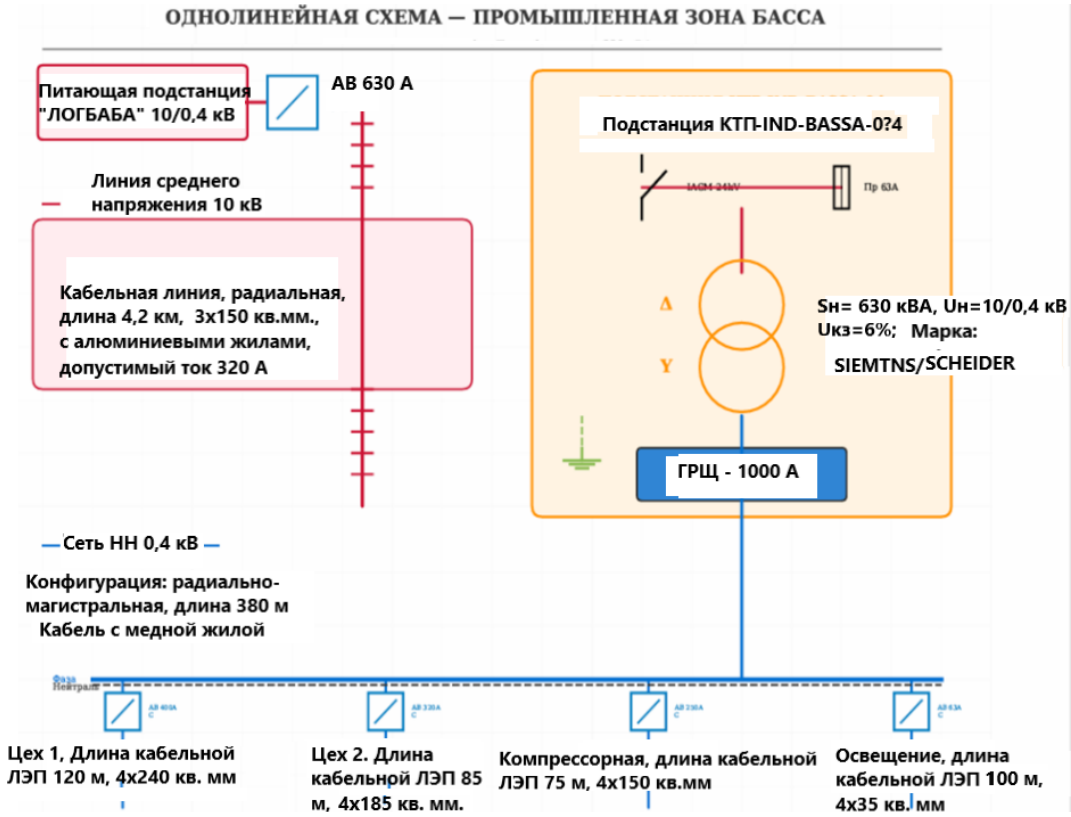


Рис. 9. Однолинейная схема электрической сети 0,4 кВ, питающей нагрузку промышленных объектов в г. Дуала

Fig. 9. Single-line diagram of the 0.4 kV distribution grid supplying industrial loads in Douala

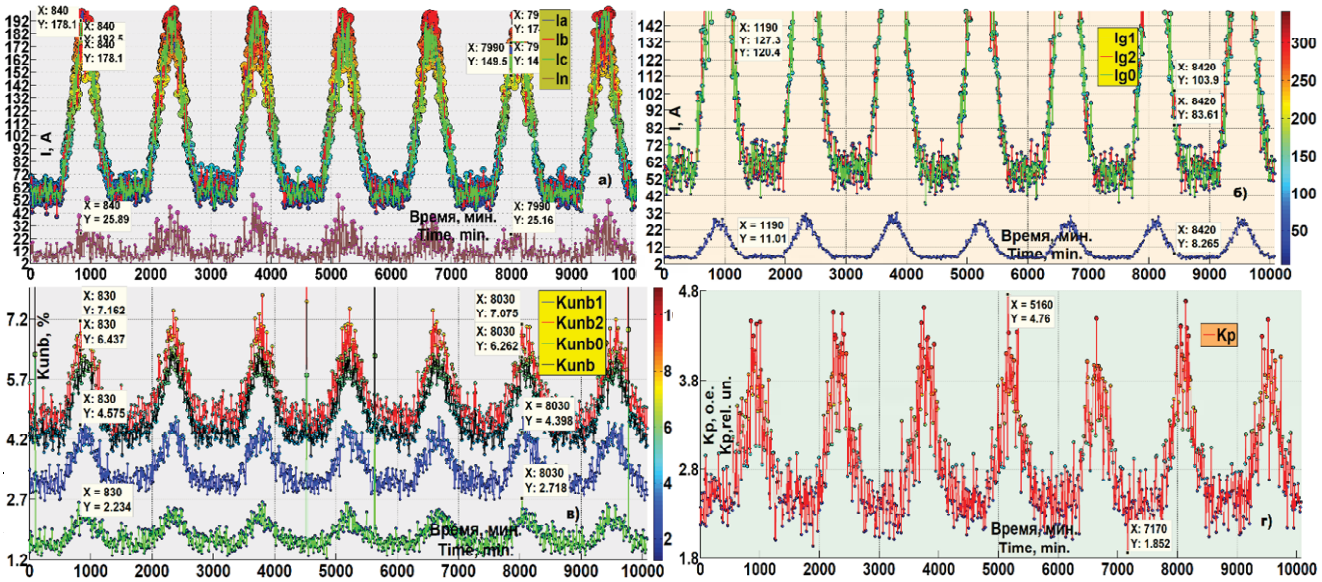


Рис. 10. Диаграммы изменения параметров ЭЭ и показателей небаланса в исследуемой электрической сети без балансирующего устройства

Fig. 10. Variation profiles of power quality parameters and unbalance indicators in the studied distribution grid without the balancing device

Рассмотрим, как показатели небаланса будут изменяться при интеграции БУ в исследуемую сеть. Проведенными исследованиями [23, 25] с использованием программного обеспечения[22] установлено, что наиболее целесообразным местом установки в исследуемых электрических сетях средств

[22] Наумов И.В., Подъячих С.В., Ермолаев Д.С., Суслов К.В. «Unbalance-5». Программа имитационного моделирования несбалансированных режимов низковольтных электрических сетей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025611445 Российская Федерация; Опубл. 20.01.2025 г.

симметрирования и балансирования является ближайший к шинам 0,4 кВ силового трансформатора узел нагрузки. Поэтому в качестве места имитационного подключения БУ на основе разработанного микроконтроллера приняты шины распределительного устройства (РУ), находящегося на расстоянии 380 м от шин 0,4 кВ силового трансформатора ТП, от которого запитаны 3 производственных цеха и линия освещения.

В соответствии с диаграммами изменения исследуемых показателей небаланса при подключении БУ (рис. 11а) исследуемые показатели приняли следующие значения: $K_{1UNB} = 0{,}55\%$; $K_{2UNB} = 1{,}74\%$; $K_{0UNB} = 0{,}02\%$; $K_{UNB} = 0{,}84\%$. Таким образом, снижение этих показателей при включении БУ составило, соответственно, 97,6; 67,5; 98,7; 82,5%. Значение коэффициента потерь мощности (K_P) (рис. 11б) при интеграции в сеть БУ составило в среднем 1,002 (снизилось на 65%).

Рассмотрим также изменение потерь активной мощности в исследуемой электрической сети до и после включения балансирующего устройства (рис. 12).

Как следует из данных рисунка 12, до подключения БУ усредненные значения потерь активной и реактивной мощности в сети (линия и силовой трансформатор) составили, соответственно, 77,2 кВт и 62,3 квар. При подключении БУ эти значения снизились до 24,3 кВт и 23,2 квар.

Таким образом, рассматривая активные потери мощности, отметим, что их снижение в 10-минутном промежутке времени измерения в одну неделю составило 53 кВт.

Учитывая, что измерения производились круглые сутки, включая нерабочее время и выходные дни, и предполагая, что представленный уровень несбалансированного электропотребления на исследуемом объекте сохранится неизменным в течение года, определим годовую экономию электрической энергии за счет внедрения в сеть балансирующего устройства.

Экономия энергии в 1 ч составляет: $W = \Delta P \cdot \tau = 53 \cdot 6 = 318$ (кВт·ч); годовая экономия ЭЭ – $W = \Delta P \cdot \tau = 318 \cdot 8760 = 2\,785\,680$ (кВт·ч). При стоимости 1 кВт·ч, равной \$0,136 за 1 кВт·ч [23], годовая экономия ЭЭ за счет использования БУ составит \$378852,5.

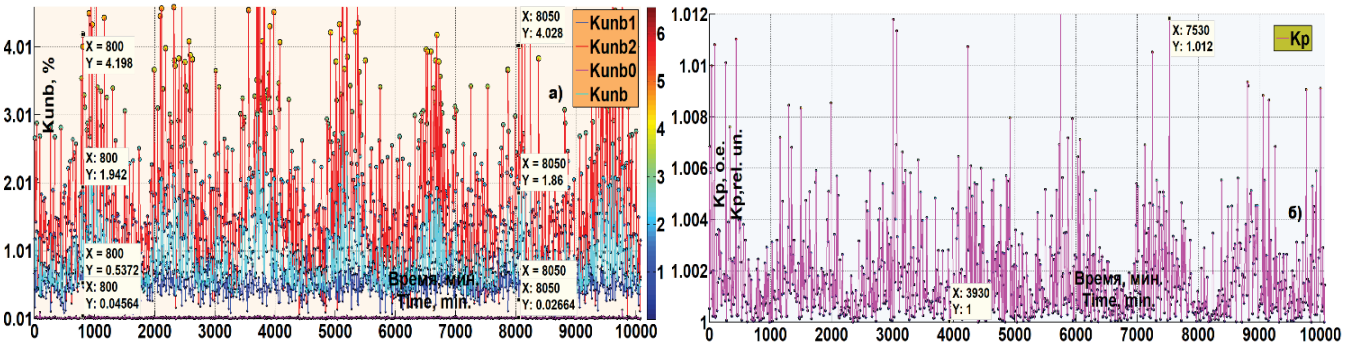


Рис. 11. Диаграммы изменения исследуемых показателей небаланса после подключения БУ

Fig. 11. Variation profiles of the analyzed unbalance indicators after connecting the balancing device

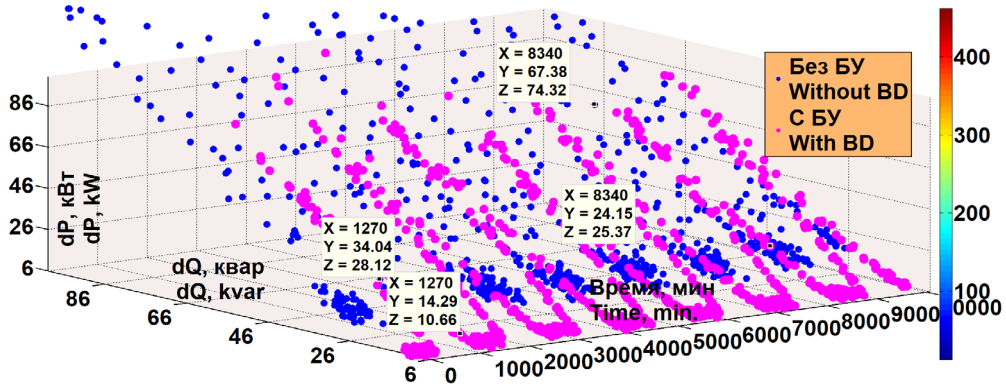


Рис. 12. Диаграммы изменения потерь активной и реактивной мощности до и после подключения БУ в исследуемой электрической сети

Fig. 12. Active and reactive power losses in the studied distribution grid before and after connecting the balancing device

[23] Цены на электроэнергию в странах мира. [Электронный ресурс]. URL: https://svspb.net/danmark/stoimost-elektroenergija.php (данные на 2025 г.)

Выводы

1. Несбалансированное электропотребление в электрических сетях низкого напряжения необходимо контролировать на различных объектах хозяйственной деятельности. Исследование этих режимов в Республике Камерун находится в начальной стадии.

2. На основе использования известной модели балансирующего устройства в системе MATLAB Simulink разработана имитационная модель нового БУ, основой которого является микроконтроллер последнего поколения, осуществляющий управление компенсацией симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей, обусловленных основной частотой напряжения электропитания, а также дополнительными прямой, обратной и нулевой последовательностями, обусловленными эмиссией гармонических составляющих, частота которых кратна основной частоте.

3. Исследования несбалансированных режимов в действующей низковольтной электрической сети в г. Дуала Республики Камерун, питающей объекты промышленного производства, показали превышение допустимой величины показателя, характеризующего дополнительную прямую последовательность напряжения электропитания, в 2,6 раза.

4. Коэффициент дополнительных потерь активной мощности в исследуемой электрической сети в реальном несбалансированном режиме почти в 3 раза превышает аналогичные потери, обусловленные только током прямой последовательности основной частоты.

5. Имитационное подключение разработанной модели балансирующего устройства на основе предлагаемого микроконтроллера позволяет снизить коэффициент небаланса напряжения по прямой последовательности более чем на 97%, а коэффициент потерь активной мощности – на 65%.

6. Расчетным путем определено, что при сохранении установленного уровня несбалансированного электропотребления в течение года и при постоянном подключении разработанного балансирующего устройства в исследуемой электрической сети годовая экономия электрической энергии может составить 2 785 680 кВт·ч, что в ценах 2025 г. привело бы к экономии $378852,5.

В качестве обсуждения. Предлагаемая статья отражает первое исследование несбалансированных режимов в электрических сетях Республики Камеруна. В ближайшее время аналогичные исследования будут проведены для сетей низкого напряжения, питающих административные объекты – таких, как университет, торговый центр, жилые массивы г. Дуала.

Список источников / References

1. Плюснина О.М. Экономический потенциал Республики Камерун в мировой экономике и в отношениях с Россией // Russian Journal of Management. 2024. Т. 12, № . 4. С. 188-202. https://doi.org/10.29039/2500-1469-2024-12-4-188-202

Plyusnina O.M. The economic potential of the Republic of Cameroon in the global economy and in relations with Russia. *Russian Journal of Management.* 2024;12(4):188-202. (In Russ.) https://doi.org/10.29039/2500-1469-2024-12-4-188-202

2. Ibrahim I.A., Hossain M.J. Low voltage distribution networks modeling and unbalanced (optimal) power flow: A comprehensive review. *IEEE Access*. 2021;9:143026-143084. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120803

3. Golobart M.L. et al. Upgrading low-voltage network models for power quality investigations with a focus on voltage unbalance. Hybride conference CIRED Porto Workshop 2022: E-mobility and power distribution. 2022. Pp. 124-128. https://doi.org/10.1049/icp.2022.0718

4. Naumov I.V. et al. Analysis of unbalanced load low-voltage electrical networks operating modes. *E3S Web of Conferences, WFSDI 2021.* 2021;295:02005. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129502005 EDN: FTGQEC

5. Новиков А.В., Злобин А.И., Хорошинина Е.Н. Физическое моделирование аномальных режимов в электрических сетях напряжением 6-35 КВ // Энергетические системы. 2024. № 1. С. 41-56. https://doi.org/10.34031/es.2024.1.005

Novikov A.V., Zlobin A.I., Khoroshinina E.N. Physical modeling of abnormal modes in electrical networks with voltage 6-35 kV. *Energy Systems*. 2024:1:41-56. https://doi.org/10.34031/es.2024.1.005

6. Naumov I.V., Podyachikh S.V., Tretyakov S.V. About electric energy additional losses reduction at the phase currents unbalancing in the 0.38 kV operating networks. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science.* 2022;979:012137. https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012137

7. Dai Z. et al. Intelligent prediction of transformer loss for low voltage recovery in distribution network with unbalanced load. *Energies*. 2023;16(11):4432. https://doi.org/10.3390/en16114432

8. Cuong N.V., Kovernikova L. Analysis of the influence of non-sinusoidal and unbalanced network modes on induction motors. *Energy Systems Research. E3S Web of Conferences*. 2021;289:01002. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128901002 EDN: QOMSJU

9. Peng Y. et al. Performance improvement of the unbalanced voltage compensation in islanded microgrid based on small-signal analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;67(7):5531-5542. https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2934021

10. Naumov I.V. et al. Methodological bases of the fire hazard reduction in internal and external 0.38 kv electrical networks with unbalancing power consumption. *IOP Conference Series*: *Earth and Environmental Science*. 2022;1045:012145. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012145

11. Mahmoodi M. et al. A comparison on power flow models for optimal power flow studies in integrated medium-low voltage unbalanced distribution systems. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2024;38:101339. https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101339

12. Heidari-Ahijani A. et al. A linear AC power flow model for unbalanced multi-phase distribution networks based on current injection equations. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2021;36(4):3806-3809. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3073839

13. Claeys S. et al. Optimal power flow in four-wire distribution networks: Formulation and benchmarking. *Electric Power Systems Research*. 2022;213:108522. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108522

14. Vanin M. et al. Comparison of linear and conic power flow formulations for unbalanced low voltage networks optimization. *Electric Power Systems Research*. 2020;189:106699. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106699

15. Claeys S. et al. Voltage-dependent load models in unbalanced optimal power flow using power cones. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2021;12(4):2890-2902. https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3052576

16. Tamba J.G. et al. An overview of electricity in Cameroon: Current Status, Influential Factors and Government Actions. *International Journal of Energy Economics and Policy.* 2022;12(4):470-481. https://doi.org/10.32479/ijeep.13024

17. Inoussah M.M., Adolpho M.I. Assessment of sustainability indicators of thermoelectric power generation in Cameroon using exergetic analysis tools. *Energy and Power Engineering.* 2017;9(1). https://doi/org/10.4236/epe.2017.91003

18. Pendieu Kwaye M., Bendfeld J., Anglani N. Assessment of renewable energy resources in Cameroon and special regards on energy supply. *2015 5th International Youth Conference on Energy* (*IYCE*), Pisa, Italy. 2015. Pp. 1-7. https://doi/org/10.1109/IYCE.2015.7180807

19. Konchou F.A.T., Koholé Y.W., Tchuen G & Tchinda R. Energy, exergy and sustainability assessment of Cameroon residential sector. *Environment, Development and Sustainability.* 2023;25:12439-12465. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02574-2

20. Talla K.F.A., Aloyem K.C.V., Tchinda R. Energy Analysis and Exergy Utilization in the Residential Sector of Cameroon. *Energy and Power Engineering*. 2015;7:93-104. http://dx.doi.org/10.4236/epe.2015.73009

21. Ngousssandou B.-P. et al. Optimal energy scheduling method for the North Cameroonian interconnected grid in response to load shedding. *Sustainable Energy Research*. 2023;10:14. https://doi.org/10.1186/s40807-023-00084-x

22. Onanena R. et al. Improvement of the voltage quality in an electrical network via the loopback: Case of the southern interconnected grid (sig) of Cameroon. *Journal of Power and Energy Engineering.* 2021;9(3):25-41. EDN: MNTPOQ

23. Наумов И.В. и др. Имитационное моделирование несбалансированных режимов работы в низковольтных компонентах систем электроснабжения. Электрические станции. 2026. № 3. С. 9-19. https://doi.org/10.71841/ES.elst.2026.1136.03.02

Naumov I.V. et al. Simulation modeling of unbalanced operating modes in low-voltage components of power supply systems. *Elektricheskie stantsii.* 2026;3:9-19. (In Russ.) https://doi.org/10.71841/ES.elst.2026.1136.03.02

24. Наумов И.В. и др. Оценка устойчивости несбалансированных режимов работы компонентов систем электроснабжения низкого напряжения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2026. Т. 19, № 2. С. 238-259. EDN: XEVRSC

Naumov I.V. et al. Assessment of the unbalanced operating modes stability of low voltage power supply system components. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2026;19(2):238-259. (In Russ.)

25. Наумов И.В. Несбалансированные режимы работы распределительных электрических сетей низкого напряжения: Монография. Т. 1. Методологические основы системного подхода к оценке несбалансированных режимов. М.: Колос-с, 2025. 226 с. EDN: TGANAG

Naumov I.V. Unbalanced modes of operation of low-voltage distribution grids: Monograph. Vol. 1. Methodological foundations of a systematic approach to the assessment of unbalanced modes. Moscow, Kolos-s, 2025. 258 p. (In Russ.)

Сведения об авторах

[1] **Наумов Игорь Владимирович,** заслуженный работник ВО РФ, д-р техн. наук, профессор; professornaumov@list.ru; SPIN-код: 3954-3292

[2] **Нтсама Нди Бернард Жосселин,** аспирант; dimitryntsama8@gmail.com

[3] **Ямщикова Ирина Валентиновна,** канд. экон. наук, доцент; yamsirina@yandex.ru; SPIN-код: 6777-4865

[1, 2] Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского; 664038, Российская Федерация, Иркутская обл., п. Молодежный, д. 1/1

[3] Иркутский национальный исследовательский технический университет; 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Author Information

Igor V. Naumov [1], Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, DSc (Eng), Professor

Ntsama Ndi Bernard Josselin [2], postgraduate student

Irina V. Yamshchikova [3], CSc (Econ), Associate Professor

[1, 2] Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky; 1/1 Molodezhny, Irkutsk Region, 664038, Russian Federation

[3] Irkutsk National Research Technical University; 83 Lermontova Str. Irkutsk, 664074, Russian Federation

Вклад авторов

И.В. Наумов – концептуализация, методология, программное обеспечение, анализ и создание окончательной версии (доработка) рукописи, ее редактирование, руководство исследованиями; Н.Н.Б. Жосселин – проведение исследований, анализ возможности применения типов микроконтроллеров, визуализация; И.В. Ямщикова – формальный анализ, программное обеспечение, верификация данных

Author Contribution

I.V. Naumov – conceptualization; methodology; software; writing – review and editing of the manuscript; research supervision; N.N.B. Josselin – investigation; validation; visualization; I.V. Yamshchikova – formal analysis, software, data curation; validation.

Конфликт интересов

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

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest and are responsible for plagiarism.

Статья поступила 26.05.2026, после рецензирования и доработки 02.10.2026, принята к публикации 08.10.2026

Received 26.05.2026; Revised 02.10.2026; Accepted 08.10.2026