

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МИКРОГРИД КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

Ковалев Владимир Захарович

*доктор технических наук,
профессор Института нефти и газа
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: vz_kovalev@mail.ru*

Щербаков Александр Геннадьевич

*кандидат технических наук, доцент,
декан факультета очного обучения АНОО ВО
«Сибирский институт бизнеса и информационных технологий»
Омск, Россия
E-mail: scherbacov@yandex.ru*

Хамитов Рустам Нуриманович

*доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры электрической техники
ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»
Омск, Россия
E-mail: apple_27@list.ru*

Статья посвящена построению алгоритма прогнозирования и оценки качества электрической энергии MicroGrid Крайнего Севера. Приводится фрагмент суточного графика электрической нагрузки малого поселения Крайнего Севера. Показаны системные особенности преобразования электрической энергии в изолированных системах электроснабжения. Построена структурная модель системы электроснабжения MicroGrid Крайнего Севера. Проведен вычислительный эксперимент по оценке качества электрической энергии MicroGrid Крайнего Севера. Определена потенциальная область выхода показателей качества электрической энергии за рамки, допустимые по ГОСТ 32144 – 2013.

Ключевые слова: системный анализ, качество электрической энергии, MicroGrid, Крайний Север.

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ANALYSIS AND FORECAST
OF THE QUALITY OF ELECTRIC POWER MICROGRID IN THE FAR NORTH**

Vladimir Z. Kovalev

*Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Institute of Oil and Gas,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: vz_kovalev@mail.ru*

Alexander G. Shcherbakov

*Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,*

Head for the Faculty of Full-time Education,

*Siberian Institute of Business and Information Technologies,
Omsk, Russia*

E-mail: scherbacov@yandex.ru

Rustam N. Khamitov

*Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor,*

Professor for the Department of Electrical Engineering,

*Omsk State Technical University,
Omsk, Russia*

E-mail: apple_27@list.ru

The article is devoted to the construction of an algorithm for predicting and evaluating the quality of MicroGrid electric power in the Far North. A fragment of the daily schedule of the electrical load of a small settlement in the Far North is given. The system features of electrical energy conversion in isolated power supply systems are shown. A structural model of the MicroGrid power supply system of the Far North has been built. A computational experiment was carried out to assess the quality of electrical energy MicroGrid in the Far North. The potential area for the output of electric energy quality indicators beyond the permissible limits according to GOST 32144 – 2013 is determined.

Keywords: system analysis, power quality, MicroGrid, Far North.

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) при решении задач электроснабжения удаленных поселений децентрализованной зоны энергоснабжения приобрело общемировую тенденцию [1-5]. Расширение присутствия в мировой экономике возобновляемой энергетики (ВЭ) закономерно приводит к появлению эффектов взаимного влияния собственно характеристик элементов ВЭ и характеристик внешней, по отношению к ВЭ, среды [6-7]. Например, в работе [8], направленной на проектирование и оптимальное управление энергопотреблением MicroGrid с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), анализируется «сообщество MicroGrid с внутренним рынком». Здесь же показано наличие социальных, экологических и экономических предпосылок для «обмена энергией» и «обмена услугами» между «объектами», входящими в MicroGrid. Учет в системе управления «неэнергетических» взаимодействий («услуг») позволил добиться снижения показателя LCOE до 40 % и повысить качество электроснабжения [8]. В работах [9-11] показано, что детальный анализ взаимодействия и взаимовлияния отдельных ВИЭ необходимо осуществлять на базе системного анализа [9-11] в рамках понятийного аппарата микрогрид (MicroGrid) [12].

Далее, в соответствии с работами [9, 12], под MicroGrid будем понимать множество «изолированных систем электроснабжения (ИСЭ), отвечающее условию: каждая ИСЭ содержит в себе электротехнический комплекс генерирования электрической энергии, включая ВИЭ; все ИСЭ электрически между собой не связаны; все ИСЭ взаимозависят через неэнергетические взаимодействия (НЭ): информационные, коммуникативные, логистические и другие; все ИСЭ имеют общую конечную цель; каждая ИСЭ имеет собственную цель, обусловленную свойствами потребителя ее электрической энергии (ПЭ)» [9]. Конечная цель определена особенностями, условиями и задачами существования внешней системы/надсистемы и содержит в себе энергетические, социальные, экологические, экономические и другие показатели, характеризующие потенциальные возможности и эффективность функционирования

MicroGrid [13-16]. Развитие ВЭ в направлении формирования взаимовлияющих и взаимодействующих региональных обособленных электротехнических комплексов генерирования электрической энергии (РОЭТК), в смысле определений работ [9,17], требует обновления применяемых инструментов решения задач, возникающих при анализе потенциальных возможностей, при построении систем управления в режиме реального времени и выборе архитектуры MicroGrid, составляющих РОЭТК [18-22].

Использование в современных комплексах производства-потребления электрической энергии, применяемых в MicroGrid, таких компонент, как накопители энергии, полупроводниковые преобразователи энергии и интеллектуальные системы управления, усугубляет вопросы анализа и управления качеством электрической энергии [23-25]. Дополнительные предпосылки, способствующие искажению качества энергии в ИСЭ, возникают из-за сравнимости мощностей источника энергии и отдельных потребителей электрической энергии, при стохастическом характере электропотребления и неопределенностях графика выработки электрической энергии, свойственных ВИЭ [26-29].

Рассмотрим характерный фрагмент суточного графика нагрузки для MicroGrid малого поселения (МП) Крайнего Севера, приведенный на рисунке 1. Длительность представленного фрагмента – 60 минут, частота измерения – 1 минута, время измерения – с 06 часов 42 минут 05 августа 2019 года. Количество жителей МП – 34 человека. Мгновенные значения фазных мощностей в точках максимальной (Max) или минимальной (Min) мощности на интервале рассмотрения представлены в таблице.

Данный фрагмент хорошо иллюстрирует особенности электропотребления, свойственные МП Крайнего Севера: фазная несимметрия потребляемой мощности, ее стохастический характер распределения во времени по амплитуде и по фазам, наличие «крутых» фронтов наброса – сброса нагрузки, с градиентами более 2100 Вт/мин. (например, на интервале 9-10 минуты фазы А). Такая ситуация обусловлена стохастическим характером подключения/отключения нагрузки МП, которая сопоставима по мощности с источником энергии.

Таблица – Мгновенные значения фазных мощностей в характерных временных точках

	Мгновенные значения фазных мощностей в характерных временных точках за период времени с 6:42 до 7:41 05 августа 2019 г.				
Момент времени измерения, мин.	t=12	t=21	t=22	t=28	t=50
Мощность фазы А, Вт	Max:2708	512	Min:415	568	761
Мощность фазы В, Вт	Max:3321	401	306	Min:159	405
Мощность фазы С, Вт	2252	Max:4084	3952	1551	Min:1418

Выявленные системные особенности преобразования электрической энергии в MicroGrid Крайнего Севера требуют построения структурной модели типовой MicroGrid Крайнего Севера с применением ВИЭ и ее математической модели, компоненты которой адекватно отражают протекающие физические процессы в элементах MicroGrid и отвечают базовым принципам системного анализа применительно к MicroGrid [9].

Структурная модель типовой MicroGrid Крайнего Севера с применением ВИЭ представлена на рис. 2. В ее состав входят:

- П0 – подсистема «Гибридная электрическая станция» (ГиЭС), включающая в себя солнечную электростанцию (СЭС), дизель-генераторную установку (ДГУ) и накопитель энергии (НЭ). Управление потоками энергии между СЭС, ДГУ и НЭ, внутри подсистемы П0, осуществляется с помощью коммутатора К. Питание нагрузки от гибридной электрической станции энергии производится через преобразователь частоты со звеном постоянного тока;

- Π_1 - Π_n – подсистемы потребителей электрической энергии, подключаемых к точке общего присоединения (ТОП).

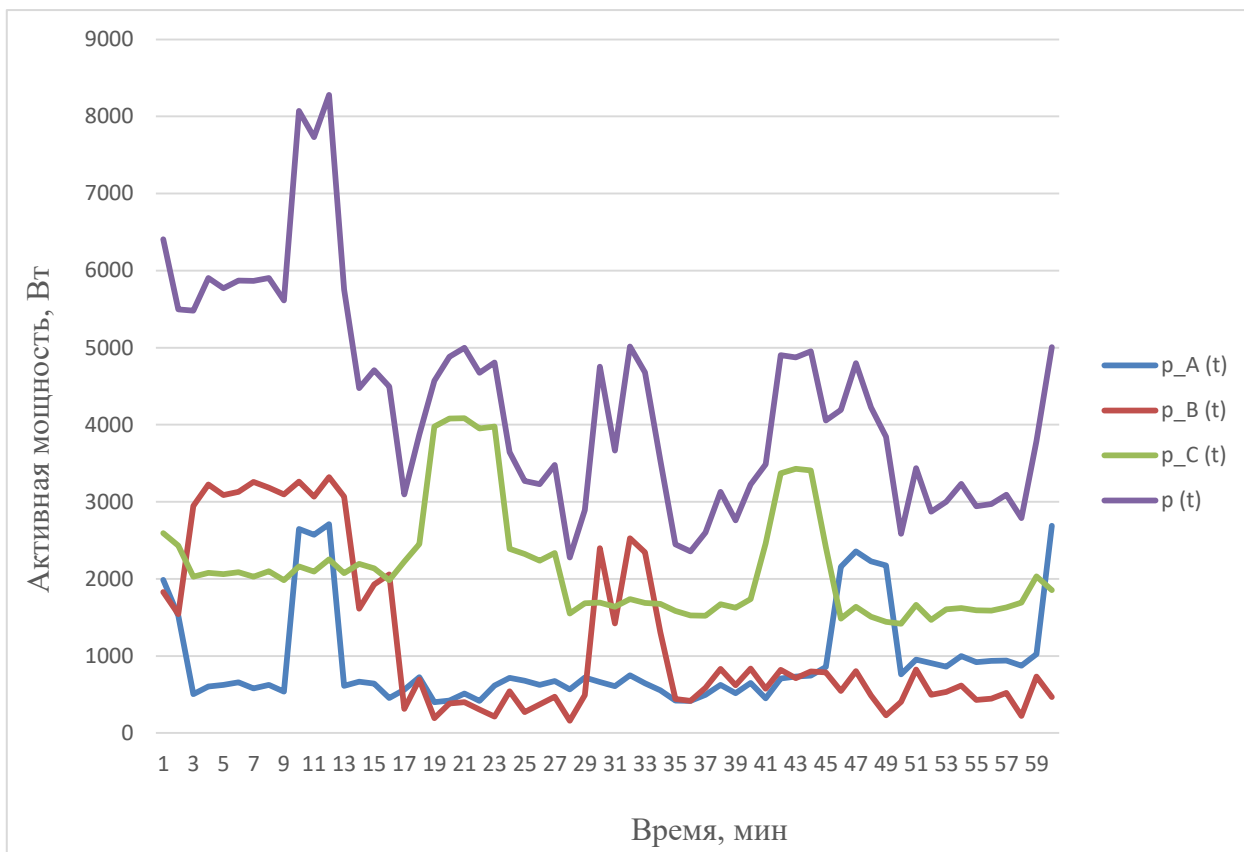


Рисунок 1. Фрагмент суточного графика MicroGrid от 05 августа 2019 г. за период времени с 6:42 до 7:41. Здесь $p_A(t)$ – изменение активной мощности фазы А, Вт; $p_B(t)$ – изменение активной мощности фазы В, Вт; $p_C(t)$ – изменение активной мощности фазы С, Вт

- Π_{II} – информационная подсистема, формирующая вектор управляющих сигналов $\dot{Y}(t)$:

$$\dot{Y}(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_L(t)\}$$

в зависимости от состояния вектора сигналов обратной связи $\dot{Y}_{0C}(t)$:

$$\dot{Y}_{0C}(t) = \{u^A(t), u^B(t), u^C(t), i_1^A(t), i_1^B(t), i_1^C(t), \dots, i_n^A(t), i_n^B(t), i_n^C(t)\},$$

в зависимости от состояния вектора задающих воздействий надсистемы $\dot{Y}_{31}(t)$:

$$\dot{Y}_{31}(t) = \{y_1^{31}(t), y_2^{31}(t), \dots, y_F^{31}(t)\},$$

вектора задающих воздействий подсистемы ИСЭ $\dot{Y}_{32}(t)$:

$$\dot{Y}_{32}(t) = \{y_1^{32}(t), y_2^{32}(t), \dots, y_G^{32}(t), \dots\},$$

векторов задающих воздействий, формируемых подсистемами $\Pi_1 - \Pi_n$.

Отметим, что вектор $\dot{Y}_{32}(t)$ включает в себя цели подсистем $\Pi_1 - \Pi_n$ и внешние неэнергетические воздействия.

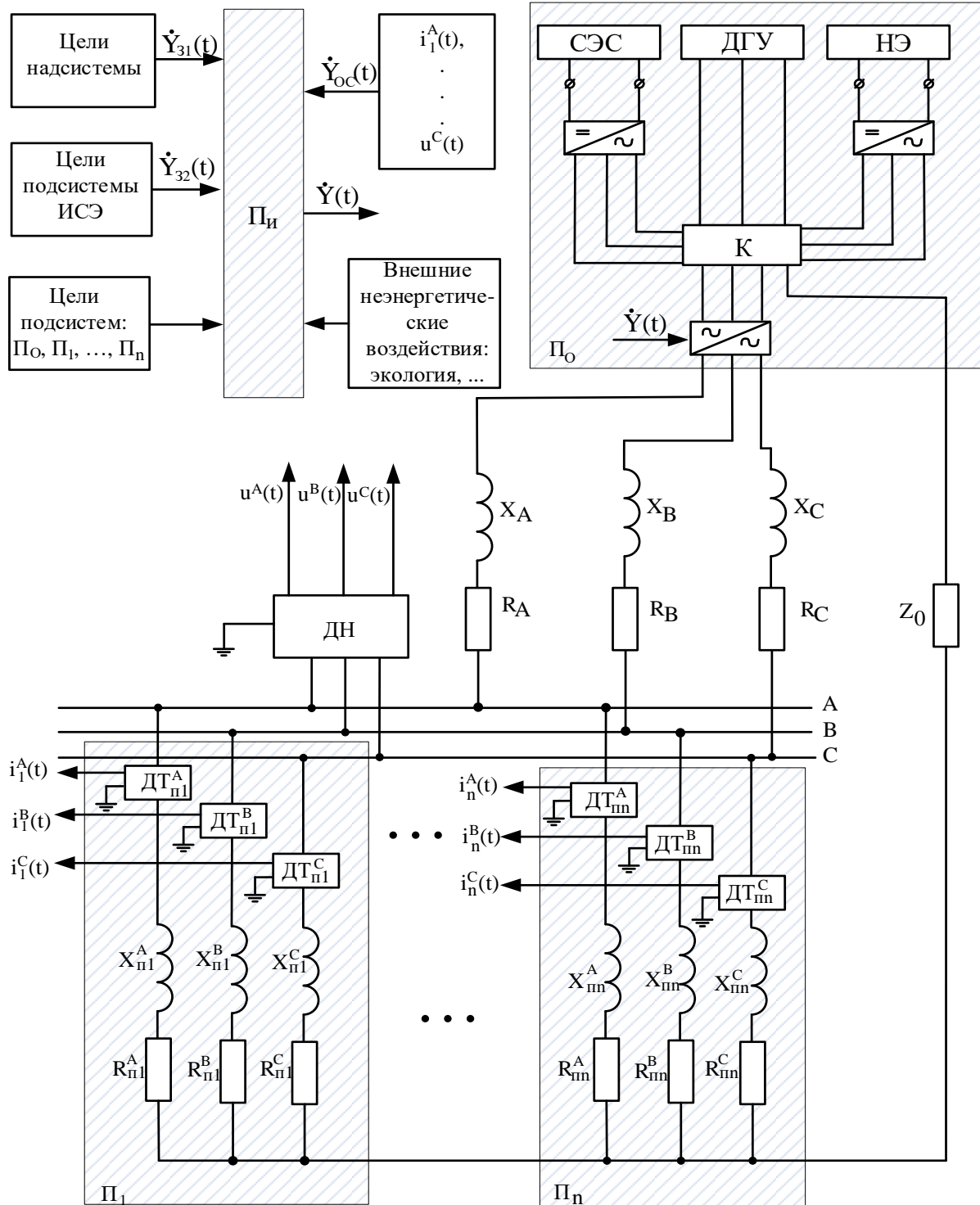


Рисунок 2. Типовая структурная модель MicroGrid Крайнего Севера: Π_0 – подсистема «Гибридная электрическая станция»; Π_1 - Π_n – подсистемы потребителей электрической энергии; $\Pi_{И}$ – информационная подсистема; СЭС – солнечная электрическая станция; ДГУ – дизель-генераторная установка; НЭ – накопитель энергии, в общем случае – гибридный; К – коммутатор; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока

Гибридная электрическая станция, как правило, вырабатывает переменную трёхфазную ЭДС, форма которой отличается от синусоидальной, которая требуется согласно действующему законодательству на качество электрической энергии. Поэтому для глубокого анализа процессов преобразования энергии в системах с гибридными электрическими станциями ЭДС, вырабатываемую каждой фазой системы, следует представлять в виде гармонического ряда с

ограниченным набором гармоник. В рамках данной работы процессы преобразования энергии в гибридной системе электроснабжения рассматриваются от воздействия основной гармоники каждой фазы системы, имеющей частоту $\omega_{(1)}$. Таким образом, закон изменения ЭДС, вырабатываемой каждой фазой системы электроснабжения, может быть записан следующим образом:

$$\begin{cases} e_{L1(1)}(t) = \sqrt{2}E_{L1(1)} \cdot \sin(\omega_{(1)}t + \varphi_{L1(1)}) \\ e_{L2(1)}(t) = \sqrt{2}E_{L2(1)} \cdot \sin\left(\omega_{(1)}t + \varphi_{L2(1)} - \frac{2}{3}\pi\right) \\ e_{L3(1)}(t) = \sqrt{2}E_{L3(1)} \cdot \sin\left(\omega_{(1)}t + \varphi_{L3(1)} + \frac{2}{3}\pi\right) \end{cases} \quad (1)$$

В последней системе:

$E_{L1(1)}$, $E_{L2(1)}$ и $E_{L3(1)}$ – действующие значения основной гармоники ЭДС в соседних фазах. Предполагая, что рассматриваемая в данной работе система электроснабжения является симметричной, вводим следующее допущение $E_{L1(1)} = E_{L2(1)} = E_{L3(1)} = E$;

$\varphi_{L1(1)}$, $\varphi_{L2(1)}$ и $\varphi_{L3(1)}$ – начальные фазы основной гармоники ЭДС в соседних фазах. В случае если система электроснабжения в рамках данной работы рассматривается как симметричная, предполагаем, что $\varphi_{L1(1)} = \varphi_{L2(1)} = \varphi_{L3(1)} = 0$.

Учитывая вышеизложенные допущения для системы уравнений (1) и применяя символический метод расчёта цепей переменного тока, преобразуем систему уравнений (1) к виду:

$$\begin{cases} \dot{E}_{L1} = A\{e_{L1(1)}(t)\} = E \cdot e^{j0} \\ \dot{E}_{L2} = A\{e_{L2(1)}(t)\} = E \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi} \\ \dot{E}_{L3} = A\{e_{L3(1)}(t)\} = E \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi} \end{cases} \quad (2)$$

В системе уравнений (2) A – оператор преобразования функций законов изменения ЭДС $e_{L1(1)}(t)$, $e_{L2(1)}(t)$ и $e_{L3(1)}(t)$ к их представлению на комплексной плоскости.

Потери энергии в подсистеме Π_0 моделируются сопротивлениями Z_{L1} , Z_{L2} , Z_{L3} и Z_N . Отметим, что идентификация параметров Z_{L1} , Z_{L2} , Z_{L3} и Z_N представляет собой отдельную задачу [18] и не рассматривается в настоящей работе. Соответственно имеем:

$$\begin{cases} Z_{L1} = R_A + j(\omega_{(1)}L_{L1}) \\ Z_{L2} = R_B + j(\omega_{(1)}L_{L2}) \\ Z_{L3} = R_C + j(\omega_{(1)}L_{L3}) \\ Z_N = Z_0(R_0, (\omega L_0), (\omega C_0)) \end{cases} \quad (3)$$

Тогда при условии линейности характеристик Π_1 до включительно Π_n имеем выражения:

$$\begin{cases} \dot{Z}_k^{L1} = Z_k^{L1} \cdot e^{j\varphi_k^{L1}} \\ \dot{Z}_k^{L2} = Z_k^{L2} \cdot e^{j\varphi_k^{L2}} \\ \dot{Z}_k^{L3} = Z_k^{L3} \cdot e^{j\varphi_k^{L3}} \\ k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

В последней системе уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_k^{L1} = \sqrt{(R_k^{L1})^2 + (\omega_{(1)}L_k^{L1})^2} \\ Z_k^{L2} = \sqrt{(R_k^{L2})^2 + (\omega_{(1)}L_k^{L2})^2} \\ Z_k^{L3} = \sqrt{(R_k^{L3})^2 + (\omega_{(1)}L_k^{L3})^2} \\ \\ \varphi_k^{L1} = \arctan\left(\frac{\omega_{(1)}L_k^{L1}}{R_k^{L1}}\right) \\ \varphi_k^{L2} = \arctan\left(\frac{\omega_{(1)}L_k^{L2}}{R_k^{L2}}\right) \\ \varphi_k^{L3} = \arctan\left(\frac{\omega_{(1)}L_k^{L3}}{R_k^{L3}}\right) \\ k = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (5)$$

Дальнейшие преобразования позволяют перейти к решению частной задачи прогнозирования и оценки качества электрической энергии изолированной системы электроснабжения малых поселений. А именно, к построению методики прогнозирования и оценки долевого вклада каждого из потребителей электрической энергии в изменение фазных напряжений, при нелинейном характере минимум одного из потребителей электрической энергии в точке общего присоединения.

Пусть $\Delta\dot{U}_k^A, \Delta\dot{U}_k^B, \Delta\dot{U}_k^C, k=1, \dots, n$ «доли соответствующего потребителя», показывающие их вклад в отклонение значения напряжения в контролируемой точке, тогда в рамках принятых выше допущений можно показать, что:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\dot{U}_k^A = \frac{\dot{U}_\Pi^A}{Z_k^A} Z_A \\ \Delta\dot{U}_k^B = \frac{\dot{U}_\Pi^B}{Z_k^B} Z_B, \\ \Delta\dot{U}_k^C = \frac{\dot{U}_\Pi^C}{Z_k^C} Z_C \\ k = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (6)$$

где $\dot{U}_\Pi^A, \dot{U}_\Pi^B, \dot{U}_\Pi^C$ – значения фазных напряжений в точке общего присоединения потребителей согласно рис. 2.

Тестирование предложенной методики было проведено на следующей задаче. Количество потребителей – два. Первый потребитель (Π_1) имеет параметры, соответствующие точке 1 на рис. 1 (нелинейный, несимметричный). Параметры Π_1 приняты неизменными в ходе вычислительного эксперимента. Второй потребитель (Π_2) – линейный, симметричный, с номинальной мощностью 5,5 кВт и номинальным коэффициентом мощности 0,81. Исследовалась работа системы при изменении потребляемой мощности Π_2 в диапазоне от холостого хода до 1,1 номинальной, при неизменном значении коэффициента мощности Π_2 . В ходе эксперимента установлено (рис. 3), что при мощности потребления Π_2 , превышающей 0,3 номинальной, напряжение фазы С становится ниже допустимого по ГОСТ 32144 – 2013 [30].

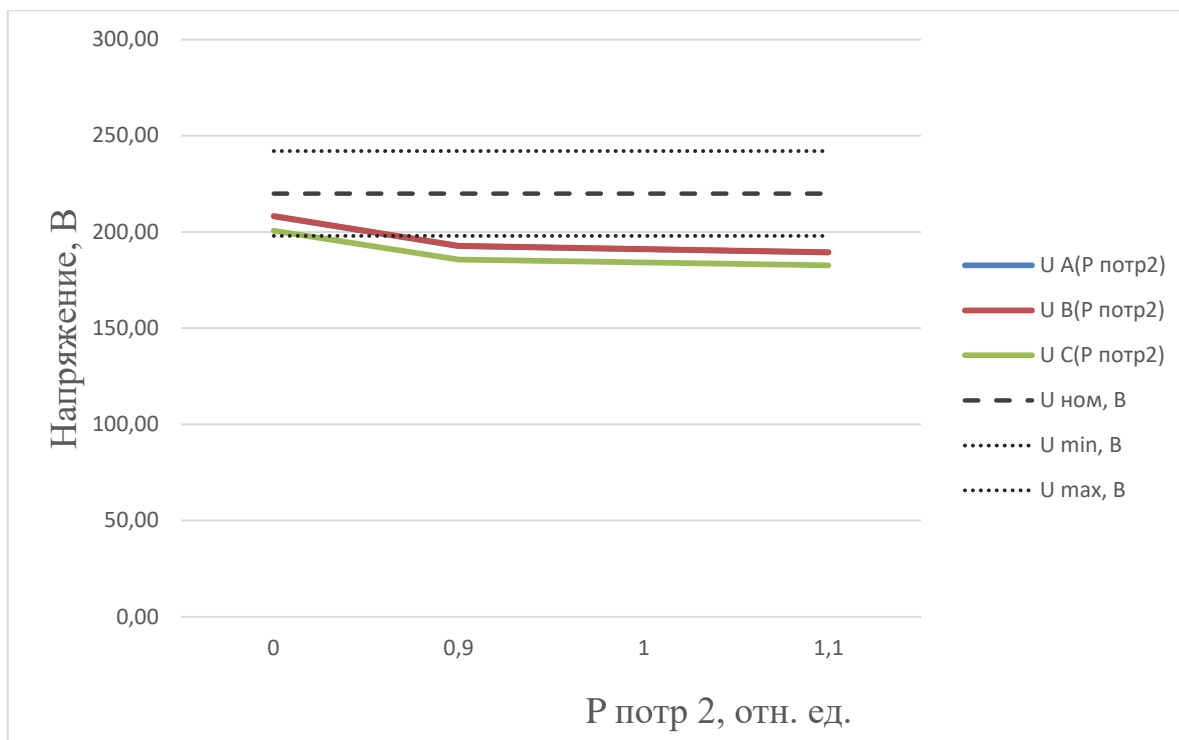


Рисунок 3. Изменение действующего значения напряжения в точке общего присоединения П₁ и П₂ в соответствии с рис. 1

Выводы

1. Детализировано понятие MicroGrid применительно к целям и задачам настоящей работы.
2. Показаны системные особенности электропотребления в MicroGrid Крайнего Севера.
3. Предложена структурно-функциональная модель MicroGrid Крайнего Севера.
4. Предложена методика построения математической модели MicroGrid Крайнего Севера.
5. Разработан алгоритм прогнозирования и оценки качества электрической энергии MicroGrid Крайнего Севера.
6. Проведено тестирование разработанного алгоритма прогнозирования и оценки качества электрической энергии MicroGrid Крайнего Севера. Показано наличие возможности выхода показателей качества электрической энергии за рамки допустимого по ГОСТ 32144 – 2013.

Благодарим Школу научного лидерства Центра развития компетенций Западно-Сибирского НОЦ за поддержку и сопровождение в подготовке этой статьи.

Список литературы

1. Siamanta, Z.C. Conceptualizing alternatives to contemporary renewable energy development: Community Renewable Energy Ecologies (CREE) / Z. C. Siamanta // Journal of Political Ecology. – 2021. – Vol. 28, № 1. – P. 47–69.
2. Wang, J. The relationship of renewable energy consumption to financial development and economic growth in China / J. Wang, S. Zhang, Q. Zhang // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 170. – P. 897–904.
3. Ansari, M. A. Do renewable energy and globalization enhance ecological footprint: an analysis of top renewable energy countries? / M. A. Ansari, S. Haider, T. Masood // Environmental Science and Pollution Research. – 2021. – Vol. 28, № 6. – P. 6719–6732.

4. Multifactorial components analysis of the renewable energy sector in the oecd countries and managerial implications / A. M. Androniceanu, I. Georgescu, C. Dobrin, I. V. Dragulanesu // Polish Journal of Management Studies. – 2020. Vol. 22, № 2. – P. 36–49.
5. Ali, A. Natural Resources Depletion, Renewable Energy Consumption and Environmental Degradation: A Comparative Analysis of Developed and Developing World / A. Ali, M. Audi, Y. Rousel // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2021. – Vol. 11, № 3. – P. 251–260.
6. Alola, A. A. Renewable energy consumption in Coastline Mediterranean Countries: impact of environmental degradation and housing policy / A. A. Alola, U. V. Alola, S. S. Akadiri // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – Vol. 26, № 25. – P. 25789–25801.
7. Oanh, T. T. K. Renewable Energy, Foreign Direct Investment, Economic Growth, and Environmental Degradation in Asian Countries / T. T. K. Oanh, N. T. Quoc, P. T. N. Dieu // International Journal of Energy, Environment and Economics. – 2021. – Vol. 28, № 2. – P. 87–102.
8. Design and optimal energy management of community microgrids with flexible renewable energy sources / N. Tomin, V. Shakirov, A. Kozlov [et al.] // Renewable Energy. – 2022. – Vol. 183. – P. 903–921.
9. Архипова, О. В. Принципы и средства исследования регионально обособленного электротехнического комплекса с позиций системного анализа / О. В. Архипова. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2020. – № 3 (171). – С. 42–46.
10. Воропай, Н. И. Теория систем для электроэнергетиков / Н. И. Воропай. – Новосибирск : Наука, 2000. – 273 с. – ISBN 5-02-031274-6. – Текст : непосредственный.
11. Папков, Б. В. Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков / Б. В. Папков, А. Л. Куликов. – 2-е издание, исправленное и дополненное. – Москва : Юрайт, 2019. – 470 с. – Текст : непосредственный.
12. Павлюк, Г. П. Формулировка комплексной оптимизационной задачи построения микрогрид арктического анклава в мультиагентном представлении / Г. П. Павлюк, А. К. Абд-Эльрахим, В. А. Шихин. – Текст : непосредственный // Российская Арктика. – 2020. – № 8. – С. 52–64.
13. Economy-environment-energy performance evaluation of CCHP microgrid system: A hybrid multi-criteria decision-making method / H. Zhao, B. Li, X. Wang [et al.] // Energy. – 2022. – Vol. 240. – P. 122830.
14. Assessment of Microgrid Potential in Southeast Asia Based on the Application of Geospatial and Microgrid Simulation and Planning Tools / P. Bertheau, M. M. Hoffmann, A. Eras-Almeida, P. Blechinger // Green Energy and Technology. – 2020. – P. 149–178.
15. Microgrid Systems: Towards a Technical Performance Assessment Frame / S. Marchand, J. Ungerland, C. Monsalve [et al.] // Energies. – 2021. – Vol. 14, № 8. – P. 2161.
16. Multi-energy microgrid optimal operation with integrated power to gas technology considering uncertainties / A. Mobasser, A. A. Ghadimi, M. Tostado-Véliz [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 333. – P. 130174.
17. Архипова, О. В. Методика моделирования регионально обособленного электротехнического комплекса / О. В. Архипова, В. З. Ковалев, Р. Н. Хамитов. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 1. – С. 173–180.
18. Hemmati, R. Resilience-oriented adaptable microgrid formation in integrated electricity-gas system with deployment of multiple energy hubs / R. Hemmati, H. Mehrjerdi, S. M. Nosratabadi // Sustainable Cities and Society. – 2021. – Vol. 71. – P. 102946.
19. Hierarchical energy optimization management of active distribution network with multi-microgrid system / S. Wenzhi, H. Zhang, L. Xinyang [et al.] // Journal of Industrial and Production Engineering. – 2021.
20. Multi-microgrid Energy Management Systems: Architecture, Communication, and Scheduling Strategies / B. Zhou, J. Zou, D. Xu [et al.] // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2021. – Vol. 9, № 3. – P. 463–476.

21. An Economical Energy Management Strategy for Viable Microgrid Modes / S. Abid, N. Javaid, T. A. Alghamdi [et al.] // *Electronics (Switzerland)*. – 2019. – Vol. 8, № 12. – P. 1442.
22. An expected-cost realization-probability optimization approach for the dynamic energy management of microgrid / J. Zhu, Y. Zhuo, J. Chen [et al.] // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2022. – Vol. 136. – P. 107620.
23. Наумов, А. А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии / А. А. Наумов. – DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92. – Текст : непосредственный // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 85–92.
24. Rani, M. D. Power quality assessment in grid connected mode hybrid microgrid with various loads / M. D. Rani, M. V. G. Rao, P. S. Prakash // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2021. – Vol. 99, № 18. – P. 4241–4252.
25. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected / L. Ye, P. Lu, Y. Zhao [et al.] // *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao*. – 2021. – Vol. 41, № 18. – P. 6189–6197.
26. Elkholy, A Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems / A. Elkholy // *Solar Energy*. – 2019. – Vol. 183. – P. 315–326.
27. A novel unbalanced power flow analysis in active AC-DC distribution networks considering PWM convertors and distributed generations / S. Mousavizadeh, M.-R. Haghifam, B. T. Ghanizadeh [et al.] // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2022. – Vol. 138. – P. 107938.
28. Optimal Configuration of Wind-Solar-Hydrogen Multi-Energy Complementary Microgrid With Demand Side / W. Chen, W. Fu, Y. Han [et al.] // *Xinan Jiaotong Daxue Xuebao*. – 2021. – Vol. 56, № 3. – P. 640–649.
29. Voltage stability enhancement in grid-connected microgrid using enhanced dynamic voltage restorer (EDVR) / A. Iqbal, A. Waqar, S. Haider [et al.] // *AIMS Energy*. – 2021. – Vol. 9, № 1. – P. 150–177
30. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст : введен впервые : дата введения 2014-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 19 с. – Текст : непосредственный.