

Синтез электротехнических комплексов генерирования электрической энергии, использующих возобновляемые источники энергии

*О.В. Архипова, А.В. Денисенко, М.А. Крохалев, О.А. Петухова,
Э.И. Хусаинов, Е.С. Балыклов*

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

Аннотация: В статье описываются результаты спектрального анализа потребляемой мощности малого поселения сибирского региона. Предлагается структура электротехнического комплекса генерирования электрической энергии с гибридным накопителем энергии. Показано, что в общем случае, оптимальный гибридный накопитель энергии должен состоять из N компонент, различающихся по соотношению: допустимая частота цикла заряд-разряд к стоимости компоненты. В качестве критерия выбора предлагается оценка по удельной приведенной стоимости выработанной электроэнергии.

Ключевые слова: гибридный накопитель энергии, электротехнический комплекс, возобновляемая энергия, суточный график нагрузки, спектральный анализ, ряд Фурье.

Территория Российской Федерации, обеспечиваемая централизованным электроснабжением, составляет порядка 30-40%. Оставшиеся 70-60% территории обеспечиваются электрической энергией с помощью [1] изолированных систем электроснабжения (ИСЭ). Здесь находятся и регионы (Дальний Восток, территории Крайнего Севера), перспективные в плане освоения природных ресурсов: запасы нефти и газа, рудные месторождения. Это делает задачу электроснабжения децентрализованной зоны актуальной. Как правило, решение данной проблемы строится на активном вовлечении в процесс генерации электрической энергии двух взаимодополняющих компонент [2-4]: установок электрогенераторных с дизельными приводными двигателями (ДЭУ) и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В такой комбинации ДЭУ выступает в роли гарантирующего поставщика, обеспечивающего потребителя электроэнергией при различных суточных и/или сезонных траекториях генерации от ВИЭ. Экспериментальные данные выявляют еще одну особенность генерации наиболее зарекомендовавших себя типов ВИЭ –

ветроэнергетических установок (ВЭУ) и фотоэлектрических (ФЭУ) - это значительные флуктуации поставляемой энергии, носящие стохастический характер, с относительно высокими частотами. Например, для ВЭУ в ходе эксперимента, на протяжении часа фиксировались флуктуации выходной мощности, которые «имеют диапазон от 0 до 48% установленной мощности, с периодом частоты 7...8 с.» [5]. Данные «эксплуатации экспериментальной солнечной станции в Новочебоксарске» [5] также показывают существенные колебания вырабатываемой мощности, что, по мнению авторов указанной работы, обусловлено зафиксированными колебаниями инсоляции (табл.1).

Таблица 1.

Максимальные и минимальные значения солнечной радиации по получасиям (интерпретация данных работы [5], (рис.7))

п/п	Временной интервал, ч	Максимальное значение солнечной радиации, Вт/м ²	Минимальное значение солнечной радиации, Вт/м ²
1	09:30 - 10:00	1000	218
2	10:00 - 10:30	967	218
3	10:30 - 11:00	1084	223
4	11:00 - 11:30	864	195
5	11:30 - 12:00	971	218
6	12:00 - 12:30	948	286
7	12:30 - 13:00	1064	255
8	13:00 - 13:30	777	231
9	13:30 - 14:00	943	419
10	14:00 - 14:30	1281	227
11	14:30 - 15:00	485	143
12	15:00 - 15:30	532	255

Возникающие «риски от стохастического характера электроэнергии поставляемой от ВИЭ» [6], в изолированных системах электроснабжения, авторы работ [5] и [7-9] предлагают «парировать» обязательным введением в структуру электротехнического комплекса генерирования электрической энергии гарантирующего поставщика в виде ДЭС и гибридного накопителя электрической энергии (ГНЭ) (рис.1).

Целью работы является обоснование структуры и параметров гибридного накопителя энергии, при синтезе электротехнических комплексов генерирования электрической энергии, использующих возобновляемые источники энергии.

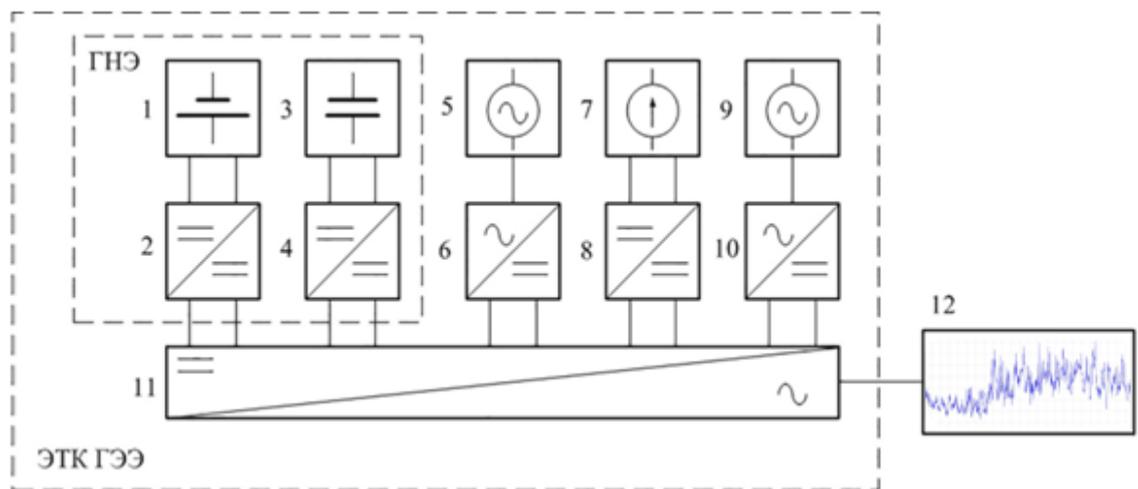


Рис. – 1. Структура электротехнического комплекса генерирования электрической энергии с гибридным накопителем энергии: 1 — накопитель энергии на базе аккумуляторной батареи; 3 — накопитель энергии на базе суперконденсатора; 5 — ВЭУ; 7 - ФЭУ; 9 — ДЭУ; 2, 4, 6, 8, 10, 11 — преобразователи энергии; 12 — потребитель электрической энергии, имеющий характерный график нагрузки; ГНЭ — гибридный накопитель электрической энергии; ЭТК ГЭЭ — электрический комплекс генерирования электрической энергии.

Дополнительно, в качестве инструмента повышения энергоэффективности ФЭУ, предлагается введение системы управления

пространственным положением фотопанели по критерию максимальной мощности [10], при этом становится эффективным и дистанционное управление через спутниковые ресурсы, например, ФГУП «Космическая связь» [11].

Оптимальное использование рассмотренных ранее технологий требует детального исследования и описания характера нагрузки, для которой предназначен электротехнический комплекс генерирования электрической энергии. В качестве иллюстрации рассмотрим нагрузку характерную для малых поселений северных регионов (рис.1,2). В графике мощности содержится значительная по амплитуде стохастическая компонента, существенно превосходящая сезонные, суточные и технологические составляющие. В силу: сравнимости по мощности отдельных потребителей между собой и сравнимости мощности потребителей с мощностью всей энергосистемы, здесь отсутствует эффект взаимного погашения высокочастотных флуктуаций, в отличие от больших электроэнергетических систем [12].

Таким образом, при построении электротехнического комплекса генерирования электрической энергии для малых поселений, необходимо учитывать два стохастических процесса: производство электрической энергии ВИЭ и характер потребления электрической энергии. Согласующим элементов в таком электротехническом комплексе предлагается использовать ГНЭ.

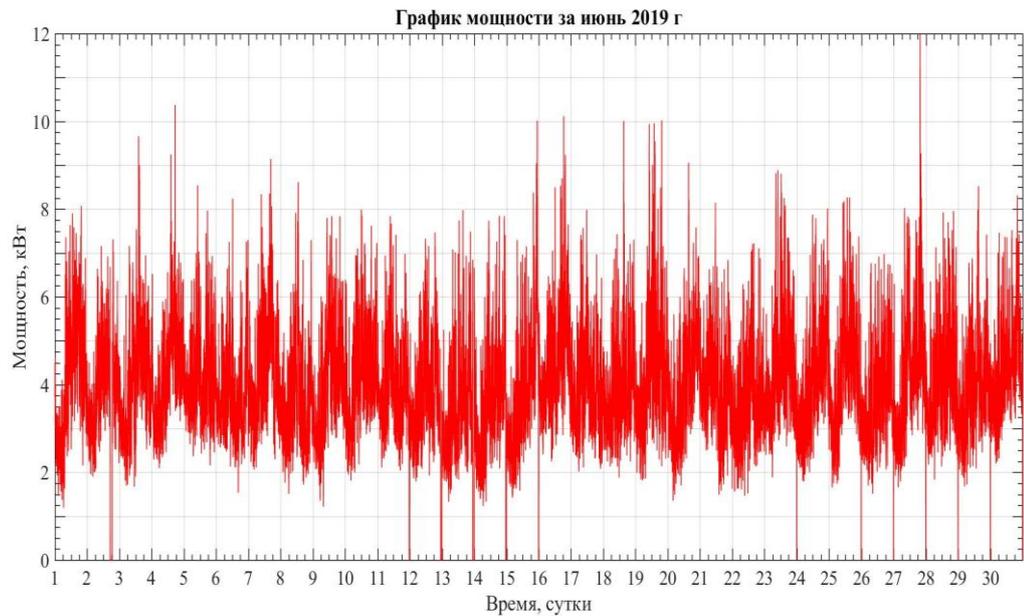


Рис.2. – График мощности, потребленной за июнь 2019г. деревней Никулкина, ХМАО – Югра (шаг регистрации – 2 минуты)

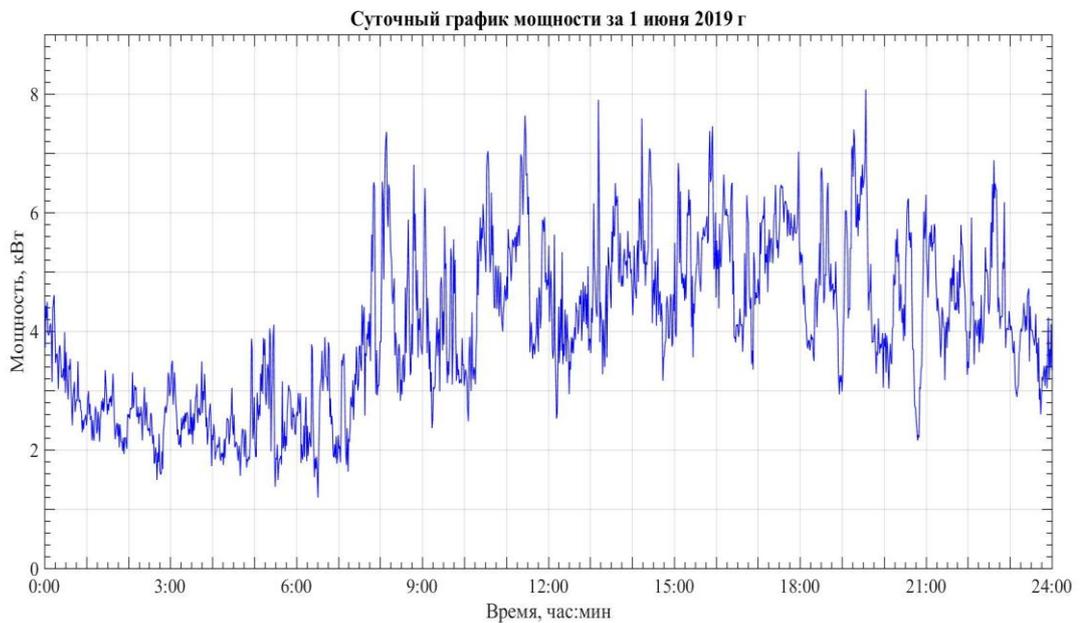


Рис.3. – График мощности, потребленной за 1 июня 2019 г. деревней Никулкина, ХМАО - Югра (шаг регистрации – 2 минуты)

Соответственно возникает задача оптимального выбора параметров ГНЭ (оптимальные параметры других компонент выбираем по методике [13]). В работах [7,14] предлагается ГНЭ состоящий из двух одинаковых

компонент, работающих в противофазе. Что существенно увеличивает срок службы ГНЭ при относительно низкочастотном характере нагрузки. В нашем случае предлагается:

- строить ГНЭ на базе двух взаимодополняющих накопителей энергии, один из которых оптимален для «высокочастотных» компонент (ГНЭ_{ВЧ}), другой - для «низкочастотных» (ГНЭ_{НЧ}). Для выбора параметров ГНЭ_{ВЧ} и ГНЭ_{НЧ} необходимо соответственно разделить энергетические потоки. Для этого в данной работе используем спектральный Фурье – анализ. Экспериментально зафиксирован интервал потребления нагрузки длительностью два года, с шагом равным две минуты. Прямое разложение в ряд Фурье в данном случае даст некорректные результаты [15]. Здесь необходимо использовать оконное преобразование Фурье. Ряд вычислительных экспериментов показал, что удовлетворительными результатами обладает окно Ханна [16]:

$$W_n = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{n}{N} \right) \right), \quad 0 \leq n \leq N, \quad L = N + 1;$$

где L – размер окна в отсчетах.

На примере данных, приведенных на рис.3, проведен вычислительный эксперимент: интервал рассмотрения – 1440 мин с шагом 2 мин., окно – 64 мин., перекрытие окон принималось равным 50%, деревня Никулкина, установленная мощность – 36,6 кВт, разрешенная мощность – 21 кВт.

В ходе спектрального анализа, проведенного по предложенному алгоритму, выделяются циклы: суточные, 8 и 12 часовые циклы, 1 и 1,5 часовые, и кратные им более высокие частоты с близкими амплитудами (рис.4).

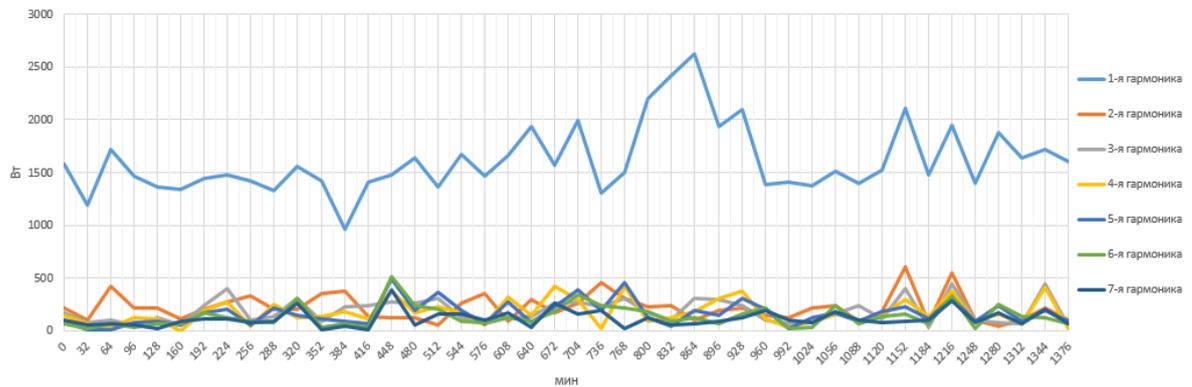


Рис. 4. – Фрагмент распределения амплитуд гармоник потребляемой мощности суточной нагрузки, дер. Никулкина, 1 июня 2019г.

Заключение. Энергетический подход [17] к подбору компонент ГНЭ – требует N видов накопителей электрической энергии, различающихся по соотношению: допустимая частота цикла заряд-разряд к стоимости компоненты. Что требует дополнительных исследований с применением арбитражирующих критериев базирующийся на показателях «удельной приведенной стоимости выработанной электроэнергии (levelized cost of electricity — $LCOE$)» [18]. При конструировании $LCOE$ учитываются затраты инвестиционного и операционного характера на протяжении всего жизненного цикла, анализируемого ИСЭ_{*i*} поселения «*i*»:

$$LCOE_i = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{IR_i(t) + OR_i(t) + FR_i(t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{ER_i(t)}{(1+r)^t}} ;$$

где $IR_i(t)$ - инвестиции в ИЭС поселения «*i*», осуществленные в году t , руб.;

$OR_i(t)$ - операционные расходы и расходы на техническое обслуживание ИЭС поселения «*i*», осуществленные в году t , руб.;

$FR_i(t)$ - расходы ИЭС поселения «*i*» на ГСМ, осуществленные в году t , руб.;

$ER_i(t)$ - производство электрической энергии ИЭС поселения « i », осуществленное в году t , кВт*ч;

t – текущий год;

T – длительность жизненного цикла РОЭТК, год;

r – ставка дисконтирования; (в некоторых исследованиях принимается равной ставке рефинансирования);

$$IP \geq i \geq 1;$$

IP – количество ИСЭ (в общем случае проектирование ведется для совокупности ИСЭ объединенных как правило административной принадлежностью).

Прямое применение критерия $LCOE$, для решения проблемы минимизации себестоимости производства электрической энергии РОЭТК, сводится к поиску методами оптимизации компонент вектора:

$$MIN_{LCOE} = \{MIN_{LCOE1}, MIN_{LCOE2}, \dots, MIN_{LCOEIP}\};$$

где MIN_{LCOEi} – глобальный минимум $LCOE_i$ определенный для « i »-й ИСЭ входящей в анализируемую совокупность. В этом случае на основании анализа компонент вектора MIN_{LCOE} принимаются решения в области проектирования, создания, и эксплуатации анализируемой системы.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства ХМАО — Югры в рамках научного проекта № 18-47-860017.

Литература

1. Елистратов В.В. Оптимальные решения системы автоматического управления энергокомплексов средней мощности на основе возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. №2. С. 69-85.

2. Шеина С.Г., Грачев К.С. Лучшие европейские практики для внедрения возобновляемых источников энергии в РФ // Инженерный вестник Дона. 2019. №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2019/5993
 3. Шеина С.Г., Пирожникова А.П. Тенденции развития альтернативной энергетики в странах мира и России // Инженерный вестник Дона. 2016. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720
 4. Штайнер В.Ю., Питык А.Н., Архипова Е.С., Колотиенко М.А. Энергосбережение в России: основные проблемы и перспективы // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4564
 5. Тягунов М.Г., Шевердиев Р.П. 5. Влияние режимов работы гибридных энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии на определение типа аккумуляторов энергии // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2020. №4. С. 62-70.
 6. Соснина Е.Н., Шалухо А.В. Исследование риска от стохастического характера генерации в изолированных системах с возобновляемыми источниками энергии // Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность. Материалы IV Международного конгресса REENCON-XXI. Под редакцией Дуникова Д.О., Попеля О.С.: 2018. С. 213- 218.
 7. Obukhov S., Ibrahim A., Tolba M.A., El-Rifaie A.M. Power balance management of an autonomous hybrid energy system based on the dual-energy storage // Energies. 2019. V. 12. №24. pp. 46-90.
 8. Хамитов Р.Н., Ковалев В.З., Архипова О.В., Есин С.С. Модель регионально обособленного электротехнического комплекса с учетом графиков электрической нагрузки потребителей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. №12-2. С. 200-204.
-

9. Архипова О.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н. Методика моделирования регионально обособленного электротехнического комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. №1. С. 173-180.

10. Ibrahim A., Aboelsaud R., Obukhov S. Maximum power point tracking of partially shading pv system using cuckoo search algorithm // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2019. V. 10. №2. pp. 1081-1089.

11. Frolov A.V., Grigoriev A.S., Korolev A.V., Losev O.G., Melnik D.A. Hybrid stand-alone power supply systems for the arctic polar stations // Russian Meteorology and Hydrology. 2019. V. 44. №4. pp. 305-310.

12. Kuster C., Rezgui Y., Mourshed M. Electrical load forecasting models: A critical systematic review. Sustainable Cities and Society, 2017, vol. 35, pp. 257–270. URL: doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.009.

13. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Оптимизация установленной мощности фотоэлектростанций в составе дизельных систем электроснабжения северных поселков // Научное обозрение. Технические науки. 2018. №6. С. 16-21.

14. Обухов С.Г., Плотников И.А., Ибрагим А., Масолов В.Г. Двухконтурный накопитель энергии для гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331 №1. С. 64-76.

15. Жук В.В., Натансон Г.И. Тригонометрические ряды Фурье и элементы теории аппроксимации. Л.: изд. ЛГУ, 1983. 186 с.

16. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 265 с.

17. Ковалев В.З., Мальгин Г.В., Архипова О.В. Математическое моделирование электротехнических комплексов нефтегазодобычи в задачах энергосбережения. Ханты-Мансийск: ЮГУ, 2008. 222 с.

18. Архипова О. В. Принципы и средства исследования регионально обособленного электротехнического комплекса с позиций системного анализа // Омский научный вестник. 2020. №3 (171). С. 42-46. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-42-46.

References

1. Yelistratov V.V. Silovoye i energeticheskoye oborudovaniye. Avtonomnyye sistemy. 2019. №2. pp. 69-85.

2. Sheina S.G., Grachev K.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2019/5993

3. Sheina S.G., Pirozhnikova A.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720

4. Shtayner V.YU., Pityk A.N., Arkhipova E.S., Kolotiyenko M.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4564

5. Tyagunov M.G., Sheverdiyev R.P. 5. Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI. 2020. №4. pp. 62-70.

6. Sosnina E.N., Shalukho A.V. Vozobnovlyayemaya energetika XXI vek: Energeticheskaya i ekonomicheskaya effektivnost'. Materialy IV Mezhdunarodnogo kongressa REENCON-XXI. Pod redaktsiyey Dunikova D.O., Popelya O.S.: 2018. pp. 213- 218.

7. Obukhov S., Ibrahim A., Tolba M.A., El-Rifaie A.M. Energies. 2019. V. 12. №24. pp. 46-90.

8. Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Arkhipova O.V., Yesin S.S. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2018. №12-2. pp. 200-204.

9. Arkhipova O.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2019. №1. pp. 173-180.
10. Ibrahim A., Aboelsaud R., Obukhov S. International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2019. V. 10. №2. pp. 1081-1089.
11. Frolov A.V., Grigoriev A.S., Korolev A.V., Losev O.G., Melnik D.A. Russian Meteorology and Hydrology. 2019. V. 44. №4. pp. 305-310.
12. Kuster C., Rezgui Y., Mourshed M. Sustainable Cities and Society, 2017, vol. 35, pp. 257–270. URL: doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.009
13. Dmitriyenko V.N., Lukutin B.V. Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskkiye nauki. 2018. №6. pp. 16-21.
14. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Ibragim A., Masolov V.G. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2020. V. 331 №1. pp. 64-76.
15. Zhuk V.V., Natanson G.I. Trigonometricheskkiye ryady Fur'ye i elementy teorii approksimatsii [Trigonometric Fourier series and elements of approximation theory]. L.: izd. LGU, 1983. 186 pp.
16. Marpl-ml. S.L. Tsifrovoy spektral'nyy analiz i yego prilozheniya [Digital spectral analysis and its applications] M.: Mir, 1990. 265 pp.
17. Arkhipova O. V. Omskiy nauchnyy vestnik. 2020. №3 (171). pp. 42-46. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-42-46.
18. Kovalev V.Z., Mal'gin G.V., Arkhipova O.V. Matematicheskoye modelirovaniye elektrotekhnicheskikh kompleksov neftegazodobychi v zadachakh energosberezheniya [Mathematical modeling of electrotechnical complexes of oil and gas production in problems of energy saving]. Khanty-Mansiysk: YUGU, 2008. 222 pp.