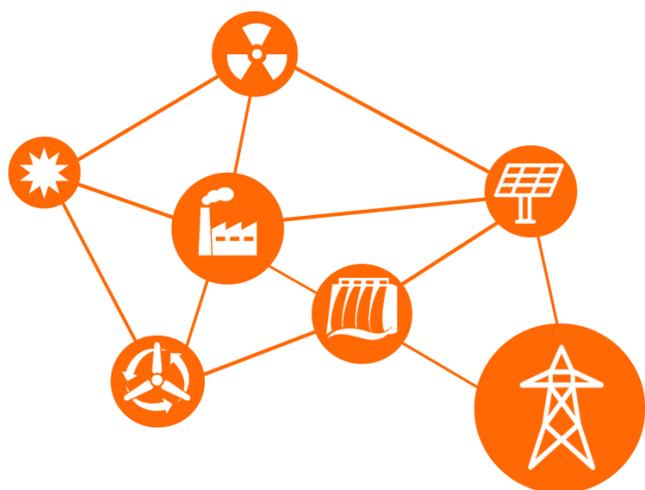


Институт систем энергетики  
им. Л.А. Мелентьева СО РАН

«СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ – 2022»



# Energy Systems Research

Тезисы  
III Всероссийской молодежной конференции  
с международным участием

24-26 мая 2022 год  
г. Иркутск

# СЕКЦИЯ 1. ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОТ УДАЛЁННЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

**О.А. Балдынов**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[oabaldynov@isem.irk.ru](mailto:oabaldynov@isem.irk.ru)

Ежегодно увеличивается доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в структуре мирового энергопотребления [1]. Согласно прогнозам [2, 3] доля потребления энергии от новых возобновляемых источников энергии (НВИЭ) продолжит увеличиваться в дальнейшем. Технический потенциал применения возобновляемых источников на территории пустыни Гоби, Атакамы, Сахары, побережья Северного Ледовитого океана, в зоне ветров Тихого океана и т.д. говорит о возможности создания в этих локациях крупных парков ВИЭ. [2, 5]. Данные регионы обладают подходящими природными и климатическими условиями для развития ВИЭ, при этом не являются густонаселенными. В результате возможным становится создание систем энергоснабжения от географически удаленных ВИЭ.

В тоже время существует ряд технических сложностей, связанных с использованием электроэнергии, генерируемой ВИЭ, и ее передачей на значительные расстояния (1 000 – 7 000 км):

- низкий коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) солнечных и ветровых электростанций,
- ограничение пропускной способности линий электропередач,
- необходимость использования систем аккумулирования и резервных электростанций для обеспечения надежности энергосистемы.

Альтернативой электронному транспорту может стать концепция «Power to X», заключающейся в использовании электрической энергии для производства синтетических топлив. На данный момент можно выделить несколько технологических цепочек: с применением сжиженного водорода, органических водородосодержащих веществ (например, метилциклогексан), «e-fuels» (например, зелёные аммиак и синтетический метан).

Создание конкретной системы энергоснабжения ВИЭ требует значительных объемов капиталовложений, развития наукоемких отраслей, подготовки высококвалифицированных кадров, разработки стандартов качества, изменения номенклатуры промышленного производства, внесения поправок в действующее законодательство, применения инвестиционных и налоговых инструментов. Данные системы отличаются друг от друга: различные показатели энергетической и экономической эффективности, отличия в производственном процессе, уровне антропогенного влияния на окружающую среду, степени принятия обществом и т.д.

Вследствие сказанного появляется задача подготовки методологического аппарата для проведения комплексной оценки систем энергоснабжения на предплановом и предпроектном этапах. Решение этой задачи позволяет определять ниши российских энергоресурсов на международных энергетических рынках (путём сравнения показателей производства энергии ВИЭ с другими странами-экспортерами); выбирать наиболее рациональный вариант построения энергетических систем (на основе технических, экономических, экологических критериев и политических аспектов).

#### Список источников

1. Global Energy Review 2020 // IEA [Электронный ресурс]. URL: - <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/renewables> (31.03.2022).
  2. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050 [Электронный ресурс], 2019 – Режим доступа: <https://www.irena.org/DigitalArticles/2019/Apr/-/media/652AE07BBAAC407ABD1D45F6BBA8494B.ashx>.
  3. World Energy Outlook 2021 report of IEA [Электронный ресурс], 2021 – Режим доступа: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf> (31.03.2022).
  4. Renewables Readiness Assessment: Mongolia // IRENA [Электронный ресурс]. URL: - <https://www.irena.org/publications/2016/Mar/Renewables-Readiness-Assessment-Mongolia> (31.03.2022).
  5. Energy Policies Beyond IEA Countries: Chile 2018 Review// IEA [Электронный ресурс]. URL: - <https://www.iea.org/reports/energy-policies-beyond-iea-countries-chile-2018-review> (31.03.2022).
- 

## THE RELATIONSHIP BETWEEN ENERGY CONSUMPTION AND INDUSTRIAL STRUCTURE

**Liu Xueyao**

Belarusian State University, Minsk

[18215686524@163.com](mailto:18215686524@163.com)

With the aim of sustainable economic development, the optimization and upgrading of industrial structure has become the main means of national macroeconomic regulation and control. The adjustment of industrial structure will effectively accelerate economic development and stimulate potential. However, the adjustment of industrial structure inevitably influences regional energy consumption. The relationship between energy consumption and industrial structure has been discussing by scholars in China and abroad. According to the researches, we can know that industrial restructuring has an important influence on energy consumption. Because of the difference in the economic development and the resource endowments, the influence of industrial structure on energy consumption varies among regions.

With the data on total energy consumption and industry output value from 2015 to 2019, the grey relational analysis is applied to calculate the grey relational coefficient of each industry in each province of China for the purpose of studying the relationship between energy consumption and industrial structure.

According to the result, from the perspective of country, the tertiary industry exerts the largest influence on energy consumption in China, followed by the secondary industry and the primary industry the least. Therefore, energy consumption would be much easier influenced by the variation of the share of tertiary industry. From the perspective of regions, most provinces in China are easily influenced by the share of tertiary industry, which is same as the nationwide situation. For these provinces, the focus should be on optimizing the internal industrial structure, improving energy efficiency, developing energy-saving technologies and reducing energy intensity. Besides, only in three provinces, Henan, Shanxi, and Tianjin, the energy consumption is mostly influenced by the share of the secondary industry. As for these provinces, there exists the greatest possibility that an increasing share of secondary industry could lead to an increase of regional energy consumption. And when the share of secondary industry decrease, their energy consumption tends to decrease. For these provinces, some measures should be taken to retard the growth of the secondary industry and gradually reduce the share of the secondary industry. It should also promote the rapid development of the tertiary industry in these provinces and increase the contribution to gross regional product, in an attempt

to drive economic growth by the tertiary industry. In addition, an internal restructuring and the introduction of advanced technology and equipment would help reduce the energy consumption per unit of output in secondary industry.

#### References

1. X. H. Shi, L. Liu. A study of the relationship between regional energy consumption and industrial structure in China. *Journal of China university of geosciences*. 2014. Volume 14. P. 39-47.
  2. X. Zou, P. Wang. Study on the mechanism of industrial structure adjustment on the optimization of energy consumption structure. *RuanKeXue*. 2021. Volume 22. P. 11-16.
  3. F. Krausmann, H. Haberl. The process of industrialization from the perspective of energetic metabolism: Socioeconomic energy flows in Austria. *Ecological Economics*. 2002. Volume 41. P. 177-201.
  4. K. Narayanan, Santosh K. Sahu. Energy consumption response to climate change: Policy options for India. *IIM Kozhikode Society and Management Review*. 2014. Volume 3. P. 123-133.
- 

## **METHODOLOGY FOR FORECASTING MARINE FUEL CONSUMPTION TAKING INTO ACCOUNT INTER-FUEL COMPETITION**

**A.K. Kuklina**

The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow  
[kuklina.a.k@yandex.ru](mailto:kuklina.a.k@yandex.ru)

This paper presents a description of the economic-mathematical model to forecast global energy demand in the water transport segment detailed by countries, regions and vessel category. The model combines various approaches to forecasting and modeling, including through the use of regression analysis methods, and generates demand forecasting basing on the identified stable correlations between water transport energy consumption and economic-demographic indicators. In addition, the model implements a simulation of predictive inter-fuel switching from conventional petroleum fuels to alternative ones, taking into account the cost of owning ships with various types of fuel, emission prices, and other parameters. The key difference between the developed model and existing analogues is the ability to calculate the entire world demand for marine fuel using large aggregate indicators (a significant part of the existing models is designed exclusively for calculating the demand for fuel from one ship, the closest analogue is the model of the IEA). The methodology developed at ERI RAS rely on establishing statistical relationships with water transport technical characteristics in the context of vessel categories, allows not only to calculate the forecast for several years ahead, but also to assess the prospects of fuel alternatives using under the current environmental requirements. The calculation results obtained using this model may be of interest to research organizations, ship owners and marine fuel producers.

#### References

1. Kim, Y.-R.; Jung, M.; Park, J.-B. (2021) Development of a Fuel Consumption Prediction Model Based on Machine Learning Using Ship In-Service Data. *Journal of Marine Science and Engineering* 9, no. 2: 137 – URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9020137> (20.07.2021);
2. Merchant fleet by flag of registration and by type of ship, annual. UNCTAD – URL: <https://unctadstat.unctad.org/wds/TableView/tableView.aspx?ReportId=93> (20.07.2021).

3. IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions// International Maritime Organization (IMO) – URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx> (20.07.2021);

4. Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI), annex 11 resolution MEPC.215 (63)//International Maritime Organization (IMO) –URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.215\(63\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.215(63).pdf) (07.01.2022);

5. Kee, Keh Kim & Boung Yew, Simon Lau & Renco, King-Hwa. (2018). Prediction of Ship Fuel Consumption and Speed Curve by Using Statistical Method. The 7th International Conference on Computer Science and Computational Mathematics 2018 (ICCSCM 2018) – URL: [https://www.researchgate.net/publication/328494948\\_Prediction\\_of\\_Ship\\_Fuel\\_Consumption\\_and\\_Speed\\_Curve\\_by\\_Using\\_Statistical\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/328494948_Prediction_of_Ship_Fuel_Consumption_and_Speed_Curve_by_Using_Statistical_Method) (20.07.2021);

6. K Scott, (2012), Rational habits in gasoline demand, Energy Economics, 34, (5), 1713-1723– URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/eneeco/v34y2012i5p1713-1723.html> (07.01.2022);

7. Understanding Global Warming Potentials // United States Environmental Protection Agency (EPA). 2019 – URL: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials> (12.07.2021).

---

## **ОЦЕНКА РАЗМЕРА СУБСИДИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

**А.С. Грачев**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

[a.grachev@isem.irk.ru](mailto:a.grachev@isem.irk.ru)

Правительством опубликована концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации [1], Атлас Российских проектов по производству низкоуглеродного и безуглеродного водорода и аммиака [2], составленный Минпромторгом России. Общее количество таких проектов составило 42. Общие объемы согласно прогнозу, к 2035 году, достигнут около 13,4 тыс. тонн голубого аммиака и 7,2 тыс. тонн зеленого водорода. Следует отметить, что практически все указанные объемы планируется экспортировать либо в Европейские государства, либо в страны азиатско-тихоокеанского региона.

Водородные энергетические технологии как часть водородной энергетики в настоящее время находятся на своей ранней стадии развития. Прогресс внедрения инновационных водородных технологий в энергетику находится на этапе разработки планов и программ. В рамках решения задачи по ускорению развития и прогресса внедрения водородных энергетических технологий, необходимо создать экономические условия, которые помогут сократить длительность перехода от этапа опытно-конструкторских изысканий к этапу их коммерческого использования.

И уже на этом этапе поддерживать их конкурентоспособность на фоне альтернативных решений по удовлетворению спроса на энергетические услуги потребителей. Благоприятные экономические условия возможно обеспечить субсидированием и географическим размещением, при котором стоимость использования традиционных энергетических технологий и инновационных водородных становится сопоставимой.

Однако следует отметить, что водородным технологиям можно найти свое ограниченное применение, не прибегая к вышеуказанным инструментам стимулирования, например, компания En+ планирует производить зеленый водород на основе ГЭС в Красноярске для его последующего использования в водородных автобусах. Такие инновации позволят улучшить экологическую обстановку в городе [3].

Для решения задачи внедрения водородных энергетических технологий предполагается определить размеры субсидирования, что является возможным в рамках экономического сравнения вариантов моделей изолированных энергосистем с равным объемом предоставленных энергетических услуг потребителям при использовании водородных технологий и без них.

#### Список источников

1. Распоряжение правительства Российской Федерации об утверждении концепции развития водородной энергетики [Электронный ресурс]. – <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf>
2. Атлас водородных проектов РФ от 21.10.2021 [Электронный ресурс]. – <https://minpromtorg.gov.ru/docs/>
3. На Красноярской ГЭС планируют выпускать водород для производства топлива для автобусов [Электронный ресурс]. – <https://www.press-line.ru/news/2021/08/na-krasnoyarskoj-ges-hotyat-vypuskat-vodorod-dlya-proizvodstva-topliva-dlya-avtobusov>

## РИСКИ И УГРОЗЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**В.В. Панасюк**

Академия управления при Президенте Республики Беларусь, Минск

[panasiukvasili@ya.ru](mailto:panasiukvasili@ya.ru)

Обеспечение энергетической безопасности является важным фактором развития экономики страны и особо значимо как составляющая национальной безопасности государства.

Вопросам обеспечения энергетической безопасности уделяют особое внимание международные организации, органы государственной власти, научное сообщество. Так, Мировой энергетический совет считает, что энергия уверенно должна иметься в том количестве и необходимого качества, которые востребованы конкретными экономическими условиями [1].

Проблемы энергетической безопасности постоянно исследуются российскими учеными. Заслуживают внимания работы, проводимые Институтом экономики Уральского отделения РАН, по оценке энергетической безопасности территории с акцентами на вопросы финансово-экономического и экологического характера, а также исследования Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН по проведению анализа и классификации угроз энергетической безопасности [2-4].

В работах, проводимых Институтом энергетики НАН Беларуси, рассматривались основные методы оценки и формирования системы угроз энергетической безопасности, где белорусские ученые группируют их в блоки энергетической самостоятельности, диверсификации видов и надежности поставок энергоресурсов и энергетической эффективности их конечного потребления [5, 6].

В целях эффективной разработки направлений укрепления энергетической безопасности страны и оценки их влияния на устойчивое социально-экономическое развитие регионов Республики Беларусь и в связи с тем, что различные угрозы являются основой рисков энергетической безопасности, предлагается рассмотреть угрозы и риски

с учетом их значимости на всех этапах энергетического производства, с классификацией их на риски производственного, финансового и информационного характера.

#### Список источников

1. World energy trilemma index [Electronic resource] // World Energy Council - Mode of access: <https://www.worldenergy.org/assets/downloads>. - Date of access: 24.02.2022.
  2. Борталевич С.И. Методические основы оценки энергетической безопасности регионов / С.И. Борталевич // Экономический анализ: теория и практика. - №38(293). – 2019. – С. 33 – 37.
  3. Воробьев А.Г., Мякота Е.А., Путилов А.В. Подходы к оценке энергетической безопасности региона (на примере Челябинской области) / А.Г. Воробьев, Е.А. Мякота, А.В. Путилов // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – №4(12). – 2020. – С. 71 – 80
  4. Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И. Онтологическая модель угроз энергетической безопасности / Т.Н. Ворожцова, Н.И. Пяткова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – №3(7). – 2017. – С. 35 – 41
  5. Попов Б.И., Зорина Т.Г., Любчик О.А. Многокритериальный анализ решений как метод оценки уровня энергетической безопасности Республики Беларусь / Б.И. Попов, Т.Г. Зорина, О.А. Любчик // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь – состояние и перспективы : сб. ст. Междунар. научн. конф., Минск, 1 – 2 окт. 2020 г. – С. 287 – 295
  6. Богдан И.Т., Зорина Т.Г. Стратегия устойчивого развития энергетики Республики Беларусь / И.Т. Богдан, Т.Г. Зорина // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь – состояние и перспективы: сб. ст. Междунар. научн. конф., Минск, 1 – 2 окт. 2020 г. – С. 104 – 112
- 

## DEVELOPING THE APPROACHES FOR MODELING THE “CIRCULAR PLASTICS ECONOMY”

**N.O. Kapustin and D.A. Grushevenko**

The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

[nikita.kapustin@mail.ru](mailto:nikita.kapustin@mail.ru)

The issue of combating plastic pollution in recent years has come to the forefront of the environmental protection agenda in many countries of the world. The solution is supposed to be the formation of a "circular plastics economy", which involves a radical change in the production chains of the industry with a focus on the refining and reuse of polymer products and is mentioned in the legislations of the European Union, the USA, Canada and some other countries. This work examines the options for the development of the "circularity" of the plastic industry, as well as methodological approaches for forecasting the plastics market and demand for conventional and new types of feedstock for polymer production in the context of industry changes. The article considers the cross-influence of new patterns formed by "circularity" with the liquid hydrocarbon markets and the integration of new modeling tools into the ERI RAS forecasting complex SCANNER.

The proposed model of the "circular" plastic industry consists of four key interconnected blocks as shown in Figure 1:

- Block of the SCANNER complex: Liquid Fuels Market Model - a block that simulates the global market for petroleum products and biofuels, including their production capabilities and economic parameters;
- Polymer (plastic) products market model - calculates the final demand for plastic products, on the basis of which both the demand for feedstock for their production and the supply of polymer waste as a source of secondary feedstock are formed;

- Secondary feedstock market model - used to model the polymer waste processing industry in order to determine the available volumes and competitiveness parameters of secondary feedstock;
- The feedstock competition model is a key element of the complex, aggregating data from other blocks for calculating inter-resource competition and presenting demand for feedstock for the corresponding feedstock models.

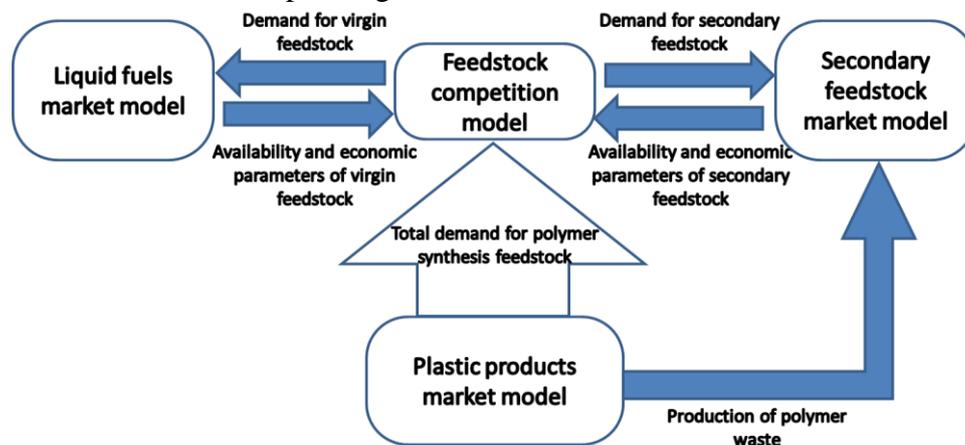


Figure 1 Modeling scheme of the "circular" plastics market

#### References

1. Makarov, A. (Ed.) SCANNER: Super Complex for Active Navigation in Energy Research. 2011. Moscow: ERI RAS.
2. Mechthild Wörsdörfer. The Future of Petrochemicals. OECD/IEA. 2018
3. Roland Geyer, Jenna Jambeck, Kara Law. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances vol. 3, 7 e1700782, 2017. doi:10.1126/sciadv.1700782

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ В КИТАЕ И МИРЕ

Ян Чжуси

Белорусский государственный университет, Минск

[yangzhuxi21@gmail.com](mailto:yangzhuxi21@gmail.com)

В этой статье обсуждаются индикаторы и методы оценки устойчивости развития энергетики, а также анализируется статус-кво устойчивости развития энергетики в моей стране. Путем сравнительного анализа мы делаем вывод, что в Китае устойчивость развития энергетики относительно невелика, при этом существенных различий между провинциями нет. Для стран мира из-за разных видов энергии, которыми владеет каждая страна, направление развития энергетики также имеет свои особенности.

Китайские провинции уже сейчас находятся в прекрасном положении с точки зрения социального фактора устойчивости развития энергетики. Из-за обильных запасов энергоносителей ресурсные регионы имеют значительно более высокие показатели по фактору обеспеченности и экономическому фактору устойчивости развития энергетики. Однако эти провинции имеют более низкие показатели по экологическому фактору устойчивости развития энергетики в целом по стране. Для них ключом к повышению их энергетической устойчивости является экологическое улучшение.

Благодаря исследованиям мы дали рекомендации по развитию энергетики в Китае и других странах.

#### Список источников

1. Meng H., Chen Y., Energy and CO2 Emissions Status, the Counter measures to Slow Down Climate Change in the United Kingdom and Their Enlightenment to China., Chinese Soft Science, pp. 25-35, 2010.
  2. Wang N., Main measures and enlightenment of developing renewable energy in Denmark., Economic Review Journal, pp. 111-120, 2019.
  3. Wang C., Wang L., Dai S., An indicator approach to industrial sustainability assessment: the case of China's capital economic circle, Journal of clean production, pp. 473-482, 2018.
  4. Yu Y.L., Zhao D.Q., Chen Y., On a sustainability indicator system for regional energy development, China opening journal, pp. 63-66, 2011.
  5. Jiang W.B., Chai H.Q., Feng T.W., Wang J.L., A research on evaluation of the decision-making efficiency for governance and optimization of regional ecological economy, Science research management, pp. 40-49, 2018.
  6. World Bank Open Data [Электронный ресурс]. – <https://data.worldbank.org/> (дата обращения: 12.03.2022).
  7. International Energy Agency [Электронный ресурс]. – <https://www.iea.org/> (дата обращения: 12.03.2022).
- 

### ПРИМЕНЕНИЕ КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОГНОЗНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЭК

**Т.Г. Мамедов, А.Г. Массель**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[mamedowtymur@yandex.ru](mailto:mamedowtymur@yandex.ru)

В ИСЭМ СО РАН активно ведут прогнозные исследования ТЭК с позиции энергетической безопасности [1]. Для проведения этих исследований была разработана модель топливно-энергетического комплекса, описывающая производство, хранение, транспорт и потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) по районам [2].

Прогнозные исследования ТЭК носят многовариантный характер, причем многовариантность существенно возрастает в связи с необходимостью учета требований энергетической безопасности: на базовые варианты накладываются сценарии возможных чрезвычайных ситуаций (ЧС), а также, оперативных и ликвидационных мероприятий [3]. Для автоматизации проведения этого исследования был разработан программный комплекс (ПК) «ИНТЭК» и выполнен его реинжиниринг.

Применение когнитивного моделирования к проблеме энергетической безопасности дает возможность формировать сценарии устойчивого и кризисного развития энергетики региона, выделять факторы, влияющие на сценарии развития энергетической системы, а также вырабатывать планы парирования угроз энергетической безопасности при помощи когнитивных карт.

Интеграция когнитивного моделирования в новую версию ПК «ИНТЭК-А» даст следующие возможности: визуализация результатов расчетов с помощью когнитивных моделей; снижение нагрузки на экспертов за счет ограничения вариантов расчетов; интерфейс для работы с моделью прогнозных исследований ТЭК; выявление неявных связей, в явном виде, и их формализация. Предлагается интегрировать поддержку когнитивного моделирования ПК «ИНТЭК-А», для обеспечения возможности формирования и корректировки вычислительного сценария.

**Благодарности.** Отчетное исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, согласно исследовательскому проекту № 22-21-00841, <https://rscf.ru/project/22-21-00841/>.

#### Список источников

1. Применение двухуровневой технологии исследований при решении проблем энергетической безопасности / Пяткова Н.И., Сендеров С.М., Чельцов М.Б. и др. // Известия РАН. Энергетика, 2000, №6, с. 31-39
  2. Система моделей для исследований проблем энергетической безопасности и методы анализа их решений / Бондаренко А.Н., Криворучский Л.Д., Пяткова Н.И. и др. // Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы / под ред. Н.И. Воропая – Новосибирск: Наука, 1999, с. 122-129.
  3. Массель, Л. В. Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики / Л. В. Массель, А. Г. Массель // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 135-140.
- 

### **РЕИНЖИНИРИНГ «НЕФТЬ И ГАЗ РОССИИ» ПОД ТРЕБОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМ ЖИВУЧЕСТИ ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

**Г.К. Данилов**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[dangleb@isem.irk.ru](mailto:dangleb@isem.irk.ru)

При исследовании энергетических моделей часто возникают потребности в использовании функционала, представленного унаследованным программным обеспечением, которое не может корректно удовлетворять потребностям исследователя в связи с запросом на выполнение задач, не предусмотренных разработчиком во время создания этих продуктов. Для решения данных проблем используется реинжиниринг унаследованного программного обеспечения. В частности, было принято решение провести реинжиниринг программного обеспечения по решению задачи потокораспределения в ГТС и поиску узких мест в ней с помощью геоинформационной технологии. Главными недостатками унаследованного ПВК было отсутствие возможности добавления новой расчетной схемы либо её модернизация и отсутствие возможности геокодирования.

Применены следующие методы реинжиниринга: 1) Анализ унаследованного программного обеспечения на связность модулей; 2) выбор фреймворка с возможностями разработки геоинформационных систем; 3) переработка архитектуры программного модуля для реализации функции добавления объектов расчетной модели; 4) интеграция программного обеспечения с встраиваемой СУБД для компактности и возможности сохранения внесенных изменений.

Данные решения позволили обновить программное обеспечение и дали исследователю удобный инструментарий для создания и корректировки расчетных схем используя для помощи геоинформационные технологии. Так же поддержка геокодирования позволяет расширять существующие энергетические модели путем добавления объектов исходя из данных предоставляемыми геоинформационными сервисами по запрашиваемому тегу, позволяя проводить исследования по определению новых оптимальных решений транспортировки энергоресурсов.

#### Список источников

1. Еделев А. В., Еникеева С. М., Сендеров С. М. Информационное обеспечение при исследовании больших трубопроводных систем //Вычислительные технологии. – 1999. – Т. 4. – №. 5. – С. 30-35.

2. Массель Л. В., Подкаменный Д. В. Системный анализ и реинжиниринг унаследованного программного обеспечения //Машиностроение и компьютерные технологии. – 2011. – №. 4. – С. 4.

3. Seacord R. C., Plakosh D., Lewis G. A. Modernizing legacy systems: software technologies, engineering processes, and business practices. – Addison-Wesley Professional, 2003.

## РАЗРАБОТКА WEB-СЕРВИСА ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ СИСТЕМЫ ГеоГИПСАР

**В.С. Гасан, Е.Н. Осипчук**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

[viktor-gasan@yandex.ru](mailto:viktor-gasan@yandex.ru)

Для обработки и анализа геоклиматических данных в ИСЭМ СО РАН разработана система ГеоГИПСАР [1, 2], включающая средства для добавления новых компонентов. Для расширения круга пользователей разработан проект интерфейса системы в виде специального Web-сервиса. Данный сервис включает базовые функции по формированию:

- климатических карт абсолютных и относительных показателей для выбранного бассейна водосбора водохранилищ ГЭС;
- распределений средних показателей для рассматриваемого периода времени;
- средних показателей за период в несколько лет;
- разностей показателя для задаваемых двух периодов;
- корреляционных полей связей для выбранных временных рядов;
- различных индексов (завихренности, увлажненности, циркуляции и др.).

Обработка геоклиматических данных осуществляется с помощью языка LuaISEM – расширения языка Lua от ИСЭМ СО РАН с добавлением прикладных и базовых функций. Управление сервисом реализовано на языке PHP и включает администрирование доступа к данным, актуализацию данных, управление параметрами и стилями визуализации, создание HTML-форм представления.

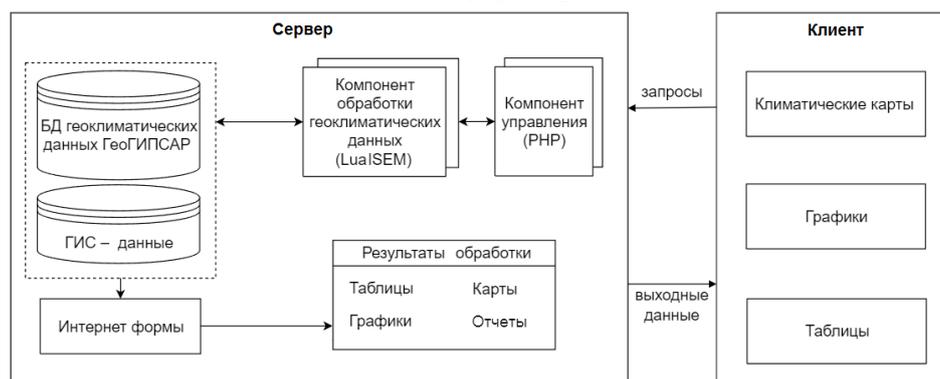


Рис.1. Схема управления и формирования данных в Web-сервисе

Разработка и управление Web-сервисом реализованы в двух видах:

- 1) функционирование на портативном USB Web-сервере, позволяющего работать на различных системах без необходимости её установки;
- 2) перенос отлаженного программного обеспечения на стационарную систему (ОС Windows/Linux).

На данный момент Web-сервис находится в стадии активной разработки (рис. 1). Дальнейшее развитие предполагает расширение ядра системы с возможностью оперативного выбора форм представления и визуализации данных.

## Список источников

1. Abasov N.V., Nikitin V.M., Osipchuk E.N. A System of Models to Study Long-Term Operation of Hydropower Plants in the Angara Cascade // Energy Systems Research, Vol. 2, Number 2(6), 2019. P. 5–18.

2. Абасов Н.В. Система долгосрочного прогнозирования и анализа природообусловленных факторов энергетики ГеоГИПСАР // Материалы международного совещания APN (MAIRS/NEESP/SIRS) «Экстремальные проявления глоб. изменения климата на территории Северной Азии» (Enviromis-2012) – С. 63-66.

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ КАРТ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

**В.М. Бердников**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

[berdVM98@gmail.com](mailto:berdVM98@gmail.com)

Проблема формирования достоверного долгосрочного прогноза притока воды в водохранилища носит острый характер в течении длительного времени, особенно в настоящем, где наблюдается период глобальных климатических изменений

На основе МНС (разработанной в системе ГеоГИПСАР) ранее были созданы различные нейросетевые модели по формированию долгосрочных прогностических оценок притоков воды в водохранилища ГЭС [1]. Несмотря на отдельные положительные результаты, абсолютную надежность они не гарантируют из-за значительных климатических изменений.

Предлагается новый подход по созданию нейросетевых моделей для формирования пространственных распределений прогностических показателей для заданной прямоугольной области, включающей исследуемые бассейны водосбора рек (рис.1).

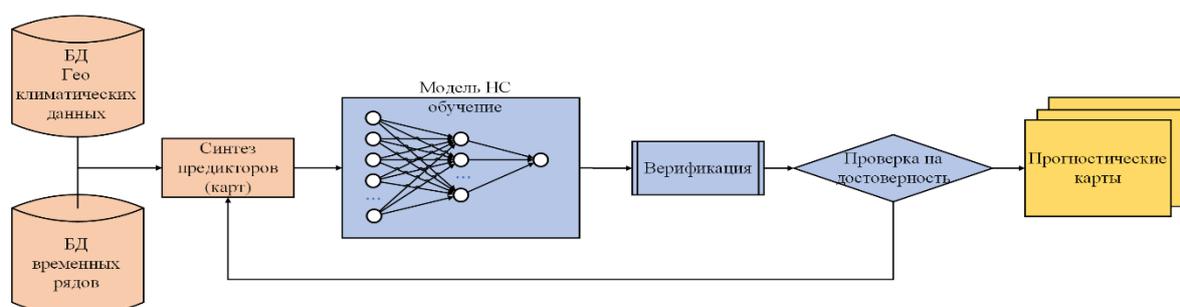


Рис. 1 Схема работы МНС использованием нового подхода.

Для заданной области исследования производится формирование предикторов в виде матриц из базы данных, которые преобразуются сначала в набор векторов, затем в единый вектор с дополнением точечных данных (например, солнечная активность, различные индексы по состоянию атмосферы и др.). Выходом НС является матрица пространственного распределения метео-показателей (температур, осадков, давления и др.)

На верификационной выборке проверяется критерий

$$\sum t \sum_i^j c_{i,j} \left( y_{i,j}(t) - x_{i,j}(t) \right)^2 < \varepsilon,$$

где  $c_{i,j} \in [0,1]$  -весовые коэффициенты весов значимости различных участков исследуемой области

Синтез предикторов включает перебор различных наборов карт-предикторов для различных периодов в прошлом. Для выходных матриц автоматически строятся прогностические карты с наложением различных слоев ГИС-данных.

Рассмотренный подход позволяет формировать прогностические карты, как для прямых оценок по климатическим данным, так и для уточнения весовых коэффициентов прогностических ансамблей, формируемых глобальной климатической системой CFSv2, что позволяет в итоге формировать более надежные прогностические оценки.

#### Список источников

1. Berdnikov V. Generation of prognostic interval estimates of water inflows to hydroelectric reservoirs using multiparametric neural network // E3S Web Conf. 289 01003 (2021).

## ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ОЦЕНОК МЕТЕОПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ГЛОБАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ CFSv2

**В.А. Петрухина**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

[lera.petruhina@mail.ru](mailto:lera.petruhina@mail.ru)

Предлагаемая технология формирования прогностических оценок метеопказателей на основе глобальной климатической модели CFSv2 предназначена для повышения надежности прогностических оценок притоков воды в водохранилища ГЭС, необходимых для эффективного управления их режимами. Основой технологии (рис.1) являются прогностические ансамбли геоклиматических показателей, формируемых глобальной климатической моделью CFSv2, которые предоставляются для свободного скачивания в специальном формате GRIB.

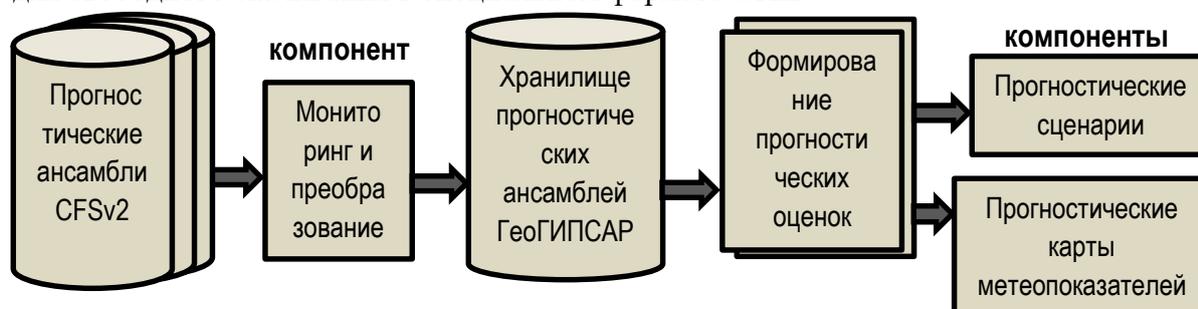


Рис. 1. Технология анализа и обработки прогностических ансамблей

Программные компоненты разработаны в системе ГеоГИПСАР [1,2] на языке LuaISEM, включающем универсальный язык Lua с набором библиотек-расширений по работе с матрицами данных, архивами, статистической обработке и др.

Компонент мониторинга производит сканирование и загрузку прогностических ансамблей с агрегированием по суткам исходных показателей каждые 6 часов и записью в хранилище системы ГеоГИПСАР.

Компоненты обработки прогностических ансамблей позволяют формировать: прогностические карты метеопказателей (осадков, температуры, давления и др.) по исследуемым бассейнам водосбора для заданного периода времени (до 9 месяцев); прогностические сценарии изменения метеопказателей для бассейнов рек; вероятностные распределения прогностических показателей для исследуемого периода времени с оперативным расчетом основных статистических характеристик.

Технология включает задачи подбора весовых коэффициентов влияния отдельных ансамблей для формирования итоговых показателей, а также процедуры верификации по фактическим данным. Графическое представление результата формирования прогностических оценок метеопоказателей основано на специализированных методах использования системы Gnuplot с использованием различных слоев ГИС-данных.

#### Список источников

1. Abasov N.V., Nikitin V.M., Osipchuk E.N. A System of Models to Study Long-Term Operation of Hydropower Plants in the Angara Cascade // Energy Systems Research, Vol. 2, Number 2(6), 2019. P. 5-18.

2. Абасов Н.В. Система долгосрочного прогнозирования и анализа природообусловленных факторов энергетики ГеоГИПСАР // Материалы международного совещания APN (MAIRS/NEESP/SIRS) «Экстремальные проявления глоб. изменения климата на территории Северной Азии» (Enviromis-2012) – С. 63-66.

---

## **«ЗЕЛЕНАЯ» ЭНЕРГЕТИКА В СТРАНАХ-ЧЛЕНАХ ШОС: РИСКИ И ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РОССИИ**

**А.А. Шутова**

Российский государственный гуманитарный университет, Москва

[anastasia.shutova@inbox.ru](mailto:anastasia.shutova@inbox.ru)

В условиях мирового четвертого энергоперехода Россия сталкивается как с техническими и финансовыми трудностями внедрения объектов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в свою энергосистему, так и с возможностями для реализации своего потенциала в этой области. Ключевой проблемой выступает экспортоориентированность национальной экономики, основанная на традиционных источниках энергии. Процесс замещения тяжелой энергодобычи «зелеными» способами усложняется недостаточным уровнем развития отечественной технологической базы.

Активизация государственной политики в направлении к низкоуглеродной энергетике отражена в ключевых стратегических документах, в том числе в Энергетической стратегии РФ до 2035 года, Стратегии низкоуглеродного развития РФ до 2050 г., Концепции развития водородной энергетики и др. Планы по увеличению доли альтернативных источников энергии с целью достижения поставленных целей в вышеуказанных документах в долгосрочной перспективе выступают доказательством причастности России к мировому энергетическому переходу. Однако статистические данные, представленные в документах ЕЭС России, демонстрируют крайне низкий процент доли ВИЭ в общей энергосистеме страны и даже с условием достижения поставленных задач в будущем, российские показатели «зеленой» энергетики будут значительно ниже, чем в развитых странах мира.

В таких условиях Россия сталкивается с рисками ослабления своих позиций на международной арене. Речь идет не только о переориентации на экологически чистое производство, но и о возрастающей экономической привлекательности объектов ВИЭ. С каждым годом увеличивается объем инвестиций в «зеленые» проекты за рубежом и сокращается востребованность в энергоресурсах из традиционных источников энергии. Понижение цен на ВИЭ и принятие мер по сокращению использования углеродных ресурсов снижает конкурентоспособность российских экспортируемых энергопродуктов. Необходимо разработать такую энергетическую модель перехода на ВИЭ, при которой рост экономики будет оставаться устойчивым, и Россия, ввиду своего природного потенциала, имеет такую возможность.

В работе рассмотрены: современный уровень развития ВИЭ в России; стратегические документы в области энергетики; возможность реализации природного потенциала для развития экологически чистого производства; риски для национальной экономики в случае перехода на «зеленые» ресурсы; сотрудничество России со странами-членами ШОС в низкоуглеродной энергетической отрасли.

#### Список источников

1. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации от 5 августа 2021 года // Static. Government. [Электронный ресурс]. – <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf>, (дата обращения: 12.03.2022).
  2. Стратегия социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. [Электронный ресурс]. – <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf>, (дата обращения: 12.03.2022).
  3. Энергетическая Стратегия Российской Федерации до 2035 года. [Электронный ресурс]. – <https://minenergo.gov.ru/node/1026>, (дата обращения: 12.03.2022).
- 

## ОЦЕНКА ДЕФИЦИТА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

**В.М. Пискунова<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск  
[vitalpiskunova98@gmail.com](mailto:vitalpiskunova98@gmail.com)

Поддержание требуемого уровня энергетической безопасности (ЭБ) и надёжности топливо- и энергоснабжения является одной из приоритетных задач при управлении топливо-энергетическим комплексом (ТЭК). При функционировании ТЭК возможна реализация различных угроз, которые могут приводить к нарушению надёжности энергоснабжения и дефициту различных видов энергоресурсов [1]. В этом исследовании рассматриваются подходы к оценке дефицитов энергоресурсов ТЭК с учетом специфики моделирования тепловых электростанций (ТЭС). При этом формируется математическая модель, объединяющая такие условно независимые отрасли, как электроэнергетическая, теплоэнергетическая, угольная, нефтеснабжающая и газоснабжающая.

Несмотря на сопряжённые с энергетической трансформацией тенденции перехода на низкоуглеродные источники энергии [2,3], тепловые электростанции остаются одним из основных источников тепло- и электроэнергетики. В связи с этим при моделировании ТЭК необходимо разработать математические модели ТЭС, которые будут корректно отражать технологические процессы, влияющие на надёжность энергоснабжения. Целью этого исследования является моделирование взаимодействия электроэнергетической, теплоснабжающей и топливной систем в рамках работы ТЭС и расчет тестовой энергосистемы для анализа корректности разработанной модели.

В модели ТЭС отдельные тепловые агрегаты описываются аналитическими зависимостями потребления топлива от тепловой и электрической нагрузки, полученными при помощи аппроксимации (методом наименьших квадратов) типовых графиков и диаграмм режимов работы. Для паровых турбин были получены зависимости количества теплоты, подводимого к турбине, от ее нагрузки (электрической и/или тепловой в зависимости от типа турбины). Для котлоагрегатов была проведена аппроксимация зависимости КПД от тепловой нагрузки и получена линейная

зависимость. Для ГТУ и ПГУ проводилась аппроксимация зависимости КПД от нагрузки. В результате были получены полиномы второго порядка.

Тестовая энергосистема содержит три энергорайона, которые могут обмениваться между собой следующими энергоресурсами: электроэнергией, газом и углем. Внутри каждого района имеются собственные системы теплоснабжения, которые в модели выражаются как генерация и потребление тепловой энергии. В некоторых районах присутствуют источники угля и газа. ТЭС во всех районах представлены угольными, газовыми или парогазовыми ТЭЦ и КЭС. Моделирование тестовой энергосистемы проводилось в MATLAB с использованием пакета Optimization Toolbox. Целевой функцией модели является минимизация дефицитов энергии.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-00367.

#### Список источников

1. Указ Президента Российской Федерации «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации» [Электронный ресурс], <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2019/deb.pdf> (дата обращения: 15.03.2022).
  2. Smil V. Energy Transitions: Global and National Perspectives, 2nd Edition; 2017.
  3. Кулапин А.И. Энергетический переход: Россия в глобальной повестке // Энергетическая политика. 2021. №7(161). С. 10-15.
- 

## ОБЗОР МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В РАМКАХ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

А.Г. Гальфингер<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск  
[galfinger98@mail.ru](mailto:galfinger98@mail.ru)

Тенденции энергетического перехода оказывают значительное влияние на традиционную архитектуру топливно-энергетического комплекса (ТЭК) [1]. Одна из основных составляющих этого перехода - внедрение распределённой генерации и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Вместе с вереницей положительных эффектов эти источники, из-за трудно прогнозируемой выработки, не могут обеспечить непрерывный поток энергии. На начальных этапах развития ВИЭ подобные проблемы решались резервированием традиционной генерацией. Теперь одним из возможных решений, сглаживающих подобный недостаток, может стать внедрение систем накопления энергии (СНЭ), повышение эффективности которых в последние десятилетия позволило расширить сферу их применения.

Принцип действия СНЭ заключается в замещении вырабатываемой генератором электрической энергии в режиме генерации на запасённую энергию за период временного отсутствия нагрузки. Иными словами, их внедрение позволяет переступить классическую парадигму одновременной выработки и потребления энергии, позволяя отложить процесс потребления, не останавливая выработку, таким образом заранее обеспечив ещё не сформированную потребность в энергии. Ввиду этого СНЭ могут стать ключевым элементом при переходе от традиционной архитектуры к новой итерации развития ТЭК.

В статье проводится обзор существующих моделей СНЭ. Накопители рассматриваются как в рамках традиционной архитектуры, так и при работе мульти-энергетических систем, энергетических хабов, активных распределителей. Обзор послужит основой для выбора подхода к моделированию, выявлению основной структуры модели

СНЭ, а также отдельных специфических решений, укладываемых в рамки задачи исследования надёжности и оценки рисков дефицита энергии.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-00367.

#### Список источников

1. Smil V. Energy Transitions: Global and National Perspectives, 2nd Edition; 2017.

---

## ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ ВВП РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СО СТРАНАМИ ЕАЭС

**О.И. Юркевич**

УО «Белорусский государственный экономический университет», Минск  
[oi.yurkevich@yandex.by](mailto:oi.yurkevich@yandex.by)

Вне зависимости от отраслевой специфики экономики любой страны мира, ее размеров и климато-географического положения, основной долей из всех потребляемых энергоресурсов является электрическая энергия. Среди важнейших параметров, определяющих степень эффективности использования электрической энергии, наиболее объективным является показатель электроемкости валового внутреннего продукта (далее – ВВП).

Электроемкость ВВП – показатель, характеризующий количественный расход электрической энергии, затрачиваемый на единицу ВВП. Сравнение электроемкости ВВП Республики Беларусь со странами Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС) и Европейского Союза показывает, что уровень электроемкости ВВП Республики Беларусь (0,19 кВт ч/долл. США) значительно ниже, чем в большинстве стран ЕАЭС (в частности, на 24% ниже Российской Федерации, на 9,5% ниже Республики Казахстан), однако на 18,7% выше стран Европейского союза в целом (0,16 кВт ч/долл.США). Для корректной оценки в межстрановом сопоставлении, учитывающей разницу во внутренних ценах, при расчетах принят ВВП сравниваемых стран, переведенный в долларовой эквивалент по паритету покупательной способности.

При этом необходимо отметить, что несмотря на практически сопоставимый уровень электроемкости ВВП, уровень тарифов на электрическую энергию для промышленности в Республике Беларусь значительно выше, чем в странах Европы и странах ЕАЭС, что существенно ограничивает конкурентоспособность национальной промышленности.

Электроемкость ВВП Республики Беларусь с 2010 года снизилась на 8,3%. К основным факторам, оказывающим влияние на данный показатель, можно отнести структуру производства (энергопотребление в сфере услуг значительно ниже, чем в промышленном секторе), уровень технологического развития различных отраслей промышленности. Так, в Республике Беларусь доля сферы услуг в последние годы неизменно растет и составляет 49,1% (для сравнения в Европейском союзе – 64,47%, в Российской Федерации – 54,1%). Наиболее низкие показатели электроемкости можно отметить по Минской области, наиболее высокие – по Гомельской и Витебской, что обусловлено расположением в данных областях большей части промышленных производств.

Ввод БелАЭС в энергосистему Республики Беларусь приводит к необходимости увеличения объемов потребления электроэнергии. Поскольку существует прямая зависимость между темпами роста потребления энергии и темпами роста ВВП, действенным механизмом государственной политики повышения потребления электроэнергии будет наращивание объемов ВВП, в том числе за счет производства и последующего экспорта энергоемкой продукции. При этом обязательным условием для

развития промышленности является установление сбалансированных тарифов на энергоресурсы, стимулирующих рост потребления и обеспечивающий конкурентоспособность продукции.

#### Список источников

1. Нигматулин, Б.И. Электроемкость ВВП. Цены на электроэнергию для конечных потребителей и на шинах АЭС в России и США. Сравнение в среднем с Миром, ОЭСР, США, Китаем и другими странами / Б.И. Нигматулин // Известия РАН. Энергетика. – 2019. – №6. С. 19-42.
- 

## СЕКЦИЯ 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

### МОДЕЛИ И МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МИНИ-ТЭЦ

**Ф.Л. Бык, Я.А. Фролова**

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск  
[ya.abramova1991@gmail.com](mailto:ya.abramova1991@gmail.com)

Последние 30 лет в энергетике России наблюдается процесс снижения доли комбинированного производства энергии на ТЭЦ за счет их вытеснения котельными в части теплоснабжения [1]. При этом производство электрической энергии на ТЭС мало изменяется, следовательно, происходит рост доли отдельного производства энергии, что сопровождается снижением коэффициента полезного использования топлива.

Стремление к рациональному использованию не возобновляемых ресурсов определяет направления развития энергетики во всем мире [2]. Основой для энергетического перехода к ресурсосберегающей энергетике в России могут стать эффективные когенерационные технологии [3]. Трансформация котельных в мини-ТЭЦ на основе когенерационных установок позволит повысить долю комбинированного производства энергии. Мини-ТЭЦ – это источник тепловой и электрической энергии, произведенной на котельном оборудовании и когенерационных установках (ГПУ и ГТУ) электрической мощностью не более 25 МВт. Величина эффектов трансформации котельных в мини-ТЭЦ будут зависеть от структуры и состава генерирующего тепловую и электрическую энергию оборудования.

Целью работы является разработка моделей мини-ТЭЦ и методов для определения структуры и состава генерирующего оборудования мини-ТЭЦ в зависимости от соотношения производства тепловой и электрической энергии.

В работе предложена математическая модель мини-ТЭЦ, учитывающая тип когенерационной установки, соотношение производимой тепловой и электрической мощности и энергии. Разработанные математические модели мини-ТЭЦ позволяют выбрать тип когенерационной установки и структуру мощности генерирующего тепловую и электрическую энергию оборудования. Определены условия целесообразности трансформации котельных в мини-ТЭЦ и обоснована необходимость реконструкции котельных находящихся в дефицитных энергорайонах.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при обосновании основных технических решений трансформации котельной в мини-ТЭЦ.

#### Список источников

1. Стенников, А., Пеньковский А. Проблемы российского теплоснабжения и пути их решения // Всероссийский экономический журнал ЭКО. 2019 г., №9 том 49. сс. 48-69, doi:10.30680/ЕСО0131-7652-2019-9-48-69.

2. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина; ИНЭИ РАН–Московская школа управления СКОЛКОВО – Москва, 2019. – 210 с. - ISBN 978-5-91438-028-8

3. Илюшин П.В. Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети // Библиотечка электротехника. 2020. № 8 (260). С. 1-116.

---

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СЖИГАНИЯ УГЛЯ СОВМЕСТНО С АЛЮМОСИЛИКАТНЫМИ КАТАЛИЗАТОРАМИ

**И.К. Сосновский**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

[sosnovskiy71@gmail.com](mailto:sosnovskiy71@gmail.com)

Уголь является основным энергетическим ресурсом на многих территориях, однако его использование также создает серьезные проблемы для окружающей среды. При массовом использовании угля серьезно загрязняется среда обитания. Сжигание является важной частью переработки угля, которая считается трехэтапным процессом: пиролиз угля, сжигание летучих веществ и сжигание полукокса. Эти процессы представляют собой термохимическую реакцию в окислительной атмосфере с выделением тепла. Повышение эффективности сжигания угля и сокращение выбросов загрязняющих веществ являются очень важными задачами.

В связи истощением запасов высококачественного угля исследователи работают над улучшением характеристик горения низкокачественного бурого угля. Например, этого можно достичь путем добавления соответствующих катализаторов содержащих редкоземельные металлы, щелочные металлы, оксиды металлов и другие. Каталитическое действие этих добавок способствует образованию летучих, ослабляет силу межмолекулярного взаимодействия и способствует процессу макромолекулярного крекинга и конденсации продуктов.

Катализаторы могут снижать температуру воспламенения посредством увеличения скорости горения, что улучшает характеристики выгорания и скорость тепловыделения. А катализаторы с содержанием оксидов металлов могут снижать температуру воспламенения образцов угля на 8-50 °С и повышать скорость горения и экзотермические показатели высокосольных углей.

В настоящее время широко распространены алюмосиликатные катализаторы различных модификаций. Наибольший интерес представляют материалы с макро- и мезопористой структурой. Поэтому для улучшения эффективности сжигания угля предложено использовать цеолиты ZSM-5 различных модификаций в качестве катализатора.

В данной работе методом термогравиметрического анализа исследовано влияние различных алюмосиликатных катализаторов на горение угля.

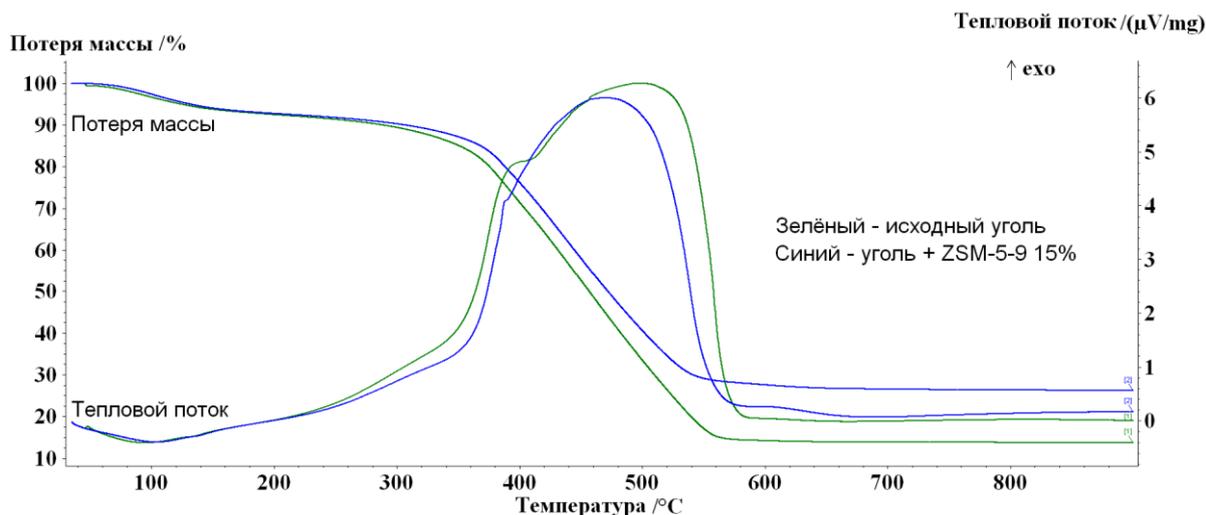


Рис. 1. Сравнение тепловых эффектов исходного угля с смесью угля с цеолитом ZSM-5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ В КАМЕРЕ КОМПЛЕКСА ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

**М.А. Козлова**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

[mari.kozlova.95@mail.ru](mailto:mari.kozlova.95@mail.ru)

Одной из задач современной энергетики является разработка способов эффективного использования различных видов топлив: угля, биомассы, твёрдых бытовых отходов. Для этого необходимо отчетливое представление о механизмах их переработки, которая основана на термохимических превращениях. Численное моделирование пиролиза и сжигания – видов термохимической конверсии – осложнено недостатком детальных представлений о протекающих физико-химических процессах, как в газовой фазе, так и в объеме топлива. Такие модели требуют знания множества кинетических параметров, отвечающих детальной кинетике физико-химического поведения системы, которые определяются экспериментально. Установление общих закономерностей позволит сократить число требуемых для модели кинетических коэффициентов.

Метод термогравиметрии успешно используется для определения кинетических характеристик физико-химических превращений при нагревании твёрдых органических топлив [1]. В [2] отмечается, что регистрируемые прибором данные могут не соответствовать реальным значениям температур в области исследуемого образца, что приводит к неверному определению кинетических характеристик процессов. Например, это проявляется при исследовании образцов в окислительной атмосфере, когда температура в зоне горения образца отличается от регистрируемой, особенно в случае его воспламенения (температурный взрыв).

В данной работе были использованы данные, полученные для образцов угля, помещённого в камеру термического анализа STA449F1. Исследования проведены с помощью методики, основанной на представлении системы в виде потокового графа [3]. Тигель и образец представлены в виде равновесных зон, между которыми происходит перенос теплоты и вещества. При этом в зонах, принадлежащих образцу, происходят химические реакции. Задачей исследования является установление соответствия между регистрируемым сигналом ДСК и температурой в зоне окисления образца.

#### Список источников

1. Dhyani V., Bhaskar T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass / V. Dhyani, T. Bhaskar // Renewable Energy. – 2018. – Vol. 129. – p. 695-716.
  2. Alexander N. Kozlov et al., A DSC signal for studying kinetics of moisture evaporation from lignocellulosic fuels (Thermochimica Acta, V. 698, № 178887, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.tca.2021.178887>).
  3. Mariia Kozlova, Vitaly Shamansky Modeling of heat transfer in inhomogeneous systems using the flow graph on the example of a lead-acid battery (E3S Web Conf. ENERGY-21, Volume 209, № 03016, 2020, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903016>).
- 

## СИСТЕМА ЭЛЕКТРОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

**Д.С. Синельников**

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

[sinelnikovden@hotmail.com](mailto:sinelnikovden@hotmail.com)

Ежегодно в РФ на поддержание горения пылеугольных котлов тратится более 5 млн. тонн мазута, при этом в связи со снижением качества энергетических углей требуется увеличения расхода мазута [1]. Для растопки энергетического котла требуется в среднем 60-80 т мазута (при средней стоимости ~ 15 тыс. руб./тонн.). Одним из важных направлений развития генерирующих компаний в Российской Федерации - повышение экономической эффективности и экологичности производственного цикла.

Потребление высокосернистых вязких мазутов в качестве растопочного, резервного или основного топлива приводит к выбросам помимо токсичных оксидов серы, азота и углерода, но и таких вредных веществ как бенз(а)пирен и пентаоксид ванадия. При образовании оксидов серы растет температура точки росы уходящих газов, что приводит к образованию серной кислоты и, как следствие, к частым ремонтам хвостовых частей котельных агрегатов из-за коррозии. Состав уходящих газов при сжигании мазута также зависит от качества мазута: содержания серы, азота, металлов, полициклоаренов и др. [2]

Наибольшей проблемой разработки систем высокочастотного воспламенения является понимание процессов химической кинетики для плазмохимической реакции воспламенения топливной смеси. Данное исследование направлено на изучение данного процесса.

Потенциал развития технологии электровоспламенения, заключается в уменьшении использования мазута в балансе угольных электростанций в РФ и на зарубежном рынке. Частичный или полный перевод станций на безмазутный режим работы, а также снижение затрат на содержание мазутного хозяйства. Отказ от мазута на угольных ТЭС улучшит экологическую обстановку угольной генерации, в масштабе сотен пылеугольных котлов это повлияет улучшить экологическую ситуацию на территории РФ.

Стоит отметить и возможность экономии других высокореакционных топлив на станции, которые используются для стабилизации пылеугольного факела и в режимах растопки. Использование для этих целей уголь с электровоспламенением, в среднем в 2 раза дешевле использования природного газа. При замене высокореакционного топлива, углём, собственные нужды на станции будут снижаться, принося дополнительную прибыль.

#### Список источников

1. Елин В.Н. Технология плазменного розжига и поддержания горения в пылеугольных котлах // Уголь. – 2011. – № 4(1020). – С. 12-13.

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СОСТАВА ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ

**В.В. Баденко**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

[vladislavbadenko@gmail.com](mailto:vladislavbadenko@gmail.com)

Современные энергетические технологии неразрывно связаны с разнообразными аналитическими методиками. Данные о составе, структуре и устойчивости анализируемого топлива могут играть ключевую роль при улучшении и модернизации различных процессов производства энергии или в других прикладных задачах. Термогравиметрический анализ, совмещенный с масс-спектроскопией, нашел широкое применение в решении аналитических задач. Однако, методы обработки данных ТГА-МС сфокусированы термогравиметрии и тепловых эффектах.

Получение не только качественного, но и количественного результата из обработки масс-спектров является актуальной проблемой, поскольку требуется проведение сложных и затратных калибровок для каждой группы образцов с учетом их специфики. Для решения данной проблемы предложен метод анализа спектров, позволяющий оценить количественный состав из данных эксперимента.

В основе метода лежит использование служебного параметра, связывающего данные о конкретном проведенном термогравиметрическом исследовании. Входными данными является массив значений температур  $T$ , кривых ионного тока по различным массовым числам  $I(T)$ , кривая ионного тока транспортного (опорного) газа  $I_{tr}(T)$ , расходы газов в системе  $V_{tr}$ , эффективная масса  $m_{eff}$  (за вычетом непрореагировавшего остатка), скорость нагрева  $b$ .

Калибровочного коэффициента  $k_{MS}$  для конкретного прибора избежать не удастся, однако используемый коэффициент легко получается из быстрой термической калибровки, обязательной для всех комплексов ТГА-МС.

Размерность полученной служебной функции – л/г. Анализируя интегральную площадь функции параметра  $F$  в заданном диапазоне температур можно описать массовый вклад каждого выбрасываемого газа. Результат анализа массового вклада становится более объективным при совместном анализе и сравнении всех выделяющихся газов, поскольку специфика масс-спектрометрии подразумевает перекрывание спектров по разным массовым числам. Результаты исследования показали, что для конкретного масс-спектрометра газы, дающие незначительные вклады, могут быть исключены из расчетов из-за малого значения входящего сигнала.

Служебный параметр рассчитывается как:

$$F = k_{MS} \frac{V_{tr}}{m_{eff} \cdot b} \int \frac{I}{I_{tr}} dT$$

Вычисляемая интегральная площадь  $S$  имеет размерность л·К/г и принимает участие в расчетах количества вещества

$$\nu = \frac{S \cdot m_{\Delta}}{V_m \cdot \Delta T}, m_{m/z} = \nu \cdot M$$

Адекватность полученных данных можно оценить, сравнив суммы расчетных масс и массу летучих, полученную независимым методом, однако в некоторых случаях эти

величины могут расходиться на величину массы окислителя. Также, существует возможность использования метода для вычисления кинетических коэффициентов для газовых компонентов. В данном приложении метод применяется аналогично стандартным методам расчета кинетики.

---

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА**

**И.Г. Донской**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[donskoy.chem@mail.ru](mailto:donskoy.chem@mail.ru)

Предложена математическая модель, позволяющая рассчитать характеристики высокотемпературного твердооксидного топливного элемента при его работе на горючих газах, полученных путем термохимической конверсии растительной биомассы. Расчеты проводятся в приближении термодинамического равновесия для реагирующей смеси и с привлечением уравнений для поляризации, рекомендованных в литературе. С помощью математической модели проведены расчеты для генераторных газов, полученных в разных условиях (состав дутья, тип реактора). Выявлены наиболее перспективные режимы газификации, позволяющие достичь лучшей эффективности работы топливного элемента.

---

## **О ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДВУХЗВЕННОГО ПЛОСКОГО МАНИПУЛЯТОРА С НЕРАЗДЕЛЕННЫМИ МНОГОТОЧЕЧНЫМИ ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ**

**В. Р. Барсемян<sup>1,2</sup>, С. В. Солодуша<sup>3</sup>, Т. А. Симонян<sup>2</sup>, Ю.А. Шапошников<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Институт механики НАН Армении, Ереван

<sup>2</sup>Ереванский государственный университет, Ереван

<sup>3</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

<sup>4</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск

<sup>3</sup>[solodusha@isem.irk.ru](mailto:solodusha@isem.irk.ru)

Задачи управления и оптимального управления динамических систем с заданными ограничениями на значения координат фазового вектора в промежуточные моменты времени возникают в ряде важных для приложения задач. Подобные задачи, в частности, встречаются в случае управления и оптимального управления манипуляционными роботами, летательными аппаратами, технологическими процессами, при энергосберегающем управлении тепловыми аппаратами и т.д. [1-2]. Некоторые вопросы управления и оптимального управления линейных динамических систем с заданными ограничениями на значения координат фазового вектора в промежуточные моменты времени исследованы, в частности, в работе [3].

В работе рассматривается задача оптимального управления движением двухзвенного плоского манипулятора на неподвижном основании с заданными начальными, конечными условиями, неразделенными условиями на значения фазового вектора в промежуточные моменты времени и с критерием качества, заданном на всем промежутке времени. Предполагается, что абсолютно жесткие звенья манипулятора соединены между собой идеальным цилиндрическим шарниром, и с помощью такого же шарнира первое звено крепится к основанию. Движения манипулятора описываются

системой уравнений Лагранжа второго рода. Критерий качества имеет смысл нормы некоторого нормированного пространства. Задача построения оптимального управления движением такой динамической системы заключается в построении оптимальных законов изменения управляющих моментов, позволяющих манипулятору осуществлять движение, переводящее систему из заданного начального состояния, обеспечивая удовлетворение неразделенным многоточечным промежуточным условиям, в конечное состояние. Решение задачи приведено к проблеме моментов [3-4], и построен явный вид оптимального управляющего воздействия и соответствующего движения. В качестве приложения предложенного подхода построены функции оптимального управления и соответствующего движения с заданными неразделенными условиями на значения координат фазового вектора в некоторых двух промежуточных моментах времени.

#### Список источников

1. Верещагин И. Ф. Методы исследования режимов полета аппарата переменной массы. Механика программного движения аппарата. – Пермь. 1972, 294 с.
  2. Вукабратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами: теория и приложения. – М.: Наука. 1985, 384 с.
  3. Барсегян В.Р. Управление составных динамических систем и систем с многоточечными промежуточными условиями. – М.: Наука. 2016, 230 с.
  4. Красовский Н.Н. Теория управления движением. – М.: Наука. 1968, 476 с.
- 

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИДРОУДАРА С УЧЕТОМ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА МЕТОДОМ КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК**

**Д.В. Апанович**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[dvapan@gmail.com](mailto:dvapan@gmail.com)

Расчеты динамических процессов в трубопроводе необходимы для моделирования процессов движения жидкости в трубопроводе пример такого явления — гидроудар, т.е. остановка движения потока жидкости с последующим формированием и распространением по трубе волн сжатия. В случае идеальной жидкости решение краевой задачи о распределении давления в трубопроводе по пространственной переменной и времени сводится к интегрированию гиперболического уравнения. Расчет явления без учета гидравлического трения может быть проведен методом характеристик [1, 2], которые в итоге сводятся к громоздким сеточным методам. Трудности решения краевых задач о течении реальных вязких жидкостей связаны с их нелинейностью ввиду зависимости коэффициента гидравлического трения от скорости, являющийся квадратичной функцией и направленный в обратную сторону от движения сложен для известных методов и может быть выполнен методом контрольных точек, который опубликован в [3].

Метод основан на поиске таких значений коэффициентов линейных разложений базисных функций, представляющих зависимости искомого из систем дифференциальных уравнений в частных производных функций от пространственных координат и времени, при которых минимального значения достигает максимальная по модулю невязка, определяемая среди всех невязок в заданных контрольных точках расчетной области. Переход от минимизации суммы квадратов невязок к минимизации максимальной по модулю невязки значительно улучшает качество приближенного решения и позволяет перейти от малых конечных элементов к достаточно крупным блокам, в пределах каждого из которых ищутся свои линейные разложения базисных

функций. Если исходная СДУЧП является линейной, то предлагаемый метод, сводится к решению задачи линейного программирования [4].

Для учета нелинейности поставленной задачи используется метод релаксации [5], позволяющий через последовательное уточнение скорости линеаризовать квадратичную зависимость.

#### Список источников

1. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений: Учебное пособие. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит., 1978.
2. К. М. Магомедов, А. С. Холодов, О построении разностных схем для уравнений гиперболического типа на основе характеристических соотношений, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1969, том 9, номер 2, 373–386
3. Kler A., Apanovich D., Maximov A. An effective method for calculating the elements of thermal power plants, which are reduced to solving systems of partial differential equations //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – Т. 209. – С. 03029. DOI: 10.1051/e3sconf/202020903029
4. Юдин Д. Б., Гольштейн Е. Г. Задачи и методы линейного программирования. – 1961.
5. Гурьев Е. К., Никулин А. М. Итерационные методы решения нелинейных уравнений: Учеб. Пособие. М.: МАТИ, 2005. - 176 с. ISBN 5-93271-245-7.

---

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НЕФТИ В НЕФТЕПРОВОДАХ

Н.Т. Исембергенов<sup>1</sup>, А.Ж. Сагындикова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казахский национальный исследовательский технический университет, Алматы

<sup>2</sup> Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Алматы  
[a.sagyndikova@aes.kz](mailto:a.sagyndikova@aes.kz)

Подогрев нефти – многогранная и серьезная проблема для многих нефтедобывающих компаний. Нагрев нефти осуществляют в различных условиях и для различных целей: при транспортировке нефти, перед узлами учета, при зимней эксплуатации низкодебитных скважин и в ряде других случаев [1]. Для обогрева используют разные теплоносители: водяной пар, жаркую воду, жаркие газы и нефтепродукты, электроэнергию.

Нагрев нефти в нефтепроводах до необходимой температуры, с максимально эффективным использованием затрачиваемой электроэнергии, возможен при использовании индукционного способа нагрева. Важнейший параметр установок индукционного нагрева - частота. Для каждого процесса существует оптимальный диапазон частот, обеспечивающий наилучшие технологические и экономические показатели. Для индукционного нагрева используют частоты от 50Гц до 5МГц.

Целью проводимых исследований является разработка преобразователя частоты на IGBT транзисторных модулях для индукционного нагрева нефти в нефтепроводах с высоким показателем КПД. Основные потери электроэнергии происходят в силовых IGBT транзисторах, с уменьшением количества силовых транзисторов потери будут наименьшими и соответственно, преобразователь частоты будут иметь высокий КПД. При этом происходит экономия электроэнергии и снижение стоимости преобразователя.

Индукционный нагрев нефтепровода происходит следующим образом, если через обмотки индуктора нефтепровода (Рис. 1) пропустить переменный высокочастотный ток, то образуется переменное магнитное поле, которое пересекая металлические стенки

нефтепровода, наводит в них вихревые токи. Эти токи нагревают металлические стенки нефтепровода до требуемой температуры и соответственно нефть.

Преобразователь частоты, содержит два выпрямителя трехфазного, два ключа на транзисторах, высокочастотный трансформатор с двумя первичными и с одной вторичной обмотками и нефтепровод с индуктором (рис.1)

Трехфазный выпрямитель **1** включен на первую первичную обмотку **W<sub>1</sub>** высокочастотного трансформатора через первый транзисторный ключ **T<sub>1</sub>**. Вторым трехфазный выпрямитель **2** включен на вторую первичную обмотку **W<sub>2</sub>** высокочастотного трансформатора через второй транзисторный ключ **T<sub>2</sub>**, причем вторичная обмотка **W<sub>3</sub>** трансформатора подключена к индуктору **W** нефтепровода. Трехфазные выпрямители питаются от трехфазного источника питания.

В настоящее время разработаны и выпущены на рынок интеллектуальные силовые транзисторные модули (IPM) серии VIPM фирмы MITSUBISHI, которые представляют собой функционально законченное изделие. Эти транзисторные модули рассчитаны на большие напряжения, токи и мощности. Преобразователь частоты, выполненный на этих транзисторных модулях позволяет нагревать нефтепроводы больших диаметров.

Был разработан и изготовлен опытный образец преобразователя частоты на транзисторах IGBT. На рисунке 2 показан опытный образец преобразователя частоты мощностью 6 кВт на частоты от 2 до 20 кГц. В качестве нагрузки для преобразователя частоты был использован индукционный нагрев металла.

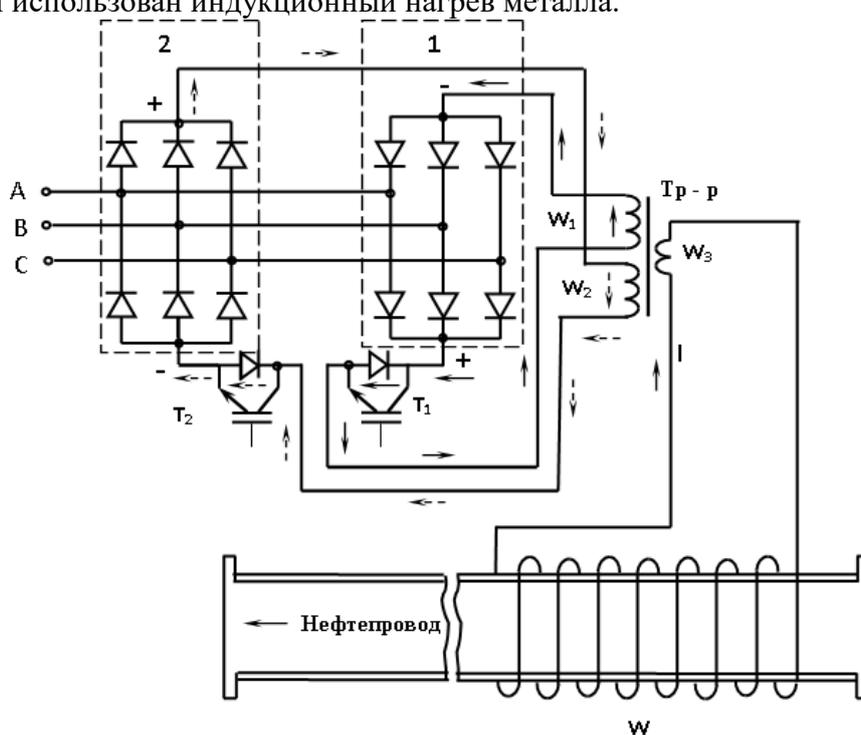


Рис. 1. Преобразователь частоты

Результаты экспериментального исследования показали, что опытный образец преобразователя частоты работает стабильно, выдает заданные технические характеристики. На рисунке 2 показан процесс индукционного поверхностного нагрева металла диаметром 120 мм при частоте 20 кГц. Это сделано с целью, чтобы показать, что преобразователь частоты нагревает только поверхность металла при частоте 20 кГц, при этом температура нагрева достигает 800 градусов.



Рис. 2. Процесс индукционного поверхностного нагрева металла диаметром 120 мм при частоте 20 кГц

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗЕРНОСУШИЛКЕ С ИНДУКЦИОННЫМИ НАГРЕВАТЕЛЯМИ

**А.Ж. Сагындикова**

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Алматы  
[a.sagyndikova@aes.kz](mailto:a.sagyndikova@aes.kz)

Своевременная сушка зерна с экологически чистыми методами подвода тепловой энергии при прочих равных условиях (производительность, малотонажность, возможность быстрой перестройки на различные виды культур), при потребности сельхозпроизводителей на расширенном ассортименте зерновых культур поступающих на зерносушилки, т.е реагировать на спрос рынка.

Данный способ сушки зерна позволяет обеспечить не только сохранение собранного урожая, но и его переводить в плоскость товарного зерна с выйгрышными органолептическими параметрами (цвет, вкус, запах и т.д.). При этом нами предусматривается замкнутый цикл отработанного воздуха, рекуперация тепла уходящего в атмосферу воздуха.

Предлагаемая зерносушилка является компактной, мобильной, универсальной, имеет довольно невысокое электропотребление, малые затраты на метал.

В целом анализ современных технологических приемов сушки зерна и специфических особенностей применения индукционного нагрева показал, что, несмотря на многочисленные результаты, необходимо проведение комплексных исследований с разработкой физических и математических моделей и соответственно методов анализа, позволяющих качественно и количественно оценивать эффективность воздействия, что даст возможность прогнозировать ожидаемый результат и повысит надежность технологического процесса.

Далее после изучения состояния вопроса, анализа информации были определены основные этапы исследования, которые включали в себя: разработку, изготовление, отладку экспериментальной установки для сушки зерна посредством индукционных нагревателей и проведение поисковых опытов; планирование эксперимента и разработку

частных методик экспериментальных исследований; выбор средств измерений, подготовку экспериментального оборудования и приборов к работе; проведение предусмотренных планом эксперимента опытов и анализ полученных результатов.

Первый этап эксперимента предусматривал формулировку задач исследований, где учитывались совокупность всех проведенных процессов и ожидаемый результат исследования.

Предметом анализа при обзоре для создания установки послужило усовершенствование процесса сушки зерна посредством обоснования параметров экологически чистого индукционного нагревателя, новые идеи и проблемы в их осуществлении, подходы к решению этих проблем, результаты предыдущих исследований, экологические данные, возможные пути достижения поставленной цели.

#### Список источников

1. A. E. Baum. Drying grain/ A. E. Baum, V. A. Rezchikov.-М.: Kolos,1983.-223s.
  2. A. Zh. Sagyndikova, N. T. Isembergenov, B. Kanay Energy-saving installation for grain Drying// Works "the role and place of young scientists in the implementation of the new economic policy of Kazakhstan" Inter. Satp. Readings, volume 4, Almaty. 2015. p.195-198
  3. Author's certificate of the Republic of Kazakhstan No. 91438 "Grain drying plant", A. Zh. Sagyndikova, N. T. Isembergenov, K. N. Taisarieva, Astana 2014.
- 

## **ВЛИЯНИЕ ГИДРОФОБИЗАЦИИ МЕДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ И ВОДНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПАВ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ**

**С.В. Григорьев, А.В. Рыженков, М.Р. Дасаев, Е.С. Трушин, А. Ю. Лихаева**

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

[trugen15@yandex.ru](mailto:trugen15@yandex.ru)

Согласно «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» одной из стратегических задач в энергетике является повышение надежности и эффективности теплообменных устройств теплотехнических установок. С целью повышения энергоэффективности теплообменных аппаратов в различных сферах промышленности большой интерес вызывают гидрофобные поверхности, использование которых способствует снижению гидравлического сопротивления [1].

Увеличение гидравлических потерь при транспортировке жидких сред является актуальной проблемой, приводящей к увеличению затрат энергии, необходимой для работы гидравлических насосов, и как следствие, снижению эффективности системы. Геометрические особенности рельефа гидрофобных поверхностей могут значительно влиять на динамику жидкости вблизи поверхности твердого тела и способствовать снижению гидравлического сопротивления при транспортировке жидких сред [2].

В данной работе проводились исследования гидравлических характеристик медных цилиндрических образцов с исходной, модифицированной с использованием поверхностно-активного вещества (ПАВ) и модифицированной с использованием лазерного комплекса и ПАВ поверхностью.

В результате проведенных исследований было установлено, что использование экспериментальных трубных образцов с модифицированной поверхностью способствует снижению гидравлического сопротивления поверхности экспериментального образца. При этом, чем выше скорость движения теплоносителя, тем больше эффект снижения перепада давления при применении модифицированных поверхностей по сравнению с исходной поверхностью экспериментальных образцов. Кроме того, использование экспериментального образца со структурированным

рельефом с последующей обработкой ПАВ (гидрофобная поверхность) позволяет снизить перепада давления на 32 – 36 %.

Работа выполнена в рамках проекта «Повышение эффективности установок на низкокипящих рабочих веществах на основе использования бифильных поверхностей теплообмена» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Энергетика», «Электроника, радиотехника и IT» и «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» в 2020-2022 гг.»

#### Список источников

1. Mohammed Liravi, Hossein Pakzad, Ali Moosavi, Ali Nouri-Borujerdi. A comprehensive review on recent advances in superhydrophobic surfaces and their applications for drag reduction // Progress in Organic Coatings. Volume 140, March 2020, 105537

2. Ryzhenkov A.V., Dasaev M.R., Grigoriev S.V., Kurshakov A.V., Ryzhenkov O.V., Lukin M.V. The effect of hydrophobicity on hydraulic resistance during transportation of fluid media // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, Vol. 8, 2020. pp. 195–202.

---

## ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА УПРАВЛЕНИЯ НАГРУЗКОЙ МЕЛКОМОТОРНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**Н.С. Огородников, В.В. Ханаев**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[ogorodnikov.nik@list.ru](mailto:ogorodnikov.nik@list.ru)

Управление спросом служит важным инструментом для обеспечения гибкости электроэнергетической системы, поскольку обеспечивает поддержание и регулирование баланса выработки и потребления электроэнергии и обладает общесистемным эффектом, формирующимся за счёт снижения цен на электроэнергию для потребителей и оптимизации загрузки и структуры генерирующих и электросетевых мощностей. В данной статье рассматривается современное состояние и перспективы развития управления спросом в России, в том числе с учётом такой важной составляющей, как распределённая генерация. Оценивается потенциал и возможность применения различных механизмов управления нагрузкой на практике.

---

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ

**О.С. Кузнецова, В.В. Ханаев**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[oliv.smith@bk.ru](mailto:oliv.smith@bk.ru)

В связи с повсеместно увеличивающимися объемами потребления электрической энергии важно постоянно приумножать число объектов генерации способных обеспечить необходимые потребителю количество и качество поставляемой энергии. Поиск более высокоэффективных и производительных технологических решений в областях разработки, производства и аккумулирования электроэнергии посредством распределенной генерации занимает одну из основных ниш в электроэнергетической сфере. В свою очередь с увеличением распространенности, повышения качества и совершенствования таких технологии возникает обоснованная необходимость в оценке потенциальных возможностей и перспектив применения различных видов аккумулирования поученной электрической энергии, и необходимых сопутствующих

технологий. Была рассмотрена возможность использования электромобилей в качестве аккумулятора для небольшой СЭС.

#### Список источников

1. O.S. Kuznetsova and V.V. Khanaev Prospects for the use of solar energy in the Irkutsk Region and the Republic of Buryatia [Электронный ресурс] // Режим па: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128905002> (дата обращения: 25.08.2021).
  2. Основные характеристики и способы зарядки электромобиля Tesla Model S [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Tesla Motors. Режим доступа: <https://www.tesla.com/> (дата обращения: 28.08.2021).
  3. Основные характеристики и способы зарядки электромобиля Nissan Leaf [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Nissan Motor Co., Ltd. Режим па: <https://www.nissanusa.com/electric-hybrid-cars> (дата обращения: 28.08.2021).
  4. Основные характеристики и способы зарядки электромобиля Renault KANGOO Z. E. [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Renault Group. Режим па: <https://www.renault.ru/vehicles/range/kangoo-ze.html> (дата обращения: 28.08.2021).
  5. Основные характеристики и способы зарядки электромобиля Ford Focus Electric [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Ford Motor. Режим па: <https://www.ford.com/cars/focus/2017/models/focus-electric/> (дата обращения: 28.08.2021)
- 

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ В НОВОСИБИРСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 10/ 0,4 КВ**

**Т.В. Мятеж, Д.А. Павлюченко, О.С. Атаманова, В. Я. Любченко,  
С.А. Юрков, Е.А. Могиленко**

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск  
[tatianamyateg@mail.ru](mailto:tatianamyateg@mail.ru)

В настоящее время наблюдается массовое использование электромобилей в мире. Это связано с тем, что важность и острота проблемы экологической безопасности повышается с каждым днем. На данный момент более удобной, доступной, востребованной и при этом менее вредоносной во всех сферах жизнедеятельности альтернативы автомобильному транспорту нет. Объем выбросов за год в мире составляет более 25 млн. т. загрязняющих веществ различного происхождения, которые являются крайне опасными для природы в целом. В среднем каждый год они увеличиваются на 3%. На транспортный сектор приходится 23% всех выбросов парниковых газов в мире. Электромобили способны внести наибольший вклад в снижение выбросов парниковых газов в атмосферу. Рынок электромобилей и зарядных станций развивается динамично: темпы прироста — до 80% ежегодно. К концу первого квартала 2021 года в России было зарегистрировано 12,4 тысячи электромобилей. В 2025 году ожидается увеличение продаж электромашин до объема 100 тысяч единиц. К 2030 году количество электромобилей достигнет 1,5 млн единиц [1].

Однако масштабный переход на использование электромобилей будет способствовать росту электропотребления. Кроме того, для снабжения энергией электромобилей необходимо создание соответствующей зарядной инфраструктуры. Следует отметить, что на сегодняшний момент рынок электромобилей и зарядных станций развивается динамично: темпы прироста — до 80% ежегодно. К 2030 году количество электромобилей достигнет 1,5 млн единиц. Основными барьерами для развития электромобилей в России являются их высокая стоимость и неразвитость сети заправочных станций. Актуальность проблемы подтверждается тем, что в марте 2022

года премьер-министр Михаил Мишустин подписал распоряжение, которым выделил около 1,37 млрд рублей на создание зарядной инфраструктуры для электротранспорта в России. Возвращаясь к стимулам. На самом деле их много. Это и необходимость решения экологической проблемы в больших городах, и достижение цели по снижению выбросов CO<sub>2</sub>, и поддержка промышленной политики, в том числе политики инновационного развития страны. Второй момент, который может повысить окупаемость зарядных станций, это умные сервисы, в первую очередь, снижающие стоимость технологического присоединения через динамическое распределение мощности между основным объектом и зарядной станцией. Есть и другие, более продвинутое решения, которые мы сейчас пилируем, это оптимизация инвестиций в сетевую инфраструктуру, например, для оператора региональной публичной зарядной инфраструктуры [2].

В работе рассмотрено решение задачи проектирования системы электроснабжения для подключения зарядной станции электромобилей к подстанции г. Новосибирска. Подключенное зарядное устройство электромобиля, являясь нелинейной нагрузкой, приводит не только к увеличению нагрузки на электросетевую инфраструктуру, но может быть причиной ухудшения качества электроэнергии за счет генерирования гармонических искажений [3]. Поэтому особое внимание уделено анализу качества электроснабжения при работе зарядной станции с использованием модели, разработанной в пакете MATLAB Simulink для анализа высших гармоник.

#### Список источников

1. Правила устройства электроустановок. - М.: Энергоатомиздат, 2013.
2. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию в 2-х томах, Т.1 Электроснабжение / Под общ.ред. А.А. Федорова - М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Скундин А.М., Современное состояние и перспективы развития исследований литиевых аккумуляторов / А.М. Скундин, О.Н. Ефимов, О.В. Ярмоленко // Успехи химии. - 2012 - №71 (4) С.378.

---

## ANALYSIS OF THE RENEWABLE ENERGY SOURCES APPLICATION EFFICIENCY IN THE COMPOSITION OF AUTONOMOUS HYBRID POWER PLANTS OF RAILWAY TRANSPORT ELECTRIFICATION SYSTEMS

**S.V. Mitrofanov<sup>1,2</sup>, N.G Kiryanova<sup>1,2</sup>, P.V. Matrenin<sup>1,2</sup>, V.M. Zyryanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

<sup>2</sup>Sirius University, township Sirius, Krasnodar region

[mitrofan\\_serg@mail.ru](mailto:mitrofan_serg@mail.ru)

The article analyzes the efficiency of using renewable energy sources (RES) as part of autonomous hybrid power plant (AHPP) to increase throughput on long sections of railways. The introduction considers Russian and world experience of AHPP and RES systems using in railway electrification systems. Mathematical models of photovoltaic converters and wind power plants as the main sources of generation for AHPP presents in Methods of modelling section. The analysis of the energy potential was performed on the basis of initial data from various information resources for estimating the influence of the averaging interval on the accuracy of the calculation results. In Results section, a quantitative assessment of the energy potential of photovoltaic panels and wind turbines for the section of West Siberian Railway was made with recommendations on the feasibility of using systems and the optimal ratio of RES sources as part of the AHPP.

# METEOROLOGICAL ADAPTATION OF SHORT-TERM SOLAR POWER PLANT GENERATION FORECASTING

**P.V. Matrenin<sup>1</sup>, A.G. Rusina<sup>1</sup>, A.I. Khalyasmaa<sup>1,2</sup>, V.V. Gamaley<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

<sup>2</sup>Ural Federal University, Yekaterinburg

[matrenin.2012@corp.nstu.ru](mailto:matrenin.2012@corp.nstu.ru)

Renewable energy sources (RES) are primarily considered as reducing the carbon footprint [1]. At the same time, RES can also solve the problems of power supply to objects experiencing a shortage of electricity, such as isolated power systems and consumers for which the throughput capacity of the external power supply system is lower than the required power at certain moments. Some traction substations in the power supply system of railway transport belong to such objects [2]. The movement of heavy train requires power higher than the power supply system can provide. It results in voltage dips, consequently in decreasing a train speed and the traffic schedule violation [3]. Since these moments of peak consumption rarely occur, the reconstruction of the power supply system is not economically workable. Using solar panels together with energy storage is an alternative way to compensate for voltage dips. In this case, the generation of a large amount of electricity is not required, since it is only necessary to maintain a reserve in the energy storage system to compensate for voltage dips.

However, the use of solar power plants (SPP) requires generation forecasting; it depends primarily on solar insolation and meteorological conditions. There is a large amount of research in this area [4], however, there is still a need to conduct research to create a predictive model for a particular power plant, considering the peculiarities of climatic conditions. In this research a forecasting machine learning model for hour ahead solar power plant generation was developed based on a long-term meteorological data for Kemerovo Region (Russia). The research novelty is a proposed method of the short-term model meteorological adaptation. The method consists of meteorological conditions clustering including not daily but hourly ones. Such clustering is shown to reduce by 17-25% the forecasting error of different regression models. A new approach is suggested to define the optimal number of clusters. The final forecasting error made 8.6 % with the R2 0.96 coefficient of determination. The research is practically oriented because it is part of a project to improve the efficiency of the power supply system of Russian Railways through the use of distributed generation systems and energy storage systems.

## References

1. H. Dong, B. Zeng, Y. Wang, Y. Liu, M. Zeng. China's Solar Subsidy Policy: Government Funding Yields to Open Markets. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2020. Volume 18(3). P. 49 – 60
2. S.V. Mitrofanov, N.G. Kiryanova, A.M. Gorlova. Stationary Hybrid Renewable Energy Systems for Railway Electrification: A Review. *Energies*. 2021. Volume 14(18). ID. 5946.
3. S.V. Mitrofanov, D.V. Armeev, E. A. Domahin. Analysis of the Impact of Autonomous Hybrid Power Plants on the Railways Capacity. *XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. 2021. P. 161 – 165.
4. C. Voyant, et al. Machine learning methods for solar radiation forecasting: a review. *Renewable Energy*. 2017. Volume 105. P. 569 – 582.

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ВЕТРОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ

**А.Г. Массель, Н.И. Шукин, А.Р. Цыбиков**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

[niksha14@mail.ru](mailto:niksha14@mail.ru)

По данным компании GE Renewable, цифровой двойник увеличивает производительность выработки электроэнергии ветроустановки GE в диапазоне от 5% до 7% [1]. Из выше сказанного можно заключить, что разработка ЦД ВЭС является актуальной темой, но очень сложной в реализации из-за отсутствия методологии к проектированию и построению такого рода систем. В свою очередь наше исследование направлено на построение методологии к разработке ЦД ВЭС для стандартизации и уменьшения затрат на разработку новых решений в этой области.

В докладе подробно рассматривается подход к построению ЦД основанный на онтологическом инжиниринге, являющемся важным этапом в построении модели данных. Приводится фрагмент системы онтологий ветровых систем необходимый для построения цифровой тени, которая в проектируемом ЦД состоит из модели данных, методов машинного обучения и системы сбора оперативной информации. Рассмотрена применяемая математическая модель для определения параметров работы ветроэнергетической установки, уделено внимание проектированию архитектуры ЦД, состоящего из цифровой тени, цифровой модели и системы управления. Далее рассмотрена задача предсказания временных рядов на примере предсказания характеристик ветра. Для решения этой проблемы было решено использовать рекуррентные нейронные сети. В работе представлены результаты предсказаний и дальнейшее развитие работы в этом направлении.

В докладе обращается внимание на этап проектирования структуры взаимодействия ЦД со SCADA-системой. Также определяются задачи, возложенные на SCADA-систему в архитектуре ЦД ветровой электростанции.

Доклад завершается планами по дальнейшему развитию системы и подведению итогов по проделанной работе.

**Благодарности.** Результаты получены в рамках выполнения базового проекта ИСЭМ СО РАН АААА-А21-121012090007-7 по госзаданию FWEU-2021-0007 и проекта по гранту РФФИ №20-07-00994.

### Список источников

1. Digital solutions for wind farms [Электронный ресурс]: URL: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/onshore-wind/digital-wind-farm> (дата обращения: 12.02.2022).

---

## СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СТЕНДА

**Р.А. Иванов, Н.В. Максаков**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

[nikita.max@isem.irk.ru](mailto:nikita.max@isem.irk.ru)

Для проведения экспериментальных работ по мониторингу выходных показателей солнечных панелей в ИСЭМ СО РАН установлен стенд с тремя разноориентированными фотоэлектрическими панелями для определения оптимального угла наклона панелей и необходимости сооружения автоматизированной следящей за солнцем системы. Для

мониторинга и автономной записи данных существует проприетарное оборудование, которое имеет высокую стоимость и ограниченный функционал.

На основе микроконтроллера Arduino разработано собственное устройство для мониторинга энергетических показателей в цепи постоянно тока. Показания силы тока считываются шунтовым амперметром, а напряжения с помощью делителя напряжения. Отладочная версия схемы устройства была собрана на макетной плате и осуществляла запись данных на SD карту. Текущая версия счётчика имеет собственную плату с возможностью модульного подключения компонентов. Так же реализована автоматическая загрузка данных на сервер с помощью одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 который работает как промежуточный центр связи и принимает данные по протоколу Bluetooth. Данные сохраняются в текстовом файле и передаются в облачное хранилище на локальный сервер.

Разработанный счётчик собирает данные со средним значением за 10 минут, передаёт их на сервер и дублирует на локальную SD карту для резервирования при сбоях беспроводной передачи информации. Полученные данные сохраняются в формате \*.txt, что позволяет упростить дальнейший просмотр и обработку. При теоретическом расчёте солнечной радиации используются данные о солнечной радиации за час, поэтому далее полученный массив измерений осредняется до необходимых значений.

Кроме того, расчёты требуют показания погодных условий такие как облачность, влажность и т.д. Для получения погодных данных можно воспользоваться бесплатными сервисами погоды, которые используют данные с местных метеостанций. Для этой цели была написана программа на языке программирования Python, она запускается на Raspberry Pi 3 и передаёт данные в отдельный файл на сервер. Так же на основе разработанного счётчика ведётся работа над устройством для мониторинга данных с пиранометра «Пеленг СФ-06» для получения практической проверки полученных расчётов солнечной радиации.

---

## СЕКЦИЯ 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

### DISTRIBUTED GENERATION AND ITS IMPACT ON TRANSMISSION OPERATION

**Miskabe Assefa Yigezu**

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk

[miskabeassefa90@gmail.com](mailto:miskabeassefa90@gmail.com)

Using a dynamic model of the power transmission system, we study the impact of distributed generation on the robustness of the power transmission grid in this paper (OPA). It has been discovered that differing percentages and distributions of dispersed generation can produce different dynamics. The ratio of distributed generation variability to generating capacity margin is discovered to be an essential metric. Surprisingly, in some of these circumstances, the transmission grid's resiliency can be eroded, thus increasing the danger of major failures with additional dispersed generation if not done appropriately.

The transmission system is fundamentally different from the distribution system in terms of functioning. The distribution system is run in a passive manner, with little intervention after it is constructed. Both automatic and manual interventions are used to operate the gearbox system.

Increased connection of dispersed generation at distribution levels above a specific penetration level may have an impact not only on distribution system operation and design, but also on transmission system operation and stability. The purpose of this work is to look into the effects of distributed generation on frequency and voltage stability. The findings reveal that the impacts vary depending on penetration levels and DG technology.

Solar panels and combined heat and power are examples of distributed generation technologies that generate electricity at or near the point of usage. Distributed generation can service a single structure, such as a home or company, or it can be part of a microgrid (a smaller grid that is also connected to the larger energy delivery system), such as at a big industrial complex, military base, or college campus. Distributed generating can help support the delivery of clean, reliable power to more consumers and reduce electricity losses along transmission and distribution lines when connected to the electric utility's lower voltage distribution lines.

Distributed generation can help the environment by reducing the quantity of electricity that must be generated at centralized power plants, which minimizes centralized generation's environmental implications.

The numerous phases of delivering power from generators to a home or business across poles and wires are referred to as transmission and distribution. After power is generated, it is transported from the generator to our homes and businesses via a network of electrical cables.

#### References

1. G.P. Azevedo and A.L. Oliviera Filho. Control centers with open architectures [power system EMS]. IEEE Computer Applications in Power, (4):27–32, 2001.
  2. J. Balcells and D. Gonzalez. Harmonics due to resonance in a wind power plant. In 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, October 1998.
  3. M.E. Baran, S. Teleke, L. Anderson, A. Huang, S. Bhattacharya, and S. Atcitty. STATCOM with energy storage for smoothing intermittent wind farm power. In IEEE Power Engineering Society General Meeting, Pittsburgh, PA, July 2008.
  4. A. Barin, L.F. Pozzatti, C.G. Carvalho, L.N. Canha, R.Q. Machado, A.R. Abaide, C. Fernandes, and F.A. Farett. Analysis of the impact of distributed generation sources on the operational characteristics of the distribution systems for planning studies. In International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Vienna, May 2007.
  5. R.E. Barlow and F. Proschan. Mathematical Theory of Reliability, classics edition, Society of Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, PA, 1996.
- 

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ МИКРОГЕНЕРАЦИИ

**И.А. Мальцев**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[malcev.iluha@yandex.ru](mailto:malcev.iluha@yandex.ru)

В последнее десятилетие ВИЭ становится одним из основных инструментов по генерации электроэнергии и борьбе с ухудшением климатической обстановки в мире. По мимо этого, возобновляемая энергетика зарекомендовала себя как эффективный метод снижения нагрузки на традиционный сектор производства энергии, опыт зарубежных стран по стимулированию развития возобновляемой энергетике от лица государственных структур показывает, что поддержка возобновляемого сектора является одним из самых приоритетных направлений в сфере электроэнергетики. Один из таких стимулов называется «Feed-in tariff» (система зеленого тарифа). К сожалению, на территории РФ в вопросах возобновляемой энергетике до середины 2017 года не рассматривалась поддержка со стороны государства. Первые, целенаправленные шаги, были сделаны разработкой законопроекта о внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» по вопросам развития микрогенерации [1] непосредственно под термином микрогенерация и понимается система зеленого тарифа. Однако в силу нововведений, законодательная база столкнулась с рядом проблем, по этой причине

неоднократно вводились новые поправки и доработки. И по состоянию на 2021 год все также были необходимы дополнительные нововведения и доработки.

Цель данного исследования – более подробное изучение и сравнение законодательной базы (на текущий момент ее реализации) о «развитии микрогенерации» по средствам моделирования реализации и эксплуатации системы электроснабжения, построенной на базе солнечной генерации без использования накопителей энергии, частного домовладения до 15 кВт реализованной при помощи программы «Matlab». На основе полученных данных дается подробная рекомендательная характеристика по доработке нововведений в законодательную базу, с целью обеспечения повышенной привлекательности зеленого тарифа в России в целом.

#### Список источников

1. Камышанский В.П. Гражданско-правовое стимулирование энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии как формы энергосбережения [Текст] / Камышанский В.П. //Гражданское право. - 2018. - Т. 4. - С. 8-11.

---

## A STUDY ON THE EFFECT OF ENERGY STORAGE SYSTEMS AND DISTRIBUTED GENERATORS ON RELIABILITY

**Beopsoo Kim<sup>1</sup>, Insu Kim<sup>1</sup>, Dayoung Lee<sup>1</sup>, N.V. Rusetskii<sup>2</sup>, D.N. Sidorov<sup>3</sup>,  
K.A. Shusterzon<sup>3</sup>, Minseok Song<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Inha University, Incheon

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk

<sup>3</sup>Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the RAS, Irkutsk  
[k.shusterzon@isem.irk.ru](mailto:k.shusterzon@isem.irk.ru)

This research is devoted to the problem of the development of an Energy Storage System (ESS) operation strategy. In the case of the usage of renewable energy resources, such strategies cannot be trivial. We propose a method of ESS operation based on a prediction of the grid demand. For prediction, we considered two machine learning approaches such as Long Short-Term Memory (LSTM) and Echo State Network (ESN). We predict system marginal price (SMP) using empirical data published by the Korea Power Exchange and the Korea Meteorological Administration. Then we use predicted data to build the operation demand-based strategy for ESS and Distributed Generators (DG). To verify the impact of the proposed operation strategy on power grid, a grid fault is simulated through OpenDSS to consider the power system reliability. As a result, the proposed algorithm was able to interpret the effect on the system when the ESS operator shows selfish behaviour to the system.

#### References

1. D. Sidorov et al., "A Dynamic Analysis of Energy Storage With Renewable and Diesel Generation Using Volterra Equations," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 5, pp. 3451-3459, 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2932453. 806 Authorized licensed use limited to: The University Of The Arts London. Downloaded on December 22, 2021 at 11:07:04 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.
2. I. Kim, "A case study on the effect of storage systems on a distribution network enhanced by high-capacity photovoltaic systems," Journal of Energy Storage, vol. 12, pp. 121-131, 2017/08/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.04.010>.

3. M. Carolin Mabel and E. Fernandez, "Analysis of wind power generation and prediction using ANN: A case study," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 986-992, 2008, doi: 10.1016/j.renene.2007.06.013.

4. A. Kusiak, H. Zheng, and Z. Song, "Short-Term Prediction of Wind Farm Power: A Data Mining Approach," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 1, pp. 125-136, 2009, doi:10.1109/TEC.2008.2006552.

5. T. Hiyama and K. Kitabayashi, "Neural network based estimation of maximum power generation from PV module using environmental information," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 12, no. 3, pp. 241-247, 1997, doi:10.1109/60.629709.

---

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЦЕН НА ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ ДЛЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДВУХУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МЕТОДА НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ МНОЖИТЕЛЕЙ ЛАГРАНЖА**

**В.А. Стенников, О.В. Хамисов, А.В. Пеньковский, А.А. Кравец**  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[kravets@isem.irk.ru](mailto:kravets@isem.irk.ru)

В настоящее время тарифное регулирование является одним из наиболее продуктивных методов контроля, которые реализуются в РФ. Регулирование цен, при помощи установления тарифов, подразумевает, собственно, что все теплоснабжающие компании проводят расчет тарифов и передают их на утверждения в надлежащие госструктуры. Модель рынка провозглашает надобность обеспечения покрытия небаланса между созданием и потреблением тепловой энергии.

В работе представлен сравнительный анализ двухуровневого моделирования теплоснабжающих систем и метода неопределенных множителей Лагранжа при расчете средневзвешенного тарифа.

На основе метода двухуровневого моделирования (bilevel programming) предложена оптимизационная иерархическая модель по управлению функционированием теплоснабжающих систем. Предложенная математическая модель позволяет учитывать технические и экономические характеристики источников тепловой энергии и тепловых сетей, интересы участников процесса теплоснабжения потребителей и определять оптимальные условия по управлению функционированием теплоснабжающих систем.

Особенности рынка при формировании цены отражаются в понятии «узловая цена». Она оценивает стоимость тепловой энергии в конкретной точке системы теплоснабжения с учетом конфигурации сети и возникших при производстве и транспортировки тепловой энергии.

Для расчета узловых цен в работе предлагается использовать метод неопределенных множителей Лагранжа, основанного на задачи оптимизации установившегося режима в теплоснабжающей системе. Полученные в результате расчета множители Лагранжа при балансовых ограничениях (первый закон Кирхгофа) интерпретируются как узловые цены.

### Список источников

1. Н. В. Дресвянская Анализ поведения генераторов в двухуровневой рыночной модели функционирования ЭЭС Известия Иркутского государственного университета Серия «Математика» 2016. Т. 16. С. 43—57 - [Электронный ресурс]. - <http://isu.ru/izvestia>, (дата обращения 17.03.2022).

2. Merenkov AP, Khasilev VYa., Theory of hydraulic circuits. Moscow: Nauka; 1985 – 279 p.

3. Замбжицкая, Е. С. Совершенствование существующей методики расчета регулируемых цен (тарифов) в сфере теплоснабжения / Е. С. Замбжицкая, А. У. Ямалетдинова. — Текст : непосредственный, электронный // Молодой ученый. — 2016. — № 19 (123). — С. 449-453. - [Электронный ресурс]. - <https://moluch.ru/archive/123/33844/> (дата обращения: 30.04.2020).

4. Васьяковская Т.А. Показатели разницы узловых цен на оптовом рынке электроэнергии. // Электричество. 2007г. № 2. 23-27 с

5. Стенников В.А., Пеньковский А.В., Хамисов О.В. Поиск равновесия Курно на рынке тепловой энергии в условиях конкурентного поведения источников тепла // Проблемы управления. 2017. № 1. С. 10-18.

6. Merenkov AP, Khasilev VYa., Theory of hydraulic circuits. Moscow: Nauka; 1985 – 279 p.

---

## ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРЭМ В РАЗЛИЧНЫХ СТРАНАХ

**Ю.Э. Добрынина**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

[yulia071294@mail.ru](mailto:yulia071294@mail.ru)

В представленной статье рассмотрены основные направления развития рынка электрической энергии в различных странах, динамика показателей, результат деятельности на сегодняшний день, а также способы регулирования и влияния на уровень качества поставляемой энергии. Рассмотрены основные особенности применяемых моделей регулирования, основные принципы работы энергетических компаний – пути успешного развития и функционирования в рамках заданных условий.

Цель данного исследования – рассмотреть элементы функционирования энергетических рынков, изучить особенности регулирования как зарубежных моделей, так и отечественного оптового рынка электрической энергии и мощности с учетом технических составляющих (уровень надежности энергетической системы). Определение вектора развития – точки роста, для эффективной работы генераторов в заданных условиях.

В рамках данной статьи произведен обзорный экскурс по основным направлениям функционирования рынка электрической энергии как в зарубежной практике, так и в отечественном варианте. Наглядно представлены модели рынков, описаны различные подходы к определению уровня качества и надежности поставляемой электрической энергии.

### Список источников:

1. Модели ценообразования на услуги субъектов естественных монополий в Великобритании – [Электронный ресурс] – Модели ценообразования на услуги субъект.нных монополий в Великобритании.pdf, (дата обращения: 27.04.2020).

2. Первое отраслевое электронное СМИ – [Электронный ресурс]. – <https://www.ruscable.ru>, (дата обращения: 27.04.2020).

3. National Grid Electricity Transmission Plc – [Электронный ресурс] – National Grid Electricity Transmission plc - Special Conditions Consolidated - Current Version.pdf, (дата обращения: 27.04.2020).

4. National Grid Electricity System Operator Limited – [Электронный ресурс] – NGESO - Special Conditions Consolidated - Current Version.pdf, (дата обращения: 27.04.2020).

5. Официальный портал Ассоциация «НП Совет рынка» – [Электронный ресурс] – <https://www.np-sr.ru/ru>, (дата обращения: 27.04.2020).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

И.А. Пузанов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск  
[ihorpuzanov@yandex.ru](mailto:ihorpuzanov@yandex.ru)

В [1] рассмотрены основные этапы итерационной процедуры оценивания состояния (ОС) трехфазной четырехпроводной распределительной сети низкого напряжения, результатом которого является определение векторов узловых напряжений фаза-земля, нейтральный провод-земля и фаза – нейтральный провод. Такая информация позволяет производить расчет потокораспределения и потерь мощности в сети при ее четырехпроводном, так и трехпроводном моделировании, которые, как показано в [2] для потерь активной мощности, при обоих способах моделирования дают одинаковые результаты. В данной работе вывод о равенстве потерь для четырехпроводного и трехпроводного способов моделирования сети поручен для потерь реактивной мощности.

Другой возможностью расчета потерь мощности в фазах разомкнутой распределительной сети при ее трехпроводном моделировании может быть определение потерь как разности мощности, переданной из узла питания РС в каждый нагрузочный узел и мощности нагрузки этого узла. В [3] показана возможность расчета потерь активной мощности в распределительной сети непосредственно по измерениям интеллектуальных счетчиков. В этом случае вместо продольных и поперечных составляющих фазных напряжений относительно нейтрального провода используются измеренные значения модулей напряжений [4].

В работе приведено экспериментальное доказательство возможности расчета потерь активной мощности в распределительной сети только по измерениям интеллектуальных счетчиков без использования данных о параметрах ее схемы ее замещения. Исследование же аналогичной возможности расчета потерь реактивной мощности по измерениям реактивных нагрузок и модулей напряжений в нагрузочных узлах показало, что такой измерительной информации недостаточно и требуются данные о параметрах схемы замещения распределительной сети.

## Список источников

1. Болоев Е.В., Голуб И.И., Федчишин В.В. Оценивание состояния распределительной сети низкого напряжения по измерениям интеллектуальных счетчиков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 95–106. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-95-106>
2. Голуб И.И., Болоев Е.В., Кузькина Я.И. Оценивание состояния трехфазной четырехпроводной вторичной распределительной сети. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020, т.24, №2.
3. Гамм А.З, Голуб И.И. Адресность передачи активных и реактивных мощностей в электроэнергетической системе// Электричество. 2003, №3, с.9-16.
4. Голуб И.И., Болоев Е.В., Кузькина Я.И. Метод расчета потокораспределения вторичной распределительной сети по измерениям интеллектуальных счетчиков. // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 70. Методические и практические проблемы надежности систем энергетики. В 2-х книгах. / Книга 2 / Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2020. С. 123–133.

# ОСНОВЫ РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ СТРАТЕГИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ АКТИВНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Д.В. Амосова

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[dar.amosova@mail.ru](mailto:dar.amosova@mail.ru)

В связи с постоянным ростом тарифов на электрическую энергию, развитием цифровых и аппаратных комплексов, все больше платежеспособных потребителей выходят из Единой энергетической системы России (ЕЭС России) [1]. Данный факт негативно сказывается на надежности функционирования системы, качестве электрической энергии и образовании тарифов для потребителей, оставшихся в ЕЭС России [2]. Активный энергетический комплекс — это локальная энергоячейка, имеющая собственную генерацию (электростанции на различных видах энергии), электросетевой комплекс и коммерческого потребителя [2,3].

Целью данной работы является разработка алгоритма, предназначенного для исследования возможных стратегий управления режимами активного энергетического комплекса и выбора наиболее эффективной стратегии для заданного отрезка времени.

В регулировании баланса мощностей могут участвовать балансирующие станции, системы накопителей электрической энергии, потребители с активным поведением (АП) и переток мощности из сети.

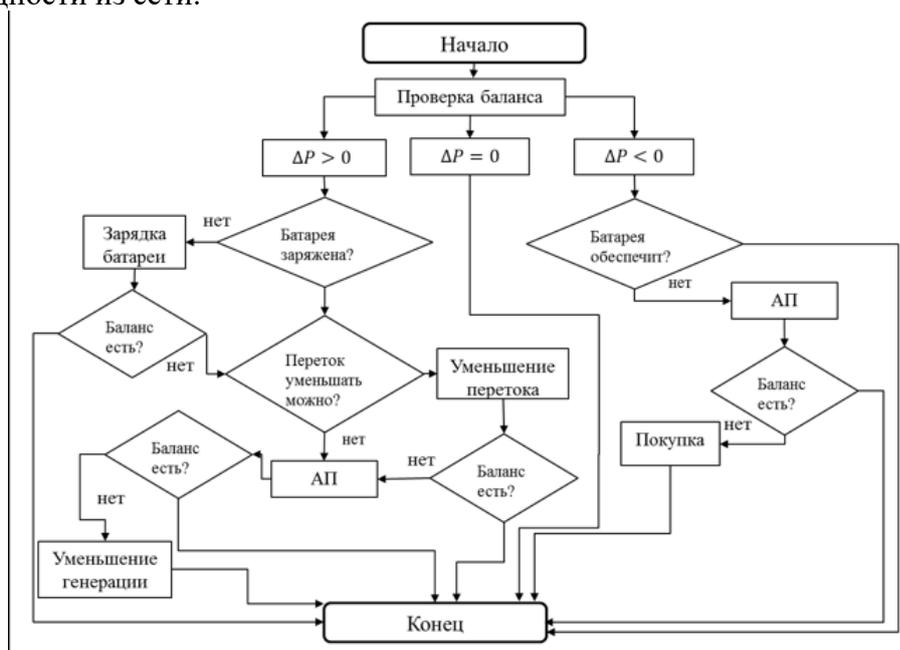


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

Блок-схема алгоритма разрабатываемой стратегии управления режимами АЭК показана на рис.1. В предлагаемом алгоритме главным критерием является минимизация затрат на снабжение электрической энергией при максимальном использовании возобновляемых источников энергии, а в роли ограничений выступают: баланс мощностей, пределы пропускной способности, генерируемая мощность, уровень комфорта активного потребителя, постоянство площади под графиком АП до и после корректировки, возможности системы накопителей. Предполагается, что результатом работы общей стратегии управления будут откорректированные графики генерации и нагрузки и перетока по линии, связывающей АЭК с ЕЭС России, на сутки вперед.

## Список источников

1. Дацко, К. А. Активные энергокомплексы / К. А. Дацко // Энергетическая политика. – 2020. – № 6(148). – С. 64-75. – DOI 10.46920/2409-5516\_2020\_6148\_64;

2. Авдеев, Я. В. Предпосылки для создания активных энергетических комплексов в России / Я. В. Авдеев // Россия молодая : Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 20–23 апреля 2021 года / Редколлегия: К.С. Костиков (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. – С. 21301.1-21301.4;

3. Активный энергетический комплекс: как интегрировать распределенную энергетику в ЕЭС и снизить затраты потребителей АО "СО ЕЭС" // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – № 2(59). – С. 26-29.

---

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

**Я.Ю. Малькова, Р.А. Уфа, В.Е. Рудник**

Томский политехнический университет, Томск

[yamalkova96@gmail.com](mailto:yamalkova96@gmail.com)

Сегодня в распределительных сетях наблюдается тенденция увеличения мощности нагрузки, что, в свою очередь, определяет необходимость ввода новой генерации. В соответствии с целью №7 «Недорогостоящая и чистая энергия» в области устойчивого развития, а также содержанием актуальной климатической повестки выбор типа генерации, как правило, осуществляется в пользу объектов на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Возобновляемая генерация характеризуется непостоянством выработки электроэнергии ввиду очевидной зависимости от суточных и сезонных погодных изменений. Таким образом, для обеспечения надежности электроснабжения нагрузки от местной генерации необходимо планировать совместную установку объекта ВИЭ и системы накопления энергии, в частности, водородного накопителя.

Получение водорода посредством электролиза с использованием избыточной электроэнергии, вырабатываемой объектами ВИЭ в дневные часы, является наиболее экологичным способом (так называемый «зеленый» водород), сопровождающимся минимальным негативным воздействием на состояние окружающей среды.

Установке объекта ВИЭ и системы накопления энергии непосредственно в сеть предшествует этап планирования и определения основных параметров данных объектов в рамках соответствующей оптимизационной задачи [1].

Оптимальной конфигурации вводимых объектов соответствует минимальное значение целевой функции (например, суммарных потерь мощности). Кроме того, необходимо задать ограничительные и расчетные условия, а также выбрать инструментарий для расчета целевой функции и поиска ее минимального значения среди всех возможных решений поставленной задачи. Коллективом авторов было создано программное обеспечение [2], основанное на разработанном алгоритме. Математические выкладки в рамках данного алгоритма соответствуют методу итерационного расчета перетоков и потерь мощности.

В рамках одного из расчетных сценариев [3] для исследуемой 15-узловой IEEE схемы рекомендован к установке объект ВИЭ в третий узел, мощностью 718 кВт. Далее для оценки параметров водородного накопителя рассмотрен суточный график суммарной нагрузки и было установлено, что суммарная избыточная генерация составляет 1764 кВт ч. Однако после учета суммарного КПД двойного преобразования водорода располагаемая емкость составила 917 кВт ч. Полученная величина является входным параметром для дальнейшего определения оптимального размещения системы накопления энергии. Для чего, необходимо в соответствии со спецификой выбранной системы накопления энергии задать граничные и расчетные условия заряда/ разряда накопителя.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00275.

#### Список источников

1. Rathore A., Patidar N.P. Optimal sizing and allocation of renewable based distribution generation with gravity energy storage considering stochastic nature using particle swarm optimization in radial distribution network // Journal of Energy Storage. –2021. – Vol. 35. – P. 1-18.
  2. Определение оптимального места и мощности объектов распределенной генерации: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022611224 Российская Федерация / Я.Ю. Малькова, Р.А. Уфа, И.А. Разживин. – № 2022610316; заявл. 13.01.22; опубл. 21.01.22, Бюл. № 2.
  3. Ufa R.A., Malkova Y.Y., Gusev A.L., Ruban N.Y., Vasilev A.S. Algorithm for optimal pairing of res and hydrogen energy storage systems // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Vol. 46, Iss. 68. – P. 33659-33669.
- 

## ПОСЛЕАВАРИЙНАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ КАК СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**Е.В. Карпова**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[karpova.e.v.96@yandex.ru](mailto:karpova.e.v.96@yandex.ru)

Показателем отказоустойчивости первичной распределительной сети среднего напряжения является ее способность к восстановлению электроснабжения потребителей при аварийных отключениях как отдельных, так и нескольких линий, особенно наиболее ответственных из них. При решении проблемы восстановления электроснабжения необходимо учитывать эксплуатационные и технические ограничения, связанные с сохранением радиальной конфигурации сети, с допустимыми токами в секциях фидеров и допустимыми уровнями узловых напряжений [1].

Используемый в работе алгоритм реконфигурации, в основе которого лежат методы теории графов, позволяет не только определить оптимальный состав разомкнутых линейных выключателей, обеспечивающий минимальные потери мощности в распределительной сети, но и варианты линейных выключателей, которые могут использоваться для восстановления электроснабжения при аварийном отключении любого из нормально замкнутых секционных выключателей. Минимизация потерь мощности приводит к выравниванию уровней узловых напряжений, однако, в послеаварийных режимах может потребоваться ряд дополнительных мероприятий для введения напряжений в допустимые пределы, таких как повышение напряжения источника питания, подключение дополнительных источников активной или реактивной мощности, ограничение режима потребления мощности, а также сочетания указанных мероприятий [2].

Выбор линейных выключателей, которые могут быть использованы для восстановления электроснабжения потребителей, основывается на том, что одна и та же ветвь покрывающего дерева может входить в состав нескольких контуров, поэтому восстановление режима при аварийном отключении секционного выключателя может быть обеспечено замыканием любого из линейных выключателей, входящих с отключенным в общий контур [3]. Из всех вариантов восстановления режима выбирается вариант с минимальными потерями мощности и, как правило, минимальными отклонениями напряжений. Если отклонения напряжений превышают допустимые, то принимается решение о дополнительных мероприятиях, обеспечивающих их введение в допустимые пределы. Эффективность алгоритма иллюстрируется на примере распределительной сети, состоящей из 118 узлов, 132 ветвей и 15 линейных выключателей [4]. Рассмотрены сценарии отключения как отдельных, так и нескольких

секционных выключателей и различные подходы к восстановлению допустимого режима.

#### Список источников

1. Успенский М.И., Кызродев И.В. Методы восстановления электроснабжения в распределительных сетях. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2010.
  2. Воротницкий В.Э. Основные направления снижения потерь электроэнергии в электрических сетях // Энергия единой сети. 2013. №2 (7). С. 24–35.
  3. Голуб И.И., Войтов О.Н., Болоев Е.В., Семенова Л.В. Выбор краткосрочной фиксированной конфигурации распределительной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 39–51
  4. D. Zhang, Z. Fu, L. Zhang, An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems // Electric Power Systems Research. 2007. Volume 77. Issues 5-6. P. 685-694.
- 

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ ИЭС К КИБЕРАТАКАМ

**И.С. Демидов**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[demidov.is96@mail.ru](mailto:demidov.is96@mail.ru)

В настоящее время продолжается цифровая трансформация в энергетическом комплексе РФ. Создание и развитие интеллектуальной энергосистемы (ИЭС) предусматривает внедрение новых компьютерных технологий контроля, управления, измерения и передачи данных для мониторинга режимов и управления ими. Однако помимо всех плюсов, которые привносят эти внедрения, увеличивается уязвимость энергетических объектов при кибератаках (КА). Поэтому в ИЭС наряду с традиционными проблемами повышения эффективности производства, преобразования, передачи и распределения электроэнергии, их надёжности, безопасности и живучести возникают задачи обеспечения их кибербезопасности [1].

Целью данной работы является проведение обзора современных методов анализа устойчивости объектов ИЭС к КА, а также способов, которые позволят ее повысить.

На сегодняшний день существуют различные методики, которые в той или иной мере можно применить для поставленной выше цели [2-4]. В работе подробно рассмотрены следующие методы:

- метод оценки киберфизической (КФ) устойчивости;
- метод оценки КФ осведомленности;
- метод оценки уязвимости SCADA-систем;
- метод оценки риска КА и др.

Для выполнения задачи повышения устойчивости объектов ИЭС к КА необходим комплексный подход. В работе предложены разнообразные способы, позволяющие повысить КБ, начиная от выбора наиболее подходящего программного обеспечения на энергетических объектах и заканчивая способами защиты от социальной инженерии [5].

#### Список источников

1. Воропай Н.И., Колосок И.Н., Коркина Е.С., Осак А.Б. Киберугрозы и кибербезопасность в электроэнергетических системах // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции, 02 – 06 октября 2017, Самара. – В 3 т. Т 2. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. С.56-67.

2. Гаськова Д.А., Массель А.Г. Методики анализа киберситуационной осведомленности об энергетическом объекте. Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2021 Т.19, №2. С. 17–28. DOI: 10.25210.25205/1818-7900-2021-19-2-17-28

3. Колосок И.Н., Гурина Л.А. Оценка рисков управления ЭЭС при кибератаках на информационно-коммуникационную инфраструктуру киберфизической системы // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 70. Методические и практические проблемы надежности систем энергетики. 2019. С.238-247.

4. Y. Cherdantseva, P. Burnap, A. Blyth, P. Eden, K. Jones, H. Soulsby, K. Stoddart A review of cyber security risk assessment methods for SCADA systems // Computers & Security. 2016. P. 1-27

5. Воропай Н.И., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Проблемы повышения киберустойчивости цифровой подстанции // Релейная защита и автоматизация. Т.34. №1. ID:37403283. 2019. С.78-83.

---

## **ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАЗВИТИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Г.С. Майоров**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

[mayorovgs@isem.irk.ru](mailto:mayorovgs@isem.irk.ru)

В настоящее время при решении задач развития энергетических систем требуется учитывать глубокие изменения, связанные с переходом от рассмотрения централизованного государственного планирования и управления к новой парадигме многостороннего процесса обоснования решений и создания механизмов их реализации в условиях неопределенности, многокритериальности и множественности несовпадающих интересов. Развитие современных энергетических систем требует применения инновационных методов и технологий к их исследованию, предполагающих наличия множества центров принятия решений и учитывающих сложную структуру этих систем. Создание энерготехнологической метасистемы, объединяющей системы электро-, тепло-, хладо-, газоснабжения на интеллектуальной основе является перспективной технологией для создания современных энергетических систем нового поколения. В данной статье для решения задач развития интегрированных энергетических систем используется мультиагентный подход, в котором решения получаются в результате взаимодействия между собой множества агентов. На основании предложенной структуры мультиагентной системы разработана мультиагентная модель интегрированной энергетической системы в программной среде AnyLogic. И проведен вычислительный эксперимент, который позволил осуществить проверку разработанных принципов взаимодействия объектов в интегрированной энергетической системе при решении задач развития.

### Список источников

1. Voropai N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol.1111. No.1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1111/1/012001>

2. Valery Stennikov, Evgeny Barakhtenko, Gleb Mayorov, Dmitry Sokolov, Bin Zhou. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. Applied Energy. 2022; 309: 118487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118487>

3. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice // The Knowledge Engineering Review. 1995. Vol.10. N2. pp. 115-152.

4. Fisher K, Muller J.P., Heimig I., Scheer A-W. Intelligent Agents in Virtual Enterprises. In Proceedings of the First International Conference “The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology”, London, UK. 1996. pp. 205-224.

5. Luis Gomes, Zita Vale, Juan M. Corchado. Microgrid management system based on a multi-agent approach: An office building pilot. Measurement. 2020; 154. 107427. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107427>

6. Yongli Wang, Xiaohai Wang, Haiyang Yu, Yujing Huang, Huanran Dong, Cheng Yuan Qi, Niyigena Baptiste. Optimal design of integrated energy system considering economics, autonomy and carbon emissions. Journal of Cleaner Production. 2019; 225: 563-578. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.025>

7. O. Siddiqui, I. Dincer. Design and analysis of a novel solar-wind based integrated energy system utilizing ammonia for energy storage. Energy Conversion and Management. 2019; 195: 866–884. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.001>.

---

## **ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ**

**Е. А. Барахтенко, А.А. Попов**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[aptem\\_33@mail.ru](mailto:aptem_33@mail.ru)

Интеллектуальная сеть – развивающаяся парадигма современной энергетики, направленная на модификацию существующей инфраструктуры, путём добавления информационного слоя, обеспечивающего непрерывный мониторинг производства и потребления энергии [1]. Задача оптимизации полученных киберфизических систем осложнена возросшим числом компонентов с их уникальными характеристиками и связями.

В данной статье будут рассмотрены некоторые традиционные методы структурной оптимизации и их применимость для нового класса систем, а также представлен подход к разработке программного обеспечения их реализующего. Реализация алгоритмов является универсальной и может применяться к различным классам систем, имеющих сетевую структуру.

### **Список источников**

1. Study of Smart Grid Communication Network Architectures and Technologies, Naeem Raza, Muhammad Qasim Akbar, Aized Amin Soofi, Samia Akbar — [Электронный ресурс] — <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=91158>, (дата обращения: 07.04.2020).

---

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ И ИМПУТАЦИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

**А.С. Лосев**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[losef.aleksei@gmail.com](mailto:losef.aleksei@gmail.com)

Существуют два этапа разработки цифровых двойников: разработка прототипа с использованием научного инструментария исследователей, и отладка информационных взаимодействий с реальными информационными потоками для решения конкретных задач [1]. Работа с реальными данными допустима только на втором этапе, потому

появляется необходимость в создании генератора правдоподобных синтетических данных, которые в последствии могли бы использоваться во время тестирования цифрового двойника уже на первом этапе. В институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, принято решение разработать модель генерации и импутации данных для цифрового двойника солнечной электростанции, на основе имеющихся погодных данных, полученных с реального объекта.

В настоящее время продолжает расти роль солнечной энергии играет в производстве электроэнергии, поскольку возобновляемые источники энергии становятся многообещающей альтернативой для мира в целом [2]. Однако, если речь идет об установке солнечных электростанций на специфических объектах, например, крайний север, необходимо обосновать целесообразность такого решения, для чего и будет реализовано прогнозирование. Также, во время получения реальных данных, велика вероятность их потери, в виду их сбора на специфическом объекте. Первоначальные данные об объектах, которые были использованы в работе, были получены с пропусками – от одного часа до суток. Данные были восстановлены с помощью инженеров, однако было бы намного комфортнее в будущем иметь готовую модель импутации погодных данных, которая ускорила бы дальнейшие аналогичные исследования.

Существуют несколько моделей прогнозирования для предсказания будущего излучения, в том числе, включающие в себя технологии искусственного интеллекта, например, модель численного прогноза погоды (NWP), которая описывается нелинейными уравнениями в частных производных погодных переменных, с применением временных рядов в качестве фиксации динамики излучения [1, 2, 3]. Эта технология, возможно, будет реализована в будущем, когда будет необходимость генерировать значения комплексно, с последующим вычислением количества мощности в зависимости не только от солнечного излучения, но и от влажности, скорости ветра и т.д. Приоритет первого прототипа будет больше сосредоточен на импутации пропущенных данных.

В материале представлены результаты научной работы, опубликованной в журнале "Информационные и математические технологии в науке и управлении": реализация авторегрессионной модели для прогнозирования данных о солнечной радиации. Был проведен эксперимент с некоторыми подходами импутации данных и обоснован выбор подхода MICE. Также был проведен сравнительный эксперимент прогнозирования солнечной радиации на основе первоначальных данных и на данных, в которых была применена импутация.

#### Список источников

1. Ерженин Р.В., Массель Л.В. Онтологический подход к представлению знаний о методологии моделирования сложной системы управления // Онтология проектирования. 2020. №4 (38). – 327–337 с.
2. Huang R., Huang T., Gadh R., Li N. Solar generation prediction using the ARMA model in a laboratory-level micro-grid. // 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). – Tainan, Taiwan: IEEE, 11/5/2012 - 11/8/2012. С. 528–533.
3. Badescu V. Modeling solar radiation at the earth's surface: Recent advances / Viorel Badescu, (ed.). Berlin: Springer, 2008. URL: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0904/2007942168-d.html>, (дата обращения: 17.04.2020).

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОГОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПОМОЩЬЮ LSTM -СЕТЕЙ

**А.Р. Цыбиков, Н. И. Шукин, А.Г. Массель**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[tsibikow@mail.ru](mailto:tsibikow@mail.ru)

В докладе рассматривается прогнозирование временного ряда с помощью сетей LSTM. В качестве примера анализируется временной ряд погодных характеристик (солнечной радиации) за 106000 часов.

Использование рекуррентных нейронных сетей позволяет обучить модель за несколько итераций, что приводит к уменьшению ошибок моделировании. Информация в нейроне, поступающим на вход, может запоминаться, что позволяет использовать рекуррентные нейронные сети при прогнозировании временных рядов. Для задачи прогнозирования данных о погоде с краткосрочными и долгосрочными трендами используется технология сетей с долговременной кратковременной памятью (LSTM).

Особенностью архитектуры сетей LSTM является использование «блоков памяти», а основным механизмом управления являются «вентили». Обучение нейронной сети проходит в три этапа. На первом этапе определяется информация, которую следует удалить из блока. На втором этапе осуществляется выбор и сохранение новой информации для обновления состояния. На третьем этапе на основе полученной информации вычисляются выходные значения из «блока памяти».

При построении модели используется два типа данных: время и солнечное излучение. На основании полученных результатов работы модели можно сделать вывод, что построенная сеть учитывает краткосрочные тренды – время суток, а также долгосрочные тренды – время года. Существует проблема с учетом пиковых значений. Сеть выдает максимальное значение  $800 \text{ Вт/м}^2$ , а фактическое значение:  $976 \text{ Вт/м}^2$ .

Доклад завершается планами по дальнейшему развитию и подведению итогов по проделанной работе.

**Благодарности** Результаты получены в рамках выполнения базового проекта ИСЭМ СО РАН АААА-А21-121012090007-7 по госзаданию FWEU-2021-0007 и проекта по гранту РФФИ №20-07-00994.

### Список источников

1. Recurrent Neural Networks (RNN) with Keras. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tensorflow.org/guide/keras/rnn>, (дата обращения: 06.04.2020).
  2. Olah, C. Understanding LSTM Networks [Электронный ресурс] – URL: <https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs>. (дата обращения: 06.04.2020).
  3. Wei, W., Li, P. Multi-Channel LSTM with Different Time Scales for Foreign Exchange Rate Prediction. Proceedings of the international conference on Advanced Information Science and System. 2019.].
- 

## МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК

**Р.А. Комаров**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[romkom94@mail.ru](mailto:romkom94@mail.ru)

Центральное место в экономике по праву занимает материальное производство – высокотехнологичная промышленность, отвечающая, в первую очередь, требованиям

высокой производительности труда, экономической эффективности и глобальной конкурентоспособности.

Цифровые двойники способствуют стремительному развитию современных компаний последнее время. С помощью них упрощается поддержка технических систем, возрастает эффективность, что повышает стабильность работы. Данные возможности позволяют бизнесу максимально повысить доходность от инвестиций, увеличить конкурентоспособность и, нарастить и преумножить клиентскую базу.

Процесс работы промышленных установок не обходится без воздействия на него большого количества различных факторов. Данные факторы вызывают изменения в состоянии оборудования, что с течением времени с высокой долей вероятности приведет к отказу. Главной особенностью таких факторов является их случайный (стохастический) характер. Технологические нагрузки, прочностные характеристики материала, геометрические размеры, соблюдение условий технологического процесса, качество технического обслуживания и ремонта, вибрация, температура и многие другие факторы оказывают огромное влияние на процесс изменения состояния оборудования.

Для решения задач предсказания отказов в технологических установках существует большое количество моделей и методов, которые отличаются объемом входных данных, методикой работы и формой представления результатов. Также доступно и готовое программное обеспечение (ПО), реализующее систему методов и алгоритмов, направленных на прогнозирование отказов оборудования технологических установок, например, ПО Matlab Prediction Toolbox.

Основными стратегиями выполнения ремонтов на данный момент являются стратегия «Ремонт после отказа», что сопровождается большими затратами, и стратегия «Планово-предупредительный ремонт», что в половине случаев является, как правило, преждевременным. Вместе с тем наиболее перспективной представляется стратегия «Ремонт по состоянию» с использованием предсказательного подхода к обслуживанию оборудования, позволяющий заранее определять возможные отказы оборудования. Это способствует повышению эксплуатационной надежности.

Как правило, в своем большинстве применяются вероятностные методы, методы статистического анализа данных и машинного обучения.

---

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ХЛАДОСНАБЖЕНИЯ В РЕГИОНАХ С РЕЗКО- КОНТИНЕНТАЛЬНЫМ КЛИМАТОМ С КРИОЛИТОЗОНОЙ**

**С.С. Васильев<sup>1</sup>, Е.А. Барахтенко<sup>2</sup>, А.В. Малышев<sup>1</sup>, К.Н. Большев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт Физико-Технических Проблем Севера имени В.П. Ларионова СО РАН,  
Якутск

<sup>2</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск  
[vasilievss\\_ykt@mail.ru](mailto:vasilievss_ykt@mail.ru)

Развитие энергетических технологий способствует более тесной технологической взаимосвязи на всех этапах: преобразования, генерации, транспорта и хранения энергии. Параллельно с этим идет развитие телекоммуникационных и информационных технологий, которая предоставляет дополнительные возможности для согласованного управления системами энергоснабжения. Это приводит к объединению систем электро-, тепло-, хладо-, газоснабжения в новую конструкцию в виде интегрированной энергетической системы (ИЭС).

В этой работе исследуется частная задача управления развитием интегрированных систем тепло-, хладо-снабжения в экономических и природно-климатических условиях г.

Якутска, Республика Саха (Якутия). Область исследования - проектирования квартальных трубопроводных систем централизованного хладоснабжения (ЦХ).

Актуальность интегрированных систем тепло-, хладоснабжения можно обосновать резко-континентальным климатом в городе Якутске, с холодной зимой и жарким летом. Мощные тепловые электростанции работают круглый год, зимой выработанное тепло идет теплоснабжение зданий, а летом излишки тепла сбрасываются, которые по оценкам достигают 1 млн Гкал [1]. Сильная концентрация на теплоснабжение дало развитию разветвленной сети трубопроводов теплоснабжения, питающих почти все здания города. Сочетание трех факторов: наличие большого количества сбросного тепла, трубопроводные сети теплоснабжения с большими пропускными мощностями и потребность в кондиционировании воздуха в летнее время создает предпосылки для эффективной работы технологии централизованного хладоснабжения с использованием абсорбционных чиллеров [2].

В работе проведен анализ основных отличий трубопроводных систем централизованного хладоснабжения от систем централизованного теплоснабжения при проектировании, эксплуатации. Выделены перспективные материалы трубопроводов и способы прокладки для внедрения технологии тепло-, хладоснабжения в г. Якутске. Проведен пример расчета при проектировании сетей холода одного квартала. Рассчитаны гидравлические режимы, изоляция, технико-экономические параметры.

Также, проектирование трубопроводных сетей централизованного хладоснабжения в подземном исполнении в криолитозоне требует учета влияния опасных криогенных процессов на устойчивость и надежность трубопроводных систем и учета теплообменных процессов, проходящих между теплоносителем ЦХ и мерзлыми грунтами. Исследование теплообменных процессов в мерзлых грунтах производится с помощью моделирования в кроссплатформенном программном обеспечении COMSOL Multiphysics.

#### Список источников

1. Semen Vasilev. Analysis of perspective technical solutions for the implementation of integrated heat and cooling systems in a harsh continental climate. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020906023>

2. Louise Trygg, Shahnaz Amiri. European perspective on absorption cooling in a combined heat and power system – A case study of energy utility and industries in Sweden. *Applied Energy* 84 (2007) 1319–1337. doi:10.1016/j.apenergy.2006.09.016.

---

## **ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГЭС АНГАРО-ЕНИСЕЙСКОГО КАСКАДА В РАЗЛИЧНЫЕ ПЕРИОДЫ ВОДНОСТИ**

**Е.Н. Малиновская**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

[lina.617244@mail.ru](mailto:lina.617244@mail.ru)

В составе ОЭС Сибири работают 112 электростанций общей мощностью 52,1 ГВт, в том числе один из крупнейших в мире Ангаро-Енисейский каскад ГЭС суммарной мощностью 25,3 ГВт. На долю гидроэлектростанций, (с учетом Новосибирской и Мамаканской ГЭС) приходится около 50% общего объема производства электроэнергии в ОЭС Сибири (в целом по РФ – 18%). Важнейшую роль в функционировании ОЭС Сибири играет Ангарский каскад ГЭС, в составе которого находятся уникальные водохранилища многолетнего регулирования – Иркутское (оз. Байкал) и Братское с

суммарным полезным объемом 96 км<sup>3</sup>, позволяющим накапливать до 10 ÷ 12% общей годовой потребности в электроэнергии ОЭС. Вместе с Усть-Илимской и Богучанской ГЭС Ангарский каскад производит около 30% общего объема электроэнергии ОЭС.

В зависимости от условий водности диапазон изменения выработки электроэнергии ГЭС Ангаро-Енисейского каскада составляет от 70 до 120 млрд. кВт·ч в год.

Проблемы в энергосистеме и связанных с ней системах (водохозяйственной и социально-экономической) возникают при отклонениях приточности от нормальных и близких к нормальным условиям. В маловодные периоды, особенно экстремальные, значительно сокращается производство электроэнергии на ГЭС, появляется дефицитность энергобаланса на отдельных участках ОЭС, уменьшаются запасы в водохранилищах многолетнего регулирования. В целом снижается общая надежность и устойчивость функционирования как энергосистемы, так и водохозяйственной системы.

В период экстремального маловодья, наблюдаемого на Ангарском каскаде ГЭС в 2014–2017(2018) годах, произошло значительное снижение выработки электроэнергии гидроэлектростанциями. 4-х летний маловодный период привел к сокращению запасов гидроресурсов в водохранилищах ГЭС, в том числе многолетних в Братском водохранилище.

Проблемы возникают и в многоводные годы. Из-за ограниченной потребности энергосистемы в электроэнергии в периоды паводков (обычно происходящих в летний период), а также недостаточной пропускной способности межсистемных и внутрисистемных ЛЭП, возникают риски переполнения водохранилищ и холостых сбросов через пропускные сооружения гидроузлов, затопление территорий, расположенных в верхних и нижних бьефах.

После затяжного маловодья на Ангарском каскаде ГЭС, наступил не менее экстремальный период большой водности – 2019-2021(2022) годы. В 2021 году не удалось избежать открытия холостых сбросов ни на одной станции Ангаро-Енисейского каскада, при максимально загруженных турбинных расходах и переносе ремонтной кампании системообразующей сети 500 кВ.

Наличие в энергосистеме мощного каскада гидроэлектростанций является как преимуществом (использование эффективных возобновляемых энергоресурсов), так и недостатком энергосистемы. Основной недостаток – неопределенность располагаемых водных ресурсов в расчетный временной период.