

## Автономное электроснабжение узлов задвижек на трубопроводах

*А.В. Беспалов, О.В. Архипова, А.В. Денисенко, М.А. Крохалев,*

*Э.И. Хусаинов, Е.С. Балыклов*

*«Югорский государственный университет», г. Ханты-Мансийск*

**Аннотация:** В статье рассматриваются вопросы использования в нефтедобывающей отрасли автономных источников электрической энергии для питания удаленных потребителей с эпизодической нагрузкой, главным образом, узлов задвижек на трубопроводах. Показано, что решение о надежности электроснабжения должно приниматься на основе дополнительных исследований статической и динамической устойчивости электротехнического комплекса генерации электрической энергии. Приводятся результаты расчета питания узла задвижек на магистральном трубопроводе при использовании блока электроснабжения линейных потребителей в составе дизель-генератора и ветроустановка.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, узел задвижек на трубопроводах, экология, статическая устойчивость, динамическая устойчивость.

В настоящее время в качестве источников электроснабжения в промышленности все чаще используются возобновляемые источники энергии [1-3], в основном это установки использования солнечной энергии и ветроэлектрические установки. В нефтедобывающей отрасли автономные источники используются для питания удаленных потребителей с эпизодической нагрузкой, главным образом, узлов задвижек на трубопроводах [4,5]. Солнечная или ветроустановка используются совместно с дизель-генераторной или аккумуляторной установкой [6]. Такие гибридные установки выпускаются некоторыми производителями как блок-боксы полной заводской готовности [7].

Потребность в источниках электрической энергии данного типа определяется необходимостью установки узлов задвижек на пересечениях трубопроводов с водными преградами, на пересечениях с транспортными артериями и в ряде других случаев [8]. Очень часто в таких местах нет доступных линий электропередачи или подстанций [9,10]. В этом случае единственной альтернативой использованию автономных источников является дорогостоящая прокладка протяженной воздушной линии (ВЛ). В

ряде случаев застройщик принимает решение отказаться от ВЛ в связи с высокой стоимостью и необходимостью дополнительного землеотвода, с точки зрения экологии это также имеет дополнительный положительный эффект.

Поскольку установка узлов задвижек продиктована, в основном, экологическими соображениями, к надежности электроснабжения предъявляются высокие требования [11]. Нарушение этих условий может привести к гидравлическим ударам в системе [12] и возможным разрушениям и поломкам элементов системы [13]. С одной стороны, ветроустановка или солнечные батареи несомненно являются независимым источником электроснабжения и, в паре с аккумуляторами или дизель-генераторной установкой, формально могут обеспечивать высокую надежность и качество электроснабжения [14,15]. С другой стороны, имеются периоды времени, когда мощность ветроустановки или солнечной батареи недостаточна для электроснабжения заданной нагрузки (или вовсе равна нулю). Как следствие, решение о надежности электроснабжения, должно приниматься на основе дополнительных исследований статической и динамической устойчивости электротехнического комплекса генерации электрической энергии, и соответственно приниматься стратегия управления комплексом [16]. Для оценки статической устойчивости ветроустановки требуется оценить число дней в году, когда сила ветра недостаточна для обеспечения заданной мощности. Для оценки статической устойчивости солнечной батареи необходима информация о годовом числе часов достаточной освещенности. В целом оценке подлежит оценка времени перерыва электроснабжения или вероятности выдачи заданной мощности за анализируемый период времени.

Динамическая устойчивость определяется результатом переходных процессов в электротехническом комплексе генерации электрической

---

энергии и потребителе при больших возмущениях [17,18]. В случае автономного источника для питания узла задвижек обеспечение динамической устойчивости имеет важное значение. Фактически вся работа системы электроснабжения узла проходит в режиме больших возмущений: включение задвижек под действием автоматики – полная загрузка с пусковыми токами сменяет практически полное отсутствие нагрузки, что необходимо учитывать при решении задач повышения энергоэффективности задвижек [19-21] и энергосбережения системы в целом [22]. В случае запуска дизельной установки (при недостатке мощности и для обеспечения надежности) процесс включения задвижек сопровождается синхронизацией двух источников примерно одинаковой мощности. В практике проектирования мощность каждого источника (ветроустановки, солнечной батареи, дизель-генератора) выбирается из расчета 50% загрузки, что создает некоторый запас устойчивости. Тем не менее, основными динамическими режимами являются запуск на полную нагрузку при одном включенном источнике и синхронизация двух источников электроснабжения при сопоставимой мощности нагрузки и источников. Расчет динамических режимов работы необходим для оценки надежности электроснабжения и определения алгоритма действий автоматики по обеспечению этой надежности [23,24].

Ключевым процессом в расчете динамической устойчивости является поведение электрических машин – электродвигателей задвижек и электрогенераторов ветроустановки и дизельной установки. Здесь мы пренебрегаем динамическими режимами подсистемы «солнечная батарея/ветрогенератор – аккумулятор», и считаем достаточным оценить исключительно ее статическую устойчивость. Поэтому целесообразно остановиться на анализе процессов в электромеханических преобразователях энергии, а остальные подсистемы рассматривать в упрощенном виде. То есть

---

в расчете проводится анализ системы дифференциальных уравнений движения электрических машин и алгебраических уравнений электрической и механической подсистем.

В случае системы с двумя источниками – дизельным и ветрогенератором, система уравнений движения электромеханических преобразователей системы имеет следующий вид:

$$J_{ВК} \frac{d\omega_{ВК}}{dt} = M_{ВК} - n_{ВК} M_{ВГ}$$

$$J_{Д} \frac{d\omega_{Д}}{dt} = M_{Д} - n_{Д} M_{ДГ}$$

$$J_{ЭП} \frac{d\omega_{ЭП}}{dt} = M_{ЭД} - n_{ЭП} M_{С}$$

где  $\omega_{ВК}$  - скорость вращения ветроколеса;  $\omega_{Д}$  - скорость вращения дизельного двигателя;  $\omega_{ЭП}$  - скорость вращения эквивалентного электропривода нагрузки;  $J_{ВК}$ ,  $J_{Д}$ ,  $J_{ЭП}$  - суммарный приведенный момент инерции соответственно ветроустановки, дизель-генераторной установки и электропривода нагрузки;  $M_{ВК}$  – момент вращения ветроколеса;  $M_{ВГ}$  – момент сопротивления ветрогенератора;  $M_{Д}$  – момент вращения дизельного двигателя;  $M_{ДГ}$  – момент сопротивления генератора дизельной установки;  $M_{ЭД}$  – момент эквивалентного двигателя нагрузки;  $M_{С}$  – момент сопротивления эквивалентной нагрузки.

Моменты сопротивления генераторов и момент вращения двигателя нагрузки определяются расчетом электрической схемы системы электроснабжения. Расчет осуществляется путем решения системы алгебраических уравнений, определяющих статическое состояние электромагнитной подсистемы. Именно в эту систему входят уравнения, определяющие состояние аккумуляторных и солнечных батарей, если они входят в состав комплекса. Уровень детализации физических процессов и

методов исследования выбираются, исходя из решаемых задач и доступности исходных данных. Например, формула внешней характеристики солнечной батареи может иметь следующий вид [25]:

$$U = \frac{k \cdot T}{q} \ln \left[ \frac{W \cdot I_f - I_{НГ}}{I_0} + 1 \right],$$

где  $I_{НГ}$  - ток нагрузки;  $I_f$  - обратный ток насыщения;  $q$  – заряд электрона;  $T$  – абсолютная температура, °К;  $k$  – постоянная Больцмана;  $I$  – фототок;  $W$  – освещенность, кВт/м<sup>2</sup>.

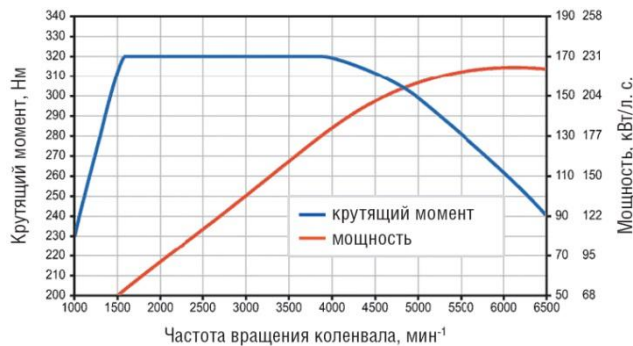


Рис. 1. – Характеристики дизельного двигателя

Режим работы дизель-генератора в большой степени определяется системой управления двигателем и генератором. При высокой степени автоматизации

дизель-генератор можно считать источником практически

постоянной величины напряжения. Исключением является старт, вплоть до набора номинальной скорости вращения двигателя. В период нормальной работы дизель-генератор является своего рода опорным источником напряжения. При отсутствии управления дизель-генератором, расчет проводится более сложным способом, с использованием характеристик дизельного двигателя, в т.ч. в графическом форме (на рис. 1 показаны типовые характеристики дизельного двигателя, представленные на сайте одного из производителей).

На сегодня, «из всех применяемых ветродвигателей, наиболее совершенными являются так называемые крыльчатые ветродвигатели с горизонтальной осью вращения ветроколеса,» [26].

Момент, развиваемый ветроколесом, может быть определен по формуле [23]:

$$M = M_* \pi R_{BK}^3 \frac{\rho v^2}{2},$$

$$M_* = \frac{4e}{Z} \frac{1-e}{1+e} \left[ 1 - \frac{r_0^2}{R_{BK}^2} - 2\mu \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1-r_0/R_{BK}}{Z_u} - \frac{1-r_0^2/R_{BK}^2}{2} \right) \right],$$

$$Z_u = \frac{1}{2} \left[ \frac{Z}{1-e} - \mu \left( 1 + \frac{e}{1-e^2} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \frac{Z}{1-e} - \mu \left( 1 + \frac{e}{1-e^2} \right) \right]^2 + \frac{e}{1-e^2} + \mu \frac{Z}{1-e}} \right]$$

$$Z = \omega_{BK} R_{BK} / v,$$

«где  $M_*$  - отвлеченный (относительный) момент;

$R_{BK}$  - радиус ветроколеса, м;

$\rho$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$e$  - коэффициент торможения ( $e = v_1/v_0$ , здесь  $v_1$  - скорость потока в плоскости вращения ветроколеса,  $v_0$  - скорость исходного потока);

$Z$  - быстроходность или число модулей ветроколеса;

$Z_u$  - число относительных модулей;

$\mu$  - «обратное качество» лопастей;

$r_0$  - радиус околотовулочного пространства, м» [26].

В качестве примера покажем результаты расчета питания узла задвижек на магистральном трубопроводе при использовании блока электроснабжения линейных потребителей в составе дизель-генератора и ветроустановки (рис. 2). Конкретные данные и завод-изготовитель не являются предметом рассмотрения, поэтому в данной статье не приводятся. Расчетные кривые показывают три характерных режима работы: режим достаточной мощности ветроустановки (скорость ветра более 6 м/с), режим недостатка мощности ветроустановки (скорость ветра 4 м/с) и режим полного

отключения ветроустановки. В первом случае дизельная установка не используется, во втором и третьем случае производится запуск дизель-генератора (время запуска около 5 с). В результате отличается время закрытия задвижки примерно от 20 до 25 с.

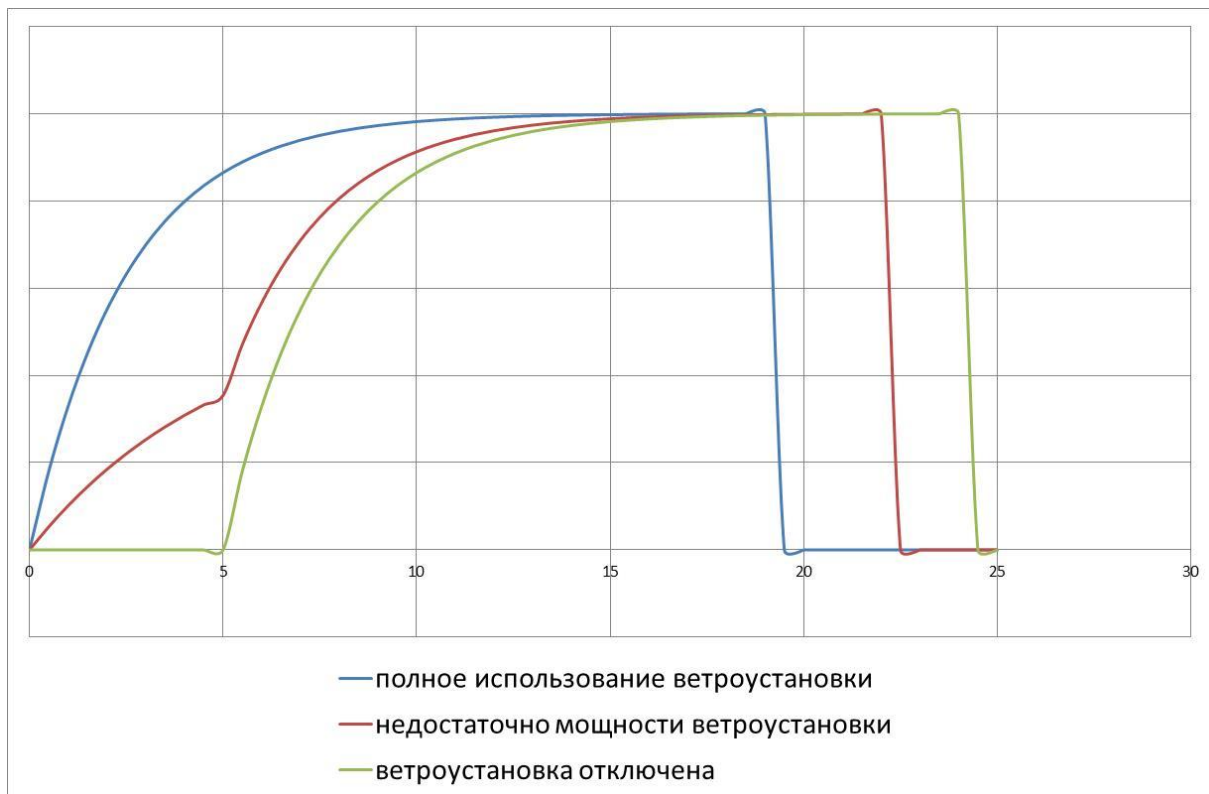


Рис. 2. – Скорость вращения электропривода задвижки (разгон и отключение после полного закрытия задвижки)

По данным инженерно-гидрометеорологических изысканий для предполагаемого района строительства в среднем за период 10 лет количество дней года со скоростью ветра 6 и более м/с составляет 210, со скоростью ветра менее 4 – 60 дней. Таким образом, можно предполагать, что время отключения задвижки 20 сек и менее предполагается 210 дней в году (вероятность 58%), 22 сек – 95 дней (26%), 25 сек – 60 дней (16%). Если наложить вероятность отключения в связи с аварийной ситуацией на вероятность времени отключения, можно определить вероятностное время отключения аварийного трубопровода. Аналогично определяется среднее



время работы дизельной установки в год, расход топлива и т.п. при заданном времени отключения трубопровода.

В целом для оценки надежности электроснабжения [27-29], в случае использования источников, зависящих от внешних факторов, требуется по крайней мере упрощенная оценка областей или вероятностей сохранения статической и динамической устойчивости. При использовании результатов таких расчетов существенно упрощается принятие решения о достаточной надежности систем автономного электроснабжения и возможности их использования для ликвидации аварийных ситуаций.

### **Благодарности**

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

### **Литература**

1. Wang H., Wu X., Lahdelma R., Pietro G.D., Verda V., Haavisto I. Renewable and sustainable energy transitions for countries with different climates and renewable energy sources potentials // *Energies*. 2018. Т. 11. №12. pp. 1-32.
2. Dudin M.N., Frolova E.E., Protopopova O.V., Mamedov A.A., Odintsov S.V. Study of innovative technologies in the energy industry: nontraditional and renewable energy sources // *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 2019. Т. 6. №4. pp. 1704-1713.
3. Oyedepo S.O., Uwoghiren T., Babalola P.O., Kilanko O., Leramo R.O., Aworinde A.K., Adekeye T., Nwanya S.C., Oyebanji J.A., Abidakun O.A. Assessment of decentralized electricity production from hybrid renewable energy sources for sustainable energy development in Nigeria // *Open Engineering*. 2019. Т. 9. №1. pp. 72-89.



4. Шегельман И.Р., Васильев А.С., Щукин П.О. Новая конструкция задвижки для магистрального трубопровода // Инженерный вестник Дона. 2015. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3124](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3124).

5. Васильев А.С., Шегельман И.Р., Щукин П.О. Некоторые особенности технических решений на конструкции клиновых задвижек для магистральных трубопроводов предприятий атомной, тепловой энергетики, нефтегазовой промышленности // Инженерный вестник Дона. 2013. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1827](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1827).

6. Ковалев В.З., Архипова О.В. Методика оптимизации структуры парка ветро-дизельных электростанций // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12. №4. С. 112-125.

7. Автономная энергетическая станция (АЭС) ЭКОТЕРМ URL: [termotron.ru/catalog/colnechnaya-energetika/ekoterm.html](http://termotron.ru/catalog/colnechnaya-energetika/ekoterm.html) (дата обращения: 24.12.2020).

8. Муравьева Л.В., Овчинников И.Г. Анализ заглубленных трубопроводов, приложенных под эксплуатируемыми трубопроводами, подвергнутых воздействию эксплуатационных нагрузок // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. №3. С. 26.

9. Большаник П.В., Евланов Е.А., Исламутдинов В.Ф., Исламутдинова Д.Ф., Ковалев В.З., Рыбина В.Б., Санников Д.В., Татьянкин В.М., Тей Д.О., Устюжанцева А.Н., Шубина В.И. Исследование эволюции, институциональных условий и факторов развития отраслей экономики северного ресурсодобывающего региона (на примере Ханты-Мансийского автономного округа - Югры) // Югорский государственный университет. Ханты-Мансийск. 2017.

10. Хамитов Р.Н., Ковалев В.З., Архипова О.В., Есин С.С. Модель регионально обособленного электротехнического комплекса с учетом

графиков электрической нагрузки потребителей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. №12-2. С. 200-204.

11. Нечитайло Н.М. Обеспечение надёжности предоставления услуг по техническому обслуживанию рассредоточенных объектов // Инженерный вестник Дона. 2020. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6640.

12. Ковалев В.З., Бородацкий Е.Г. Эффективное использование энергии в насосных установках нефтеперекачивающих станций // Промышленная энергетика. 2000. №1. С. 26-28.

13. Лопа И.В., Ефимова А.И., Жукаев А.И. Потеря продольной устойчивости шпинделем задвижки трубопровода при гидравлическом ударе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. №9. С. 257-264.

14. Ковалев В.З., Щербаков А.Г. Мониторинг вклада потребителей в ухудшение показателей качества электрической энергии // Вестник Югорского государственного университета. 2009. №2 (13). С. 45-49.

15. Ковалев В.З., Архипова О.В. Энергетические аспекты регионально обособленного электротехнического комплекса // Вестник Югорского государственного университета. 2015. №S2 (37). С. 217-218.

16. Ковалев В.З. Моделирование процессов управления в электротехнических комплексах и системах // Системы управления и информационные технологии. 2009. №1-2 (35). С. 259-263.

17. Пантелеев В.И., Пахомов А.Н., Федоренко А.А. Математическое моделирование энерготехнологического комплекса "питающая сеть - электропривод - насос - трубопровод" // Электротехника. 2020. №10. С. 56-62.

18. Закирничная М.М., Кульшарипов И.М. Особенности расчета ресурса безопасной эксплуатации клиновых задвижек с учетом рабочих



параметров в технологических трубопроводах // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. №4. С. 121-125.

19. Иванов С.Н., Ким К.К. Повышение эффективности электропривода магистральных задвижек // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2020. №3. С. 71-77.

20. Иванова Т.Н., Губанов А.М., Борисова К.Э., Надуялова Д.Ю. Повышение эффективности работоспособности задвижек трубопроводной арматуры // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. №4. С. 48-49.

21. Гарганеев А.Г., Кюи Д.К., Кашин Е.И. Электропривод задвижки трубопроводной арматуры с гистерезисной муфтой // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. Т. 21. №1. С. 127-131.

22. Вейнблат А.В., Беспалов А.В., Мальгин Г.В. Потенциал энергосбережения в электрической части установок электроцентробежных насосов // Нефтяное хозяйство. 2016. №7. С. 124-127.

23. Бакасова А.Б., Сатаркулов К., Ниязова Г.Н., Сатаркулов Т.К. О методе анализа надежности и диагностики состояний микрогэс для автономного электроснабжения // Проблемы автоматизации и управления. 2020. №1 (38). С. 15-20.

24. Петров А.А., Петрова В.А., Шарафеев Т.Р. Расчет показателей надежности источника автономной системы электроснабжения в условиях изменяющейся нагрузки // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. №1 (52). С. 66-71.

25. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высшая школа, 1986. 304 с.

26. Безруких П.П. и др. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / СПб. Наука, 2002. 314 с.

27. Королёва О.А. Категории надежности электроснабжения кустов добывающих скважин нефтегазовых месторождений // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2018. №1 (7). С. 73-76.

28. Богачков И.М. Оптимизация системы внешнего электроснабжения путем выбора прогрессивного класса напряжения с учетом всего жизненного цикла газового месторождения // Известия Транссиба. 2020. №2 (42). С. 114-130.

29. Богачков И.М., Хамитов Р.Н., Валиев М.К. Пути выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газовых месторождений // Электротехнические системы и комплексы. 2020. №4 (49). С. 35-41.

### References

1. Wang H., Wu X., Lahdelma R., Pietro G.D., Verda V., Haavisto I. Energies. 2018. T. 11. №12. pp. 1-32.

2. Dudin M.N., Frolova E.E., Protopopova O.V., Mamedov A.A., Odintsov S.V. Entrepreneurship and Sustainability Issues. 2019. T. 6. №4. pp. 1704-1713.

3. Oyedepo S.O., Uwoghiren T., Babalola P.O., Kilanko O., Leramo R.O., Aworinde A.K., Adekeye T., Nwanya S.C., Oyebanji J.A., Abidakun O.A. Open Engineering. 2019. T. 9. №1. pp. 72-89.

4. Shegel'man I.R., Vasil'yev A.S., Shchukin P.O. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. №3 p. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3124](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3124).

5. Vasil'yev A.S., Shegel'man I.R., Shchukin P.O. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1827](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1827).

6. Kovalev V.Z., Arkhipova O.V. Neftegazovoye delo. 2014. T. 12. №4. pp. 112-125.

7. Avtonomnaya energeticheskaya stantsiya [Autonomous power station] (AES) EKOTERM. URL: [termotron.ru/catalog/colnechnaya-energetika/ekoterm.html](http://termotron.ru/catalog/colnechnaya-energetika/ekoterm.html).
8. Murav'yeva L.V., Ovchinnikov I.G. Transportnyye sooruzheniya. 2019. T. 6. №3. p. 26.
9. Bol'shanik P.V., Yevlanov YE.A., Islamutdinov V.F., Islamutdinova D.F., Kovalev V.Z., Rybina V.B., Sannikov D.V., Tat'yankin V.M., Tey D.O., Ustyuzhantseva A.N., Shubina V.I. Issledovanie evolyucii, institucional'nyh uslovij i faktorov razvitiya otraslej ekonomiki severnogo resursodobyvayushchego regiona (na primere Hanty-Mansijskogo avtonomnogo okruga - YUgry) [Study of the evolution, institutional conditions and factors of development of economic sectors of the northern resource-extracting region (on the example of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Ugra)]. Yugorskiy gosudarstvennyy universitet. Khanty-Mansiysk. 2017.
10. Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Arkhipova O.V., Yesin S.S. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2018. №12-2. pp. 200-204.
11. Nechitaylo N.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6640](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6640).
12. Kovalev V.Z., Borodatskiy YE.G. Promyshlennaya energetika. 2000. №1. pp. 26-28.
13. Lopa I.V., Yefimova A.I., Zhukayev A.I. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2016. №9. pp. 257-264.
14. Kovalev V.Z., Shcherbakov A.G. Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. 2009. №2 (13). pp. 45-49.
15. Kovalev V.Z., Arkhipova O.V. Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. №S2 (37). pp. 217-218.

16. Kovalev V.Z. Sistemy upravleniya i informatsionn-yye tekhnologii. 2009. №1-2 (35). pp. 259-263.
  17. Panteleyev V.I., Pakhomov A.N., Fedorenko A.A. Elektrotekhnika. 2020. №10. pp. 56-62.
  18. Zakirnichnaya M.M., Kul'sharipov I.M. Neftegazovoye delo. 2016. T. 14. №4. pp. 121-125.
  19. Ivanov S.N., Kim K.K. Izvestiya SPBG·ETU L·ETI. 2020. №3. pp. 71-77.
  20. Ivanova T.N., Gubanov A.M., Borisova K.E., Naduyalova D.YU. Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya. 2016. №4. pp. 48-49.
  21. Garganeyev A.G., Kyui D.K., Kashin YE.I. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki. 2018. T. 21. №1. pp. 127-131.
  22. Veynblat A.V., Bepalov A.V., Mal'gin G.V. Neftyanoye khozyaystvo. 2016. №7. С. 124-127.
  23. Bakasova A.B., Satarkulov K., Niyazova G.N., Satarkulov T.K. Problemy avtomatiki i upravleniya. 2020. №1 (38). pp. 15-20.
  24. Petrov A.A., Petrova V.A., Sharafeyev T.R. Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2019. №1 (52). pp. 66-71.
  25. Yepifanov G.I., Moma YU.A. Tverdotel'naya elektronika [Solid State electronics]. M.: Vysshaya shkola, 1986. 304 pp.
  26. Bezrukikh P.P. i dr. Resursy i effektivnost' ispol'zovaniya vozobnovlyayemykh istochnikov energii v Rossii [Resources and efficiency of renewable energy sources in Russia]. SPb.: Nauka, 2002. 314 pp.
  27. Korolëva O.A. PRONEFT'. Professional'no o nefti. 2018. №1 (7). С. 73-76.
  28. Bogachkov I.M. Izvestiya Transsiba. 2020. №2 (42). С. 114-130.
-



29. Bogachkov I.M., Khamitov R.N., Valiyev M.K.  
Elektrotekhnicheskiye sistemy i kompleksy. 2020. №4 (49). С. 35-41.