ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Использование кибернетического подхода к ценозависимому управлению спросом на потребляемую подземным горно-добывающим предприятием электроэнергию

А.В.НИКОЛАЕВ[1]✉, **Ш.ФЁТ**[2], **А.В.КЫЧКИН**[3]

[1] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия*

[2] *Высшая школа технических наук Георга Агриколы, Бохум, Германия*

[3] *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», филиал в г. Пермь, Пермь, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Николаев А.В., Фёт Ш., Кычкин А.В. Использование кибернетического подхода к ценозависимому управлению спросом на потребляемую подземным горно-добывающим предприятием электроэнергию // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 403-414. EDN CJGQKP. DOI: 10.31897/PMI.2022.33

Аннотация. В статье рассматривается кибернетическая модель ценозависимого управления спросом на электроэнергию (Demand Response, DR), потребляемую подземным горно-добывающим предприятием (ПГДП), в частности главной вентиляторной установкой (ГВУ). Предложены схема модели управления энергопотреблением ГВУ в режиме DR и имплементации кибернетического подхода к DR на базе платформы Интернета вещей. Описаны основные функциональные требования и алгоритм работы платформы, показано взаимодействие платформы с симулятором цифровой модели ПГДП, на которой будут заранее имитироваться процессы, связанные с осуществлением технологического процесса проветривания и управления спросом на электроэнергию. Приведены результаты моделирования снижения нагрузки на ГВУ горно-добывающего предприятия на сутки вперед. Представленное решение позволяет заблаговременно определять требуемые затраты электроэнергии на работу ГВУ, управлять ее работой в энергосберегающем режиме, учитывать прогнозируемые изменения в плановом (например, при спуске-подъеме рабочих по вентиляционному стволу) и внеплановом (например, при изменении параметров наружного воздуха) режимах. Результаты исследования могут быть использованы для снижения себестоимости добычи полезного ископаемого ПГДП без ущерба для безопасности технологических процессов, как за счет реализации энергосберегающих технических, технологических или иных мероприятий, так и при участии предприятий в рынке DR. Предложенная модель дает ПГДП гарантированное получение финансовой компенсации за счет обоснованного изменения профиля энергопотребления ГВУ в часы высокого спроса на электроэнергию, устанавливаемые системным оператором Единой энергетической системы.

Ключевые слова: управление спросом на электроэнергию; кибернетический подход; системная архитектура; платформа Интернета вещей; подземное горно-добывающее предприятие; краткосрочное прогнозирование нагрузки; цифровой двойник

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Пермского края в рамках проекта Международной исследовательской группы «Разработка цифровой модели прогнозирования и ценозависимого управления спросом на электроэнергию, потребляемую подземными горнодобывающими предприятиями», 2020 г. (соглашение № С-26/506 от 09.03.2021).

Поступила: 12.05.2021 ***Принята: 11.05.2022*** ***Онлайн: 13.07.2022*** ***Опубликована: 19.07.2023***

Введение. Добыча полезных ископаемых подземным способом связана со значительными затратами электроэнергии на производство, почти половина которой (по некоторым данным до 70 %) расходуется на проветривание подземного горно-добывающего предприятия [1-3]. Наибольшей энергоемкостью в системе проветривания обладает главная вентиляторная установка (ГВУ). В связи с этим подземные горно-добывающие предприятия с целью снижения себестоимости добываемой и перерабатываемой продукции активно внедряют в производство различные технические и технологические решения, позволяющие снизить затраты электроэнергии на работу ГВУ

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN CJGQKP
DOI: 10.31897/PMI.2022.33

и систему проветривания в целом. К этим решениям относятся следующие: борьба с внешними утечками воздуха [4, 5], использование рециркуляции воздуха [6, 7], применение энергоэффективных технологий кондиционирования воздуха [8-10] и т.д.

Однако в области электроэнергетики, помимо затрат на электроэнергию, существует проблема баланса мощности в виде сопоставления генерируемой и потребляемой электроэнергии, поскольку большинство электростанций в промышленных районах производят ее непрерывно в течение суток, в то время как энергопотребление носит ярко выраженный циклический характер, привязанный к 24-часовому интервалу времени. Это приводит к тому, что электрическая мощность, производимая в часы низкого спроса, не востребована, в то время как в часы пикового спроса наблюдается нехватка [11]. Неспособность автоматического реагирования на динамику спроса приводит к снижению гибкости энергосистемы и, как следствие, высоким эксплуатационным затратам [12-14].

Мировая практика создания гибких энергосистем показывает высокую эффективность методов ценозависимого управления спросом на электроэнергию в режиме планирования нагрузки на сутки вперед. Метод предусматривает анализ исторических данных об энергопотреблении, выявление наиболее повторяемых (прогнозируемых с высокой точностью) энергопотребителей, оценку предполагаемого спроса на сутки вперед и на их основе формирование плана выработки электрической мощности [15-17].

Российские технологии управления спросом в теоретическом отношении хорошо проработаны и представлены рядом публикаций российских ученых, в работах приведены алгоритмы регулирования графика нагрузки образовательных учреждений на основе прогноза энергопотребления [18-20]; в статьях [21, 22] описаны предлагаемые способы накопления электроэнергии в часы низкого спроса (гибкие системы). Несмотря на это, научно-практический опыт их использования в условиях реального рынка сформирован не в полной мере. Во многом это связано с тем, что рынок управления спросом является новым для России, регламентируется нормативной документацией, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 20.03.2019 № 287. Для реализации данных мероприятий введен Агрегатор управления спросом на электрическую энергию – субъект электроэнергетики, объединяющий ресурсы розничных потребителей для предоставления услуги по управлению спросом на электрическую энергию. Агрегатор является участником оптового рынка электроэнергии, управляющим изменением нагрузки группы потребителей (например, на руднике или шахте), с целью продажи совокупности регулировочных способностей как единого объекта в качестве товара/услуги на оптовом рынке и/или на рынке системных услуг.

Несмотря на открытие рынка, процессы, связанные с автоматизацией участия подземного горно-добывающего предприятия, не исследованы в полной мере и являются перспективными для снижения себестоимости на добычу сырья.

Постановка проблемы. Кибернетический подход к ценозависимому управлению спросом для рудников и шахт подразумевает использование расчетной модели для анализа энергопотребления и автоматического снижения в часы, установленные системным оператором (СО) Единой энергетической системы (ЕЭС) России. Снижение достигается путем сокращения производительности ГВУ, которое, в свою очередь, может быть плановым и внеплановым. Так, производительность ГВУ может быть снижена при спуске или подъеме рабочих по вентиляционному стволу. Эти действия известны заранее, и результаты снижения производительности в такие моменты могут быть использованы при энергетическом планировании в режиме на сутки вперед [23].

Сложнее сократить производительность, а значит и энергопотребление ГВУ, вне запланированных технологических процессов. Это связано с тем, что на процесс проветривания влияет большое число случайных факторов [24]. Например, в процессе вентиляции между шахтными стволами действует так называемая общерудничная естественная тяга – явление конвективного теплообмена, когда теплый воздух стремится вверх, а холодный – вниз [25]. В связи с этим величина и направление общерудничной естественной тяги будут зависеть от параметров наружного воздуха. При этом возникающая тяга может быть устремлена по направлению движения воздуха, т.е. будет способствовать проветриванию (так называемая положительная естественная тяга), а может, наоборот, действовать встречно – препятствовать работе ГВУ («отрицательная» естественная

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN CJGQKP
DOI: 10.31897/PMI.2022.33

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 403-414
© А.В.Николаев, Ш.Фёт, А.В.Кычкин, 2023

тяга). Следовательно, от параметров воздуха, поступающего в шахтные стволы, будет зависеть режим проветривания.

В работе [26] представлена методика расчета прогнозируемой общерудничной естественной тяги при возможных изменениях параметров наружного воздуха. Поскольку метеорологический прогноз в краткосрочной перспективе имеет точность 85-90 % [25, 27], то можно на сутки вперед определить величину общерудничной естественной тяги и задать требуемый режим работы ГВУ. В период воздухоподготовки, помимо ГВУ, необходимо осуществлять управление режимами шахтных калориферных установок (ШКУ), что усложняет процесс. Но, принимая во внимание зависимость работы ШКУ от параметров наружного воздуха, и с учетом теплопроизводительности калориферов можно определять параметры воздуха в шахтных стволах и прогнозировать величину и направление общерудничной естественной тяги. От величины и направления общерудничной естественной тяги зависит режим работы ГВУ. При действии положительной общерудничной естественной тяги можно снизить производительность ГВУ, уменьшив затраты электроэнергии на проветривание.

Потенциальная возможность разгрузки системы электроснабжения подземного горно-добывающего предприятия в результате снижения потребления электроэнергии во время действия общерудничной естественной тяги может быть использована на практике после имплементации кибернетической модели управления спросом на электроэнергию в состав платформы Интернета вещей. Существуют ограничения использования такой платформы на объектах, поскольку по правилам безопасности невозможно контролировать работу ГВУ в автоматическом режиме. В данном случае необходимым условием обеспечения работоспособности предложенного решения является использование цифрового двойника процесса проветривания шахты (рудника), в котором будут накапливаться измерительная информация, проводиться имитационное моделирование технологических процессов, строиться прогнозы производительности ГВУ при изменении внешних факторов [28]. Архитектура платформы Интернета вещей (Internet of things – IoT) и ее взаимодействие с цифровым двойником процесса проветривания приведены в работе [26].

Методология. В основе методологии исследования лежит структурно-алгоритмическая организация процесса управления спросом на электроэнергию для подземных горно-добывающих предприятий.

В общем виде под управлением спросом на электроэнергию (Demand Response (DR) понимается процесс снижения энергопотребления объектом относительно некоторого базового уровня в моменты времени, устанавливаемые оператором энергетической системы, с последующим получением денежного вознаграждения за успешно реализованные события разгрузок.

С точки зрения технического эффекта энергосистема региона, где работают подземные горно-добывающие предприятия, получает инструмент балансировки, заменяющий ввод в эксплуатацию дорогостоящих источников электроэнергии с равнозначной по объему разгрузкой, т.е. в случае участия подземного горно-добывающего предприятия в мероприятиях DR профиль нагрузки в данном промышленном районе и частично за его пределами будет более сглаженным. Эффект участия предприятия в процессе управления спросом на электроэнергию показан на рис.1 [29].

Кривая предложения электроэнергии S в регионе резко возрастает в правой части (рис.1), что обусловлено подключением резервных источников энергии, дополнительными расходами на планирование, обслуживание и т.д. Снижение потребления в часы максимума со значения P_1 до P_2 приводит к смещению кривой спроса D_1 в кривую D_2 и снижению цены на электроэнергию на величину ΔC_{12}. Аналогично снижение потребления в часы максимума со значения P_2 до P_3 приводит к смещению кривой спроса D_2 в кривую D_3 и снижению цены на электроэнергию на величину ΔC_{23}.

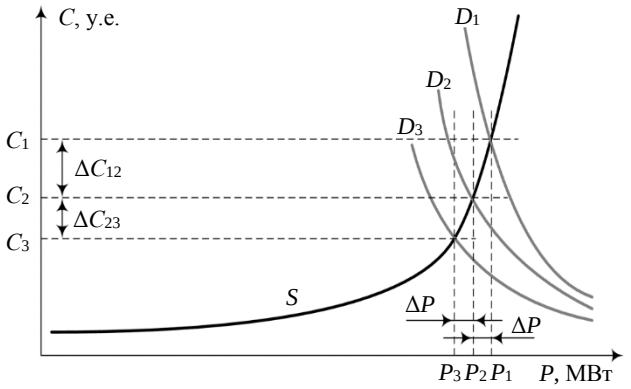


Рис.1. Зависимость цены от спроса на электроэнергию

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 403-414
EDN CJGQKP
DOI: 10.31897/PMI.2022.33
© А.В.Николаев, Ш.Фёт, А.В.Кычкин, 2023

Важно отметить, что при равнозначном снижении нагрузки подземного горно-добывающего предприятия $D_1 \rightarrow D_2$ и $D_2 \rightarrow D_3$ стоимостный эффект будет различаться. Это говорит о целесообразности строгого соблюдения времени разгрузки. Для того, чтобы обеспечить своевременность разгрузки в рамках мероприятий DR, необходимо заблаговременно, в режиме на сутки вперед, составить план энергопотребления, этот план согласовать с оператором услуги DR, а в день реализации события разгрузки точно вовремя реализовать снижение энергопотребления в соответствии с ранее принятым планом (рис.2).

В представленной модели процесса управления спросом на электроэнергию подземного горно-добывающего предприятия, адаптированного для российского рынка, выделяются следующие элементы:

• Системный оператор – орган оперативно-диспетчерского управления, который в рамках предложенной DR-модели формирует команду на разгрузку для заранее отобранных агрегаторов и контролирует выполнение обязательств и оплачивает разгрузки.

• Агрегатор – субъект электроэнергетики, который работает посредником между системным оператором и ПГДП, выдает команды на снижение энергопотребления ПГДП после получения команд на разгрузку от СО при готовности ГВУ к разгрузке.

• Платформа Интернета вещей – информационный продукт [30, 31], который осуществляет мониторинг и управление энергопотреблением технологических машин и оборудования, в частности ГВУ, формирует уведомления о готовности разгрузки ПГДП.

• Потребитель – участок ПГДП, который принимает участие в мероприятиях DR, для чего снижает энергопотребление в определенные часы суток с помощью ручного, автоматизированного или автоматического переключения режимов работы ГВУ.

• Контроллер управления – прибор для измерений энергопотребления на входе энергопринимающего устройства системы проветривания, в частности ГВУ, а также осуществления управляющих воздействий (в случае получения команды управления от платформы Интернета вещей) при необходимости автоматических переключений режимов работы ГВУ.

• Нагрузка – энергопринимающее устройство, которое задействовано в технологических процессах проветривания ПГДП, управляемое с помощью контроллера управления.

На рис.2 представлено несколько нагрузок, поскольку в самой системе управления спросом, помимо ГВУ, задействованы и другие потребители. Если на руднике (шахте) несколько ГВУ, то их работа будет согласовываться. Механизм управления энергопотреблением ГВУ в режиме DR с использованием платформы Интернета вещей подробно представлен на рис.2.

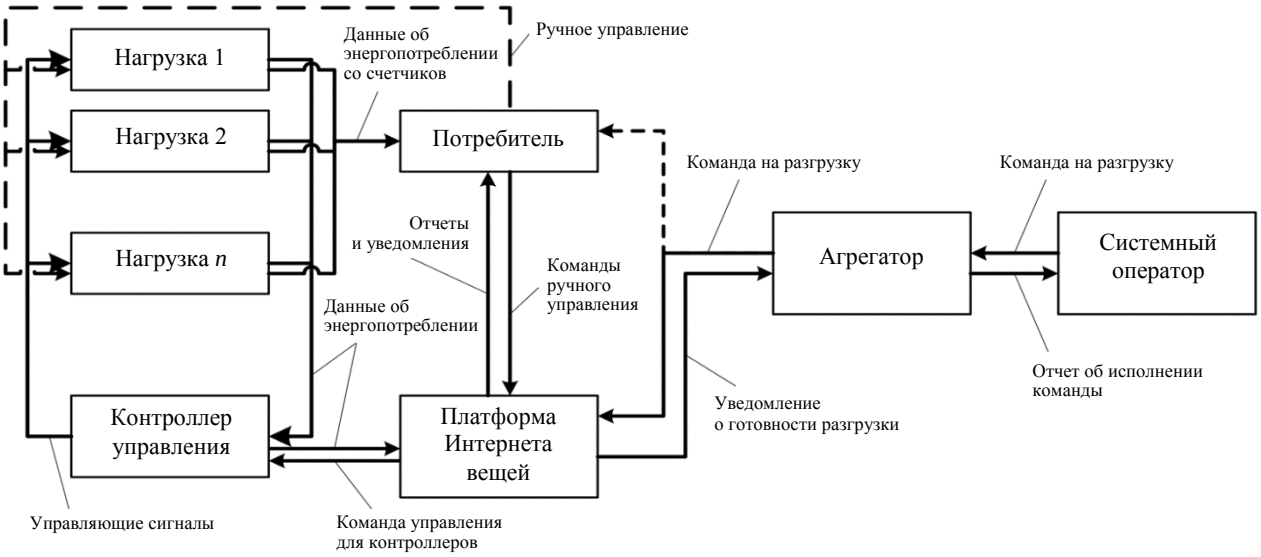


Рис.2. Модель управления энергопотреблением ГВУ в режиме DR с использованием платформы Интернета вещей

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 403-414
© А.В.Николаев, Ш.Фёт, А.В.Кычкин, 2023

Подземное горно-добывающее предприятие заключает договор с агрегатором спроса на услугу DR. Договор заключается на фиксированный промежуток времени, например один квартал. Агрегатор рассчитывает объем разгрузки для каждого потребителя внутри организационной структуры предприятия. В рамках договора указывается суммарный объем разгрузки, который должен реализовать потребитель. Каждые сутки потребитель подземного горно-добывающего предприятия оповещает агрегатора или системного оператора, с которым заключил договор на DR, о готовности разгрузки на следующие сутки.

Как только системный оператор идентифицирует возможность (прогноз) перегрузки энергосистемы, он определяет необходимость снизить нагрузку в регионе. После этого системный оператор отправляет это требование агрегаторам, с которыми имеется договоренность. Агрегаторы должны распределить необходимый объем сокращения потребления электроэнергии между потребителями ПГДП, с которыми у них заключен договор, и уведомить их за день до снижения нагрузки системы. Они могут сделать это вручную или с помощью платформы Интернета вещей, которая подключается через управляющие контроллеры к потребителям энергии [32, 33].

Агрегатор, в свою очередь, в момент наступления события снижения нагрузки обязуется уменьшить энергопотребление на заявленный объем электроэнергии и, в случае успешного выполнения условий, получить установленное договором вознаграждение.

Потребитель, получая соответствующий сигнал, реализует разгрузку, например, снижая потребляемую мощность ГВУ. Допускается не более пяти сигналов на разгрузку в месяц. Сигнал содержит информацию о времени разгрузки мощности и ее величине в кВт (МВт). Длительность периода разгрузки составляет два или четыре часа. В это время потребитель должен снизить свое энергопотребление (электрическую мощность) на указанную величину. Потребитель может это реализовать как вручную, так и при помощи контроллера управления и имеющихся на предприятии средств автоматизации.

Обсуждение. В рамках обсуждения предложены следующие результаты непосредственных исследований авторов:

1. Кибернетическая схема ценозависимого управления спросом на подземном горно-добывающем предприятии с прогнозированием энергопотребления.

2. Результаты имплементации кибернетического подхода к ценозависимому управлению спросом для подземного горно-добывающего предприятия на базе платформы Интернета вещей.

При реализации стратегии управления спросом на стороне агрегатора возникает необходимость планирования сокращения энергопотребления между нагрузками ПГДП за сутки до фактического снижения нагрузки. В то же время и потребителям необходимо заранее готовиться к разгрузке и знать, в какое время можно будет снизить мощность. Величина и направление общерудничной естественной тяги, зависит от параметров наружного воздуха, которые в требуемый период могут существенно не меняться. В этом случае снижения потребляемой ГВУ электроэнергии с учетом общерудничной естественной тяги добиться не получится. Решением проблемы является краткосрочное прогнозирование энергопотребления, которое в условиях отсутствия фактических данных позволяет определить нагрузку по показателям, основанным на данных прошлых дней, влияющих на ценообразование и спрос.

На рис.3 рассмотрен алгоритм построения графика снижения нагрузки в процессе управления спросом на электроэнергию для подземного горно-добывающего предприятия на основе расчета графиков базовой нагрузки, предлагаемых АО «Системный оператор Единой энергетической системы» России. Схема иллюстрирует алгоритм определения возможного объема снижения нагрузки в течение часов, указанных СО, и последующего построения графика снижения нагрузки за один расчетный день на основании профилей фактического энергопотребления подземного горно-добывающего предприятия за предыдущие расчетные периоды.

Алгоритм составления графика разгрузки в рамках мероприятий DR подземного горно-добывающего предприятия следующий:

1. Построение графиков базовой нагрузки для потребителей, включая ГВУ.

2. Построение фактических графиков нагрузки для потребителей.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 403-414
EDN CJGQKP
DOI: 10.31897/PMI.2022.33
© А.В.Николаев, Ш.Фёт, А.В.Кычкин, 2023

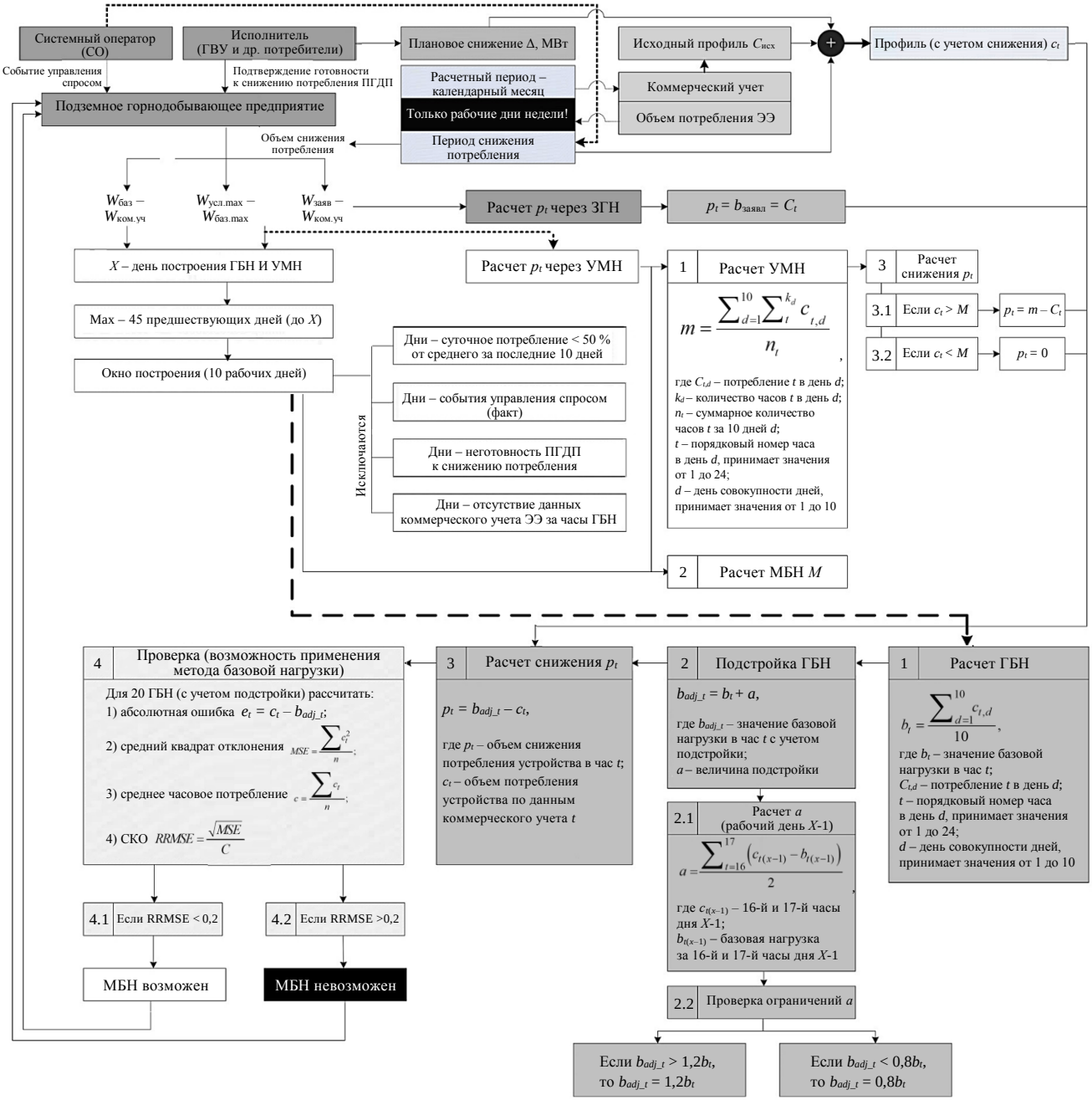


Рис.3. Схема ценозависимого управления спросом на потребляемую электроэнергию с прогнозированием энергопотребления ПГДП

ГБН – график базовой нагрузки; УМН – условная максимальная нагрузка; МБН – максимальная базовая нагрузка; ЗГН – заявленный график нагрузки; СО – системный оператор; И – исполнитель; ПГДП – подземное горно-добывающее предприятие; СКО – среднестатистическое отклонение; ЭЭ – электрическая энергия

3. Расчет планируемого отклонения фактической от базовой нагрузки с определением периодов избытка/дефицита энергии для каждого потребителя (как плановый, так и внеплановый).

4. Распределение потребителей с избыточной производительностью в разбивке по часам расчетного дня.

5. Наложение (суммирование значений) графиков базовой нагрузки и графиков фактической нагрузки для потребителей с избыточной мощностью.

6. Расчет избытка производительности для группы энергопотребителей предприятия в разбивке по часам расчетного дня: расчет разницы между агрегированным значением базового плана нагрузки и агрегированным планом фактической нагрузки (с профицитом);

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 403-414
© А.В.Николаев, Ш.Фёт, А.В.Кычкин, 2023

• расчет суммы отклонений фактической нагрузки от базовой с избыточной производительностью за каждый час расчетного дня (шаг 3-4).

7. Оценка количества случаев снижения нагрузки N_d для каждого за текущий месяц (текущий расчетный день); должна быть $N_d \leq 5$ за весь месяц.

8. Выбор конкретного потребителя в рамках энергосистемы подземного горно-добывающего предприятия для снижения нагрузки с целью выполнения объема разгрузки, установленного агрегатором в указанные часы, производится на основе расчета избыточной производительности (шаг 6) с акцентом на те технологические объекты, которые соответствуют установленным ограничениям снижения нагрузки (количество снижений нагрузки за расчетный месяц $N_d \leq 5$).

Сервис-ориентированная имплементация кибернетического подхода к DR на базе платформы Интернета вещей требует соблюдения ряда функциональных требований:

• формирование детализированной структуры потребления на горном предприятии; классификация энергоприемников, установленных на объектах предприятия по виду деятельности и режимам функционирования;

• контроль динамики энергопотребления технологического оборудования подземного горно-добывающего предприятия, включая ГВУ, с фиксацией критических отклонений и регистрацией показателей электрической мощности в режиме реального времени;

• описание и подготовка исходных данных для анализа энергопотребления с детализацией признаков для классов энергоприемников;

• дифференцированный анализ с кластеризацией потребителей в составе энергосистемы горного предприятия по уровню и режиму энергопотребления с выявлением типовых закономерностей (паттернов) с учетом дней недели и сезонности;

• интеллектуальный анализ данных об энергопотреблении с идентификацией зон пиковой нагрузки как потенциальных с точки зрения DR интервалов времени;

• обеспечение повторяемости профилей нагрузки и снижение избыточных (пиковых) энергоперетоков, разработка сценариев типовых управляющих воздействий на переключения (отключения) нагрузок для сглаживания суточного профиля;

• статистика по эксплуатации и обслуживанию, в том числе выводу в ремонт энергопринимающих устройств горного предприятия, ведение отчетов по снижению энергопотребления в часы DR;

• прогнозирование энергопотребления для отдельных категорий энергопринимающих устройств энергосистемы подземного горно-добывающего предприятия;

• стабилизация соотношения спроса и потребления с учетом спрогнозированных величин (DR-моделирование);

• выработка альтернативных и комплексных решений для управления энергопотреблением технологических единиц, включая ГВУ, с определением продолжительности снижения, очередности автоматического отключения/переключения энергоприемников.

Представленные требования реализуются программным путем за счет развития типовой платформы Интернета вещей, например Tibbo Aggregate, InfluxData, Siemens MindSphere, GE Predix и др. Такие платформы разработаны специально для реализации различных сервисов, основанных на IoT-технологиях, с подключением множества источников данных, использования аналитики, в том числе машинного обучения, баз данных временных рядов. Архитектура основана на стеке технологий IoT, позволяющем разрабатывать различные приложения с использованием инструментов для сбора, хранения, визуализации и анализа данных (рис.4). Платформа обеспечивает объединение всех элементов системы управления спросом на горно-добывающем предприятии в единую киберфизическую систему [11, 34], включающую различные типы контроллеров, веб-серверов и серверов приложений, которые собирают данные о потреблении энергии и реализуют логику DR. Все коммуникации подземного горно-добывающего предприятия с СО могут быть обработаны блоком сбора и передачи данных, который также позволяет получать данные от агрегатора спроса. Такая реализация способна обрабатывать до 1000000 подключений контроллеров. Информация об энергопотреблении и платформе DR доступна конечным пользователям в личных кабинетах сайта платформы.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 403-414
EDN CJGQKP
DOI: 10.31897/PMI.2022.33
© А.В.Николаев, Ш.Фёт, А.В.Кычкин, 2023

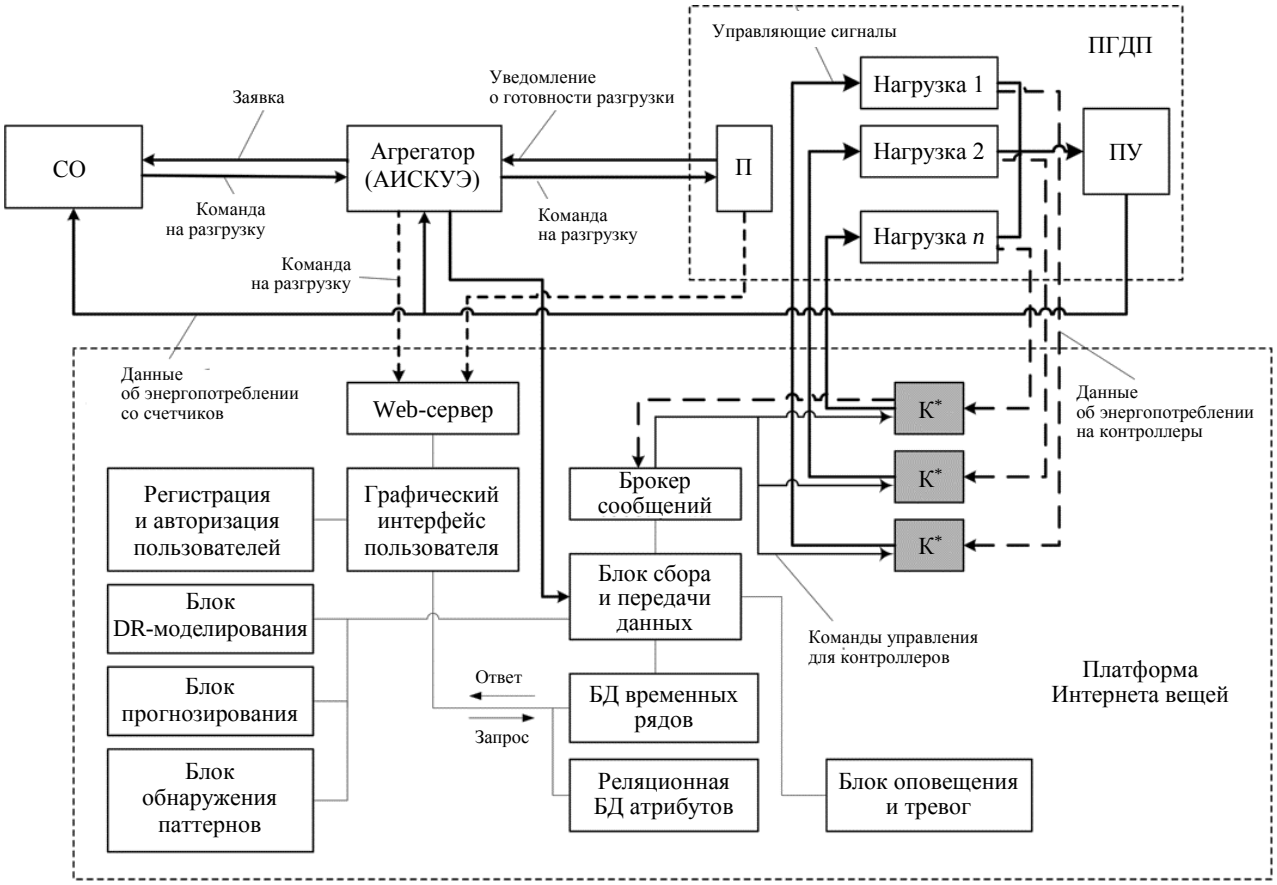


Рис.4. Схема имплементации кибернетического подхода к DR ПГДП на базе платформы Интернета вещей

Платформа работает следующим образом. Источником данных выступают управляющие контроллеры К*, которые фиксируют потребление энергии горно-добывающим предприятием в течение нескольких расчетных периодов (не менее 45 дней, предшествующих расчетному дню, для которого будет строиться анализируемый график нагрузки). При этом подразумевается, что предприятие включает в себя один или несколько крупных нагрузок в виде локальных потребителей (в нашем случае ГВУ). Профиль нагрузки формируется на основе показателей потребления электроэнергии с 30-минутным интервалом и сохраняется в процессе энергомониторинга [35]. Для упрощения задачи управления спросом представленная схема при расчете показателей энергопотребления оборудования горного предприятия не учитывает перетоки реактивной мощности.

Для информационного взаимодействия платформы и реального оборудования используется брокер сообщений, который поддерживает типовой протокол Интернета вещей, например MQTT. Данные с брокера, а также с автоматизированной информационной системы коммерческого учета электроэнергии (АИСКУЭ) агрегатора спроса поступают в блок сбора и передачи данных и далее в базу данных временных рядов. В онлайн-режиме эти данные обрабатываются с помощью блока оповещения и тревог, в случае выхода параметров за требуемые диапазоны пользователи информируются.

Расчет энергопотребления с извлечением зон пиковой нагрузки производится по типовым дням (рабочие/выходные дни каждого месяца) в блоке обнаружения паттернов. Блок DR-моделирования реализует расчет почасовой статистики потребления по объектам подземного горно-добывающего предприятия; анализ почасовой статистики о составе и режимах работы включенного оборудования; расчет коэффициентов соотношения дефицита и профицита электроэнергии (мощности) в случае реализации разгрузок; величины ожидаемых (предпочтительных) ограничений на потребляемую электроэнергию в случае участия в мероприятиях DR.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 403-414
© А.В.Николаев, Ш.Фёт, А.В.Кычкин, 2023

Блок прогнозирования реализует построение графиков базовых нагрузок для типовых дней. Спрогнозированные величины энергопотребления по объектам горного предприятия сохраняются в реляционную БД атрибутов за каждый расчетный месяц (квартал). Там же хранятся результаты разгрузок, дополнительно рассчитываются отклонения фактических объемов разгрузок от значений, заданных в рамках договорных обязательств.

Визуализация сводного графика снижения нагрузки для горно-добывающего предприятия реализуется с помощью графического интерфейса пользователя платформы Интернета вещей, доступного в локальной сети компании в виде web-сервера [36].

Представленный кибернетический подход подразумевает возможность введения новых аналитических функций, способствующих повышению эффективности оценки общих затрат на электроэнергию на горно-добывающем предприятии [37]. Однако, прежде чем использовать приведенную схему архитектуры на практике, необходимо адаптировать БД и блоки прогнозирования с учетом особенностей конкретных предприятий. В том числе должны быть дополнительно рассмотрены вопросы информационной безопасности, которые на схеме вынесены в блок регистрации и авторизации пользователей.

Заключение. Кибернетический подход к ценозависимому управлению спросом на электроэнергию, потребляемую подземным горно-добывающим предприятием, подразумевает предоставление пользователю следующих графических экранных форм:

• сводная информация по энергопотреблению (включая базовую нагрузку);

• отчет по выполнению запросов на разгрузки, журналы инфообмена между агрегатором и потребителями (статистика запросов, подтверждение готовности выполнения запросов);

• информация по расчетным моделям распределения команд СО по нагрузкам;

• прогнозы базовой нагрузки, результаты выполнения разгрузок ГВУ, расчеты профиля энергопотребления ожидаемой нагрузки с помощью цифрового двойника Modelica [38, 39].

Пример экранной формы с отображением реального энергопотребления ГВУ без разгрузки (*Active_power_Power_Station*) графиков базовой линии (*demand response baseline*), базовой линии с разгрузкой (*demand response discharge*), прогнозного профиля разгрузки (*demand response expected*) в режиме на сутки вперед приведен на рис.5.

Предлагается построение двух типов отчетов для конечных пользователей платформы:

• Отчет PLAN с прогнозируемым графиком совокупного снижения нагрузки в соответствии с алгоритмом, где представлены базовый, прогнозируемый и ожидаемый графики нагрузок, показатель RRMSE в качестве метрики точности прогнозов, дефицит и избыток энергии. Используются следующие параметры: целевой день, время и продолжительность снижения нагрузки, общий объем снижения нагрузки (МВт).

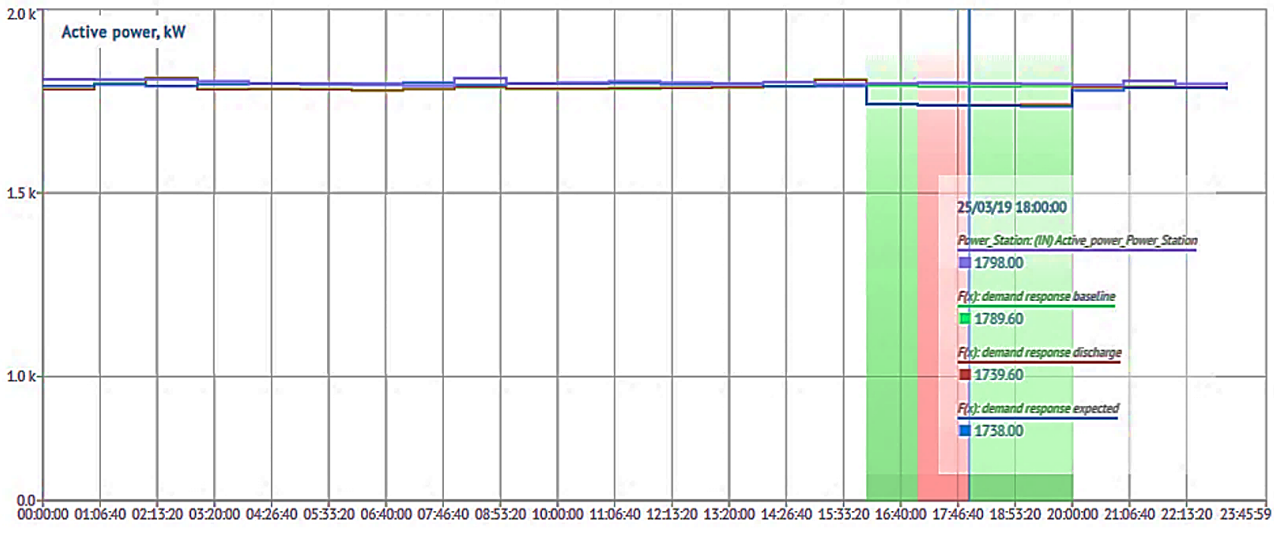


Рис.5. Моделирование снижения нагрузки на ГВУ горно-добывающего предприятия на сутки вперед

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN CJGQKP
DOI: 10.31897/PMI.2022.33

• Отчет FACT, который показывает фактический график совокупного снижения нагрузки. Представлены график базовой нагрузки, фактическое потребление энергии, установленные обязательства по снижению нагрузки, параметр RRMSE в качестве метрики точности прогнозов, результат разгрузки (успех/неудача) в разбивке по часам. Используются следующие параметры: целевой день, время и продолжительность разгрузки, общий объем снижения нагрузки (МВт), индикатор готовности к снижению нагрузки, индикатор наличия события управления спросом на электроэнергию.

Потребители горно-добывающего предприятия могут быть подключены к платформе Интернета вещей с имплементированным сервисом ценозависимого управления спросом следующими способами:

• Путем установки аппаратных средств (управляющих контроллеров) в инфраструктуре горно-добывающего предприятия. Управляющие контроллеры позволят получать данные по энергопотреблению, а также осуществлять автоматический контроль нагрузки потребителя на основе предустановленных сценариев или команд через пользовательское приложение.

• Предполагается наличие у потребителя высокого уровня автоматизации управления энергопотреблением (EMS). Тогда интеграция платформы может быть реализована программным путем (без установки дополнительных аппаратных средств) – подключение платформы Интернета вещей к EMS потребителя и получение от нее данных о потреблении энергии.

Представленная кибернетическая модель управления спросом на электроэнергию может быть встроена в киберфизическую вентиляционную систему подземного горно-добывающего предприятия, в которой будут выполняться всевозможные сценарии изменения технологических процессов и параметров задействованного электрооборудования.

Анализ полученной информации будет осуществляться платформой Интернета вещей, в результате которого будет разработано минимум два возможных сценария снижения потребления нагрузки:

• на основе анализа режимов работы всех потребителей энергии, полученных с показаний счетчиков электроэнергии;

• на основе анализа внешних факторов (снижение незапланированной нагрузки), например, на основе фактора изменения параметров наружного воздуха, который поступает в шахтные стволы и влияет на распределение воздуха между ними (объемный расход поступающего воздуха изменяется за счет смены значения общерудничной естественной тяги), а значит, и на работу ГВУ.

При анализе внешних факторов в результате моделирования технологических процессов в цифровом двойнике можно предсказать заранее (например, в течение суток) варианты возможного снижения производительности ГВУ и, следовательно, потребляемой электроэнергии.

Рассмотренная в работе архитектура позволит подземным горно-добывающим предприятиям занимать нишу на рынке ценозависимого управления спросом на электроэнергию DR, тем самым достигая устойчивого развития и придерживаясь политики в области энергосбережения. С точки зрения достижения финансового результата предприятие может снизить стоимость технологического процесса добычи полезного ископаемого до 700 тыс. руб. за 1 МВт в результате снижения электрической мощности в часы, установленные СО.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Николаев А.В.* Способ проветривания уклонных блоков нефтешахт, повышающий энергоэффективность подземной добычи нефти // Нефтяное хозяйство. 2016. № 11. С. 133-136.

2. *Vilhena Costa de L., Silva da J.M.* Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand // Mining Technology. 2020. Vol. 129. Iss. 1. P. 1-8. DOI: 10.1080/25726668.2019.1651581

3. *Wallace K., Prosser B., Stinnette J.D.* The practice of mine ventilation engineering // International Journal of Mining Science and Technology. 2015. Vol. 25. Iss. 2. P. 165-169. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.001

4. *Каменских А.А.* Разработка методов контроля и снижения поверхностных утечек воздуха на рудниках: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь: Горный институт Уральского отделения РАН, 2011. 20 с.

5. *Николаев А.В., Алыменко Н.И., Садыков Р.И.* Расчет величины поверхностных утечек воздуха на калийных рудниках // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2012. № 5. С. 115-121.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 403-414
© А.В.Николаев, Ш.Фёт, А.В.Кычкин, 2023

6. *Головатый И.И., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю.* Шахтная вентиляторная установка с системой автоматического управления для рециркуляционного проветривания калийных рудников // Горный журнал. 2010. № 8. С. 78-80.

7. *Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Зайцев А.В.* Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 5. С. 101-109.

8. *Зайцев А.В.* Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2019. 44 с.

9. *Gendler S.G., Kovshov S.V.* Estimation and reduction of mining-induced damage of the environment and work area air in mining and processing of mineral stuff for the building industry // Eurasian mining. 2016. № 1. С. 45-49. DOI: 10.17580/em.2016.01.08

10. *Николаев А.В.* Энергоэффективное кондиционирование шахтного воздуха в неглубоких рудниках // Горный журнал. 2017. № 3. С. 71-74. DOI: 10.17580/gzh.2017.03.13

11. *Кудж С.А., Цветков В.Я.* Сетецентрическое управление и кибер-физические системы // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 2(19). С. 86-92. DOI: 10.21777/2500-2112-2017-2-86-92

12. *Piette M., Sezgen O., Watson D. et al.* Development and evaluation of fully automated demand response in large facilities // Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.

13. *Sezgen O., Goldman C.A., Krishnarao P.* Option value of electricity demand response // Energy. 2007. Vol. 32. Iss. 2. P. 108-119. DOI: 10.1016/j.energy.2006.03.024

14. *Valero S., Ortiz M., Senabre C. et al.* Methods for customer and demand response policies selection in new electricity markets // IET Generation, Transmission & Distribution. 2007. Vol. 1. Iss. 1. P. 104-110. DOI: 10.1049/iet-gtd:20060183

15. *Chasparis G.C., Pichler M., Spreitzhofer J., Esterl T.* A cooperative demand-response framework for day-ahead optimization in battery pools // Energy Informatics. 2019. Vol. 2. P. 1-17. DOI: 10.1186/s42162-019-0087-x

16. *Soares L.J., Medeiros M.C.* Modeling and forecasting short-term electricity load: A comparison of methods with an application to Brazilian data // International Journal of Forecasting. 2008. Vol. 24. Iss. 4. P. 630-644. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2008.08.003

17. *Xu Y., Li N., Low S.H.* Demand Response With Capacity Constrained Supply Function Bidding // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. Vol. 31. № 2. P. 1377-1394. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2421932

18. *Boikov A., Payor V., Savelev R., Kolesnikov A.* Synthetic Data Generation for Steel Defect Detection and Classification Using Deep Learning. Symmetry. 2021. Vol. 13. Iss. 7. № 1176. DOI: 10.3390/sym13071176

19. *Zhukovskiy Y.L., Kovalchuk M.S., Batueva D.E., Senchilo N.D.* Development of an Algorithm for Regulating the Load Schedule of Educational Institutions Based on the Forecast of Electric Consumption within the Framework of Application of the Demand Response // Sustainability. 2021. Vol. 13 (24). № 13801. DOI: 10.3390/su132413801

20. *Shabalov M.Yu., Zhukovskiy Yu.L., Buldysko A.D. et al.* The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 2664-2680. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.05.001

21. *Savard C., Iakovleva E., Ivanchenko D., Rassõlkin A.* Accessible battery model with aging dependency // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 12. № 3493. DOI: 10.3390/en14123493

22. *Senchilo N.D., Ustinov D.A.* Method for determining the optimal capacity of energy storage systems with a long-term forecast of power consumption // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 21. № 7098. DOI: 10.3390/en14217098

23. *Dicks F., Clausen E.* Ventilation on Demand // Mining Report. 2017. Vol. 153. № 4. P. 334-341.

24. *Nikolaev A.V., Alymenko N.I., Kamenskikh A.A. et al.* Factors defining value and direction of thermal pressure between the mine shafts and impact of the general mine natural draught on ventilation process of underground mining companies // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. № 052020. P. 561-566. DOI: 10.2991/aime-17.2017.91

25. *Rogers D.P., Tsirkunov V.V.* Weather and Climate Resilience: Effective Preparedness through National Meteorological and Hydrological Services // World Bank Publications. Washington, DC: Directions in Development – Environment and Sustainable Development, 2013. 152 p.

26. *Kychkin A., Nikolaev A.* IoT-based Mine Ventilation Control System Architecture with Digital Twin // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020. № 9111995. 5 p. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111995

27. *Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З.* Гидрометеорологическая безопасность и устойчивое развитие России // Право и безопасность. 2007. № 1-2 (22-23). С. 7-13.

28. *Nikolaev A., Alymenko N., Kamenskih A., Nikolaev V.* The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts // E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 15. № 02004. 7 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20171502004

29. *Andersen F.M., Jensen S.G., Larsen H.V. et al.* Analyses of Demand Response in Denmark. Denmark. Roskilde: Riso National Laboratory Information Service Department, 2006. 100 p.

30. *Xu B., Zheng J., Wang Q.* Analysis and Design of Real-Time Micro-Environment Parameter Monitoring System Based on Internet of Things // IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). 15-18 December, 2016. Chengdu, China. 2016. P. 368-371. DOI: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2016.87

31. *Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswamia M.* Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // Future Generation Computer Systems. 2013. Vol. 29. Iss. 7. P. 1645-1660. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010

32. *Kychkin A., Deryabin A.S., Neganova E., Markvirer V.* IoT-Based Energy Management Assistant Architecture Design // 2019 IEEE 21st Conference on Business Informatics (CBI). IEEE Computer Society. 2019. Vol. 1. P. 522-530. DOI:10.1109/CBI.2019.00067

33. *Mijić D., Varga E.* Unified IoT Platform Architecture Platforms as Major IoT Building Blocks // International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet). 2018. P. 6-13. DOI: 10.1109/CoCoNet.2018.8476881

34. *Lu Hou, Shaohang Zhao, Xiong Xiong et al.* Internet of Things Cloud: Architecture and Implementation // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. Iss.12. P. 32-39. DOI: 10.1109/MCOM.2016.1600398CM

35. *Kychkin A.V.* Synthesizing a system for remote energy monitoring in manufacturing // Metallurgist. 2016. Vol. 59. № 9-10. P. 752-760. DOI: 10.1007/s11015-016-0170-5

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

36. *Lyakhomskiy A., Perfileva E., Kychkin A., Genrikh N.* A software- hardware system of remote monitoring and analysis of the energy data // Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86 (6). P. 314-319. DOI: 10.3103/S1068371215060103

37. *Faizrakhmanov R.A., Frank T., Kychkin A.V., Fedorov A.B.* Sustainable energy consumption control using the MY-JEVIS energy management data system // Russian Electrical Engineering. 2011. Vol. 82 (11). P. 607-611. DOI: 10.3103/S1068371211110022

38. *Vöth S., Vasilyeva M.* Potential of Modelica for the creation of digital twins // Advances in raw material industries for sustainable development goals. London: Taylor & Francis Group, 2020. P. 386-389. DOI: 10.1201/9781003164395

39. *Vöth S., Bogdanov V., Pomazov D.* Modeling of Efficiencies on Basis of Power Flow Directions using Modelica on the Example of Hoisting Systems // Project: Safety and Availability of Cranes. 2020. 6 p.

***Авторы*: А.В.Николаев,** *д-р техн. наук, доцент, nikolaev0811@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4601-5780* (*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия*), **Ш.Фёт,** *д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, https://orcid.org/0000-0002-0705-973X* (*Высшая школа технических наук Георга Агриколы, Бохум, Германия*), **А.В.Кычкин,** *канд. техн. наук, доцент, заведующий научно-учебной лабораторией, https://orcid.org/0000-0003-0626-5803* (*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», филиал в г. Пермь, Пермь, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0