

Перспективы ценозависимого энергопотребления

С.В. Дацюра^{1a}, С.И. Ножко^{2b}, И.П. Соболева^{3c}

¹ Сибирский Федеральный Университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, Россия

² ПАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод», Промплощадка БрАЗа, Братск, Россия

³ АО «Мосэнергосбыт», ул. Наметкина, д. 9 строение 2, Москва, Россия

^a dacyuras1970@mail.ru, ^b semen.nozhko@rusal.com, ^c isoboleva2017@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-7765-2303>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7437-5145>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-9872-591X>

Статья поступила 02.11.2022, принята 14.11.2022

Во многих странах мира успешно практикуется управление энергорынком с помощью ценозависимого энергопотребления. Ценозависимое энергопотребление заключается в уменьшении потребления электроэнергии конечным потребителем при возникновении определенных системных условий, например, «противоаварийное» ценозависимое энергопотребление, которое заключается в недопущении перегрузки энергосети, или «экономическое» ценозависимое энергопотребление, которое заключается в недопущении «сигналов» оптового и розничного рынков электроэнергии — недопущении экономически нецелесообразных потоков электроэнергии либо включения генерации с высокой себестоимостью для ликвидации локального энергодефицита. Практика показывает, что способов организации выравнивания энергопотребления путем привлечения крупных либо пула относительно небольших потребителей много, и результат в виде надежного функционирования энергосистемы таким образом достичь можно. Интерес в развитии ценозависимого потребления в России существует как у крупных потребителей, так и у крупных производителей электроэнергии, однако на практике ценозависимое энергопотребление в России не применяется ввиду отсутствия экономических механизмов компенсации затрат всем участникам рынка энергоуслуг. Возможная оптимизация энергопотребления может производиться в трех направлениях:

- оптимизация внутрисуточного изменения потребляемой мощности (изменение составляет 13–16 % нагрузки);
- оптимизация сезонного (зима-лето) потребления мощности (изменение составляет 25–30 % нагрузки);
- оптимизация потребления мощности по типу генерации (увеличение доли выработки электроэнергии на ГЭС, соответственно, снижение доли тепловой генерации), максимальный дефицит энергии гидрогенерации — до 10 %.

Использование алюминиевых заводов в ценозависимом энергопотреблении — достаточно широко используемая мировая практика. Проведенный на Братском алюминиевом заводе эксперимент показал принципиальную техническую возможность использования алюминиевого завода в ценозависимом энергопотреблении в России.

Ключевые слова: энергосистемы; надежность; ценозависимое энергопотребление; управление энергорынком; алюминиевый завод.

Prospects for demand response power consumption

S.V. Datsyura^a, S.I. Nozhko^b, I.P. Soboleva^c

¹ Siberian Federal University; 79, Svobodny Per., Krasnoyarsk, Russia

² «RUSAL Bratsk Aluminum Plant» PJSC; Promplshchadka BrAZa, Bratsk, Russia

³ «Mosenergosbyt» JSC; 9, Building 2, Nametkin St., Moscow, Russia

^a dacyuras1970@mail.ru, ^b semen.nozhko@rusal.com, ^c isoboleva2017@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-7765-2303>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7437-5145>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-9872-591X>

Received 02.11.2022, accepted 14.11.2022

In many countries of the world, energy market management is successfully practiced with the help of demand response. Demand response consists in reducing the consumption of electricity by the end consumer when certain systemic conditions occur, for example, “emergency-prevention” demand response, which consists in preventing overload of the power grid, or “economic” demand response, which consists in preventing the “signals” of the wholesale and retail electricity markets: prevention of economically inexpedient power flows or prevention of switching on generation with high cost to eliminate local energy shortages. Practice shows that there are many ways to organize energy consumption equalization by attracting large or a pool of relatively small consumers, the result in the form of reliable functioning of the energy system can thus be achieved. Interest in the development of demand response in Russia exists both among large consumers and large electricity producers, however, in practice, demand response in Russia is not used due to the lack of economic mechanisms for compensating costs for all participants in the energy services market. Possible optimization of energy consumption can be carried out in three directions:

- optimization of the intraday change in power consumption (the change is 13–16% of the load);
- optimization of seasonal (winter-summer) power consumption (the change is 25–30% of the load);
- optimization of power consumption by type of generation (increasing the share of electricity generation at hydroelectric power stations, respectively, reducing the share of thermal generation) - the maximum deficit of hydrogeneration energy is up to 10%. The use of aluminum smelters in demand response is a fairly widely used world practice. The experiment carried out at the Bratsk Aluminum Plant has shown the fundamental technical possibility of using an aluminum smelter in demand response in Russia.

Keywords: power systems; reliability; demand response; power market management; aluminium plant.

Введение. Различные формы стимулирования участия промышленных предприятий и физических лиц в повышении эффективности и надежности работы оборудования энергосистем являются ярко выраженным мировым трендом. Потребители, имеющие технологическую возможность влияния на энергобаланс региона, а также на ценовую составляющую энергообеспечения путем изменения графика своего энергопотребления, в зарубежных странах называются *Demand Response* (DR). Во многих странах участие DR в функционировании энергорынка закреплено законодательно, механизмы участия и прогнозирование их потенциала учитываются в программах развития энергетики, проводится поиск различных технических решений по сквозной автоматизации совместного функционирования, создаются различные проекты интеллектуальных сетей (*Smart Grids*) [1].

В качестве примеров такого снижения энергопотребления можно привести использование резервных генераторов промышленными предприятиями в часы ограничения, использование различных аккумуляторов, изменение графика работы насосного оборудования, установку термостатов на промышленных холодильных установках, частичное отключение освещения, использование тепловых аккумуляторов и т. д. Это понятие не включает в себя изменение потребления электроэнергии при нормальной эксплуатации оборудования, например, уменьшение энергопотребления в выходные дни.

Таким образом, «умное» энергопотребление способно обеспечить не только бесперебойное функционирование энергетической системы в целом, но и обеспечить экономическую эффективность для потребителя электроэнергии при этом.

Зарубежный опыт. В Соединенных Штатах Америки DR позиционируются как важный ресурс, обеспечивающий баланс потребления и производства электроэнергии. DR рассматриваются как экономически более доступный и потому целесообразный эквивалент выравнивания энергопотребления [2]. Поэтому на рынке мощности, объединяющем 13 штатов и федеральный округ Колумбия, потребителям предоставлены широкие возможности участия через механизмы DR в функционировании энергорынка: потребитель может подавать заявки на снижение мощности, тем самым оказывая оплачиваемые услуги по экономическому и противоаварийному DR. При этом потребитель не принимает непосредственного участия в программах DR, если не является зарегистрированным участником рынка мощности, однако от его имени может действовать поставщик услуг по снижению нагрузки — *Curtailment Service Provider* — CSP, или агрегатор. В качестве агрегатора могут выступать энергосбытовые или распределительные компании, а также другие участники рынка мощности, которые специализируются на DR [3]. По сути, на рынке мощности экономический DR представляет собой добровольное выполнение обязательств по снижению

энергопотребления, взятых на себя потребителем, в момент, когда цена на электроэнергию становится выше ежемесячно устанавливаемой рынком рамки, которая называется «ценой чистой выгоды» (*Net Benefit Price*). Участие в программе *Economic Load Response Program* (экономической программе по функционированию механизма DR) дает возможность потребителю участвовать на рынке на сутки вперед, а также в режиме реального времени. Следует также отметить, что исполнение добровольно взятых на себя обязательств потребителя по снижению мощности не только оплачивается при их выполнении, но и влечет за собой штрафные санкции в случае их неисполнения [4]. Таким образом обеспечивается безусловное функционирование системы в целом.

Ежегодный энергетический эффект от функционирования экономического DR в США оценивается в снижении годового энергопотребления на 74 070 МВт*ч [4].

Тем не менее, основной экономический эффект от функционирования DR в США связан с противоаварийным DR. *Emergency Load Response Program* — программа по противоаварийному DR заключается в обязательном снижении энергопотребления или непревышении определенного уровня энергопотребления по команде диспетчера. Рынок при этом относится к участвующим в противоаварийном DR потребителям как к генераторам электроэнергии, поэтому оператор полностью уверен, что участвующие в противоаварийном DR потребители полностью выполняют взятые на себя обязательства по частичному либо полному отказу от энергопотребления. Соответственно, оплата таких услуг значительно выше, чем при экономическом DR. Противоаварийный DR подразделяется следующим образом:

- ограниченный DR (*Limited Demand Resource*);
- расширенный летний DR (*Extended Summer Demand Resource*);
- годовой DR (*Annual Demand Resource*).

Независимо от типа противоаварийного DR, по команде диспетчера DR в течение двух часов следует снизить либо ограничить энергопотребление. После аварийного случая, в котором привлекались поставщики DR, производится оценка полноты и своевременности предоставления услуги по команде диспетчера (*Event Compliance*). Также следует отметить, что диспетчер может проводить проверку готовности поставщика к оказанию услуги, а невыполнение команды диспетчера штрафует [5]. Ежегодные обязательства потребителей по противоаварийному снижению энергопотребления оцениваются более чем в 10 600 МВт [6].

В Китае развитие DR происходит в рамках национального проекта, бюджет которого составляет 1,5 трлн юаней и включает в себя как развитие национальной энергосистемы, так и создание интеллектуальной сети *Smart Grid* национального масштаба [7]. Проводится оснащение автоматической системой управления потреблением AutoDR офисных зданий, некоторых государственных и коммерческих

предприятий, заводов Тяньцзиньской зоны экономического и технического развития (TEDA). Принятые технические решения направлены на снижение пиковых нагрузок на 15–30 %, эквивалентный эффект по снижению энергопотребления и воздействия на окружающую среду [8].

Существенным отличием идей DR в Европе является их фокусировка на экологических аспектах: сокращении выбросов загрязняющих веществ, адаптации в общую энергосистему источников возобновляемой энергии (в первую очередь ветряной и солнечной) [9]. В операционной зоне системного оператора Великобритании компании *National Grid* потребители через механизмы DR имеют возможность участвовать в процессе обеспечения качества электроэнергии (поддержание частоты), предоставлять резервы, управлять реактивной мощностью, обеспечивать системную надежность. Это можно делать, используя собственную аварийную генерацию предприятий, а также путем снижения собственной нагрузки на некоторый временной промежуток [10; 11]. Управление качеством электроэнергии (поддержание частоты) может происходить двумя способами:

- путем снижения нагрузки у потребителя минимум на 10 МВт на определенное время. При этом оплата предоставленной услуги определяется в процессе отбора поставщика услуги [12];

- путем автоматического отключения нагрузки продолжительностью не менее 30 мин и предоставления не менее 3 МВт снижения нагрузки. Достаточно часто эта задача решается путем сбора в пулы некоторого количества потребителей с относительно невысоким энергопотреблением. Такого рода услуги оплачиваются по результатам двусторонних переговоров [13].

В предоставлении резервов есть следующие оплачиваемые услуги:

- быстрореализуемый резерв. Используется при появлении большой либо быстрорастущей потребности, обеспечить которую тепловыми электростанциями затруднительно либо невозможно;

- краткосрочный резерв. Для обеспечения стабильности энергосистемы во время коротких изменений в балансе спроса, а также при перебоях в генерации [12].

Существует также управление потреблением (*Demand Management*), которое используется как дополнительное обеспечение бесперебойности энергосистемы на случай, если других видов резерва недостаточно. В целом, компания *National Grid* стимулирует участие потребителей в данной услуге через агрегаторов [14].

Резюмируя, можно отметить, что наличие механизмов DR в энергосистеме позволяет снизить энергопотребление в Великобритании на 1–1,5 ГВт при 80 ГВт имеющихся генерирующих мощностей [15].

Потребители электроэнергии в Австралии в соответствии с текущими законами не могут участвовать в национальном рынке электроэнергии и вспомогательных услуг (*National Electricity Market* — NEM), однако ряд механизмов DR позволяет успешно

выравнивать суточные графики нагрузки и эффективно использовать электроэнергию. В Австралии практикуется заключение договоров с крупными потребителями электроэнергии на увеличение энергопотребления в непииковые часы, что в общем случае повышает экономическую рентабельность потребителя [16]. Уже в 1960-е гг. была реализована система управления нагрузкой в частном секторе, которая заключается в осуществлении горячего водоснабжения по пониженным тарифам в непииковые часы. Реализуются проекты по льготным тарифам на отпуск электроэнергии на кондиционирование воздуха и обеспечение работы насосных систем в непииковые часы [17]. Широко применяются различные тарифы в зависимости от времени года, времени суток, реальных цен на пиковых нагрузках. NEM позволяет энергосбытовым компаниям передавать крупным и средним потребителям ценовые сигналы, что приводит к коррекции энергопотребления, сокращает затраты и, по сути, является элементом DR [18]. Широко распространены в Австралии резервные генераторы, источники возобновляемой энергии, когенерационные и тригенерационные источники. За их использование для обеспечения резервного питания при аварии на главных генерирующих мощностях оплата не производится. Текущая структура NEM требует реформирования, поэтому запланирован ряд мероприятий, например, внедрение форвардного рынка энергии и мощностей, организация рынка вспомогательных услуг, обеспечивающего реализацию механизма ценообразования для услуг по снижению нагрузки потребителям. Правительство Австралии подготавливает необходимую нормативную базу для участия в рынке крупных потребителей электроэнергии, участие мелких потребителей планируется осуществить через агрегаторов [19].

Отечественная практика ценозависимого потребления. Механизм управления спросом на электрическую энергию на российском оптовом рынке начал функционировать в 2017–2018 гг. Масштабный эффект от реализации механизмов DR на российском энергетическом рынке оценивается в 0,8 трлн р. [20]. За время реализации проекта при наличии серьезного интереса у достаточного большого количества потребителей фактически с заданиями на снижение энергопотребления в рамках DR было отработано всего 25 дней, причем только 6 из них по экономическим причинам, а остальные — в рамках регламентного тестирования системы [20]. Таким образом, рынок услуг DR в России находится в зачаточном состоянии, но имеет перспективы роста.

Интерес к реализации концепции DR в России имеется не только у крупных потребителей — Лукойла [21], РУСАЛа [22], но также у крупных производителей электроэнергии, например, Росэнергоатома [23]. Существенным преимуществом России является наличие крупных потребителей электроэнергии, способных существенно изменять картину спроса на электроэнергию регионов.

Использование алюминиевого завода в качестве DR. В работах [24–26] описаны случаи, когда алюминиевый завод был вынужден самостоятельно

обеспечивать надежность сети после возникновения энергетического кризиса, потому как аварийные отключения электроэнергии вследствие пиковой перегрузки системы принесли прямые затраты, исчисляемые десятками миллионов долларов. Первопричиной энергетических кризисов могло быть увеличение доли возобновляемой генерации либо прямой недостаток мощности в энергосистеме. Как правило, изменение потребляемой мощности алюминиевого завода для недопущения расстройств технологического хода алюминиевых электролизеров связано, в первую очередь, со стабильностью теплового потока и сохранением тепла [27]. В общем случае, для относительно кратковременного (на несколько часов) изменения потребляемой мощности производится модуляция силы тока в электролизном производстве [28], при этом для сохранения теплового баланса электролизера производится поддержание необходимой температуры боковых стенок электролизеров с помощью воздушных [29] либо кожухотрубных [30] теплообменников. Ограничение в мощности может продолжаться достаточно продолжительный промежуток времени — до четырех недель [31] без существенного технологического вреда для электролизера.

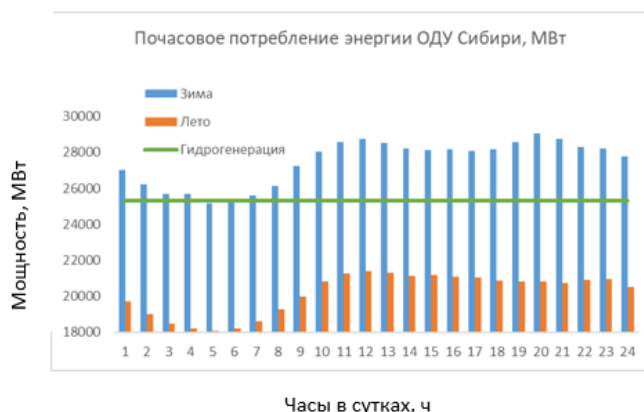


Рис. 1. Почасовое потребление энергии ОДУ Сибири, МВт. Источник: [32]

На рис. 1 представлено почасовое потребление энергии ОДУ Сибири в зимний и летний период, а также установленная мощность гидроэлектростанций. Анализ рис. 1 показывает, что возможная оптимизация энергопотребления ОДУ Сибири может производиться в трех направлениях:

- оптимизация внутрисуточного изменения потребляемой мощности (изменение составляет 13–16 % нагрузки) путем изменения тарифа на потребляемую мощность внутри суток;
- оптимизация сезонного (зима-лето) потребления мощности (изменение составляет 25–30 % нагрузки) путем сезонного изменения тарифа на потребляемую мощность

Ранее проведенные исследования [33–37] показали принципиальную возможность изменения токовой нагрузки на отечественных алюминиевых заводах и, как следствие, энергопотребления электролизеров в продолжительном промежутке времени (сезонное регулирование). Потребляемая алюминиевыми заводами

Сибири мощность (более 6 ГВт) свидетельствует о наличии серьезного резерва в управлении мощностью энергосистемы Сибири с привлечением потребителей — алюминиевых заводов. В рамках данного исследования планируется оценить перспективы использования алюминиевого производства в целях суточного DR регулирования.

Техническая оценка возможности использования алюминиевого завода в качестве регулятора мощности в энергосистеме. Корпус № 25 ПАО «РУСАЛ Братск» оснащен 142-мя электролизерами типа А-105 на силу тока 110 кА, а также десятью электролизерами типа ВТ-120 на силу тока 141 кА. Питание током всех электролизеров корпуса № 25 осуществляется одной кремниево-преобразовательной подстанцией, для электролизеров типа ВТ-120 осуществляется дополнительная подпитка током для увеличения силы тока от общесерийной величины 110 кА до величины 141 кА. В ходе очередной проверки технического состояния агрегатов подпитки участка электролизеров ВТ-120 была выявлена необходимость ремонта подпиточных агрегатов. Для проведения данного ремонта требовалось обесточить группу агрегатов для безопасного проведения работ (исключить поражение электрическим током ремонтного персонала). Собственно, это снижение токовой нагрузки на группе электролизеров, технические и технологические последствия этого непланового эксперимента можно рассматривать как оценку возможного использования электролизного производства алюминиевого завода в качестве DR.



Рис. 2. Почасовое изменение потребляемой мощности на электролизерах ВТ-120 в ремонтном периоде

На рис. 2 представлен график снижения потребляемой мощности в период проведения ремонтных работ. Ремонтные работы проводились в будние дни в течение стандартной 8-часовой рабочей смены. Таким образом, ежесуточно 5 рабочих дней подряд производилось снижение мощности на 10 %. Это достаточная величина и продолжительность для регулирования энергопотребления в макрорегионе «Сибирь». В пересчете на электролизное производство Братского алюминиевого завода, возможное снижение нагрузки масштабируется в 180–200 МВт.

Экспертно было высказано мнение, что основная технологическая проблема, с которой придется столкнуться, это увеличение количества нарушений на анодах. Для оценки количества технологических

нарушений на анодах было организовано раздельное складирование слоений анода опытной группы электролизеров и остальных электролизеров корпуса. Динамика количества слоений анода на опытной группе электролизеров приведена на рис. 3. Период на рис. 3 условно можно разбить на четыре временных промежутка. Во временном промежутке с 4 по 10 марта на опытных электролизерах были проведены плановые технологические обработки, в процессе проведения плановых технологических обработок было извлечено 910 кг слоений анода, во временном промежутке, предшествующем ограничению токовой нагрузки (с 11 по 20 марта), плановых технологических обработок электролизеров не производилось: слоения анода, извлеченные в данном временном промежутке, являются следствием проведения внеплановых операций по технологическому обслуживанию электролизеров. С 11 по 20 марта (за 10 календарных дней) было извлечено 510 кг слоений анода. В период ограничения токовой нагрузки (с 21 марта по 1 апреля) плановые технологические обработки электролизеров производились только в дни, когда не было ограничений по токовой нагрузке, всего же за период ограничения токовой нагрузки (12 календарных дней) было извлечено 520 кг слоений анода. Также следует отметить, что снижение токовой нагрузки не привело к уменьшению количества электролизеров с отмечаемыми слоениями. Интересен временной промежуток сразу после ограничения токовой нагрузки (2–13 апреля) — в данном временном промежутке было извлечено всего 100 кг слоений анода, причем все слоения извлечены из одного электролизера. Когда же в следующем временном промежутке (с 14 по 19 апреля) были проведены плановые технологические обработки электролизеров, то масса извлеченных слоений анода вернулась на ранее достигнутый уровень (410 кг), причем и количество электролизеров со слоениями анода стало таким же — 5 электролизеров.



Рис. 3. Динамика выхода слоений анода в период проведения эксперимента

Гипотеза об изменении теплового поля электролизера после ограничения токовой нагрузки не подтверждается динамикой температуры электролита (рис. 4). Так на конец ограничения (1 апреля) средняя температура электролита была выше, чем на начало периода проведения плановых технологических обработок (964,2 и 961 °C соответственно). Потому снижение температуры электролита не может быть следствием снижения токовой нагрузки, а потому

снижение выхода слоений анода в период с 2 по 13 апреля не связано с ограничением по мощности в предыдущем периоде.

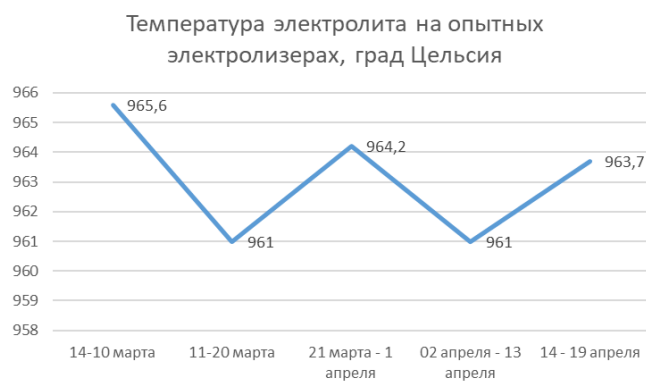


Рис. 4. Динамика температуры электролита в период проведения эксперимента

Косвенно, отсутствие взаимосвязи выхода слоений анода и потребляемой электролизером электрической мощности подтверждает динамика технологических параметров анодного узла: основные технологические параметры анодного узла на начало периода ограничения, во время ограничения и после окончания ограничения изменялись незначительно.

Во время проведения эксперимента было организовано измерение температуры перегрева электролита, динамика изменения перегрева электролита в дни ограничения мощности представлена на рис. 5



Рис. 5. Динамика температуры перегрева электролита в период ограничения мощности

Снижение мощности повлекло за собой логичное снижение температуры перегрева электролита, а также увеличение частоты анодных эффектов примерно на 0,4–0,5 АЭ/сут*эл-р. Однако увеличения частоты анодных эффектов можно избежать путем настройки порядка питания электролизеров глиноземом.

Выводы

1. Во многих странах мира успешно практикуется управление энергорынком с помощью ценозависимого энергопотребления. Практика показывает, что способов организации выравнивания энергопотребления путем привлечения крупных либо пула относительно небольших потребителей много, результат в виде

надежного функционирования энергосистемы таким образом достичь можно.

2. Интерес в развитии ценозависимого потребления в России существует как у крупных потребителей, так и у крупных производителей электроэнергии, однако на практике ценозависимое энергопотребление в России не применяется ввиду отсутствия экономических механизмов компенсации затрат всем участникам рынка энергоуслуг.

3. Возможная оптимизация энергопотребления (на примере ОДУ Сибири) может производиться в двух направлениях:

– оптимизация внутрисуточного изменения потребляемой мощности (изменение составляет 13–16 % нагрузки);

– оптимизация сезонного (зима-лето) потребления мощности (изменение составляет 25–30 % нагрузки).

4. Использование алюминиевых заводов в ценозависимом энергопотреблении — достаточно широко используемая мировая практика.

5. Проведенный на Братском алюминиевом заводе эксперимент показал принципиальную техническую возможность использования алюминиевого завода в ценозависимом энергопотреблении в России.

Литература

1. Сипина Д.С. Рыночные механизмы участия потребителей в повышении эффективности и надежности работы энергосистем // *Электричество*. 2014. № 2. С. 4-10.
2. Retail Electricity Consumer Opportunities for Demand Response in PJM's Wholesale Markets. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/dr_pjm/dr_pjm_fact_potreb.pdf (дата обращения: 22.11.2022).
3. PJM Demand Side Response Overview. 9/24/2012. URL: <http://www.pjm.com/training/~media/training/core-curriculum/ip-lse-202/demand-responce-load-management-and-energy-efficiency.ashx> (дата обращения: 31.01.2022).
4. 2011, State of the Market Report for PJM, Monitoring Analytics, LLC. URL: <http://www.PJM.com/~media/documents/reports/state-of-market/2011/2011-som-pjm-volume2-sec5.ashx> (дата обращения: 31.01.2022).
5. DR Product Training. URL: <http://www.pjm.com/training/~media/training/core-curriculum/ip-prm/demand-response-product-training.ashx> (дата обращения: 31.01.2022).
6. PJM Economic Demand Side Response. URL: <http://www.pjm.com/training/~media/training/core-curriculum/ip-dsr/demand-side-response-training-materials.ashx> (дата обращения: 31.01.2022).
7. Honeywell and TEDA Launch China's First Demand Response Project Under United States-China Smart Grid Cooperative. URL: <http://honeywell.com/news/pages/honeywell-and-TEDA-Launch-China%e2%80%99s-First-Demand-Response-Project-Under-United-States-China-Smart-Grid-Cooperative.aspx> (дата обращения: 31.01.2022).
8. Jeff St. John. Open Source Smart Grid Goes to China, Courtesy of Honeywell. URL: <http://gigaom.com/cleantech/open-source-smart-grid-goes-to-china-courtesy-of-honeywell> (дата обращения: 31.01.2022).
9. Jeff St. John. Is Europe Ready for Automated Demand Response? URL: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/is-europe-ready-for-automated-demand-response> (дата обращения: 22.11.2022).
10. The Demand Response Snap Shot. The Reality For Demand Response Providers Working in Europe Today // *Smart Energy Demand Coalition*. September 2011.
11. Нормативно-правовое регулирование DR на рынке электроэнергии Великобритании. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/markets/dr/worlds-experience/europe/uk/> (дата обращения: 22.11.2022).
12. Технологии Demand Response в Австралии. URL: https://www.so-ups.ru/index.php?id=dr_australia (дата обращения: 22.11.2022).
13. Посыпанко Н. Demand Response в России: важнее, чем может показаться // *Энергорынок*. 2019. № 1 (166). С. 16-19.
14. Батырь А. Генераторы наоборот: ценозависимое потребление как инструмент повышения энергоэффективности энергосистемы // *Энерговектор*. 2019. Февраль. С. 5. URL: <https://www.energovector.com/strategy-generatory-naoborot.html?ysclid=larzlpgec16638166> (дата обращения: 22.11.2022).
15. Данильян Н. Цены, которые зависят от потребителей // *Энергорынок*. 2017. Февраль. С. 47-51.
16. Строгий А., Юдина К. Атомэнергосбыт: спрос - дело управляемое // *РЭА - ежемесячный журнал атомной энергетики России*. 2019. № 2. С. 16-19.
17. Tabereaux A., Lindsay S. Lengthy Power Interruptions and Potline Shutdowns // *Light Metals*. 2019. P. 887-895.
18. Dussel R., Mulder A., Bugnion L. Transformation of Potline from Conventional to a Full Flexible Production Unit // *Light Metals*. 2019. P. 533-541.
19. Wong D.S., Matthews G., Tabereaux A.T., Buckley T., Dorren M.M. Domestic Aluminium Smelting and Potential Solutions // *Light Metals*. 2020. P. 791-802.
20. Chai D., Shi Z., Zhang Yanan, Zhang Yanfang, Hou G., Wang Y., Hu Q., Fang B. The Successful Implementation of Energy Saving Technology Based on Steady Flow and Heat Preservation // *Light Metals*. 2018. P. 597-603.
21. Pinheiro L.J., Nunes L., Vianna A. da Silva, Southno G. Power Modulation in Valesul P-19 pots // *Light Metals*. 1998. P. 1267-1271.
22. Namboothiri D.S., Lavoie P., Cotton D., Taylor M.P. Controlled Cooling of Aluminium Smelting Cell Sidewalls using Heat Exchangers Supplied with Air // *Light Metals*. 2009. P. 317-322.
23. Lavoie L., Namboothiri S., Dorren M., Chen J.J.J., Zeigler D.P., Taylor M.P. Increasing the Power Modulation Window of Aluminium Smelter Pots with Shell Heat Exchanger Technology // *Light Metals*. 2011. P. 317-324.
24. Wang X., Laframboise M., Gagnon P. Experience with Lengthy Pot Hibernation at ALCOA Baie-Comeau // *Light Metals*. 2021. P. 393-400.
25. Системный оператор единой энергетической системы. ОЭС Сибири по данным на 01.01.2021. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/ees/oes-siberia/> (дата обращения: 31.01.2022).
26. Ножко С.И., Блашков А.А. Перспективы повышения мощности алюминиевых электролизеров (в порядке обсуждения) // *Цветные металлы*. 2012. № 10. С. 65-68.
27. Nozhko S.I., Timofeev S.M., Sukhov O.Yu., Vibe R.S., Ovchinnikov A.E., Zimarev S.A. Increase in Productivity of Electrolyzers by Amperage Increasing // *Systems. Methods. Technologies*. 2017. № 2 (34). P. 54-58.
28. Ножко С.И., Сухов О.Ю. Практика увеличения токовой нагрузки на алюминиевых электролизерах второго поколения // *Системы. Методы. Технологии*. 2011. № 2 (10). С. 116-120.

29. Ножко С.И. Способ определения эффективности электролизера для производства алюминия // *Электromеталлургия*. 2010. № 12. С. 21-22.
30. Ножко С.И. Планирование и анализ выхода по току на электролизерах для производства алюминия // *Контроль. Диагностика*. 2010. № 11. С. 35-39.

References

1. Sipina D.S. Market mechanisms of consumer participation in improving the efficiency and reliability of power systems // *Electrichestvo (Electricity)*. 2014. № 2. P. 4-10.
2. Retail Electricity Consumer Opportunities for Demand Response in PJM's Wholesale Markets. URL: https://www.sops.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/dr_pjm/dr_pjm_fact_potreb.pdf (data obrashcheniya: 22.11.2022).
3. PJM Demand Side Response Overview. 9/24/2012. URL: <http://www.pjm.com/training/~media/training/core-curriculum/ip-lse-202/demand-response-load-management-and-energy-efficiency.ashx> (data obrashcheniya: 31.01.2022).
4. 2011, State of the Market Report for PJM, Monitoring Analytics, LLC. URL: <http://www.PJM.com/~media/documents/reports/state-of-market/2011/2011-som-pjm-volume2-sec5.ashx> (data obrashcheniya: 31.01.2022).
5. DR Product Training. URL: <http://www.pjm.com/training/~media/training/core-curriculum/ip-prm/demand-responce-product-training.ashx> (data obrashcheniya: 31.01.2022).
6. PJM Economic Demand Side Response. URL: <http://www.pjm.com/training/~media/training/core-curriculum/ip-dsr/demand-side-response-training-materials.ashx> (data obrashcheniya: 31.01.2022).
7. Honeywell and TEDA Launch China's First Demand Response Project Under United States-China Smart Grid Cooperative. URL: <http://honeywell.com/news/pages/honeywell-and-TEDA-Launch-China%e2%80%99s-First-Demand-Response-Project-Under-United-States-China-Smart-Grid-Cooperative.aspx> (data obrashcheniya: 31.01.2022).
8. Jeff St. John. Open Source Smart Grid Goes to China, Courtesy of Honeywell. URL: <http://gigaom.com/cleantech/open-source-smart-grid-goes-to-china-courtesy-of-honeywell> (data obrashcheniya: 31.01.2022).
9. Jeff St. John. Is Europe Ready for Automated Demand Response? URL: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/is-europe-ready-for-automated-demand-response> (data obrashcheniya: 22.11.2022).
10. The Demand Response Snap Shot. The Reality For Demand Response Providers Working in Europe Today // *Smart Energy Demand Coalition*. September 2011.
11. Regulatory and legal regulation of DR in the UK electricity market. URL: <https://www.sops.ru/functioning/markets/dr/worlds-experience/europe/uk/> (data obrashcheniya: 22.11.2022).
12. Demand Response in Australia. URL: https://www.sops.ru/index.php?id=dr_australia (data obrashcheniya: 22.11.2022).
13. Posypanko N. Demand Response in Russia: more important than it may seem // *Energorynok*. 2019. № 1 (166). P. 16-19.
14. Batyr' A. Generators on the contrary: price-dependent consumption as a tool to improve energy efficiency of the energy system // *Energovektor*. 2019. Fevral'. P. 5. URL: <https://www.energovektor.com/strategy-generator-naoborot.html?ysclid=larzlpgec16638166> (data obrashcheniya: 22.11.2022).
15. Danil'yan N. Prices that depend on consumers // *Energorynok*. 2017. Fevral'. P. 47-51.
16. Stognij A., YUdina K. Atomenergobyt: demand is a manageable matter // *REA - ezhemesyachnyj zhurnal atomnoj energetiki Rossii*. 2019. № 2. P. 16-19.
17. Tabereaux A., Lindsay S. Lengthy Power Interruptions and Potline Shutdowns // *Light Metals*. 2019. P. 887-895.
18. Dussel R., Mulder A., Bugnion L. Transformation of Potline from Conventional to a Full Flexible Production Unit // *Light Metals*. 2019. P. 533-541.
19. Wong D.S., Matthews G., Tabereaux A.T., Buckley T., Dorren M.M. Domestic Aluminium Smelting and Potential Solutions // *Light Metals*. 2020. P. 791-802.
20. Chai D., Shi Z., Zhang Yanan, Zhang Yanfang, Hou G., Wang Y., Hu Q., Fang B. The Successful Implementation of Energy Saving Technology Based on Steady Flow and Heat Preservation // *Light Metals*. 2018. P. 597-603.
21. Pinheiro L.J., Nunes L., Vianna A. da Silva, Southno G. Power Modulation in Valesul P-19 pots // *Light Metals*. 1998. P. 1267-1271.
22. Namboothiri D.S., Lavoie P., Cotton D., Taylor M.P. Controlled Cooling of Aluminium Smelting Cell Sidewalls using Heat Exchangers Supplied with Air // *Light Metals*. 2009. P. 317-322.
23. Lavoie L., Namboothiri S., Dorren M., Chen J.J.J., Zeigler D.P., Taylor M.P. Increasing the Power Modulation Window of Aluminium Smelter Pots with Shell Heat Exchanger Technology // *Light Metals*. 2011. P. 317-324.
24. Wang X., Laframboise M., Gagnon P. Experience with Lengthy Pot Hibernation at ALCOA Baie-Comeau // *Light Metals*. 2021. P. 393-400.
25. System operator of the unified energy system. ECO of Siberia according to data as of 01.01.2021. URL: <https://www.sops.ru/functioning/ees/oes-siberia/> (data obrashcheniya: 31.01.2022).
26. Nozhko S.I., Blashkov A.A. Prospects for increasing the capacity of aluminum electrolyzers (in the order of discussion) // *Non-ferrous Metals*. 2012. № 10. P. 65-68.
27. Nozhko S.I., Timofeev S.M., Sukhov O.Yu., Vibe R.S., Ovchinnikov A.E., Zimarev S.A. Increase in Productivity of Electrolyzers by Amperage Increasing // *Systems. Methods. Technologies*. 2017. № 2 (34). P. 54-58.
28. Nozhko S.I., Suhov O.YU. The practice of increasing the current load on aluminum electrolyzers of the second generation // *Systems. Methods. Technologies*. 2011. № 2 (10). P. 116-120.
29. Nozhko S.I. Method for determining the efficiency of an electrolyzer for the production of aluminum // *Elektrometallurgiya ("Electrometallurgy")*. 2010. № 12. P. 21-22.
30. Nozhko S.I. Planning and analysis of current output on electrolyzers for aluminum production // *Kontrol. Diagnostika ("Testing. Diagnostics")*. 2010. № 11. P. 35-39.