

Моделирование энергопотребления в социотехнических системах с интеллектуальным оборудованием

В. Б. БАРАХНИН^{1,2,*}, С. В. МАЛЬЦЕВА³, К. В. ДАНИЛОВ^{3,4}, В. В. КОРНИЛОВ³

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 630090, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, Россия

³Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, 101000, Москва, Россия

⁴ПАО “НМЛК”, 398040, Липецк, Россия

*Контактный автор: Барахнин Владимир Борисович, e-mail: barakhnin@ngs.ru

Поступила 22 ноября 2021 г., принята в печать 29 ноября 2021 г.

Современные социотехнические системы в различных областях характеризуются наличием в их составе большого количества интеллектуального оборудования, которое может самостоятельно регулировать собственное потребление энергии, а также взаимодействовать с другими потребителями в процессах принятия решений и управления. Одна из таких отраслей — энергетика, где самоорганизация и системы коллективного потребления являются наиболее перспективными с точки зрения обеспечения эффективности использования энергоресурсов. Рассмотрены подходы к установлению статических и динамических тарифов на электроэнергию. Проведено сравнение двух моделей энергопотребления — статического двухтарифного и динамического, учитывающих рациональное поведение умных устройств, способных выбирать лучшие режимы для потребления электроэнергии. Показано влияние количества таких устройств на возможность достижения равномерного потребления при использовании второй модели.

Ключевые слова: социотехнические системы, самоорганизация, умное оборудование, потребление электроэнергии, моделирование потребления энергии.

Цитирование: Барахнин В.Б., Мальцева С.В., Данилов К.В., Корнилов В.В. Моделирование энергопотребления в социотехнических системах с интеллектуальным оборудованием. Вычислительные технологии. 2021; 26(6):4–19. DOI:10.25743/ICT.2021.26.6.002.

Введение

Вопросам управления в самоорганизующихся распределенных социотехнических системах посвящено большое количество исследований, которые рассматривают различные аспекты функционирования таких систем: философские, социальные, этические, математические, технические, экономические и многие другие. Поведение таких систем

исследуется применительно к таким отраслям, как: электроэнергетика [1, 2], здравоохранение [3, 4], транспорт [5–8], логистика [9, 10], онлайн-торговля [11–13], социальная сфера [14], социальные сети [15], производственные системы [16], коллективная робототехника [17], мониторинг и самоконтроль состояния конструкций аэрокосмических аппаратов [18], самоорганизующиеся сервисы в грид-сетях [19].

Среди социотехнических систем модели самоорганизации наиболее быстро развиваются в энергетике. Многие модели коллективного потребления электроэнергии основываются на моделях взаимодействия в социальных сетях. Отмечается резкое увеличение за последнее десятилетие количества умных устройств, которые потребляют электроэнергию и могут сами регулировать подключение к энергоресурсам [20, 21].

Ряд авторов выделяют естественные и искусственные системы [22, 23]. Социотехнические системы, особенно при увеличении количества интеллектуального цифрового оборудования, что характерно для систем энергопотребления, по многим критериям можно отнести к искусственным. В этих системах правила задаются разработчиком в соответствии с поставленными целями и критериями качества. Эти правила могут затем совершенствоваться в ходе работы системы.

При рассмотрении таких систем среди множества определений самоорганизации будем опираться на определение, данное в работе [24], в которой описана самоорганизация коллектива роботов: “самоорганизация в технической системе — это процесс автономного формирования оптимальной структуры и оптимального алгоритма ее функционирования в соответствии с поставленной перед системой целью, некоторым критерием качества и внешними условиями”.

Большинство исследователей выделяют следующие основные механизмы воздействия на самоорганизующуюся систему:

- установление правил, соответствующих целям регулирования с точки зрения поддержания равновесия в системе, и обеспечение исполнимости этих правил;
- регулирование потоков ресурсов и ограничений на их использование;
- регулирование уровня шума на входе и внутри системы за счет развития информационной среды, повышения интенсивности коммуникаций, усиления обратных связей.

В дальнейшем в работе предполагается рассматривать самоорганизацию в соответствии с приведенным определением и реализацией указанных механизмов.

1. Самоорганизация в интеллектуальной энергетике

Социотехнические системы в энергетике сегодня включают большое количество устройств, которые способны сами определять необходимость и объем потребления электроэнергии. Самоорганизация в таких системах определена как один из основных принципов создания перспективных систем управления в энергетике (Energy management system — EMS).

В Дорожной карте “Энерджинет” [25] среди приоритетных направлений, по которым предполагается разработка комплекса технологий, указаны динамически самоорганизующиеся мультиагентные системы управления, а также практики и поддерживающие их инструменты коллективного планирования, функционирования и развития инфраструктур на основе цифровых моделей реального времени.

Среди стека технологий упоминается мультиагентная управляющая IT-платформа интеллектуальной энергетики для самообучающихся устройств и самоорганизующих-

ся систем. Среди проектных направлений — самоорганизующиеся системы управления на базе киберфизических устройств, “слабого” искусственного интеллекта, смарт-контрактов (“энергетика без энергетиков”) и бизнес-модель самоорганизующихся инфраструктур и рынков.

Энергопотребление регламентируется большим количеством рекомендаций и правил, например [26–28]. Интеллектуальные энергосистемы проявляют свойства самоорганизации и способны к самостоятельному решению возникающих в них проблем на основе совершенствования системы правил и развития информационно-коммуникационной инфраструктуры. Кроме того, эти системы работают в нестационарных средах: например, использование энергии зависит от времени суток, дня недели, погоды; также от погоды зависит возможность генерации возобновляемой энергии.

В [29, 30] рассмотрен агентный подход к управлению энергопотреблением в задачах зарядки электромобилей, где агенты электромобилей пытаются оптимизировать зарядку аккумулятора. Электромобили координируют свои действия с другими электромобилями, чтобы снизить пиковое потребление энергии и наилучшим образом использовать энергию в ночное время. Описана методика наблюдения и прогнозирования базовой энергетической нагрузки для улучшения условий зарядки и избегания ситуаций пиковой загрузки. Эта методика предполагает обучение мультиагентной модели методом обучения с подкреплением.

Обеспечение устойчивого развития системы энергоснабжения предполагает разработку и исследование новых моделей энергопотребления, учитывающих особенности интеллектуального оборудования, а также создание системы мониторинга и прогнозирования энергопотребления для предотвращения возникающих критических состояний, вызванных неравномерностью потребления электроэнергии в различных узлах сети. Одним из регулирующих механизмов является использование тарифных планов для разных временных зон. В [31–33] отмечено несколько факторов, обуславливающих совершенствование этого механизма.

- Развитие интеллектуальных устройств и технологий, которые не только позволяют учитывать индивидуальные потребности пользователей, но и могут быстро реагировать на изменение цен, обеспечивая лучшие условия для потребителей при смещении нагрузок.
- Переход на электроэнергию в различных областях, где использовались другие источники энергии, что во многом обусловлено климатическим кризисом. Отмечается быстрый рост количества электромобилей, различного интеллектуального оборудования, а также компьютеров, мобильных телефонов, носимых устройств. Многие из этих устройств способны сами регулировать энергопотребление с целью экономии на расходах на электроэнергию в интересах своих владельцев, а также взаимодействовать с другими устройствами, чтобы сделать потребление электроэнергии более равномерным, не допуская возникновения критических ситуаций.
- Совершенствование регулирования рынков электроэнергии, что предполагает сотрудничество операторов систем передачи и распределения энергии, использование гибкой системы тарифов, лучшей адаптации их к интересам населения и реальным нагрузкам.

В [31] отмечено, что тарифная структура не является единственным инструментом стимулирования имплицитно выгодного сетевого поведения пользователей сетей. Другим инструментом является обеспечение гибкости системы производства электроэнергии и спроса на нее для развития сетей и повышения эффективности их функцио-

нирования, в особенности при управлении перегрузками, выравнивании стоимости для потребителей по разным регионам.

В [31–35] приведены различные модели статических и динамических тарифов.

- *Статическое ценообразование.* В этом случае выделяются два или более временных периода. Цена фиксируется в зависимости от периода.
- *Критическое пиковое ценообразование.* Постоянные цены могут быть увеличены в периоды экстремальной пиковой нагрузки. В эти периоды применяется фиксированная надбавка. Клиенты информируются заранее, что позволяет перенести нагрузку на другие периоды.
- *Переменное пиковое ценообразование.* Периоды пикового потребления известны заранее, но доплата варьируется в зависимости от текущих оптовых цен.
- *Ценообразование в режиме реального времени.* В этой модели цены отражают текущую оптовую продажу электроэнергии, поэтому они не известны заранее. В этом случае для правильной оценки затрат по каждому клиенту необходимы высокоточные системы учета энергопотребления.

Далее будем рассматривать возможность перехода от наиболее популярного сегодня статического ценообразования по двум периодам к более гибкой системе ценообразования за счет изменения длины временных периодов, для которых установлены фиксированные цены. Будем также учитывать, что часть энергопотребления приходится на умные устройства, которые могут сами его регулировать, выбирая лучшие условия.

2. Моделирование потребления электроэнергии

Начальные данные о фактическом потреблении электроэнергии в течение суток задаются на основании информации от поставщика электроэнергии. Соответствующую функцию обозначим $f^0(t)$. Как правило, реально данные учитываются таким образом, что эта функция — кусочно-линейная, меняющая формулу каждый час. Суммарное суточное потребление электроэнергии рассчитывается по формуле

$$E_0 = \int_0^{24} f^0(t) dt.$$

2.1. Классическая модель двухтарифного учета

Опишем классическую схему перехода на двухтарифный учет. Обозначим временной интервал действия дневного тарифа $[t_1, t_2]$, длительность его действия T_d , длительность действия ночного тарифа T_n , размер действующего одноставочного тарифа S_0 , дневного S_d и ночного S_n тарифов, при этом $S_d = k_d S_0$ ($k_d > 1$), $S_n = k_n S_0$ ($k_n < 1$).

На практике повышающий и понижающий коэффициенты k_d и k_n , как правило, задаются так, что при “идеальном” равномерном потреблении затраты на электроэнергию при применении двухставочного тарифа меньше затрат при одноставочном тарифе, т. е.

$$\frac{T_d S_d + T_n S_n}{24 S_0} = \frac{T_d k_d + T_n k_n}{24} = l < 1.$$

Зафиксируем параметр l — он будет использован далее при установлении уровня дневного тарифа в итерационном методе.

Опишем действия потребителей при установлении нового тарифа. Пусть доля потребления энергии умными устройствами и предприятиями, способными менять время работы, составляет $s = \hat{s} \cdot 100\%$ и первоначально это потребление распределено равномерно (т. е. в каждую единицу времени на него приходится $\hat{s} \cdot 100\%$ от общего потребления в эту единицу времени).

Определяем функцию потребления энергии во время действия дневного тарифа по формуле

$$f_d^1(t) = (1 - \hat{s})f^0(t), \quad t \in [t_1, t_2],$$

а во время действия ночного тарифа — по формуле

$$f_n^1(t) = f^0(t) + F^0, \quad t \notin [t_1, t_2],$$

причем F^0 — дополнительное ночное потребление энергии, которое вычисляется из соображений равновероятности подключения умных устройств, переставших включаться при дневном тарифе, в любой момент времени ночного тарифа и неизменности общего потребления энергии:

$$F^0 = \frac{1}{T_n} \int_{T_d} (1 - \hat{s})f^0(t)dt.$$

Очевидно, что полученная функция будет иметь разрывы первого рода в точках t_1 и t_2 .

Потребление энергии (при доле умных устройств \hat{s}) в период действия дневного тарифа

$$E_d(\hat{s}) = \int_{T_d} f_d^1(t)dt,$$

в период действия ночного тарифа

$$E_n(\hat{s}) = \int_{T_n} f_n^1(t)dt.$$

Нетрудно видеть, что с ростом \hat{s} может сложиться парадоксальная ситуация — при некотором \hat{s}^* среднечасовое ночное потребление в условиях двухтарифного учета может стать больше среднечасового дневного потребления, т. е.

$$E_n(\hat{s}) > \frac{E_0 T_n}{24 S_0},$$

а с дальнейшим ростом параметра \hat{s} среднечасовое ночное потребление значительно превзойдет среднечасовое дневное потребление.

2.2. Модель двухтарифного учета с обратной связью

Для добавления обратной связи в модель рассмотрим итерационную схему установления времени действия ночного тарифа, в которой решение со стороны поставщика электричества, считающего, что идеальной схемой, с его точки зрения, является равномерный расход энергии, принимается таким образом, что низкий тариф будет, когда потребление на предыдущем шаге было меньше среднего на этом шаге S_{av}^i (верхний индекс здесь и далее означает номер итерации), а высокий — когда выше (моменты перехода определяем линейной экстраполяцией с точностью до минут).

Действия поставщика электроэнергии однотипны на всех шагах, начиная с первого. На i -м итерационном шаге время действия дневного тарифа устанавливается при значениях t , при которых $f^{i-1}(t) > S_{av}^i$, ночного — при тех значениях t , когда $f^{i-1}(t_2^i) < S_{av}^i$. Не исключено, что “переходных” значений времени может оказаться больше, чем два за сутки, а названия “дневной” и “ночной” будут носить условный характер.

Уровень тарифов будет устанавливаться исходя из естественного требования государства о невозрастании суммарных затрат потребителей. Напомним, что в классической модели $S_d = k_d S_0$ ($k_d > 1$), $S_n = k_n S_0$ ($k_n < 1$).

Как сказано в подразд. 2.1, при “идеальном” равномерном потреблении затраты на энергию при применении двухставочного тарифа меньше затрат в случае одноставочного тарифа, т. е.

$$\frac{T_d k_d + T_n k_n}{24} = l < 1. \quad (1)$$

Аналогично классической схеме будем брать ночной тариф на любой итерации с одним и тем же понижающим коэффициентом k_n относительно базового одноставочного тарифа, а дневной — с таким повышающим коэффициентом k_d^i , чтобы исходя из длины интервалов времени действия дневного и ночного тарифов “идеальное” (равномерное) потребление электроэнергии в прежнем объеме влекло бы выполнение соотношения (1) на каждой итерации:

$$\frac{T_d^i k_d^i + T_n^i k_n}{24} = l < 1,$$

т. е.

$$k_d^i = k_n + \frac{24(l - k_n)}{T_d^i}.$$

Итак, новый тариф, описание которого включает время его действия, дневные и ночные расценки, на первом шаге установлен.

Теперь опишем действия потребителей на i -й итерации. Пусть, как и ранее, доля потребления энергии умными устройствами и предприятиями, способными менять время работы, составляет $\hat{s} \cdot 100\%$ и первоначально это потребление распределено равномерно (т. е. в каждую единицу времени на него приходится $\hat{s} \cdot 100\%$ от общего потребления в эту единицу времени). Тогда на i -й итерации функцию потребления энергии во время действия дневного тарифа устанавливаем по формуле

$$f_d^i(t) = (1 - \hat{s})f^0(t), \quad t \in [t_1^i, t_2^i],$$

а во время действия ночного тарифа — по формуле

$$f_n^i(t) = f^0(t) + F^i, \quad t \notin [t_1, t_2],$$

причем F^i — дополнительное ночное потребление энергии, которое вычисляется из соображений равновероятности подключения умных устройств, переставших включаться при дневном тарифе, в любой момент времени ночного тарифа и неизменности общего потребления энергии:

$$F^i = \frac{1}{T_n^i} \int_{T_d^i} (1 - \hat{s})f^0(t) dt.$$

В точках перехода от одного тарифного плана к другому используем коэффициент, соответствующий интервалу, в котором значения t_1^1 или t_2^1 были до их округления.

Далее цикл полностью повторяется: поставщик вновь меняет тарифы, а потребитель реагирует на это по принципу, изложенному выше.

3. Результаты экспериментов

По данным АО “АтомЭнергоСбыт” (<https://atomsbt.ru>), в Твери во втором полугодии 2021 г. одноставочный тариф составляет 4.32 руб./кВт·ч, дифференцированный тариф по двум зонам суток составляет: по дневной зоне (с 7:00 до 23:00) — 4.46 руб./кВт·ч, по ночной (с 23:00 до 7:00) — 3.03 руб./кВт·ч.

В границах с Тверской областью Московской области, по данным АО “Мосэнергосбыт” (<https://www.mosenergosbyt.ru>) в домах с газовыми плитами одноставочный тариф составляет 5.93 руб./кВт·ч, двухставочный (день) — 6.82 руб./кВт·ч, двухставочный (ночь) — 2.65 руб./кВт·ч, в домах с электроплитами — 4.29, 4.93 и 1.91 руб./кВт·ч соответственно. Временной интервал действия ночного тарифа в Московской области тот же — с 23:00 до 7:00.

В качестве источника исходных данных, представленных в таблице, берем город из средней полосы России — Тверь, дата 03.06.2014 (рабочий день, летний сезон, чтобы уменьшить влияние потребления осветительных приборов). Историческая информация об энергопотреблении по Твери была предоставлена компанией ООО “АналитиксХаб” и обладала исторической глубиной 2–3 года. Выполним расчеты по классической схеме. Их результаты приведены на рис. 1 (для большей наглядности мы изобразили 24-часовой интервал с 23.00 до 23.00 следующих суток, чтобы без разрывов показать поведение функции во время действия ночного тарифа).

Видно, что с ростом доли умных устройств \hat{s} суточные колебания потребления электроэнергии все более и более сглаживаются (общие для всех графиков точки с абсциссами 7.30 и 22.30 — численный эффект применения наших формул к табличной функции, заданной с интервалом 1 ч).

В расчетах установлено, что если $\hat{s} > 0.14$, то среднечасовое ночное потребление в условиях двухтарифного учета становится больше среднечасового дневного потребления. В этой ситуации, как отмечено выше, целесообразно использовать модель двухтарифного учета с обратной связью.

Начальные данные о суточном потреблении электроэнергии
Initial data on daily electricity consumption

Время, ч	Фактическое потребление, тыс. кВт·ч	Время, ч	Фактическое потребление, тыс. кВт·ч
1	351.527	13	529.813
2	336.157	14	527.607
3	328.135	15	519.374
4	318.079	16	500.208
5	321.695	17	478.058
6	355.574	18	466.725
7	414.864	19	460.545
8	484.079	20	458.293
9	520.834	21	460.403
10	526.686	22	466.665
11	531.956	23	446.089
12	516.839	24	393.856

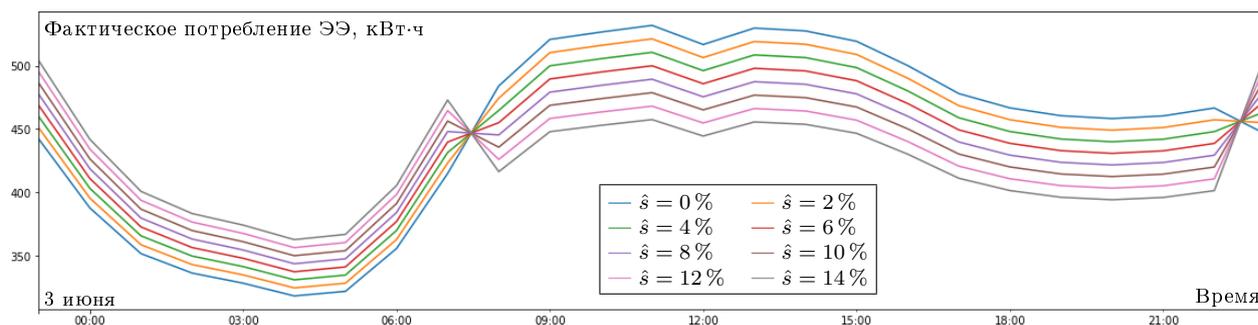


Рис. 1. Суточное потребление электроэнергии при различной доле умных устройств (классическая модель)

Fig. 1. Daily electricity consumption with a different proportion of smart devices (classic model)

Рассмотрим влияние увеличения количества умных устройств на энергопотребление с использованием этих данных. В первой серии экспериментов будем использовать данные по Твери, а во второй — данные по тарифам (для домов с газовыми плитами) граничащей с ней Московской области, где отношение дневного тарифа к ночному заметно больше.

В серии расчетов для Тверской области согласно приведенным выше данным $t_1 = 7$ ч, $t_2 = 23$ ч, однотарифный учет с применением одноставочного тарифа $S_0 = 4.32$ руб./кВт·ч, двухставочный тариф (дневная зона) $S_1 = 4.46$ руб./кВт·ч, двухставочный тариф (ночная зона) $S_2 = 3.03$ руб./кВт·ч.

Таким образом, $S_1 = 1.03S_0$, $S_2 = 0.70S_0$, т. е. $k_d = 1.03$, $k_n = 0.70$. При “идеальном” равномерном потреблении затраты на энергию при применении двухставочного тарифа составят примерно 92% от затрат при одноставочном тарифе.

Цель исследования — установить при проведении большого числа итераций, выходит система на стационарный режим, колеблется или “разваливается”.

Новые серии экспериментов для итерационной схемы можно выполнить, варьируя долю потребления энергии умными устройствами \hat{s} (разумеется, в рамках каждой серии этот параметр не меняется).

Результаты пяти расчетов при $\hat{s} = 0.08, 0.14, 0.16, 0.24, 0.3$ представлены на рис. 2 (для удобства восприятия здесь отображен 24-часовой интервал, начиная с 23:00). В случае совпадения графиков на разных итерациях отображается цвет, соответствующий номеру наибольшей из этих итераций.

Из рис. 2 видно, что при любой доле умных устройств \hat{s} система за четыре итерации выходит на режим колебаний между двумя графиками распределения потребления энергии. Исходя из распределения потребления на очередной итерации поставщик электроэнергии увеличивает тариф в моменты повышенного потребления и уменьшает в моменты пониженного, после чего происходит переток потребления умных устройств на временные интервалы, когда тариф уменьшен. Далее на этих интервалах электричество дорожает, что вызывает новый переток потребления и т. д.

При малых значениях \hat{s} колебания графиков невелики, но с ростом \hat{s} возрастают, причем когда доля умных устройств \hat{s} превосходит критическое значение 0.14, при котором среднечасовое ночное потребление в условиях двухтарифного учета становится больше среднечасового дневного потребления, графики становятся все более немонотонными. Немонотонность увеличивается с ростом \hat{s} , однако с достижением некоторого значения \hat{s} (при рассматриваемых начальных данных потребления электроэнергии с

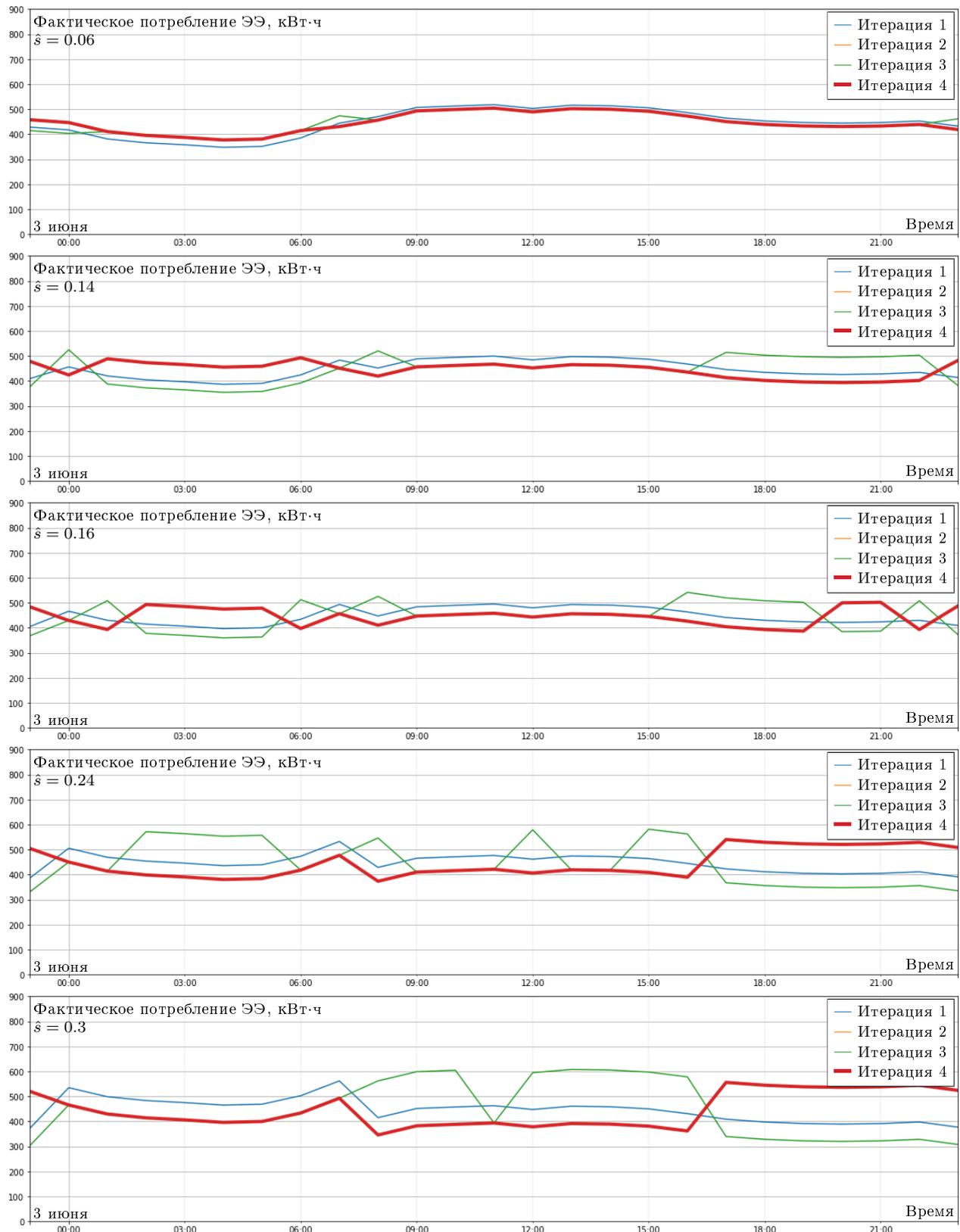


Рис. 2. Суточное потребление электроэнергии (итерационная модель)

Fig. 2. Daily electricity consumption (iterative model)

достижением значения \hat{s} , равного или большего 0.30) картина значительно упрощается и ранее многочисленные интервалы времени, в которых на данной итерации устанавливается высокий или низкий тариф, сливаются в единый. В такой ситуации для обеспечения более или менее равномерного распределения потребления электроэнергии поставщику целесообразно вернуться к однотарифной ставке.

Аналогичные расчеты проведены для двухставочного тарифного плана Московской области, где отношение дневного тарифа к ночному заметно больше. В этой серии экспериментов согласно приведенным выше данным $t_1 = 7$ ч, $t_2 = 23$ ч, однотарифный учет с применением одноставочного тарифа $S_0 = 5.93$ руб./кВт·ч, двухставочный тариф (дневная зона) $S_1 = 6.82$ руб./кВт·ч, двухставочный тариф (ночная зона) $S_2 = 2.65$ руб./кВт·ч.

Таким образом, $S_1 = 1.15S_0$, $S_2 = 0.45S_0$, т. е. $k_d = 1.15$, $k_n = 0.45$ и при “идеальном” равномерном потреблении затраты на энергию при применении двухставочного тарифа составят примерно 92 % от затрат при одноставочном тарифе, т. е. $l = 0.92$.

В этой серии расчетов итерированные графики потребления электроэнергии при различных значениях \hat{s} оказались совершенно идентичными тем, которые были получены ранее для Тверской области, т. е. даже весьма значительное варьирование отношения дневного тарифа к ночному не оказывает влияния на итоги расчетов по второй модели, что свидетельствует о ее корректности.

Заключение

Самоорганизация в современных системах потребления электроэнергии в значительной мере регулируется установлением тарифов на электроэнергию. При этом следует учитывать рост количества умных устройств как потребителей электроэнергии, их особенности и возможности. Современная тенденция к установлению гибких тарифов, ценообразованию в режиме реального времени позволяет реализовать более равномерное потребление, повысить эффективность системы производства и потребления электроэнергии.

Разработаны и исследованы две модели энергопотребления, учитывающие, что умные устройства, которые потребляют электроэнергию, могут самостоятельно анализировать тарифы и регулировать подключение к энергоресурсам.

Проведено сравнение двух моделей энергопотребления (статической двухтарифной и динамической), учитывающих рациональное поведение умных устройств, способных выбирать лучшие режимы для потребления электроэнергии. Установлено, что при небольшой доле умных устройств приемлемые результаты, обеспечивающие уменьшение вариативности функции потребления, можно получить с использованием модели без обратной связи.

Увеличение количества акторов системы неизбежно приводит к необходимости включения в систему механизма обратной связи, позволяющего поставщику ресурсов не допускать избыточной концентрации умных устройств в период действия более дешевого тарифа. В этой модели при любой доле умных устройств система за несколько итераций выходит на режим колебаний между двумя графиками распределения потребления энергии. С ростом доли умных устройств вариация функции потребления возрастает. Когда доля умных устройств превосходит критическое значение 0.14, при котором среднечасовое ночное потребление в условиях двухтарифного учета становится больше среднечасового дневного потребления, графики становятся заметно более немонотонными.

Дальнейшее увеличение доли умных устройств приводит к ярко выраженной инверсии времен дешевого и дорогого тарифов на двух последовательных итерациях. В такой ситуации для обеспечения более или менее равномерного распределения потребления электроэнергии поставщику целесообразно вернуться к однотарифной ставке.

Экспериментально показано, что излишний рост числа акторов системы способен нивелировать эффект от их применения. Естественным ограничителем числа акторов является невозможность переноса времени потребления электроэнергии целым рядом энергоемких потребителей. Дальнейшие исследования предполагают изучение других моделей установления тарифов и альтернативных методов повышения гибкости системы производства электроэнергии и спроса на нее.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-07-00651 А).

Список литературы

- [1] **Oliveira P., Vale Z., Morais H., Praca I.** A multi-agent based approach for intelligent smart grid management. *IFAC Proceedings Volumes*. 2012; 45(21):109–114. DOI:10.3182/20120902-4-FR-2032.00021.
- [2] **Howell S., Rezgui Y., Hippolyte J-L., Jayan B., Li H.** Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; (77):193–214. DOI:10.1016/j.rser.2017.03.107.
- [3] **Montagna S., Abreu P.H., Giroux S., Schumacher M.** Agents and Multi-Agent Systems for Health Care: 10th International Workshop, A2HC 2017, Sao Paulo, Brazil, May 8, 2017, and International Workshop, A-HEALTH 2017, Porto, Portugal, June 21, 2017, Revised and Extended Selected Papers. Cham: Springer; 2017: 155. DOI:10.1007/978-3-319-70887-4.
- [4] **Jemal H., Kechaou Z., Ayed M.B., Alimi A.M.** A multi agent system for hospital organization. *International Journal of Machine Learning and Computing*. 2015; (5):51–56. DOI:10.7763/ijmlc.2015.v5.482.
- [5] **Moonen J.M.** Multi-agent systems for transportation planning and coordination. ERIM Ph.D. Series Research in Management. Erasmus Research Institute of Management; 2009. Адрес доступа: <http://hdl.handle.net/1765/16208>.
- [6] **Chen B., Cheng H.H.** A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2010; 11(2):485–497. DOI:10.1109/TITS.2010.2048313.
- [7] **Skobelev P.** Multi-agent systems for real-time adaptive resource management. *Industrial Agents*. 2015: 207–229. DOI:10.1016/B978-0-12-800341-1.00012-7.
- [8] **Bretas A., Mendes A., Jackson M., Clement R., Sanhueza C., Chalup S.** A decentralised multi-agent system for rail freight traffic management. *Annals of Operations Research*. 2021. DOI:10.1007/s10479-021-04178-x.
- [9] **Dominguez R., Cannella S.** Insights on multi-agent systems applications for supply chain management. *Sustainability*. 2020; 12(5):1935. DOI:10.3390/su12051935.
- [10] **Lu Z., Zhuang Z., Huang Z., Qin W.** A framework of multi-agent based intelligent production logistics system. *Procedia CIRP*. 2019; (83):557–562. DOI:10.1016/j.procir.2019.04.116.
- [11] **Zhong J., Zhu W., Wu Y., Wang K.** Agent-based simulation of online trading. *Systems Engineering Procedia*. 2012; (5):437–444. DOI:10.1016/j.sepro.2012.04.066.

- [12] **Hakansson A., Hartung R.** Agent and multi-agent systems in distributed systems — digital economy and e-commerce. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013: 220. DOI:10.1007/978-3-642-35208-9.
- [13] **Souissi M.A., Bensaïd K., Ellaia R.** Multi-agent modelling and simulation of a stock market. *Investment Management and Financial Innovations*. 2018; 15(4):123–134. DOI:10.21511/imfi.15(4).2018.10.
- [14] **Aguado G., Julian V., Garcia-Fornes A., Espinosa A.** A multi-agent system for guiding users in on-line social environments. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2020; (94):103740. DOI:10.1016/j.engappai.2020.103740.
- [15] **Gutounig R.** Social Media and Self-Organization: Potentials for Knowledge Processes and Social Change. 10th IAS-STS Annual Conference. Graz (Austria); 2011. DOI:10.13140/RG.2.2.36785.38240.
- [16] **Baldassarre G.** Self-organization as phase transition in decentralized groups of robots: A study based on Boltzmann entropy. Prokopenko M. (eds) *Advances in Applied Self-Organizing Systems*. Advanced Information and Knowledge Processing. London: Springer; 2008. DOI:10.1007/978-1-84628-982-8_7.
- [17] **Baldassarre G., Nolfi S.** Strengths and synergies of evolved and designed controllers: A study within collective robotics. *Artificial Intelligence*. 2009; 173(7–8):857–875. DOI:10.1016/j.artint.2009.01.001.
- [18] **Hoschke N., Lewis C.J., Price D.C., Scott D.A., Gerasimov V., Wang P.** A self-organizing sensing system for structural health monitoring of aerospace vehicles. Prokopenko M. (eds) *Advances in Applied Self-Organizing Systems*. Advanced Information and Knowledge Processing. London: Springer; 2008. DOI:10.1007/978-1-84628-982-8_4.
- [19] **Schlegel T., Kowalczyk R.** Self-organizing nomadic services in grids. Prokopenko M. (eds) *Advances in Applied Self-Organizing Systems*. Advanced Information and Knowledge Processing. London: Springer; 2008. DOI:10.1007/978-1-84628-982-8_10.
- [20] **Rasanen T., Ruuskanen J., Kolehmainen M.** Reducing energy consumption by using self-organizing maps to create more personalized electricity use information. *Applied Energy*. 2008; 85(9):830–840. DOI:10.1016/j.apenergy.2007.10.012.
- [21] Addendum report for the total energy model v2.0 for connected devices report prepared for IEA 4E EDNA, February 2021. Адрес доступа: <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2021/02/EDNA-TEM2.0-Report-V1.0-Final.pdf> (дата обращения 15.11.2021).
- [22] **Rey G.Z., Carvalho M., Trentesaux D.** Cooperation models between humans and artificial self-organizing systems: Motivations, issues and perspectives. *Proceedings of the 6th International Symposium on Resilient Control Systems (ISRCs)*. San Francisco; 2013: 156–161. DOI:10.1109/ISRCs.2013.6623769.
- [23] **Di Marzo Serugendo G., Gleizes M.-P., Karageorgos A.** Self-organising software: From natural to artificial adaptation. Berlin, Heidelberg: Springer; 2011: 462. DOI:10.1007/978-3-642-17348-6.
- [24] **Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р.** Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели. *Управление большими системами*. 2010; 30(1):605–639.
- [25] План мероприятий (“дорожная карта”) “Энерджинет” Национальной технологической инициативы. Адрес доступа: <http://static.government.ru/media/files/LqKPTw0rMkzgzHm8a1KBp5b0h70wHZq6P.pdf> (дата обращения 15.11.2021).
- [26] Постановление Правительства РФ от 29 декабря 2011 г. № 1178 “О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике” (с изменениями и дополнениями). Адрес доступа: <https://base.garant.ru/70119304> (дата обращения 15.11.2021).

- [27] Рекомендации по стандартизации Р 50-605-89-94. Энергосбережение. Порядок установления показателей энергопотребления и энергосбережения в документации на продукцию и процессы. Адрес доступа: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/d55/4293831367.pdf> (дата обращения 15.11.2021).
- [28] Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 51749-2001. Энергосбережение. Энергопотребляющее оборудование общепромышленного применения. Виды. Типы. Группы. Показатели энергетической эффективности. Идентификация. Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200012993> (дата обращения 15.11.2021).
- [29] **Roesch M., Linder C., Zimmermann R., Rudolf A., Hohmann A., Reinhart G.** Smart grid for industry using multi-agent reinforcement learning. *Applied Sciences*. 2020; 10(19):6900. DOI:10.3390/app10196900.
- [30] **Fang X., Wang J., Song G., Han Y., Zhao Q., Cao Z.** Multi-agent reinforcement learning approach for residential microgrid energy scheduling. *Energies*. 2020; 13(1):123. DOI:10.3390/en13010123.
- [31] C19-DS-55-04 CEER paper on electricity distribution tariffs supporting the energy transition. April 20, 2020. Адрес доступа: <https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/fd5890e1-894e-0a7a-21d9-fa22b6ec9da0> (дата обращения 15.11.2021).
- [32] **von Coburg M.** Timing is everything: Why time-of-use tariffs are here to stay. May 19, 2021. Адрес доступа: <https://www.gridx.ai/blog/time-of-use-flexible-tariffs> (дата обращения 15.11.2021).
- [33] Innovation landscape brief: Time-of-use tariffs. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi; 2019. Адрес доступа: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Innovation_ToU_tariffs_2019.pdf (дата обращения 15.11.2021).
- [34] **Schott P., Sedlmeir J., Strobel N., Weber T., Fridgen G., Abele E.** A generic data model for describing flexibility in power markets. *Energies*. 2019; 12(10):1893. DOI:10.3390/en12101893.
- [35] **Karlsen S.S., Hamdy M., Attia S.** Methodology to assess business models of dynamic pricing tariffs in all-electric houses. *Energy and Buildings*. 2020; (207):109586. DOI:10.1016/j.enbuild.2019.109586.

Modelling of energy consumption in sociotechnical systems with intelligent equipment

BARAKHNIN VLADIMIR B.^{1,2,*}, MALTSEVA SVETLANA V.³, DANILOV KONSTANTIN V.^{3,4},
 KORNILOV VASILY V.³

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 630090, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia

³National Research University Higher School of Economics, 101000, Moscow, Russia

⁴NLMK Group, 398040, Lipetsk, Russia

*Corresponding author: Barakhnin Vladimir B., e-mail: barakhnin@ngs.ru

Received November 22, 2021, accepted November 29, 2021.

Abstract

Modern socio-technical systems in various fields include a large number of smart equipment that can independently regulate its own energy consumption, as well as interact with other consumers in decision-making and management processes. Energy is one of these areas. Self-organization and collective self-consumption are the most promising in terms of ensuring the efficiency of energy use.

Existing and prospective approaches to using static and dynamic time-based tariffs are under consideration. The paper presents a mathematical description of two models of energy consumption: a static model based on the allocation of two zones with a fixed duration and tariffs for each one and a dynamic model of two-tariff accounting with feedback, which assumes tariffs changing based on the results of the analysis of current electricity consumption.

A pilot study of both models was conducted by using energy consumption data and taking into account the rational behavior of smart devices as consumers who can choose the best periods for electricity consumption. During the experiments it was investigated how an increase in the share of smart devices in the composition of electricity consumers as well as options for establishing zones and tariffs, affect the possibility of achieving uniform consumption during the day.

Experiments have shown that with a small proportion of smart devices, acceptable results that reduce the variation in the consumption function can favor usage of the model without feedback.

An increase in the number of actors in the system inevitably requires including a feedback mechanism into the system that allows the resource supplier to prevent excessive concentration of smart devices during the period of the cheaper tariff.

However, when the share of smart devices exceeds a certain critical value, a pronounced inversion of the times of cheap and expensive tariffs occurs in two successive iterations. In this case, in order to ensure a quite even distribution of electricity consumption, it is advisable for the supplier to return to the single tariff rate. Thus, an excessive increase in the number of actors in the system can neutralize the effect of their use.

Keywords: sociotechnical systems, self-organizing, smart equipment, electric energy consumption, energy consumption modelling.

Citation: Barakhnin V.B., Maltseva S.V., Danilov K.V., Kornilov V.V. Modelling of energy consumption in sociotechnical systems with intelligent equipment. Computational Technologies. 2021; 26(6):4–19. DOI:10.25743/ICT.2021.26.6.002. (In Russ.)

Acknowledgements. The work is supported by RFBR (grant No. 20-07-00651).

References

1. **Oliveira P., Vale Z., Morais H., Praca I.** A multi-agent based approach for intelligent smart grid management. IFAC Proceedings Volumes. 2012; 45(21):109–114. DOI:10.3182/20120902-4-FR-2032.00021.
2. **Howell S., Rezgui Y., Hippolyte J-L., Jayan B., Li H.** Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017; (77):193–214. DOI:10.1016/j.rser.2017.03.107.
3. **Montagna S., Abreu P.H., Giroux S., Schumacher M.** Agents and Multi-Agent Systems for Health Care: 10th International Workshop, A2HC 2017, Sao Paulo, Brazil, May 8, 2017, and International Workshop, A-HEALTH 2017, Porto, Portugal, June 21, 2017, Revised and Extended Selected Papers. Cham: Springer; 2017: 155. DOI:10.1007/978-3-319-70887-4.
4. **Jemal H., Kechaou Z., Ayed M.B., Alimi A.M.** A multi agent system for hospital organization. International Journal of Machine Learning and Computing. 2015; (5):51–56. DOI:10.7763/ijmlc.2015.v5.482.
5. **Moonen J.M.** Multi-agent systems for transportation planning and coordination. ERIM Ph.D. Series Research in Management. Erasmus Research Institute of Management; 2009. Available at: <http://hdl.handle.net/1765/16208>.

6. **Chen B., Cheng H.H.** A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2010; 11(2):485–497. DOI:10.1109/TITS.2010.2048313.
7. **Skobelev P.** Multi-agent systems for real-time adaptive resource management. *Industrial Agents*. 2015: 207–229. DOI:10.1016/B978-0-12-800341-1.00012-7.
8. **Bretas A., Mendes A., Jackson M., Clement R., Sanhueza C., Chalup S.** A decentralised multi-agent system for rail freight traffic management. *Annals of Operations Research*. 2021. DOI:10.1007/s10479-021-04178-x.
9. **Dominguez R., Cannella S.** Insights on multi-agent systems applications for supply chain management. *Sustainability*. 2020; 12(5):1935. DOI:10.3390/su12051935.
10. **Lu Z., Zhuang Z., Huang Z., Qin W.** A framework of multi-agent based intelligent production logistics system. *Procedia CIRP*. 2019; (83):557–562. DOI:10.1016/j.procir.2019.04.116.
11. **Zhong J., Zhu W., Wu Y., Wang K.** Agent-based simulation of online trading. *Systems Engineering Procedia*. 2012; (5):437–444. DOI:10.1016/j.sepro.2012.04.066.
12. **Hakansson A., Hartung R.** Agent and multi-agent systems in distributed systems — digital economy and e-commerce. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013: 220. DOI:10.1007/978-3-642-35208-9.
13. **Souissi M.A., Bensaïd K., Ellaia R.** Multi-agent modelling and simulation of a stock market. *Investment Management and Financial Innovations*. 2018; 15(4):123–134. DOI:10.21511/imfi.15(4).2018.10.
14. **Aguado G., Julian V., Garcia-Fornes A., Espinosa A.** A multi-agent system for guiding users in on-line social environments. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2020; (94):103740. DOI:10.1016/j.engappai.2020.103740.
15. **Gutounig R.** Social Media and Self-Organization: Potentials for Knowledge Processes and Social Change. 10th IAS-STS Annual Conference. Graz (Austria); 2011. DOI:10.13140/RG.2.2.36785.38240.
16. **Baldassarre G.** Self-organization as phase transition in decentralized groups of robots: A study based on Boltzmann entropy. Prokopenko M. (eds) *Advances in Applied Self-Organizing Systems*. Advanced Information and Knowledge Processing. London: Springer; 2008. DOI:10.1007/978-1-84628-982-8_7.
17. **Baldassarre G., Nolfi S.** Strengths and synergies of evolved and designed controllers: A study within collective robotics. *Artificial Intelligence*. 2009; 173(7–8):857–875. DOI:10.1016/j.artint.2009.01.001.
18. **Hoschke N., Lewis C.J., Price D.C., Scott D.A., Gerasimov V., Wang P.** A self-organizing sensing system for structural health monitoring of aerospace vehicles. Prokopenko M. (eds) *Advances in Applied Self-Organizing Systems*. Advanced Information and Knowledge Processing. London: Springer; 2008. DOI:10.1007/978-1-84628-982-8_4.
19. **Schlegel T., Kowalczyk R.** Self-organizing nomadic services in grids. Prokopenko M. (eds) *Advances in Applied Self-Organizing Systems*. Advanced Information and Knowledge Processing. London: Springer; 2008. DOI:10.1007/978-1-84628-982-8_10.
20. **Rasanen T., Ruuskanen J., Kolehmainen M.** Reducing energy consumption by using self-organizing maps to create more personalized electricity use information. *Applied Energy*. 2008; 85(9):830–840. DOI:10.1016/j.apenergy.2007.10.012.
21. Addendum report for the total energy model v2.0 for connected devices report prepared for IEA 4E EDNA, February 2021. Available at: <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2021/02/EDNA-TEM2.0-Report-V1.0-Final.pdf> (Accessed at November 15, 2021).
22. **Rey G.Z., Carvalho M., Trentesaux D.** Cooperation models between humans and artificial self-organizing systems: Motivations, issues and perspectives. *Proceedings of the 6th International Symposium on Resilient Control Systems (ISRCS)*. San Francisco; 2013: 156–161. DOI:10.1109/ISRCS.2013.6623769.
23. **Di Marzo Serugendo G., Gleizes M.-P., Karageorgos A.** Self-organising software: From natural to artificial adaptation. Berlin, Heidelberg: Springer; 2011: 462. DOI:10.1007/978-3-642-17348-6.
24. **Kalyaev I.A., Kapustjan S.G., Gajduk A.R.** Self-organizing distributed control systems of intellectual robot groups constructed on the basis of network model. *UBS*. 2010; 30(1):605–639.
25. Plan of action (“road map”) “Energynet” of the National Technology Initiative. Available at: <http://static.government.ru/media/files/LqKPTw0rMkzghM8a1kBP5b0h70wHZq6P.pdf> (accessed November 15, 2021). (In Russ.)
26. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1178 of December 29, 2011 “On pricing in the field of regulated prices (tariffs) in the electric power industry” (with amendments and additions). Available at: <https://base.garant.ru/70119304> (accessed November 15, 2021). (In Russ.)

27. Recommendations for standardization R 50-605-89-94. Energy saving. Procedure for establishing energy consumption and energy saving indicators in product and process documentation. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/d55/4293831367.pdf> (accessed November 15, 2021). (In Russ.)
28. State standard of the Russian Federation R 51749-2001. Energy conservation. Energy consuming equipment in general industrial application. Kinds. Types. Groups. Indicators of energy efficiency. Identification. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200012993> (accessed November 15, 2021). (In Russ.)
29. **Roesch M., Linder C., Zimmermann R., Rudolf A., Hohmann A., Reinhart G.** Smart grid for industry using multi-agent reinforcement learning. *Applied Sciences*. 2020; 10(19):6900. DOI:10.3390/app10196900.
30. **Fang X., Wang J., Song G., Han Y., Zhao Q., Cao Z.** Multi-agent reinforcement learning approach for residential microgrid energy scheduling. *Energies*. 2020; 13(1):123. DOI:10.3390/en13010123.
31. C19-DS-55-04 CEER paper on electricity distribution tariffs supporting the energy transition. April 20, 2020. Available at: <https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/fd5890e1-894e-0a7a-21d9-fa22b6ec9da0> (accessed November 15, 2021).
32. **von Coburg M.** Timing is everything: Why time-of-use tariffs are here to stay. May 19, 2021. Available at: <https://www.gridx.ai/blog/time-of-use-flexible-tariffs> (accessed November 15, 2021).
33. Innovation landscape brief: Time-of-use tariffs. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi; 2019. Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Innovation_ToU_tariffs_2019.pdf (accessed November 15, 2021).
34. **Schott P., Sedlmeir J., Strobel N., Weber T., Fridgen G., Abele E.** A generic data model for describing flexibility in power markets. *Energies*. 2019; 12(10):1893. DOI:10.3390/en12101893.
35. **Karlsen S.S., Hamdy M., Attia S.** Methodology to assess business models of dynamic pricing tariffs in all-electric houses. *Energy and Buildings*. 2020; (207):109586. DOI:10.1016/j.enbuild.2019.109586.