

Моделирование и оптимизация в реальном времени умной микросети электропитания района с распределенными источниками энергии

П.М. Ведель, Н.Ю. Овчинникова

НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация. В системах электроснабжения все более важную роль играют возобновляемые генераторы энергии, для которых разрабатываются способы управления, учитывающие изменение цены на электроэнергию. В данной работе представлен вариант управления потреблением энергии на основе прогнозирующей экономической модели (*Economic MPC*), которая минимизирует стоимость эксплуатации микросети с распределенным производством электроэнергии. Контроллер для координации и оптимизации работы микросети в реальном времени, который включает в себя блок прогнозирования потребления электроэнергии и профилей цен на электроэнергию на основе моделей ARIMA, разработан на базе прогнозирующей экономической модели с учетом смешанного целочисленного программирования и протестирован в среде *Matlab / Simulink*. Было исследовано изменение параметров умной микросети на общую экономию затрат.

Ключевые слова: умная микросеть, *Economic MPC*, модель ARIMA, ценообразование в реальном времени.

ВВЕДЕНИЕ

Мировая энергетика развивается и эволюционирует с течением времени. Растет спрос на электроэнергию, поэтому растет предложение по предоставлению электроэнергии. Но неконтролируемое использование традиционных (первичных) источников энергии ведет к экологическим проблемам. Выбросы парниковых газов, истощение природных ресурсов и глобальное потепление – все это негативно повлияет на жизнь на Земле в долгосрочной перспективе.

В связи с этим, в 2015 году в Париже выработано соглашение по объединению усилий всех мировых держав по сдерживанию климатических изменений и регулированию методов генерации энергии. Цели данного соглашения достигаются путем отказа от невозобновляемых источников энергии и переходу к возобновляемым источникам энергии.

Текущие мировые рынки электричества значительно зависят от возобновляемых генераторов, таких как солнечные батареи, ветряные турбины и др. Эти генераторы не контролируются, но в какой-то степени предсказуемы. В связи с необходимостью поддерживать баланс мощности в энергосети, в соответствии с этими условиями, требуются новые методов, которые позволяют изменять пользовательское потребление основываясь на текущем производстве. Такие сети называются умными сетями (*SmartGrid*).

Взаимосвязь между текущим производством электроэнергии и спросом на электроэнергию отражается в колебаниях цен на краткосрочных рынках электроэнергии. Это приводит к идее о том, что вся электроэнергетическая система может выиграть, если потребление электро-

энергии конечных пользователей также будет изменяться в реальном времени соответственно. В результате одним из эффективных подходов является использование цены за электричество в реальном времени, и если значение этой цены основывается на какой-то рациональной матрице, которая отражает текущий дисбаланс потребления и производства электроэнергии, например, на краткосрочные рынки электричества. Таким образом пользователь путем достижения своих собственных целей минимизации затрат помогает или может помочь поддерживать баланс всей энергосети. Данная статья посвящена достижению этих целей.

1. СОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Для работы была выбрана эталонная микросеть низкого напряжения касающаяся жилой зоны из *CIGRÉ* (международный совет по крупным электрическим сетям) [1]. Эта сеть включает в себя 5 конечных пользователей (частные дома и многоквартирные дома), подключение к главной энергосети, хранилище энергии в виде аккумуляторов, возобновляемые генераторы (солнечные панели и ветровые турбины) и управляемые генераторы (микротурбины и топливная ячейка). Данная микросеть представлена на *Рис. 1*.

Модель умной микросети была создана в среде *Matlab* с использованием *Simulink / Simscape* при помощи решателя, основанного на комплексных амплитудах (*phasor*).

Подключение к главной сети

Участок, который описывает подключение к внешней энергосети всегда восполняет баланс мощности между потребительской микросетью и подведенной электроэнергией.

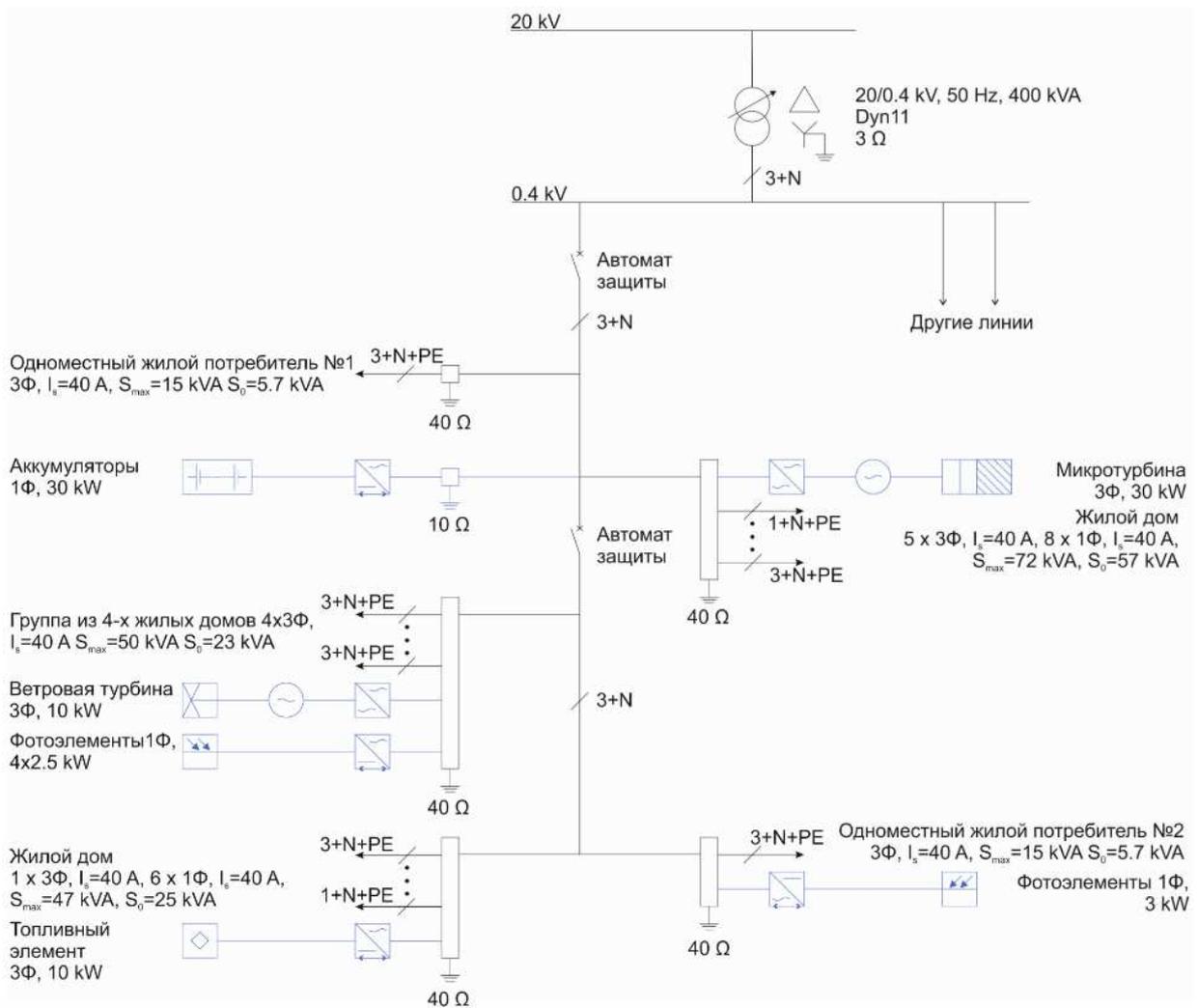


Рис. 1. Эталонная микросеть низкого напряжения CIGRÉ

Типовая связь блоков разных библиотек

Основная часть, которая связывает Simulink (управляющий сигнал мощности) и Simscape (трехфазная сеть) можно описать через формулу:

$$\bar{S} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{1}{3} (\overline{V_{ab}} - \overline{V_{bc}} \cdot e^{-i120}) \cdot \overline{I_{pA}}^* \right) \quad (1)$$

где: \bar{S} – полная мощность источника электричества [ВА]; $\overline{I_{pA}}$ – комплексная амплитуда тока фазы А [А]; $\overline{V_{ab}}$ и $\overline{V_{bc}}$ – линейный напряжения [В].

Комплексные амплитуды токов других фаз получаются с помощью умножения $\overline{I_{pA}}$ на поворотные коэффициенты $e^{\pm i120}$.

Описание неконтролируемых элементов

Данная микросеть имеет неконтролируемые элементы, такие как конечные потребители и возобновляемые источники энергии. Данные элементы управляются по реальным историческим профилям за 2018 год для Чешской Республики [2].

Для каждого конечного пользователя был выбран типовой профиль потребления, соответствующий его конфигурации [3, 4].

Солнечные панели (СП) управляются значением солнечного излучения $W_{ir}(t) [Bm / m^2]$:

$$P_{СП}(t) = K_{СП} \cdot W_{ir}(t), \quad (2)$$

где: $P_{СП}(t)$ – мощность блока солнечных панелей в данный момент времени [Вт]; $K_{СП}$ – коэффициент, характеризующий площадь СП, КПД СП и КПД инвертора.

Ветровая турбина (ВТ) управляется значением скорости ветра $V_w(t) [м / с]$:

$$P_{ВТ}(t) = K_{ВТ} \cdot V_w(t)^3, \quad (3)$$

где: $P_{ВТ}(t)$ – мощность ветровой турбины в данный момент времени [Вт]; $K_{ВТ}$ – коэффициент, характеризующий параметры воздуха и характеристики ВТ.

Описание контролируемых генераторов

Микротурбина (МТ) и топливный элемент (ТЭ) в выбранной микросети – это управляемые генераторы, работающие на натуральном газе. В данной модели рассматривается только электрические характеристики МТ и ТЭ. Стоит учитывать, что электрический КПД ТЭ намного

выше, чем КПД МТ, однако ТЭ имеет меньшую номинальную электрическую мощность [5, 6]:

$$P_{MT}(t) = \eta_{MT} \cdot Q_{MT}(t), \quad (4)$$

$$P_{TЭ}(t) = \eta_{TЭ} \cdot Q_{TЭ}(t), \quad (5)$$

где: $P_{MT}(t)$, $P_{TЭ}(t)$ – мощности, выделяемые МТ и ТО в момент времени t [Вт]; η_{MT} , $\eta_{TЭ}$ – электрические КПД МТ и ТО при постоянной температуре окружающей среды; $Q_{MT}(t)$, $Q_{TЭ}(t)$ – полное количество энергий подаваемых на МТ и ТО через натуральный газ [Дж/ч].

Хранилище энергии представлено в виде аккумуляторов [7]. В рассматриваемом диапазоне безопасной зарядки/разрядки, состояние заряда (Soc) будет меняться по линейному закону:

$$Soc_{k+1} = Soc_k + \left(P_{char}(t) \cdot \eta_{char} - \frac{P_{dis}(t)}{\eta_{dis}} \right) \cdot \frac{\Delta t}{Cap} \cdot 100, \quad (6)$$

при условии:

$$Soc_{min} \leq Soc_{k+1} \leq Soc_{max}, \quad (7)$$

где: $P_{char}(t)$, $P_{dis}(t)$ – мощности зарядки/разрядки аккумулятора в момент времени t , представленные как положительные компоненты полной мощности $P_{batt}(t)$ [Вт]; Soc_{k+1} , Soc_k – состояние заряда аккумулятора в момент времени $k+1$ и k [%]; Soc_{min} , Soc_{max} – минимальное и максимальное состояние заряда аккумулятора (соответственно 20% и 90%); η_{char} , η_{dis} – КПД зарядки и разрядки блока аккумулятора соответственно; Δt – шаг дискретизации по времени [ч]; Cap – ёмкость аккумулятора [Вт·ч].

Ток зарядки/разрядки аккумулятора $I_{rms}(t)$ [А] в момент времени t находится как:

$$I_{rms}(t) = \begin{cases} -\eta_{char} \cdot \frac{I_{char}}{P_{char}} \cdot P_{batt}(t), & P_{batt}(t) < 0 \\ \frac{1}{\eta_{dis}} \cdot \frac{I_{dis}}{P_{dis}} \cdot P_{batt}(t), & P_{batt}(t) \geq 0 \end{cases}, \quad (8)$$

Подсистема подсчета затрат микросети

Модель микросети подсчитывает общий эксплуатационные расходы по формуле:

$$Cost_{mg}(t) = Cost^{el}(t) \cdot P_{MG}^{el}(t) + |Cost_{dist}^{el} \cdot P_{MG}^{el}(t)| + Cost^{gas} \cdot P_{MG}^{gas}(t), \quad (9)$$

где: $Cost_{mg}(t)$ – цена за энергоснабжение микросети в момент времени t полученная с рынка электроэнергии на день вперед (DAM) [К€/ (МВт·ч)]; $Cost_{dist}^{el} = 1000$ [К€/ (МВт·ч)] – цена на дистрибьюцию электричества принятая как константа; $Cost^{gas} = 800$ [К€/ (МВт·ч)] – полная цена за натуральный газ принятая как константа; $P_{MG}^{el}(t)$ – мощность, используемая микросетью из главной сети электроэнергии в

течение часа t [МВт·ч]; $P_{MG}^{gas}(t)$ – мощность, используемая микросетью из сети газопровода в течение часа t [МВт·ч].

2. УПРАВЛЕНИЕ МИКРОСЕТЬЮ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ

В данной работе наша цель состоит в экономической оптимизации микросети, в среде с коррелирующими со временем ценами за электроэнергию и мощностью потребителей. Чтобы этого добиться, нужно усложнить нашу микросеть контроллером управления электроэнергией создав умную сеть.

Был выбран экономический контроллер с прогнозирующей моделью (EMPC). Главное отличие EMPC от стандартного MPC, это то, что EMPC использует линейную весовую функцию, а не квадратную.

Данный контроллер гарантирует наилучшие результаты оптимизации энергозатрат, с учетом будущих событий, при условии, что предсказания выполнены достаточно точно.

Таким образом, структуру EMPC можно представить из двух блоков (Рис. 2):

- участок генерации будущих горизонтов событий, на основе предсказаний;
- участок минимизации затрат, на основе матриц ограничений и представленных горизонтов.

Рассмотрим синтез каждого из участков ниже.

Блок минимизации затрат

Основа блока минимизации затрат — это функция минимизации. В его основе лежит итерационная модель оптимизации, старающаяся минимизировать функцию затрат J каждый момент времени [8].

В данной работе все функциональные формулы были описаны в линейном виде, поэтому используется смешано-целочисленное линейное программирование (MILP). В Matlab это функция *intlinprog*, которую можно представить как:

$$\min_x J^T x \text{ при условии } \begin{cases} integer : x(intcon) \\ A \cdot x \leq B \\ A_{eq} \cdot x = B_{eq} \\ lb \leq x \leq ub. \end{cases}, \quad (10)$$

где: J – вектор, представляющий весовую функцию на всю длину горизонтов, построенный при модификации формулы (9); x – решение MILP на всю длину горизонтов, которое включает:

- управляющее значение мощности на каждый час горизонтов;
- значение заряда хранилищ на каждый час горизонтов;

– переключающая переменная для (зарядки/разрядки) аккумулятора на каждый час описания попеременного режима работы горизонтов.

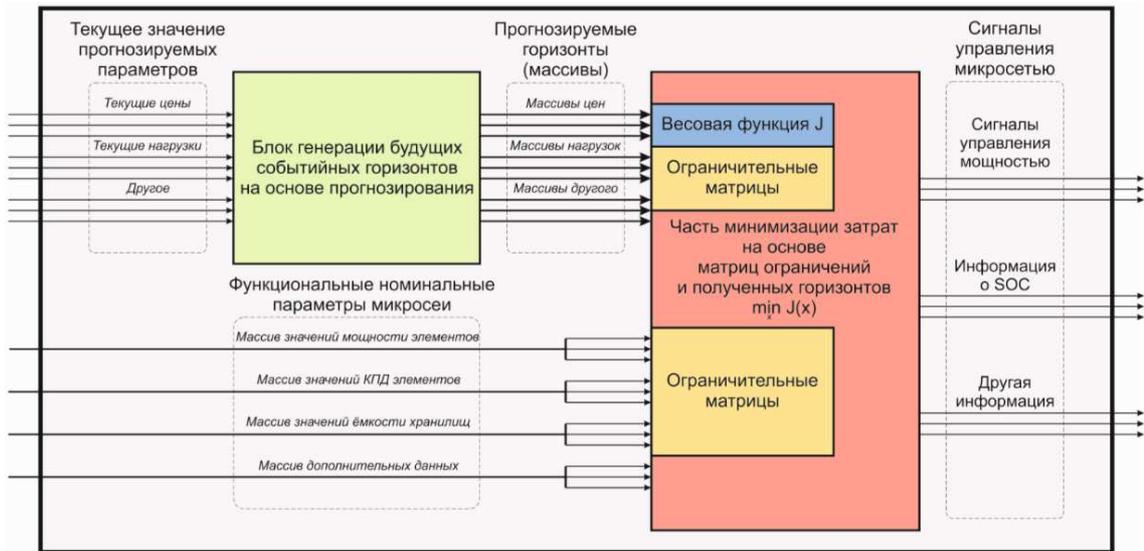


Рис. 2. Структура контроллера на основе прогнозирующей экономической модели для умных микросетей

Рассмотрим более детально формулировку проблемы MILP. Критерий MILP на всю длину горизонтов можно представить как:

$$J = \sum_{k=1}^{\text{Длина горизонтов}} \sum_{i=1}^{\text{Кол-во. упр. генераторов}} \text{Cost}_{k,i} \cdot \text{Power}_{k,i}, \quad (11)$$

где: $\text{Cost}_{k,i}$ – будущие цены, полученные из горизонтов (ARIMA); $\text{Power}_{k,i}$ – часть вектора x представляющие искомые значения мощностей генераторов микросети.

Мы усложняем данный критерий строгими требованиями ($A_{eq} \cdot x = B_{eq}$) для суммарной генерации энергии для покрытия нагрузки на каждый будущий час горизонтов:

$$\sum_{i=1}^{\text{Кол-во. упр. генераторов}} \text{Power}_{k,i} = \text{Load}_k, \quad (12)$$

где: Load_k – общая предсказанная нагрузка микросети на каждый час горизонтов (ARIMA). Также с помощью строгих ограничений, мы устанавливаем начальные условия для Soc в данный момент времени:

$$\text{SOC}_0 = \text{SOC_initial}. \quad (13)$$

С помощью не строгих ограничений ($A \cdot x \leq B$) устанавливается область оптимального заряда/разряда аккумулятора на основе формул (6, 7):

$$\text{Soc}_{\min}^{20\%} \leq \text{SOC}_0 + \sum_{k=1}^{\text{Длина горизонтов}} \text{VSOC}_k \leq \text{Soc}_{\max}^{90\%}, \quad (14)$$

где: VSOC_k – оптимальное изменение Soc на час k .

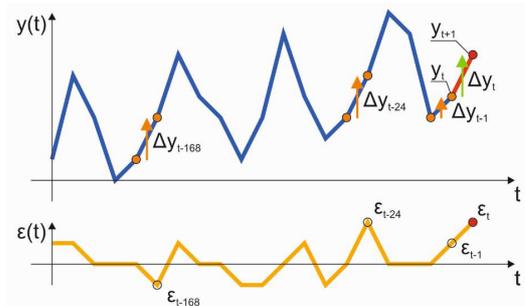


Рис. 3. Принцип работы выбранной ARIMA модели (20), где $y(t)$ – временная серия, $\epsilon(t)$ – ошибка предсказания.

Также вводится дополнительная целочисленная переменная $b_k \in [0;1]$, которая является одной из частей вектора x и ограничивает одновременную зарядку/разрядку аккумуляторов. Ограничения описываются в виде:

$$0 \leq \text{Power}_{k,DIS} \leq \text{Power}_{k,DIS}^{\text{MAX}} \cdot (1 - b_k), \quad (15)$$

$$0 \leq \text{Power}_{k,CH} \leq \text{Power}_{k,CH}^{\text{MAX}} \cdot b_k, \quad (16)$$

где: $\text{Power}_{k,DIS}$, $\text{Power}_{k,CH}$ – часть решения вектора x , которая показывает мощность разрядки/зарядки аккумулятора на k час горизонтов; $\text{Power}_{k,DIS}^{\text{MAX}}$, $\text{Power}_{k,CH}^{\text{MAX}}$ – функциональные лимиты разрядки/зарядки аккумулятора.

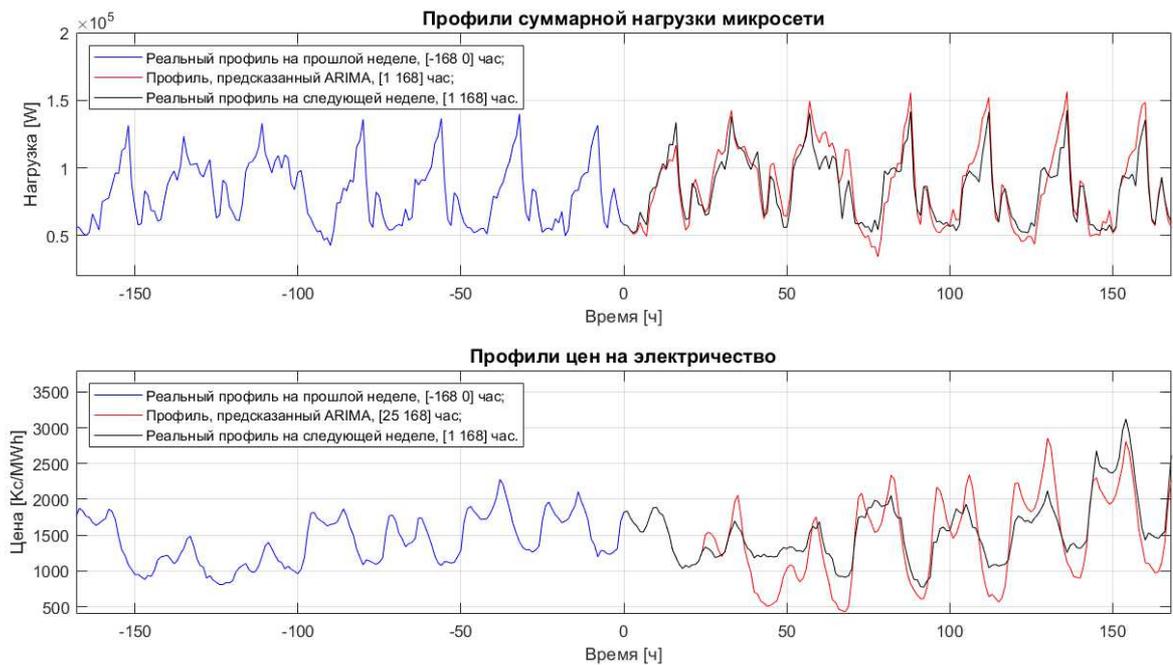


Рис. 4. Профили нагрузки и цены за электричество за прошлую неделю и будущую неделю. Предсказания с помощью модели ARIMA представлены красным цветом

С помощью двухсторонних фиксированных ограничений ($lb \leq x \leq ub$) на решение в виде вектора x , задаются эксплуатационные пределы искомым переменных на каждый час горизонтов:

$$Power_{k,i}^{MIN} \leq Power_{k,i} \leq Power_{k,i}^{MAX}, \quad (17)$$

$$Soc_{min}^{0\%} \leq SOC_k \leq Soc_{max}^{100\%}, \quad (18)$$

$$0 \leq b_k \leq 1. \quad (19)$$

Выходом контроллера является решение MILP в виде вектора, с указаниями для блоков на текущий час ($Power_{1,i}, SOC_1, b_1$). Через час задача оптимизации MILP повторяется снова, при новых полученных горизонтах системы.

Блок генерации горизонтов

Для корректной работы блока минимизации затрат необходимо учитывать будущие значения системы, для того чтобы находить оптимальное решение оптимизации. Например, учитывать будущие значения нагрузок микросетей и цен. Эти значения известны не точно, но могут быть предсказаны.

Временные серии цен за электричество взятые из DAM и общей нагрузки микросети имеют дрейфт и выраженную сезонность (дневную, недельную, годовую). Для предсказания таких серий в эконометрике используются ARIMA модели [9].

На основе изучения этих временных серий была выбрана именно такая структура модели предсказаний:

$$\begin{aligned} &ARIMA([1, 24, 168], 1, [1, 24, 168]): \\ &(1 - \varphi_1 L - \varphi_{24} L^{24} - \varphi_{168} L^{168})(1 - L)^1 y_t = \\ &= c + (1 + \theta_1 L + \theta_{24} L^{24} + \theta_{168} L^{168}) \varepsilon_t, \quad (20) \end{aligned}$$

где: L – лаговый оператор ($L \cdot x_t = x_{t-1}$); y_t – значение временной серии в момент времени t ($\nabla y_t = (1 - L)^1 y_t$); y_{t+1} – предсказание модели ($y_{t+1} = y_t + \nabla y_t$); φ_i, θ_i, c – параметры модели (AR коэффициенты, MA коэффициенты, константа модели); ε_t – ошибка предсказания в момент времени t .

Принцип работы ARIMA модели можно рассмотреть на Рис. 3. Для трансформации в стационарный ряд (во избежание влияния дрейфта) используется предсказание разностей 1 порядка, а не абсолютных значений. В свою очередь расчет предсказанных разностей происходит с использованием сезонностей: рассматриваем вклад предыдущих разностей и предыдущих ошибок предсказаний час назад, день назад и неделю назад.

В связи со сложным расчетом структуры ARIMA модели, параметры были получены с использованием *Econometric Toolbox в Matlab*.

Генерация горизонтов в нашей модели работает, как показано на Рис. 4. Текущий час 0. Система смотрит на предыдущие значения разностей и ошибок предсказаний и шаг за шагом (или час за часом) конструирует новые горизонты с длиной в 7 дней. Для предсказания цен за электричество мы также используем данные с DAM.

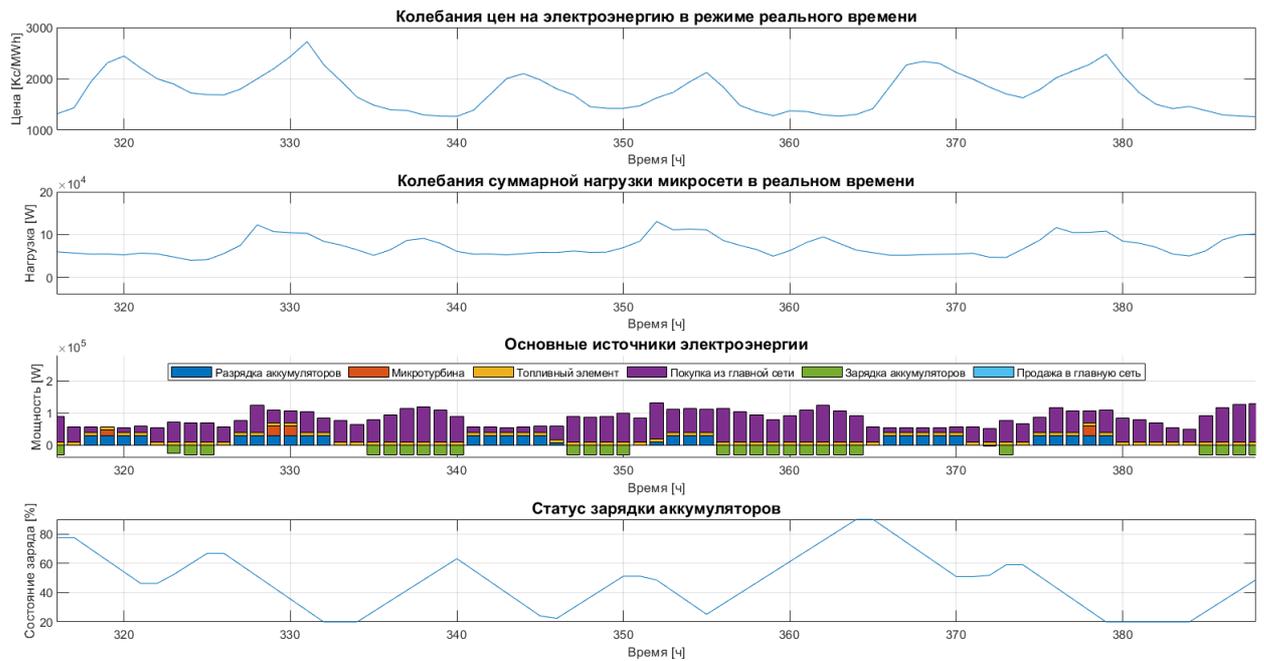


Рис. 5. Графики, отражающие поведения модели с EMPC с горизонтами в 1 день и оригинальными параметрами

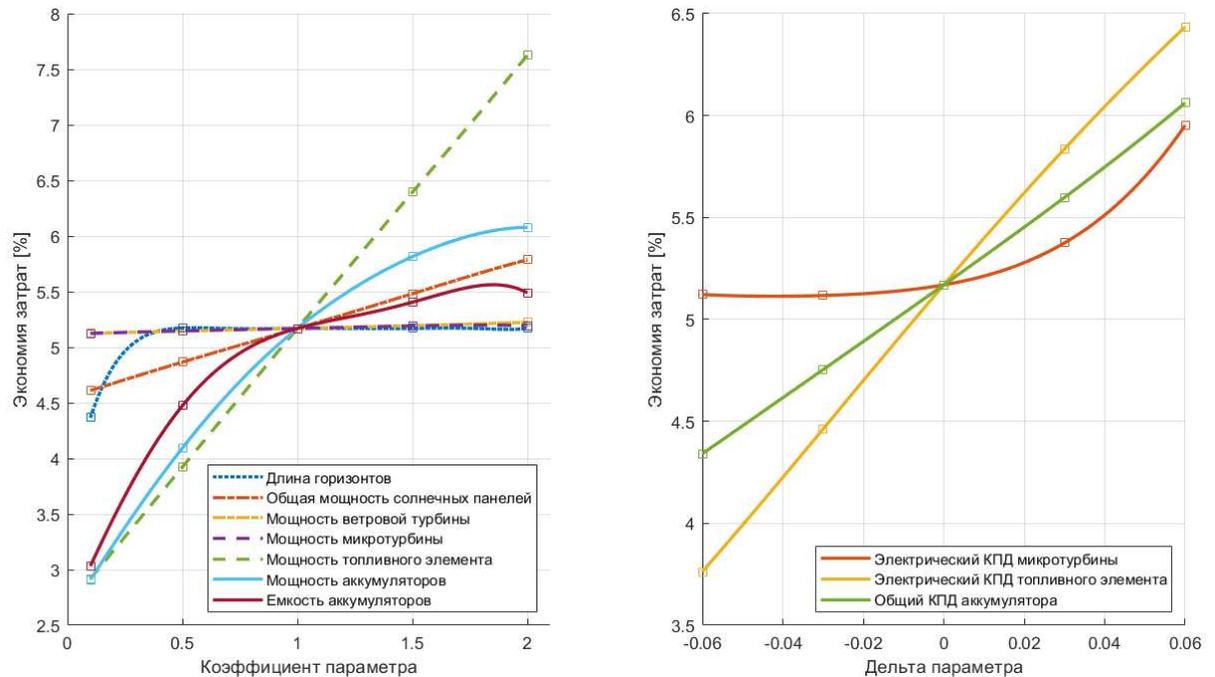


Рис. 6. Графики, отражающие поведения модели с EMPC при изменении параметров умной микросети относительно оригинальных

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ УМНОЙ МИКРОСЕТИ

Проверка работоспособности модели умной микросети

Объединив модель микросети с распределенными генераторами и EMPC, включающий ARIMA модели и MILP, была получена модель умной микросети в Matlab.

Пример работоспособности данной модели умной микросети с оригинальными параметрами системы и горизонтами длиной 1 день можно увидеть на Рис. 5. Когда цена за электричество достигает максимума (например, в момент

времени 330-го часа), система использует энергию из аккумулятора и альтернативные малоэффективные источники энергии. Когда цена достигает минимума на горизонте (например, в момент времени 340-го часа), то энергия в аккумуляторах восполняется, и система отключает альтернативные малоэффективные источники энергии. Также контроллер рассчитывает момент, когда стоит начать зарядку/разрядку аккумулятора.

Влияние параметров системы на качество оптимизации

Различные конфигурации умной микросети приводят к разным общим эксплуатационным затратам. В работе было изучено, как изменения

таких параметров как длина горизонтов, номинальные мощности генераторов, емкость аккумулятора и КПД блоков влияют на общую экономию затрат SC [%], которая рассчитывается по формуле:

$$SC = \frac{Cost_{MG} - Cost_{MG}^{EMPC}}{Cost_{MG}} \cdot 100\%, \quad (21)$$

где: $Cost_{MG}$ – суммарные затраты на эксплуатацию микросети при условии, что вся микросеть питается только от возобновляемых источников энергии и главной энергосети; $Cost_{MG}^{EMPC}$ – суммарные затраты на эксплуатацию микросети при использовании $EMPC$ и всех указанных генераторов на *Рис. 1*.

Средняя экономия затрат умной микросети при стандартных параметрах и длинам горизонтов 3 дня равна 5.17%. Изменяя параметры умной микросети, можно увеличить экономию затрат до 21%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрено обоснование для перехода к умным сетям, которые изменяют свое потребление в соответствии с текущим производством.

Смоделирована микросеть объекта в *Matlab*, находящегося на севере Чешской Республики и объекты которого управляются реальными историческими профилями за 2018 год.

Для этой модели был синтезирован $EMPC$, который включает в себя:

- участок генерации будущих горизонтов, работающий с помощью *ARIMA* моделей;

- участок минимизации затрат микросети, работающий на основе смешано-целочисленного линейного программирования (*MILP*).

Работоспособность модели с $EMPC$ была проверена.

Также был изучен вклад каждого из параметров системы в общую экономию затрат умной микросети. Общая экономия затрат достигает значения 5.17%, а экономия затрат измененной системы достигает значения 21%.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ayaz M.S., Azizipanah-Abarghooee R., Terzija V. European LV microgrid benchmark network: Development and frequency response analysis // 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). 06.2018. С.1–6. DOI:10.1109/ENERGYCON.2018.8398759.
- [2] OTE. Statistics. Normalized Load Profile. 2019. URL: <https://www.ote-cr.cz/en/statistics/electricity-loadprofiles/normalized->

[http://www.jurnal.nips.ru/?set_language=en&date=201903-30;](http://www.jurnal.nips.ru/?set_language=en&date=201903-30) [Дата обращения 9-04-2019].

- [3] Carl C. Calculating Solar Photovoltaic Potential on Residential Rooftops in Kailua Kona, Hawaii: дис. маг. / Carl Caroline. Faculty of the USC graduate school. University of Southern California: University of Southern California, 05.2014.
- [4] Johnson G.L. Wind Energy Systems. Prentice Hall, 1985. ISBN 0139577548.
- [5] Capstone. Datasheet C30 MicroTurbine. Natural Gas. 2019. URL: https://horizonpowersystems.com/wp-content/uploads/2016/03/C30-NatGas_331031E_lowres.pdf; [Дата обращения 10-04-2019].
- [6] Barone L., Kharitonov Z., Roth N. Solid Oxide Fuel Cells Powered by Natural Gas as The Solution for Clean Consumer Energy // University of Pittsburgh Swanson School of Engineering. 2016. Март. С.1–7.
- [7] Rodríguez D.I.H., Myrzik J.M. Economic Model Predictive Control for Optimal Operation of Home Microgrid with Photovoltaic-Combined Heat and Power Storage Systems**This work was supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under the grant number 03EK3547 // IFAC-PapersOnLine. 2017. Т. 50, № 1. С. 10027-10032. ISSN2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2039>.
- [8] Halvgaard R. Model Predictive Control for Smart Energy Systems: дис. канд. / Halvgaard Rasmus. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark. Department of Applied Mathematics, Computer Science, 2014.
- [9] Asteriou D., Hall S.G. Applied econometrics. 2-е изд. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2011.

Павел Михайлович Ведель – магистрант кафедры автоматизации.

Область научных интересов: разработка, проектирование, моделирование и исследование реальных объектов автоматизации.

E-mail: vedel.pavel@mail.ru
630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20



Надежда Юрьевна Овчинникова – магистрант кафедры автоматизации.

Область научных интересов: разработка и проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами.

E-mail: Nadezhda-ov@mail.ru
630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20



Статья получена 13.04.2019.

Modeling and Real Time Optimization of a Smart Microgrid of Power Supply of a District with Distributed Energy Sources

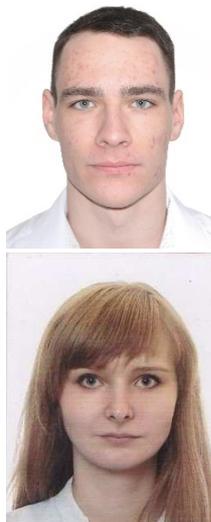
P. M. Vedel, N.Y. Ovchinnikova

Abstract: In power supply systems, renewable energy generators play an increasingly important role. Different control methods are developed for such generators and these methods take into account changes in the price of electricity. This paper presents a variant of energy management based on an economic model predictive control (Economic MPC), which minimizes the cost of microgrid operating with distributed power generation. The controller for coordinating and optimizing the microgrid operation in real time was developed based on a predictive economic model taking into account mixed-integer linear programming and it was then tested in Matlab / Simulink. The controller includes a block for predicting electricity consumption and price profiles of electricity based on ARIMA models. The change in the parameters of the smart microgrid was investigated for overall cost savings.

Keywords: Smart grid, Economic MPC, ARIMA models, Real time pricing.

REFERENCES

- [1] AYAZ, M. S.; AZIZIPANAH-ABARGHOOEE, R.; TERZIJA, V. European LV microgrid benchmark network: Development and frequency response analysis. In: 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). 2018, pp. 1–6. Available from DOI: 10.1109/ENERGYCON.2018.8398759.
- [2] OTE. Statistics. Normalized Load Profile. 2019. URL: https://www.ote-cr.cz/en/statistics/electricity-loadprofiles/normalized-lp?set_language=en&date=201903-30; [Online; accessed 9-04-2019].
- [3] Carl, Caroline. Calculating Solar Photovoltaic Potential on Residential Rooftops in Kailua Kona, Hawaii. Faculty of the UCS graduate school. University of Southern California, 2014. Master's thesis. University of Southern California.
- [4] Johnson G.L. Wind Energy Systems. Prentice Hall, 1985. ISBN 0139577548.
- [5] Capstone. Datashit C30 MicroTurbine. Natural Gas. 2019. URL: https://horizonpowersystems.com/wp-content/uploads/2016/03/C30-NatGas_331031E_lowres.pdf; [Online; accessed 10-04-2019].
- [6] BARONE, Luke; KHARITONOV, Zane; ROTH, Nicholas. Solid Oxide Fuel Cells Powered by Natural Gas as The Solution for Clean Consumer Energy. University of Pittsburgh Swanson School of Engineering. 2016, pp. 1–7.
- [7] Diego I. Hidalgo Rodríguez, Johanna M.A. Myrzik, Economic Model Predictive Control for Optimal Operation of Home Microgrid with Photovoltaic-Combined Heat and Power Storage Systems**This work was supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under the grant number 03EK3547, IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, 2017, Pages 10027-10032, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2039>.
- [8] HALVGAARD, Rasmus. Model Predictive Control for Smart Energy Systems. Kongens Lyngby, 2014. PhD thesis. Technical University of Denmark. Department of Applied Mathematics and Computer Science.
- [9] ASTERIOU, Dimitrios; HALL, Stephen G. Applied econometrics. 2nd ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2011.



Pavel Vedel – master's student of Department of Automatic. Research interests: development, design, modeling and research of real automation objects. Email: vedel.pavel@mail.ru 630073, Novosibirsk, st. Prosp. K. Marksa, h. 20

Nadezhda Ovchinnikova – master's student of Department of Automatic. Research interests: development and design of automated process control systems. Email: Nadezhda-ov@mail.ru 630073, Novosibirsk, st. Prosp. K. Marksa, h. 20

The paper has been received on 13.04.2019.