

УДК 621.316.1.05

АДАПТИВНОЕ КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ АВТОНОМНЫМИ ЭНЕРГОСИСТЕМАМИ МАЛЫХ СЕВЕРНЫХ ПОСЕЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

Исаев Юсуп Ниязбекович¹,
isaev_yusup@mail.ru

Архипова Ольга Владимировна²,
arkh82@mail.ru

Ковалев Владимир Захарович^{2,1},
vz_kovalev@mail.ru

Хамитов Рустам Нуриманович^{3,4},
apple_27@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Югорский государственный университет,
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

³ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

⁴ Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Одной из основных проблем построения энергоэффективных и нересурсоемких систем децентрализованного электроснабжения Арктической зоны и районов Крайнего Севера является прогнозирование потребления электрической энергии малыми северными поселениями. Среди существующих методов, дающих приемлемый по точности результат, можно выделить подходы на базе эконометрического метода ARIMA. Рассмотрен метод на основе разложения Вольда и корреляционных функций стохастического процесса, построена адаптивная модель разностного уравнения, позволяющая прогнозировать процесс энергопотребления активной мощности автономных систем малого поселения на интервале 0–4 часа, за счет сведения стохастического процесса к стационарному Марковскому процессу с короткой памятью.

Цель: построение методики краткосрочного прогноза потребления электрической энергии автономными энергосистемами малых северных поселений с учетом специфики энергопотребления в условиях Арктической зоны и Крайнего Севера на основании стохастического ряда данных об электрической энергии, потребленной поселением за предшествующий период.

Методы: подход к получению краткосрочного прогноза потребления электроэнергии автономными энергосистемами малых северных поселений, который базируется на эконометрическом методе ARIMA. При этом конструируется разностное уравнение для детерминированной и случайной компонент имеющегося стохастического ряда энергопотребления; используются декомпозиция Вольда и корреляционные функции процесса энергопотребления. Для адаптации модели исследуемый стохастический процесс сводится к Марковскому процессу с короткой памятью. Для этого необходимо использовать разностный оператор, который уменьшает относительный вклад детерминированной составляющей процесса потребления.

Результаты. На основе декомпозиции Вольда и корреляционных функций удалось получить модель, дающую краткосрочный прогноз энергопотребления активной мощности на интервал упреждения до 4 часов.

Выводы. На основе декомпозиции Вольда и корреляционных функций стохастического процесса авторам работы удалось получить адаптивную модель разностного уравнения, позволяющую прогнозировать процесс энергопотребления активной мощности автономных систем малого поселения с интервалом упреждения в 4 часа. Стационарность случайного процесса производилась с помощью введения разностного оператора первого порядка, позволяющего уменьшить относительный вклад детерминированной составляющей стохастического ряда. Авторам удалось свести процесс к стационарному Марковскому процессу с короткой памятью. Коэффициенты разложения разностного уравнения оценивались с помощью решения нелинейного уравнения, заключающегося в поиске глобального максимума функции правдоподобия. Построенные 90 % вероятностные границы позволяют говорить об удовлетворительной подстройке адаптивных параметров разностного уравнения для прогнозирования системы. Результат моделирования прогноза с упреждением в 4 часа показывает хорошее согласие с экспериментом.

Ключевые слова:

стохастический ряд, декомпозиция Вольда, автокорреляционная функция, частная корреляционная функция, авторегрессия, скользящее среднее, функция максимального правдоподобия.

Введение

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (далее Стратегия) задает траекторию «перехода к более эффективной энергетике», в том числе «структурную диверсификацию, в рамках которой централизованное энергоснабжение дополняется децентрализованным ...» [1. С. 5]. Как следствие, будет проведена «оптимизация пространственного размещения энергетической инфраструктуры Восточной Сибири, на Дальнем Востоке и в Арктической зоне Российской Федерации, в том числе путем перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, и энергетической эффективности» [1. С. 5–6]. Инструментом решения отмеченных выше задач становится повышение эффективности децентрализованного энергоснабжения удаленных и изолированных территорий на основе использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1. С. 56], что отвечает и общемировым тенденциям [2–6]. Одновременно возникает задача управления взаимовлияющими физически разнородными объектами: источниками генерации, потребителями энергии, неэнергетическими воздействиями внешней среды [7–9]. От взаимодействия подсистем внутри децентрализованных источников генерации зависит эффективность их функционирования [10–13]. Что накладывает определенные требования к построению архитектуры систем управления [14–18].

Отметим, что выделенная в Стратегии Арктическая зона Российской Федерации (АЗ РФ) представляет собой часть Крайнего Севера (КС) и охватывает 9 регионов [19]. Четыре относятся к АЗ РФ полностью, пять – частично. Площадь арктических территорий – 4,8 млн км² (28 % территории страны). Здесь проживает 2,6 млн человек, больше половины населения мировой Арктики [20]. Соответственно, в районах Крайнего Севера проживают около 10 млн человек на площади почти 12 млн км² (более 69 % площади РФ) [21]. На рассматриваемой территории Арктической зоны и Крайнего Севера (АЗиКС РФ) локализовано полезных ископаемых (в процентах от общероссийских): никель – 70 %, кобальт – 75 %, олово – 50 %, алмазы – до 60 %, нефть – 90 %, газ – 80 % и много другое [21].

Перспективы развития сухопутных территорий АЗиКС РФ в существенной мере коррелируются с динамикой Северного морского пути (СМП) [22–24]. Транспортные возможности примыкающей к СМП речной инфраструктуры АЗиКС РФ дают возможность распространить ореал социально-экономического воздействия СМП на значительную глубину северной территории РФ.

Соответственно, возникает необходимость в децентрализованной энергогенерирующей структуре, состоящей из совокупности изолированных электроэнергетических систем, называемой в дальнейшем регионально обособленным электротехническим комплексом (РОЭТК) [25]. Значимость создания и эффективной эксплуатации РОЭТК на территории АЗиКС РФ обусловлена требованиями энергетиче-

ского обеспечения таких энергоемких инфраструктурных проектов, как портовые терминалы, арктическая авиация, навигационное и гидрографическое обеспечение, метеослужбы, система слежения за судоходством (системы управления движением судов), судостроительные и судоремонтные заводы, а также объекты военного назначения, такие как наблюдательные базы Северного флота, пограничные заставы и военные базы [26–29]. На сегодня функционирование указанных объектов обеспечивается через «северный завоз» – это 3,1 млн т груза ежегодно для 3 млн человек, проживающих в 25 северных регионах; причем 75 % грузов – топливно-энергетические ресурсы [30, 31].

Требования к функционированию РОЭТК в условиях АЗиКС РФ определяются совокупностью жестких (по отношению к остальной части территории РФ) природно-климатических и социально-экономических условий [32]:

- сложная сезонно-ориентированная логистика транспортировки грузов, сопряженная с болотистыми почвами; в результате доставка груза может занимать до двух лет и сопряжена со строительством зимников, перевалочных баз, коротким сроком судоходства, использованием транспорта вплоть до гужевого;
- очаговая стратегия построения производственной и социальной инфраструктуры, что в свою очередь приводит к низкой плотности населения (1–2 чел. на 10 км²) и невозможности создания централизованного электроснабжения;
- высокая энерго- и ресурсоемкость региональной производственной деятельности;
- полная зависимость хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения населения от поставок топлива, продовольствия и товаров первой необходимости из других регионов России.

Выделенный класс РОЭТК в условиях АЗиКС РФ обладает целым рядом отраслевых особенностей. Прежде всего, высокая себестоимость производства электрической энергии. «В изолированных системах энергоснабжения Крайнего Севера тарифы на электроэнергию достигают 22–237 р./кВт·ч, а это до 55 раз выше средних по России» [28]. А для ряда территорий «тариф на электроэнергию достигает катастрофически высоких показателей – 600–2000 р./кВт·ч» [28], что обусловлено особенностями логистики «северного завоза» ГСМ. Следующая характерная особенность анализируемой группы РОЭТК – стохастический характер суточного графика потребления электрической энергии, с флуктуациями, достигающими 70–90 % от суточного максимума электропотребления [33, 34], со значительными градиентами изменения потребляемой энергии, вызванными наличием мощной полупроводниковой техники [35, 36] (рис. 1). Ранее исследовано потребление электрической энергии в РОЭТК, расположенном на территории ХМАО-Югра и содержащем 21 малое северное поселение [34]. Оценка электропотребления проведена через интегральные коэффициенты потребления электрической энергии:

K_m – коэффициент максимума, устанавливает связь между средней и максимальной нагрузкой; $K_{з.г.}$ – коэффициент заполнения графика, коэффициент обратный коэффициенту максимума; $K_{ф.г.}$ – коэффициент формы графика, характеризует степень неравномерности графика нагрузки; W , кВт*ч – суточная энергия, потребленная поселением; $P_{ср}$, кВт – средняя суточная мощность электростанции поселения; $P_{ср}$, кВт – среднеквадратичная мощность; P_m , кВт – максимальная мощность.

В результате отмечено [34]: все интегральные коэффициенты потребления электрической энергии для данной группы потребителей имеют значительные разбросы: K_m – от 1,02 до 1,54 – зимой и 1,03–1,53 летом; $K_{з.г.}$ – от 0,35 до 0,89 зимой и 0,36–0,81 летом; $K_{ф.г.}$ – от 1,13 до 2,86 – зимой, и 1,24–2,79 летом. Разброс значений зимнего коэффициента заполнения графика $K_{з.г.}$ достигает 254%! Следовательно, применять для прогнозирования потребления электрической энергии РОЭТК « типовые » графики суточной нагрузки в данном случае недопустимо, поскольку они не обеспечат минимально допустимую достоверность в 80 %.

Выявленные отраслевые особенности рассматриваемого класса РОЭТК приводят к необходимости трактовать РОЭТК как сложную техническую систе-

му, оптимальное управление которой на протяжении жизненного цикла требует количественного прогноза потребления электрической энергии.

Следовательно, актуальна проблема надежного, качественного и эффективного электроснабжения удаленных малонаселенных поселений, отнесенных к районам Крайнего Севера и приравненным к ним территориям.

Построение алгоритма краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии автономными энергосистемами малых северных поселений

Решение отмеченной проблемы лежит в области прогнозирования электропотребления указанных выше объектов, с учетом их «северной» специфики, в том числе: сопоставимость мощностей потребителя и генерирующей части, взаимное влияние потребителя и генерирующей части, вероятностные характеристики поступления–потребления энергии, стохастическая фазная несимметрия. Это позволит минимизировать объемы ГСМ, поставляемых северным завозом, и оптимизировать структуру и состав генерирующего оборудования, выводя его в режимы оптимальной эксплуатации [37–40].

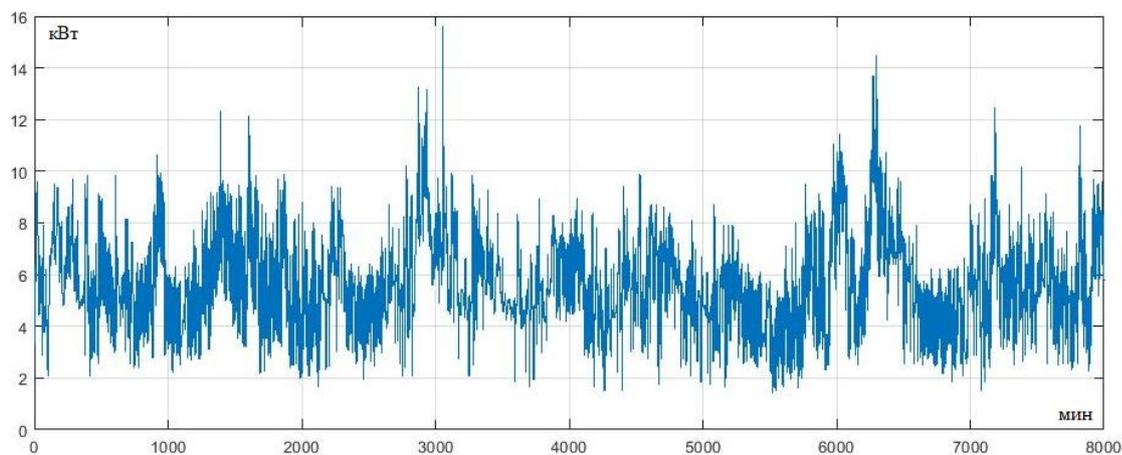


Рис. 1. График потребления электрической энергии с периодом дискретизации $\Delta t=1$ мин.

Fig. 1. Plot of electrical energy consumption with sampling period $\Delta t = 1$ min

Дальнейшее исследование проводится на основании экспериментальных данных, полученных в период 2018–2022 гг. при эксплуатации гибридной электростанции тестового северного малого поселения.

Состав используемого оборудования гибридной электростанции: дизельная электростанция (ДЭС) Cummins 2012 г. выпуска мощностью 26,4 кВт, солнечная электростанция (СЭС) мощностью 15 кВт, накопительные элементы (НЭ), инверторная система, построенная на гибридных трехфазных солнечных инверторах SILA PRO 10000МН и SILA PRO 5000МН, дистанционная система управления и система удаленного мониторинга через модуль SNMP SILA, круглосуточное электроснабжение, загрузка ДЭС – 68 % на периоде работы. Как правило, ДЭС в составе гибридной электростанции работает 4–15 часов при принятом алгоритме управления. ДЭС также исполь-

зуется в качестве аварийного источника или в составе гибридной электростанции для подзарядки накопительных элементов при недостаточном поступлении энергии от солнечной электростанции.

Работа с рассматриваемым рядом потребления электрической энергии (рис. 1) показала, что для достижения требуемой точности прогноза достаточно информации, содержащейся на интервале не более 8000 минут, при использовании предложенного в настоящей работе алгоритма. В примере, рассмотренном в данной статье, используется фрагмент потребления активной мощности тестового малого поселения, представленного в виде стохастического временного ряда z_t , $t=1..N$, $N=8 \cdot 10^3$. Длительность исходного ряда составляет 8000 минут. Интервал измерения – 1 минута, в соответствии с рекомендациями работы [41]. Исходя из принятой стратегии управления,

определяем требуемый горизонт прогноза электропотребления в интервале до 4 часов (рассмотрение собственно стратегии управления не является целью данной статьи).

В связи с требованиями управления технологического процесса РОЭТК преобразуем исходный ряд

таким образом, что интервал в 20 минут заменяется на одну точку, значение преобразованного ряда в которой равняется среднему значению исходного ряда на этом интервале. Получим 400 точек вместо исходного ряда. По абсциссе отложены минуты, а по ординате – единицы мощности, киловатты (рис. 2).

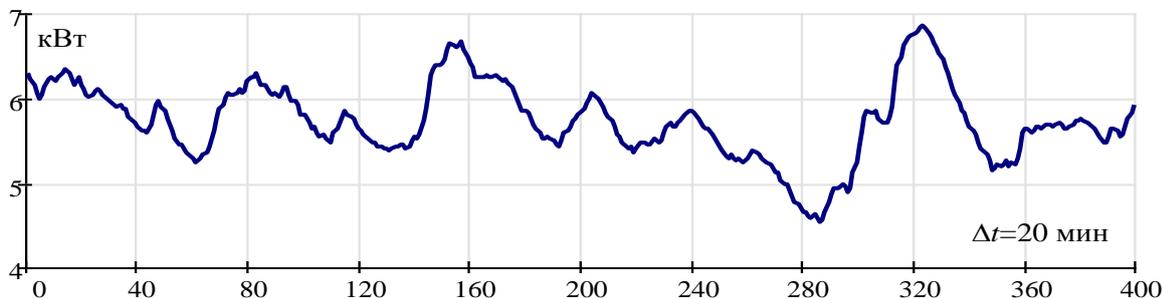


Рис. 2. График потребления электрической энергии с интервалом усреднения в $\Delta t=20$ мин.

Fig. 2. Plot of electrical energy consumption with an averaging interval in $\Delta t=20$ min

Цель работы состоит в конструировании и апробации адаптивного алгоритма идентификации дискретных стохастических прогнозирующих моделей на основе методов корреляционного анализа.

Сконструируем разностную модель стохастического временного ряда для прогнозирования с упреждением до 4 часов. Для этого будем использовать эконометрический алгоритм адаптивного прогнозирования Бокса и Дженкинса – ARIMA [42, 43]. Авторы аббревиатуры подразумевали, что первая часть слова – AR (Auto Regression) – означает авторегрессия, средняя часть I (Integration) – интегрирование, а последняя часть слова MA (Moving Average) – скользящее среднее. Для использования алгоритма ARIMA следует составить разностное уравнение для стохастического процесса. Временной ряд включает в себя как случайные, так и детерминированные составляющие, поэтому ряд можно представить в виде

$$\begin{array}{ccc} AR & & MA \\ \downarrow & & \downarrow \\ z_t = \varphi_1 z_{t-1} + \varphi_2 z_{t-2} + \dots + \varphi_p z_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}, & t = 0, 1, 2, \dots, N. \end{array} \quad (1)$$

В уравнении значение переменной Z зависит от её же значений в предыдущие моменты времени, от её значений с лагом – сдвигом по времени на один шаг назад. Здесь z_t – детерминированная компонента; ε_t – случайная компонента ряда. Количество коэффициентов φ_p и θ_q и их величины в разностном уравнении определяются относительным вкладом детерминированной и случайной составляющих во временной ряд. Очевидно, что в качестве индикатора поведения ряда используются корреляционные функции – автокорреляционная функция ρ_r (АКФ) и частная автокорреляционная функция ϕ_n (ЧАКФ). АКФ и ЧАКФ несут в себе информацию о количестве коэффициентов в разложении (1). Причем АКФ несет информацию о коэффициентах разложения скользящего среднего (Moving Average – MA), а ЧАКФ несет информацию о

коэффициентах разложения авторегрессионной части (Auto Regression – AR). Корреляционные функции являются памятью процесса. Если память долгая, процесс инерционный с преобладание детерминированной составляющей, если память короткая, в ряде преобладает случайная составляющая. Основная идея метода ARIMA заключается в том, чтобы процесс свести к Марковскому процессу первого или второго порядка, к процессу с короткой памятью. То есть чтобы корреляции были только между ближайшими уровнями процесса.

Алгоритм ARIMA включает в себя три этапа [42, 43]:

1. Подготовительный. На этом этапе производится сглаживание данных и центрирование случайной величины.
2. Производится идентификация параметров разностного уравнения модели на основе анализа АКФ и ЧАКФ.
3. Производится оценка и подгонка параметров модели и прогноз.

Подготовительный этап. Освободимся от высокочастотной шумовой составляющей. Для этого будем использовать экспоненциальный фильтр скользящего среднего, учитывающий высокий вклад текущего уровня ряда и уменьшающего по экспоненциальному закону предшествующие – прошлые уровни ряда (рис. 3). Рекомендуемое значения коэффициент $\alpha=0,1$ [44]

$$S_k = \sum_{j=0}^N \alpha(1-\alpha)^{s-j} z_{k-j} + (1-\alpha)S_0, \quad i = 1..N, \quad N = 4,464 \cdot 10^4.$$

Шаг второй шаг подготовительного этапа: Осуществим вычитание средней составляющей, используя формулу (2).

$$z_k = z_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N z_k. \quad (2)$$

Результат центрирования приведен на рис. 4.

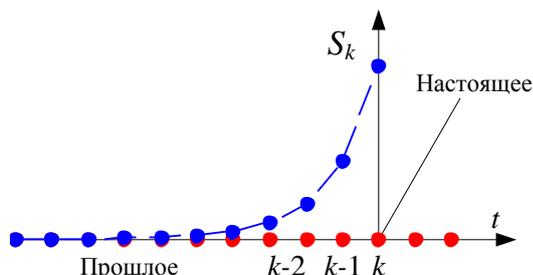


Рис. 3. Действие экспоненциального фильтра. Удельный вес сигнала в настоящий момент времени больше удельного веса всех прошлых значений ряда

Fig. 3. Action of the exponential filter. The specific weight of the signal at the present moment of time is greater than the specific weight of all past values of the series

Второй этап – идентификация процесса. На этом этапе необходимо определить, является ли процесс Марковским, стационарным. Если процесс нестационарен, его необходимо преобразовать, то есть уменьшить его инерционность, снизить относительный вклад детерминированной аддитивной компоненты.

Для определения коэффициентов разложения ряда (1) найдем АКФ и ЧАКФ процесса, предполагая, что случайные компоненты распределены по нормальному закону и имеют нулевое математическое ожидание, и дисперсию σ_ε , $N(0, \sigma_\varepsilon)$, то есть будем считать, что случайная компонента дельта коррелирована. Поскольку мы имеем дискретный набор выборок, будем использовать выборочные АКФ и ЧАКФ. Для этого введем среднее статистическое

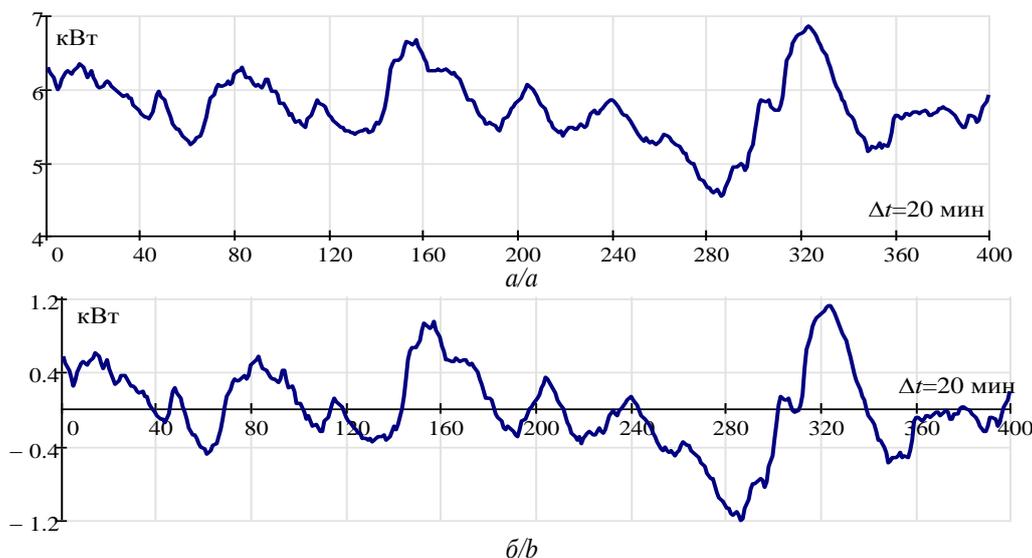


Рис. 4. Ряд после сглаживания (а) и вычитания средней составляющей (б)

Fig. 4. Series after smoothing (a) and subtracting the average component (b)

$$E\langle z \rangle = Z = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N z_k, \text{ или просто } \langle z \rangle,$$

выборочную ковариацию

$$\gamma(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-\tau-1} (z_k - Z)(z_{k+\tau} - Z) = E\langle z_t - Z, z_{t+k} - Z \rangle.$$

Учитывая, что $D = \gamma(0)$ – это дисперсия

$$D = \gamma(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (z_k - X)^2,$$

получим выражения для выборочной автокорреляционной функции (3)

$$\rho_\tau = \frac{\gamma(\tau)}{\gamma(0)} = \frac{\sum_{k=0}^{N-\tau-1} (z_k - Z)(z_{k+\tau} - Z)}{\sum_{k=0}^N (z_k - Z)^2}. \quad (3)$$

Для определения выборочной ЧАКФ будем использовать систему уравнений Юла–Уокера, связывающую АКФ и ЧАКФ [42–45]. Принимая во внимание, что корреляционная функция четная и в нуле равняется единице [20–25], можно записать в виде (4):

$$\begin{pmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \dots & \rho_k \\ \rho_1 & 1 & \rho_{1..} & \dots & \rho_{k-1} \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 & \dots & \rho \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_k & \rho_1 & \rho_{1..} & \dots & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_{k,1} \\ \varphi_{k,2} \\ \varphi_{k,3} \\ \dots \\ \varphi_{k,k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \dots \\ \rho_k \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В частности для первых трех ЧАКФ будем иметь: $\varphi_{1,1} = \rho_1$, далее, используя правило Крамера, получим:

$$\begin{pmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_{2,1} \\ \varphi_{2,2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{pmatrix} \rightarrow \rightarrow \varphi_{2,2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & \rho_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2},$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_{3,1} \\ \varphi_{3,2} \\ \varphi_{3,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \end{pmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \varphi_{3,3} &= \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 & \rho_2 \\ \rho_2 & \rho_1 & \rho_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 \end{vmatrix}} = \\ &= \frac{\rho_3(\rho_1^2 - 1) - \rho_1(2\rho_2 - \rho_2^2 - \rho_1^2)}{(1 - \rho_2)(\rho_2 + (1 - 2\rho_1^2))}. \end{aligned}$$

Поступая аналогично, получаем необходимое количество ЧАФК. Приведем коррелограммы для исследуемого ряда (рис. 5) и проанализируем его свойства.

Представленные на рис. 5 коррелограммы показывают, что процесс нестационарный, так как АКФ и ЧАКФ затухают слабо. Это говорит о том, что существенно превалирует детерминированная составляющая. Для того чтобы получить стационарный процесс, возьмем первую прямую разность – дискретную производную. Очевидно, что при этом относительный вклад детерминированной компоненты уменьшится, а случайной увеличится. В результате получим ряд и его АКФ и ЧАКФ.

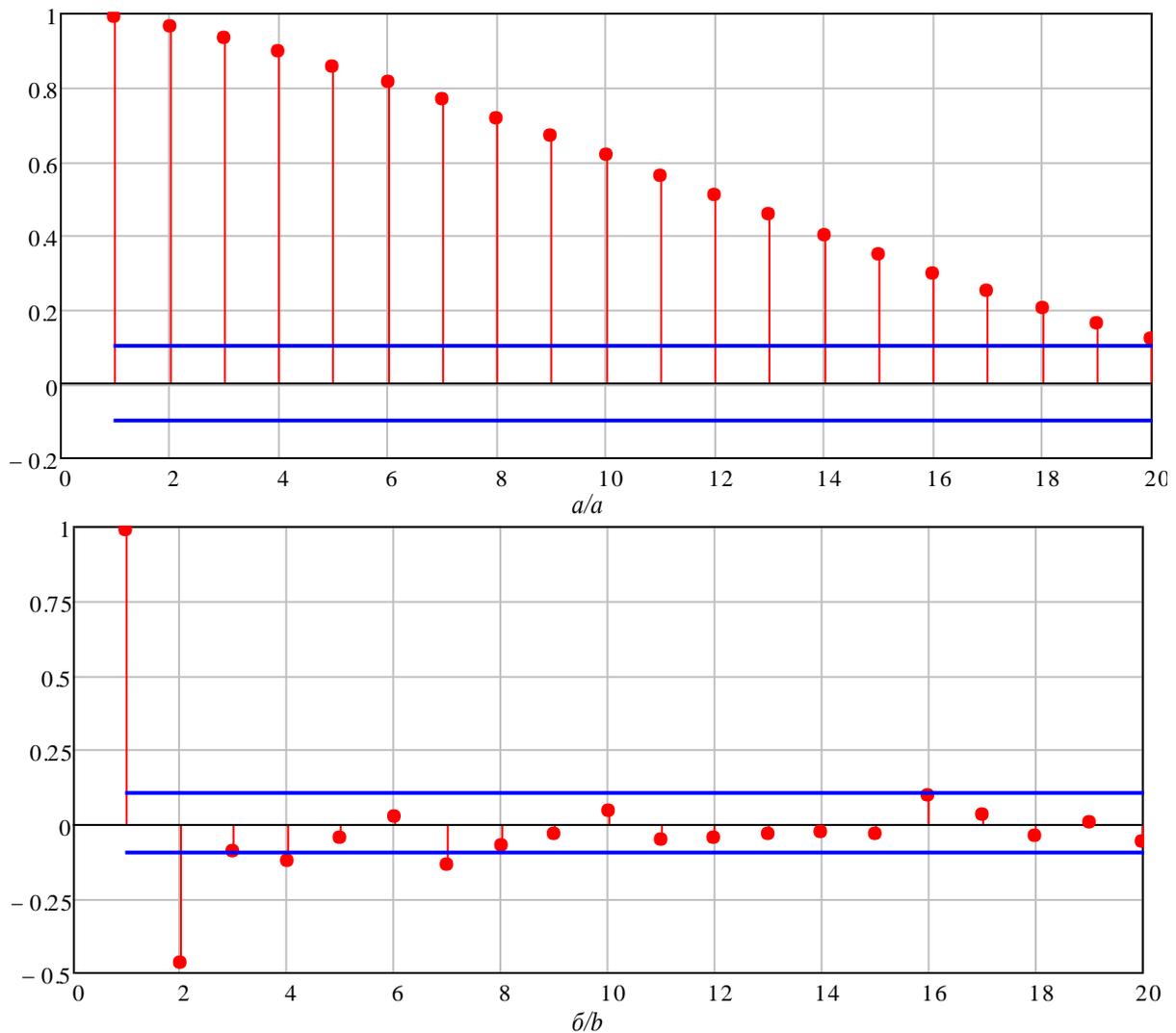


Рис. 5. Коррелограммы для временного ряда (2): а) АКФ, б) ЧАКФ

Fig. 5. Correlograms for the time series (2): a) ACF – Autocorrelation Function, b) PACF – Private Autocorrelation Function

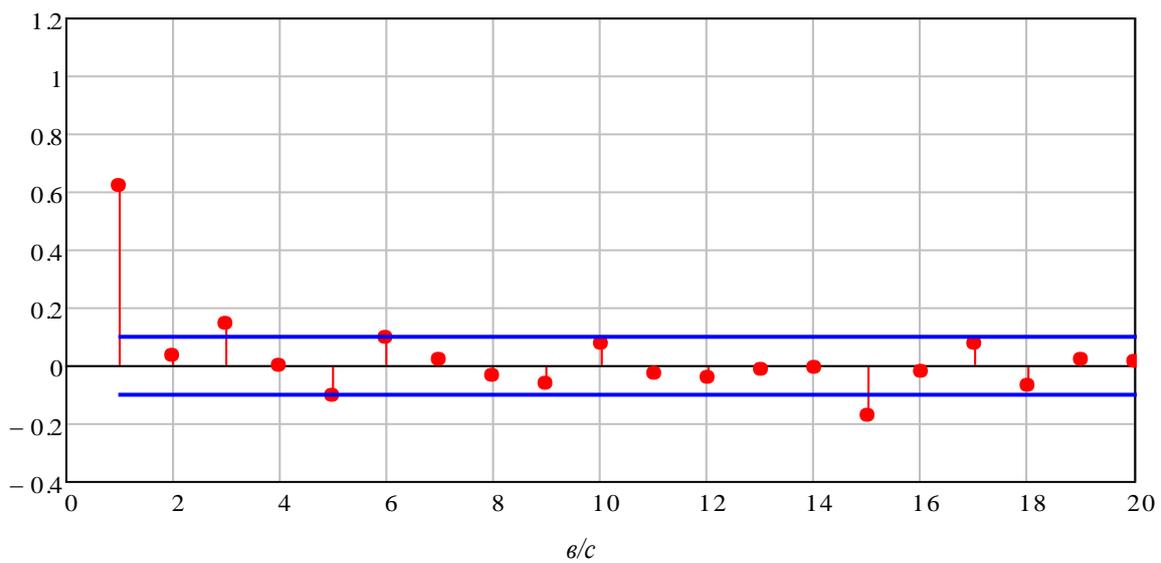
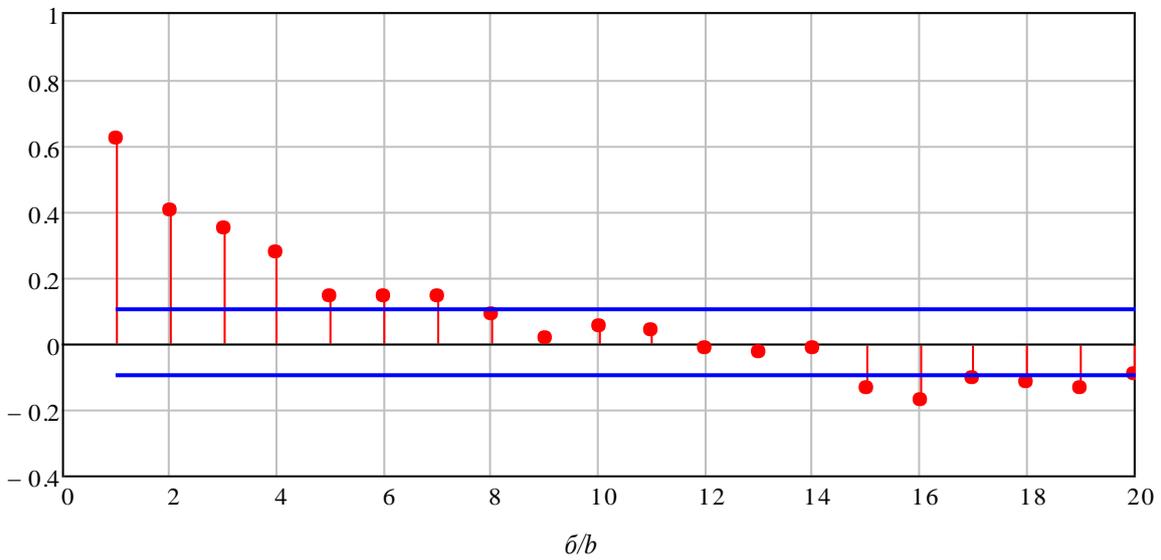
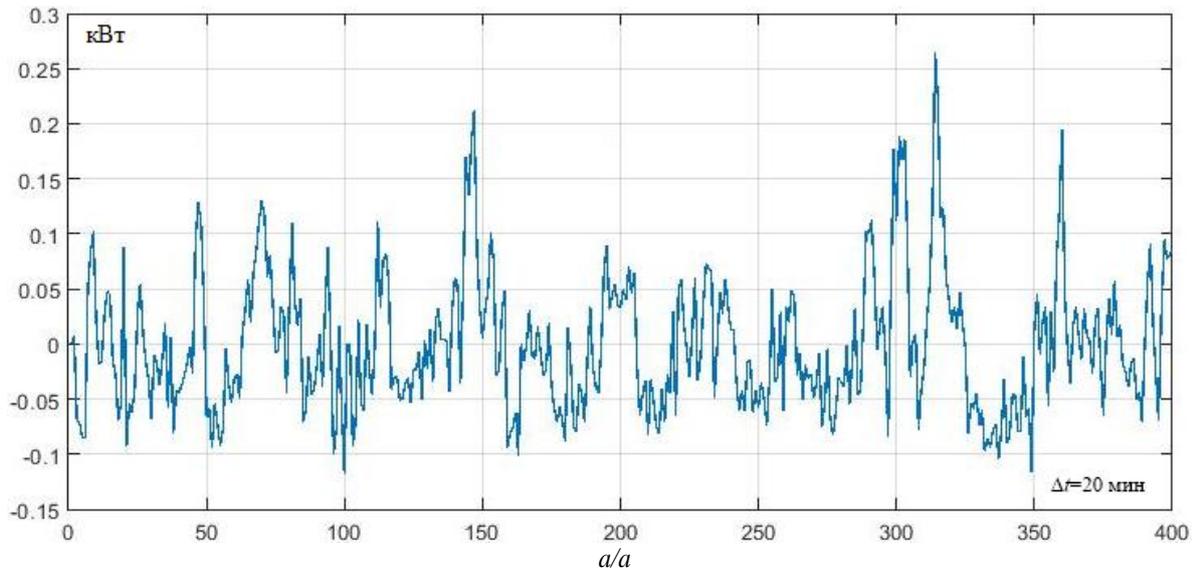


Рис. 6. Коррелограммы для первой разности временного ряда: а) первая разность ряда (2); б) АКФ первой разности; в) ЧАКФ первой разности

Fig. 6. Correlograms for the first difference of the time series: a) first difference of the series (2); b) ACF of the first difference; c) PACF of the first difference

На рис. 6 видно, что АКФ и ЧАКФ спадают заметно быстрее, что позволяет считать процесс стационарным в широком смысле.

Приступим к оценке коэффициентов разложения разностного уравнения (1). Из рис. 6 видно, что ЧАКФ имеет значения, отличные от условного нуля (обозначенного синей линией) только на двух первых лагах. Это дает нам основание считать, что в разностном уравнении в ее регрессионной части будет участвовать только два коэффициента φ , с учетом первой разности и стационарности процесса разностное уравнение можно записать в операторном виде:

$$\begin{array}{ccc} AR(1) & I(1) & MA(1) \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ (1-\varphi B)(1-B)z_t = \varepsilon_t - \theta\varepsilon_{t-1} \rightarrow \varphi(B)z_t = \theta(B)\varepsilon_t, \\ \varphi(B) = (1-\varphi B)(1-B), \theta(B) = (1-\theta B), \\ (1-(1+\varphi)B + \varphi B^2)z_t = \varepsilon_t - \theta\varepsilon_{t-1}. \end{array} \quad (5)$$

Здесь B – оператор запаздывания на один лаг. В развернутом виде последнее уравнение будет выглядеть так:

$$z_t = (1+\varphi)z_{t-1} - \varphi z_{t-2} + \varepsilon_t - \theta\varepsilon_{t-1},$$

или, если выделить разностную часть выражения $dz_t = w_t$, получим:

$$\begin{aligned} z_t &= (1+\varphi)z_{t-1} - \varphi z_{t-2} + \varepsilon_t - \theta\varepsilon_{t-1}, \rightarrow \\ \rightarrow w_t &= z_t - z_{t-1} \rightarrow w_t = \varphi w_{t-1} + \varepsilon_t - \theta\varepsilon_{t-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Последнее выражение w в формуле (6) есть первая разность. Найти коэффициент пропорциональности φ перед первым лагом можно через АКФ. Умножим уравнение первой разности w само на себя, сдвинутое на один лаг. Произведем операцию усреднения E , затем сделаем то же, но со вторым лагом. Учитывая, что случайная величина дельта коррелирована, получим систему уравнений:

$$\rho_1 = \frac{(\varphi-\theta)(1-\varphi\theta)}{1+\theta^2-2\theta\varphi}, \quad \rho_2 = \frac{(\varphi-\theta)(1-\varphi\theta)}{1+\theta^2-2\theta\varphi}\varphi. \quad (7)$$

Значения АКФ для первой разности представлены на рис. 6, и ее значения для первых лагов равны $\rho_1=0,66$, $\rho_2=0,42$. Решение нелинейной системы (7) представлено на рис. 7. Пересечение изолиний поверхностей уравнения (7) $\rho_1(\theta, \varphi)=0,66$ и $\rho_2(\theta, \varphi)=0,42$ дает нам решение $\varphi=0,64$, $\theta=0,052$ – точка на пересечении выделенных прямых.

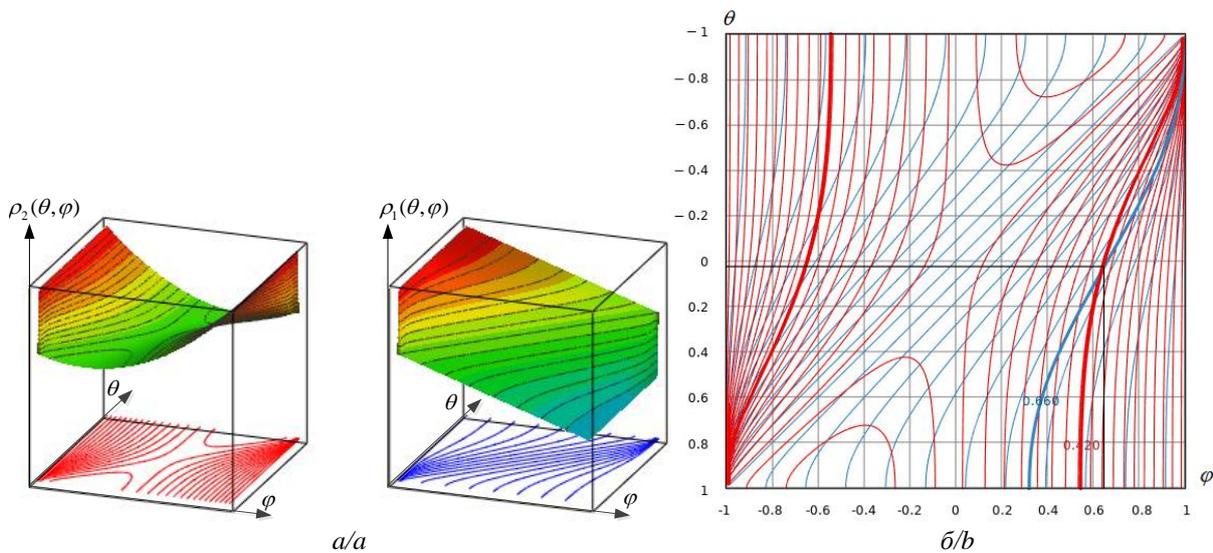


Рис. 7. Решение нелинейного уравнения (7): а) поверхности $\rho_1(\theta, \varphi)$ и $\rho_2(\theta, \varphi)$, и их проекции на горизонтальную плоскость (θ, φ) ; б) синие линии – зависимость $\rho_1(\theta, \varphi)$, красные линии – $\rho_2(\theta, \varphi)$. Пересечение изолиний $\rho_1(\theta, \varphi)=0,66$, $\rho_2(\theta, \varphi)=0,42$ дают значения величин $\varphi=0,64$, $\theta=0,052$

Fig. 7. Solution of the nonlinear equation (7): a) surfaces and their projections on a horizontal plane; b) blue lines dependence of $\rho_1(\theta, \varphi)$, red lines – $\rho_2(\theta, \varphi)$. The intersection of the isolines gives the values of the quantities $\varphi=0,64$, $\theta=0,052$

Поскольку автокорреляционная функция является выборочной, проведем идентификацию параметров φ и θ , используя функцию правдоподобия, которая записывается в виде [42–45–49]:

$$f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) = \frac{1}{\sigma_\varepsilon^n} \exp \left(-\frac{\sum_{k=1}^n \varepsilon_k^2}{2\sigma_\varepsilon^2} \right). \quad (8)$$

После логарифмирования получим

$$\begin{aligned} L(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) &= -n \ln(\sigma_\varepsilon) - \frac{\sum_{k=1}^n \varepsilon_k^2}{2\sigma_\varepsilon^2} = \\ &= -n \ln(\sigma_\varepsilon) + \frac{S(\varphi, \theta)}{2\sigma_\varepsilon^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Изолинии логарифмической функции правдоподобия и сумма квадратов $S(\varphi, \theta)$ совпадают. Значит, минимизируя функцию квадратов, можно найти оценки

максимального правдоподобия φ и θ . Последовательно изменяя значения φ и θ в интервале от -1 до 1 , строим функцию суммы квадратов $S(\varphi, \theta)$ и находим

минимум этой функции. На рис. 8, б представлены значения коэффициентов $\varphi=0,647$, $\theta=0,052$, что совпадает с предыдущей оценкой.

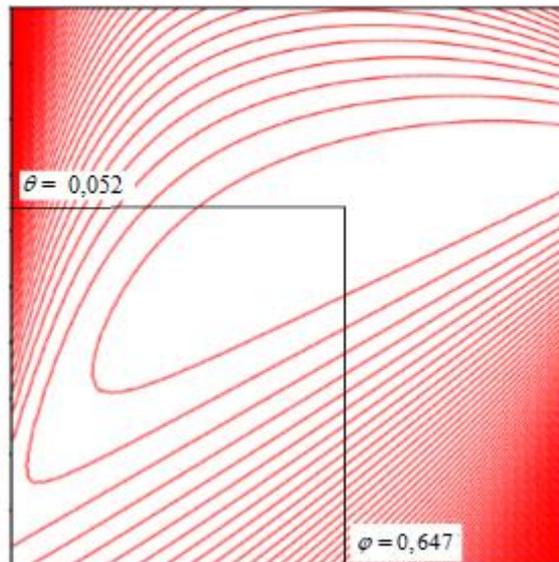
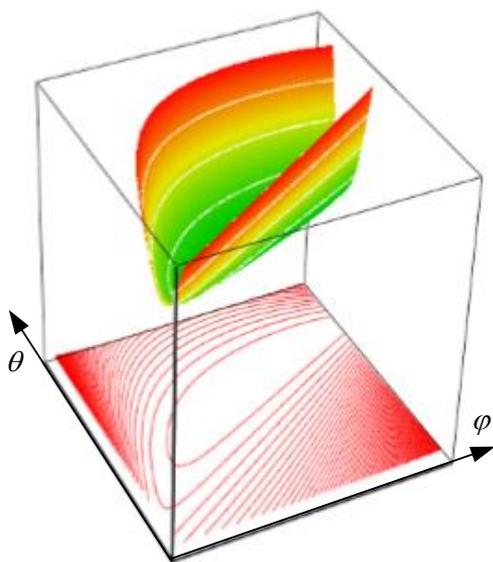


Рис. 8. а) функция $S(\varphi, \theta)$; б) минимальное значение $S(\varphi, \theta)$
 Fig. 8. a) function $S(\varphi, \theta)$; b) minimum value $S(\varphi, \theta)$

Таким образом, оценки коэффициентов в регрессионной части и в части скользящего среднего уравнения (5) определены.

Подставив выражение (10) в (11), получим соотношение между коэффициентами π_t и ψ_t в виде (12)

Будем искать решения разностного уравнения (5). Искать решения разностных уравнений (5), (6) удобно в двух видах: в виде фильтра (рис. 9) с коэффициентами ψ_t , на вход которого подаются импульсы случайной компоненты ε_k . Такое разложение принято называть декомпозицией Вольда [42–45]

$$\left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \psi_k B^k\right) \left(1 - \sum_{k=1}^{\infty} \pi_k B^k\right) = 1. \quad (12)$$

Раскрывая скобки и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях B , получим связь между коэффициентами [50, 51]

$$z_t = \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \psi_k B^k\right) \varepsilon_t = \varepsilon_t + \psi_1 \varepsilon_{t-1} + \psi_2 \varepsilon_{t-2} + \psi_3 \varepsilon_{t-3} \dots \quad (10)$$

$$B \begin{cases} \psi_1 = \pi_1 \\ B^2 \psi_2 = \pi_2 + \pi_1 \psi_1 & \pi_2 = \psi_2 - \pi_1 \psi_1 \\ B^3 \psi_3 = \pi_3 + \pi_2 \psi_1 + \pi_1 \psi_2 & \pi_3 = \psi_3 - \pi_2 \psi_1 - \pi_1 \psi_2 \\ \dots & \dots \\ B^k \psi_k = \pi_k + \pi_1 \psi_{k-1} + \dots + \pi_{k-1} \psi_1 & \pi_k = \psi_k - \pi_{k-1} \psi_1 - \dots - \pi_1 \psi_{k-1} \end{cases} \quad (13)$$

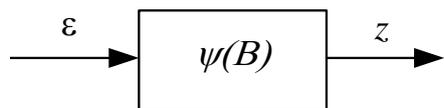


Рис. 9. Фильтр решения (10)
 Fig. 9. Filter for (10) solution

Заметим, что, подставляя решение (10) в (5)

Или в виде представления случайной компоненты ε через сумму значений предыдущих уровней ряда z (рис. 10)

$$\begin{aligned} (1 - \varphi B)(1 - B) z_t &= \varepsilon_t - \theta \varepsilon_{t-1} \rightarrow \\ \rightarrow (1 - \varphi B)(1 - B) &= \left(1 - \sum_{k=1}^{\infty} \pi_k B^k\right) \end{aligned}$$

и подставляя вместо B единицу, получим, что сумма коэффициентов π_t равняется единице:

$$\varepsilon_t = \left(1 - \sum_{k=1}^{\infty} \pi_k B^k\right) z_t = z_t - \pi_1 z_{t-1} - \pi_2 z_{t-2} - \pi_3 z_{t-3} \dots \quad (11)$$

$$1 = \sum_{k=1}^{\infty} \pi_k. \quad (14)$$

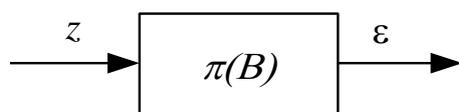


Рис. 10. Фильтр решения (11)
 Fig. 10. Filter for solution (11)

Подставим ряд (11) в (5) и найдем коэффициенты разложения ряда (11)

$$(1 - (1 + \varphi)B + \varphi B^2) \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \psi_k B^k\right) = 1.$$

Раскрывая скобки, получим:

$$\begin{aligned} & (1 - (1 + \varphi)B + \varphi B^2) \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \psi_k B^k \right) = \\ & = 1 + (\psi_1 - (1 + \varphi))B + (\psi_2 + (\varphi - (1 + \varphi)\psi_1))B^2 + \\ & \quad + (\psi_3 + (\varphi\psi_1 - (1 + \varphi)\psi_2))B^3 + \dots \end{aligned}$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях B , получим

$$\begin{cases} B & \psi_1 = \varphi + 1 - \theta, \\ B^2 & \psi_2 = (\varphi + 1)\psi_1 - \varphi. \end{cases} \quad (15)$$

Для всех коэффициентов с индексом больше 2 выполняется соотношение

$$B^k \mid k \geq 3, \quad (1 - (1 + \varphi)B + \varphi B^2) \psi_k = 0.$$

Подставляем значения $\varphi=0,64$, $\theta=0,052$ в (15) и получаем коэффициенты ψ_k . Приведем в табл. 1 первые десять коэффициентов декомпозиции Вольда.

Таблица 1. Коэффициенты декомпозиции Вольда

Table 1. Wold decomposition coefficients

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ψ_k	1,674	2,112	2,397	2,582	2,702	2,78	2,831	2,864	2,886	2,9

Используя связь коэффициентов ψ_k и π_k по формулам (11), находим коэффициенты π_k . Их всего три:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \psi_1 = 1,674, & \pi_2 &= \psi_2 - \psi_1 \pi_1 = -0,69; \\ \pi_3 &= \psi_3 - \psi_2 \pi_1 - \psi_1 \pi_2 = -0,017. \end{aligned}$$

Очевидно, что проверка (12) выполняется, так сумма коэффициентов π_k равняется единице. Также выполняется соотношение (10), если подставить вместо B любую величину меньше единицы.

Теперь можно записать формулу прогноза на интервал упреждения l , используя представления z через прошлые его значения, используя формулу (9)

$$\begin{aligned} z_t &= \pi_1 z_{t-1} + \pi_2 z_{t-2} + \pi_3 z_{t-3} + \varepsilon_t; \\ z_t &= 1,674 z_{t-1} - 0,69 z_{t-2} - 0,017 z_{t-3} + \varepsilon_t. \end{aligned} \quad (16)$$

Приведем действие полученного решения (16) на исследуемом ряде (рис. 11). Выберем в качестве конечных точек процесса лаги с номером $k=123$, $k=165$, $k=183$. В прогнозе на интервале упреждения l будут участвовать три уровня. Результат расчетов с упреждениями, равными $l=12$ точкам, что соответствует 4 часам, приведен на рис. 12.

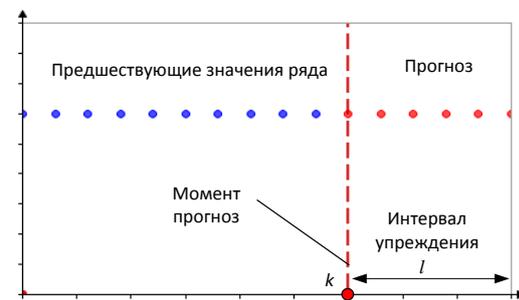


Рис. 11. Пояснения в тексте

Fig. 11. Explanations in the text

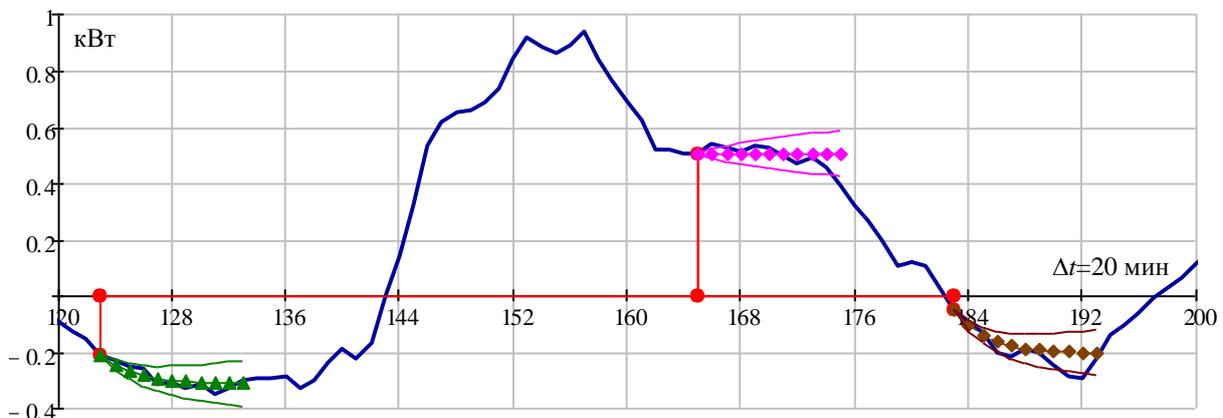


Рис. 12. Маркерами обозначены прогнозы ряда для точек $k=123$ (зеленый), $k=165$ (сиреневый), $k=183$ (коричневый) с упреждением $l=15$ минут, с 90 % вероятностной границей. Сплошными тонкими линиями показаны 90 % пределы нормального распределения

Fig. 12. Markers indicate the forecasts of the studied series for the points $k=123$ (green), $k=165$ (purple), $k=183$ (brown), with a lead of $l=15$ minutes, with a 50 % probability limit. Solid thin lines show 90 % normal distribution limits

Приведем расчет доверительных интервалов для каждого прогноза. Можно показать, что дисперсия ошибки прогноза определяется выражением (17) [42]

$$V(l) = \left(1 + \sum_{k=1}^{l-1} \psi_k^2 \right) \sigma_\varepsilon^2. \quad (17)$$

В частности, для исследуемого ряда получаем значения, первые десять из которых приведены в табл. 2.

Таблица 2. Относительная дисперсия ошибки прогноза

Table 2. Relative variance of forecast error

l	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{V(l)}{\sigma_\varepsilon^2}$	1	3,8	8,26	14,0	20,67	28	35,7	43,7	60,25	68,7

Используя предположение, что ε_k подчиняется нормальному закону, и считая, что прогноз – это

среднее значение со стандартным отклонением (13), приведем условные распределения вероятностей будущих значений (рис. 13):

$$z_{k+l} = z_k(l) \pm u_{\varepsilon/2} \sqrt{\left(1 + \sum_{k=1}^{l-1} \psi_k^2\right) \sigma_\varepsilon}$$

Здесь $u_{\varepsilon/2}$ – квантиль уровня $1-\varepsilon/2$ стандартного нормального распределения (рис 13). Ниже приведены значения для

$$z_{k+l} = z_k(l) \pm 1.96 \sqrt{\left(1 + \sum_{k=1}^{l-1} \psi_k^2\right) \sigma_\varepsilon};$$

$$z_{k+l} = z_k(l) \pm 0.674 \sqrt{\left(1 + \sum_{k=1}^{l-1} \psi_k^2\right) \sigma_\varepsilon}. \quad (14)$$

Здесь σ_ε – выборочное стандартное отклонение белого шума; вычисляется дисперсия белого шума с помощью формулы (8) – декомпозиция Вольда. Если декомпозицию (8) умножить на себя справа, а с левой стороны взять операцию усреднения, считая, что шум дельта коррелирован, то в результате получим:

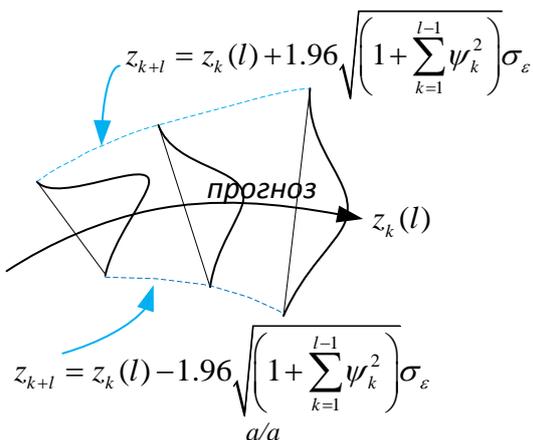


Рис. 13. Для нормального распределения выделены области доверительных интервалов от $-1,96$ до $1,96$, 95 % площади под кривой (голубой цвет) (а), и от $-0,674$ до $0,674$, 50 % площади под кривой (оранжевый) (б)

Fig. 13. For normal distribution, areas of confidence intervals from $-1,96$ to $1,96$, 95 % of area under the curve (blue) (a), and from $-0,674$ to $0,674$, 50 % of area under the curve (orange) are highlighted (b)

$$\gamma(0) = \sigma_z^2 = \left(1 + \psi_1^2 + \psi_2^2 + \psi_3^2 + \dots\right) \sigma_\varepsilon^2 = \left(1 + \sum_{k=1}^N \psi_k^2\right) \sigma_\varepsilon^2.$$

В соответствии с выборочной ковариацией (2) и коэффициентами разложения Вольда, получаем дисперсию процесса и дисперсию шума.

$$\gamma(0) = \sigma_z^2 = 0,076, \quad \left(1 + \sum_{k=1}^N \psi_k^2\right) = 3,407 \cdot 10^3,$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{\sigma_z^2}{\left(1 + \sum_{k=1}^N \psi_k^2\right)} = 0,047, \quad \sigma_\varepsilon = 1,38 \cdot 10^{-5}.$$

Подставляя полученные значения σ_ε в формулу (14), строим вероятностные пределы. Графические результаты 95 % вероятностных границ для прогнозов исследуемого ряда приведены на рис. 6.

После всех обратных преобразований получаем исходный временной ряд с прогнозами, представленным на рис. 14.

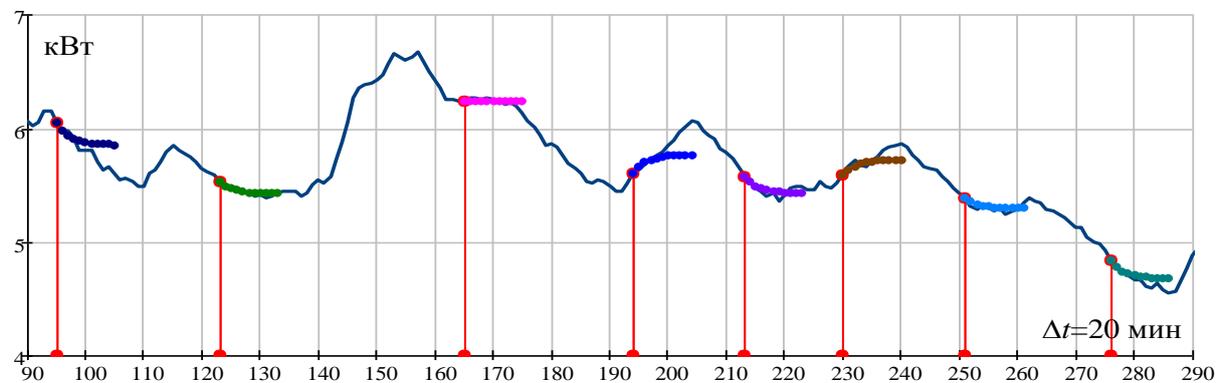
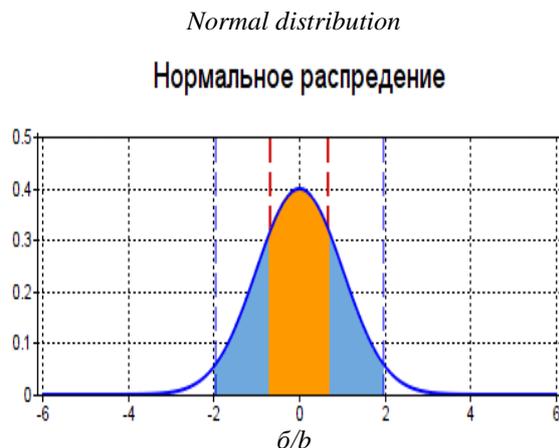


Рис. 14. Прогноз временного ряда с усреднением в 20 мин с упреждением до 4 часов. Ряд демонстрирует удовлетворительную работу алгоритма. В качестве примера цветными маркерами приведены прогнозы в точках от 95 до 280 минут

Fig. 14. Forecast of a time series with an average of 20 minutes with a lead up to 4 hours. The series demonstrates the satisfactory performance of the algorithm. As an example, colored markers show forecasts at points from 95 to 280 minutes

Заключение

В представленном материале статьи изложен оригинальный подход по разработке дискретных стохастических прогнозирующих моделей и алгоритмов их адаптивной идентификации методами корреляционного анализа. Предложенный подход позволяет решать задачу краткосрочного прогнозирования энергопотребления изолированных поселений с учетом специфики энергосистемы.

На основе декомпозиции Вольда и корреляционных функций стохастического процесса авторам работы удалось получить адаптивную модель разностного уравнения, описывающего детерминированную и случайную компоненты стохастического ряда, позволяющую прогнозировать процесс энергопотребления автономных систем малого поселения с интервалом упреждения до 4 часов. Стационарность случайного процесса производилась с помощью введения разностного оператора первого порядка, позволяющего уменьшить относительный вклад детерминиро-

ванной составляющей и тем самым свести процесс к стационарному Марковскому процессу с короткой памятью. Весовые коэффициенты разложения разностного уравнения оценивались с помощью корреляционных функций и верифицировались с помощью решения нелинейного уравнения, заключающегося в поиске глобального максимума функции наибольшего правдоподобия. Поскольку полученные решения являются результатом случайного процесса, рассчитывалось отклонение случайной величины от его математического ожидания – дисперсия случайной величины, и строились доверительные интервалы. Построенные 50 и 90 % вероятностные границы позволяют говорить об удовлетворительной подстройке адаптивных параметров разностного уравнения для прогнозирования системы. Результат моделирования прогноза с упреждением до 4 часов показывает удовлетворительное согласие с данными стохастического ряда, усредненными во временном интервале в 20 минут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года // Министерство энергетики РФ. URL: <http://minenergo.gov.ru/> (дата обращения: 11.07.2022).
2. Siamanta Z.C. Conceptualizing alternatives to contemporary renewable energy development: Community Renewable Energy Ecologies (CREE) // *Journal of Political Ecology*. – 2021. – V. 28. – № 1. – P. 47–69. DOI: 10.2458/jpe.2297.
3. Wang J., Zhang S., Zhang Q. The relationship of renewable energy consumption to financial development and economic growth in China // *Renewable Energy*. – 2021. – V. 170. – P. 897–904. DOI: 10.1016/j.renene.2021.02.038.
4. Ansari M.A., Haider S., Masood T. Do renewable energy and globalization enhance ecological footprint: an analysis of top renewable energy countries? // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – V. 28. – № 6. – P. 6719–6732. DOI: 10.1007/s11356-020-10786-0.
5. Multifactorial components analysis of the renewable energy sector in the oecd countries and managerial implications / A.M. Androniceanu, I. Georgescu, C. Dobrin, I.V. Dragulanesu // *Polish Journal of Management Studies*. – 2020. – V. 22. – № 2. – P. 36–49. DOI: 10.17512/pjms.2020.22.2.03.
6. Ali A., Audi M., Roussel Y. Natural resources depletion, renewable energy consumption and environmental degradation: a comparative analysis of developed and developing world // *International Journal of Energy Economics and Policy*. – 2021. – V. 11. – № 3. – P. 251–260. DOI: 10.32479/ijeep.11008.
7. Alola A.A., Alola U.V., Akadiri S.S. Renewable energy consumption in Coastline Mediterranean Countries: impact of environmental degradation and housing policy // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – V. 26. – № 25. – P. 25789–25801. DOI: 10.1007/s11356-019-05502-6.
8. Oanh T.T.K., Quoc N.T., Dieu P.T.N. Renewable energy, foreign direct investment, economic growth, and environmental degradation in Asian countries // *International Journal of Energy, Environment and Economics*. – 2021. – V. 28. – № 2. – P. 87–102.
9. Design and optimal energy management of community microgrids with flexible renewable energy sources / N. Tomin, V. Shakirov, A. Kozlov, D. Sidorov, V. Kurbatsky, C. Rehtanz, E.E.S. Lora // *Renewable Energy*. – 2022. – V. 183. – P. 903–921. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.024.
10. Economy-environment-energy performance evaluation of CCHP microgrid system: a hybrid multi-criteria decision-making method / H. Zhao, B. Li, X. Wang, H. Li, S. Guo, W. Xue, H. Lu, Y. Wang // *Energy*. – 2022. – V. 240. – P. 122830. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122830.
11. Assessment of microgrid potential in Southeast Asia based on the application of geospatial and microgrid simulation and planning tools / P. Bertheau, M.M. Hoffmann, A. Eras-Almeida, P. Blechinger // *Green Energy and Technology*. – 2020. – P. 149–178. DOI: 10.1007/978-3-030-41952-3_7.
12. Microgrid systems: towards a technical performance assessment frame / S. Marchand, J. Ungerland, C. Monsalve, S. Ruhe, T. Reimann, W. Heckmann, H. Lauer, C. Krauß // *Energies*. – 2021. – V. 14. – № 8. – P. 2161. DOI: 10.3390/en14082161.
13. Multi-energy microgrid optimal operation with integrated power to gas technology considering uncertainties / A. Mobasseri, A.A. Ghadimi, M. Tostado-Véliz, F. Jurado, M. Reza Miveh // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – V. 333. – P. 130174. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130174.
14. Hemmati R., Mehrjerdi H., Nosratabadi S.M. Resilience-oriented adaptable microgrid formation in integrated electricity-gas system with deployment of multiple energy hubs // *Sustainable Cities and Society*. – 2021. – V. 71. – P. 102946. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102946.
15. Hierarchical energy optimization management of active distribution network with multi-microgrid system / S. Wenzhi, H. Zhang, L. Xinyang, M.-L. Tseng, Z. Weipeng // *Journal of Industrial and Production Engineering*. – 2021. DOI: 10.1080/21681015.2021.1972478.
16. Multi-microgrid energy management systems: architecture, communication, and scheduling strategies / B. Zhou, J. Zou, D. Xu, C.Y. Chung, H. Wang, N. Liu, N. Voropai // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. – 2021. – V. 9. – № 3. – P. 463–476. DOI: 10.35833/MPCE.2019.000237.
17. An economical energy management strategy for viable microgrid modes / S. Abid, N. Javaid, T.A. Alghamdi, A. Haseeb, Z. Wadud, A. Ahmed // *Electronics (Switzerland)*. – 2019. – V. 8. – № 12. – P. 1442. DOI: 10.3390/electronics8121442.
18. An expected-cost realization-probability optimization approach for the dynamic energy management of microgrid / J. Zhu, Y. Zhuo, J. Chen, Y. Guo, X. Mo, M. Liu // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2022. – V. 136. – P. 107620. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107620.
19. Постановление Правительства РФ от 16.11.2021 N 1946 «Об утверждении перечня районов Крайнего Севера и местностей, приравненных к районам Крайнего Севера». URL: <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/71874.html?ysclid=la4ww4m40735472096> (дата обращения: 11.06.2022).
20. Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ) – Техническая Библиотека. URL: <http://Neftegaz.RU> (дата обращения: 11.06.2022).
21. Экономические и социальные показатели районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей в 2000–2021 годах. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13279> (дата обращения: 13.02.2023).

22. Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года (с изменениями на 16 декабря 2021 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/552378463?marker=656010> (дата обращения: 11.06.2022).
23. Федеральный закон «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации» от 13.07.2020 N 193-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357078/ (дата обращения: 11.06.2022).
24. Распоряжение Правительства РФ от 1 августа 2022 г. N 2115-р Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 г. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405010751/?ysclid=le33j7vgk194804839> (дата обращения: 13.02.2023).
25. Архипова О.В. Принципы и средства исследования регионально обособленного электротехнического комплекса с позиций системного анализа // Омский научный вестник. – 2020. – № 3 (171). – С. 42–46. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-42-46. – EDN IAPUWW.
26. Стратегия развития Арктической зоны России и обеспечения национальной безопасности до 2035 года. URL: <https://www.arctic2035.ru/> (дата обращения: 11.06.2022.)
27. Моргунова М.О., Соловьев Д.А. Энергоснабжение Российской Арктики: углеводороды или ВИЭ? // Энергетическая политика. – 2016. – № 5. – С. 44–51.
28. Киушкина В.Р. Оптимизация локальной энергетики децентрализованных территорий северных регионов через укрепление позиций энергетической безопасности (на примере Республики Саха (Якутия)) // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9. – № 6. – С. 101.
29. О государственной программе Республики Саха (Якутия) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности населения Республики Саха (Якутия) на 2020–2024 годы» от 06 ноября 2019. URL: <http://docs.cntd.ru> (дата обращения: 09.02.2023).
30. Проект Федерального закона «О северном завозе» (подготовлен Минвостокразвития России 21.08.2022). URL: <https://garant.ru> (дата обращения: 09.02.2023).
31. Рывкина М.В. Социально-экономический прогноз районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 7-3 (121). – С. 194–197. DOI: 10.23670/IRJ.2022.121.7.115.
32. Соколов Ю.И. Риски северного завоза // Проблемы анализа риска. – 2019. – Т. 16. – № 4. – С. 32–47. URL: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-4-32-47> (дата обращения: 09.02.2023).
33. Анализ графиков нагрузки потребителей децентрализованных зон электроснабжения предприятия / О.В. Архипова, Е.А. Дюба, Ю.Д. Евстегнеева, В.З. Ковалев, А.О. Парамзин, О.А. Петухова // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 8 (59). – С. 23–27.
34. Модель регионально обособленного электротехнического комплекса с учетом графиков электрической нагрузки потребителей / Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев, О.В. Архипова, С.С. Есин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 12-2. – С. 200–204.
35. Rani M.D., Rao M.V.G., Prakash P.S. Power quality assessment in grid connected mode hybrid microgrid with various loads // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2021. – V. 99. – № 18. – P. 4241–4252.
36. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected / L. Ye, P. Lu, Y. Zhao, B. Dai, Y. Tang // Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao. – 2021. – V. 41. – № 18. – P. 6189–6197. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.202599.
37. Elkholy A. Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems // Solar Energy. – 2019. – V. 183. – P. 315–326. DOI: 10.1016/j.solener.2019.03.009.
38. A novel unbalanced power flow analysis in active AC-DC distribution networks considering PWM convertors and distributed generations / S. Mousavizadeh, M.-R. Haghifam, T. Ghanizadeh Bolandi, A. Dadashzade, A. Alahyari // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2022. – V. 138. – P. 107938. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107938.
39. Optimal configuration of wind-solar-hydrogen multi-energy complementary microgrid with demand side / W. Chen, W. Fu, Y. Han, Q. Li, L. Huang, C. Xu // Xinan Jiaotong Daxue Xuebao. – 2021. – V. 56. – № 3. – P. 640–649. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20200163.
40. Voltage stability enhancement in grid-connected microgrid using enhanced dynamic voltage restorer (EDVR) / A. Iqbal, A. Waqar, S. Haider, A. Ayoub, A. Ul-Haq, M. Zahid // AIMS Energy. – 2021. – V. 9. – № 1. – P. 150–177. DOI: 10.3934/ENERGY.2021009.
41. Влияние длительности интервала измерений потребления электроэнергии на точность определения максимальной нагрузки по нагреву / И.И. Надтока, И.А. Звоникова, С.Ю. Туруткин, И.И. Обьденко // Промышленная энергетика. – 2022. – № 12. – С. 21–25. – DOI: 10.34831/EP.2022.36.20.003.
42. Time series analysis. Forecast and control / G.E.P. Box, G.M. Jenkins, G.C. Reinsel, G.M. Ljung. – New York: John Wiley & Sons Limited, 2016. – 669 p.
43. Кантарович Г.Г. Лекционные и методические материалы. Анализ временных рядов // Экономический журнал ВШЭ. – 2002. – № 1. – С. 85–116.
44. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования. – М.: Финансы и Статистика, 2003. – 416 с.
45. Hamelton J.D. Time Series Analysis. – Princeton, New Jersey: Princeton university press, 1994. – 799 p.
46. Wold H.A. Study in the analysis of stationary time series. – Stockholm: Almqvist and Wiksel, 1938. – 214 p.
47. Cryer J.D., Kung-Sik Chan. Time series analysis. – Iowa City: R. Springer Science +Business Midea, LLC, 2008. – 491p.
48. Orfanidis S.J. Optimal signal processing. – New York: McGraw-Hill Publishing Company, 2007. – 377p.
49. Anderson T.W. The statistical analysis of time series. – New York, London, Sydney, Toronto: John Wiley&sons Inc., 1971. – 757 p.
50. Исаев Ю.Н., Кабалин Д.А. Голоморфное погружение как аналитический метод расчета электрических сетей нефтяных и газовых месторождений // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 115–125.
51. Исаев Ю.Н., Кабалин Д.А., Филипас А.А. Голоморфное погружение как метод расчета установившихся режимов электрических сетей нефтяных и газовых месторождений и оценки их устойчивости // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 214–228.

Поступила: 13.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 20.02.2023 г.

Информация об авторах

Исаев Ю.Н., доктор физико-математических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Архипова О.В., старший преподаватель Политехнической школы Югорского государственного университета.

Ковалев В.З., доктор технических наук, профессор Политехнической школы Югорского государственного университета; профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Хамитов Р.Н., доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики Института промышленных технологий и инжиниринга, Тюменский индустриальный университет; профессор кафедры электрической техники Энергетического института, Омский государственный технический университет.

UDC 621.316.1.05

ADAPTIVE SHORT-TERM FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION BY AUTONOMOUS POWER SYSTEMS OF SMALL NORTHERN SETTLEMENTS BASED ON CORRELATION ANALYSIS METHODS

Yusup N. Isaev¹,
isaev_yusup@mail.ru

Olga V. Arkhipova²,
arkh82@mail.ru

Vladimir Z. Kovalev^{2,1},
vz_kovalev@mail.ru

Rustam N. Khamitov^{3,4},
apple_27@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Yugra State University,
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

³ Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

⁴ Omsk State Technical University,
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

One of the main problems in building energy-efficient and non-resource-intensive decentralized power supply systems in the Arctic zone and regions of the Far North is forecasting the consumption of electrical energy by small northern settlements. Among the existing methods that give an acceptable result in terms of accuracy, one can single out approaches based on the ARIMA econometric method. A method based on the Wold decomposition and correlation functions of the stochastic process is considered, an adaptive model of the difference equation is constructed, which makes it possible to predict energy consumption of the active power of autonomous systems of a small settlement in the interval of 0–4 hours, by reducing the stochastic process to a stationary Markov process with short memory.

The purpose of the work is to build a methodology for short-term forecasting of electric energy consumption by autonomous energy systems of small northern settlements, taking into account the specifics of energy consumption in the conditions of the Arctic zone and the Far North, based on a stochastic series of data on electric energy consumed by the settlement over the previous period.

Methods: approach to obtaining a short-term forecast of electricity consumption by autonomous energy systems of small northern settlements based on the ARIMA econometric method. In this case, a difference equation is constructed for the deterministic and random components of the available stochastic series of energy consumption; Wold decomposition and correlation functions of the energy consumption are used. To adapt the model, the studied stochastic process is reduced to a Markov process with a short memory. To do this, it is necessary to use a difference operator, which reduces the relative contribution of consumption deterministic component.

Results. Based on Wold decomposition and correlation functions, it was possible to obtain a model that gives a short-term forecast of active power consumption for a lead time of 4 hours.

Conclusions. Based on the Wold decomposition and the correlation functions of the stochastic process, the authors of the work managed to obtain an adaptive model of the difference equation, which makes it possible to predict active power consumption of autonomous systems of a small settlement with a lead time of 4 hours. The stationarity of the random process was carried out by introducing a difference operator of the first order, which makes it possible to reduce the relative contribution of the deterministic component of the stochastic series. The authors managed to reduce the process to a stationary Markov process with a short memory. The expansion coefficients of the difference equation were estimated by solving a nonlinear equation, which consists in finding the global maximum of the likelihood function. The constructed 90 % probabilistic boundaries allow us to talk about a satisfactory adjustment of the adaptive parameters of the difference equation for predicting the system. The result of forecast modeling with four-hour lead time shows good agreement with experiment.

Key words:

stochastic series, Wold decomposition, autocorrelation function, partial correlation function, autoregression, moving average, maximum likelihood function.

REFERENCES

1. *Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda* [Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035]. Available at: <http://minenergo.gov.ru> (accessed 11 July 2022).
2. Siamanta Z.C. Conceptualizing alternatives to contemporary renewable energy development: Community Renewable Energy Ecologies (CREE). *Journal of Political Ecology*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 47–69. DOI: 10.2458/jpe.2297.
3. Wang J., Zhang S., Zhang Q. The relationship of renewable energy consumption to financial development and economic growth in China. *Renewable Energy*, 2021, vol. 170, pp. 897–904. DOI: 10.1016/j.renene.2021.02.038.
4. Ansari M.A., Haider S., Masood T. Do renewable energy and globalization enhance ecological footprint: an analysis of top renewable energy countries? *Environmental Science and Pollution*

- Research, 2021, vol. 28, no. 6, pp. 6719–6732. DOI: 10.1007/s11356-020-10786-0.
5. Andronceanu A.M., Georgescu I., Dobrin C., Dragulescu I.V. Multifactorial components analysis of the renewable energy sector in the oecd countries and managerial implications. *Polish Journal of Management Studies*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 36–49. DOI: 10.17512/pjms.2020.22.2.03.
 6. Ali A., Audi M., Roussel Y. Natural resources depletion, renewable energy consumption and environmental degradation: a comparative analysis of developed and developing world. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 251–260. DOI: 10.32479/ijeeep.11008.
 7. Alola A.A., Alola U.V., Akadiri S.S. Renewable energy consumption in Coastline Mediterranean Countries: impact of environmental degradation and housing policy. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no. 25, pp. 25789–25801. DOI: 10.1007/s11356-019-05502-6.
 8. Oanh T.T.K., Quoc N.T., Dieu P.T.N. Renewable energy, foreign direct investment, economic growth, and environmental degradation in Asian countries. *International Journal of Energy, Environment and Economics*, 2021, vol. 28, no. 2, pp. 87–102.
 9. Tomin N., Shakirov V., Kozlov A., Sidorov D., Kurbatsky V., Rehtanz C., Lora E.E.S. Design and optimal energy management of community microgrids with flexible renewable energy sources. *Renewable Energy*, 2022, vol. 183, pp. 903–921. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.024.
 10. Zhao H., Li B., Wang X., Li H., Guo S., Xue W., Lu H., Wang Y. Economy-environment-energy performance evaluation of CCHP microgrid system: a hybrid multi-criteria decision-making method. *Energy*, 2022, vol. 240, pp. 122830. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122830.
 11. Bertheau P., Hoffmann M.M., Eras-Almeida A., Blechinger P. Assessment of microgrid potential in Southeast Asia based on the application of geospatial and microgrid simulation and planning tools. *Green Energy and Technology*, 2020, pp. 149–178. DOI: 10.1007/978-3-030-41952-3_7.
 12. Marchand S., Ungerland J., Monsalve C., Ruhe S., Reimann T., Heckmann W., Lauer H., Krauß C. Microgrid systems: Towards a technical performance assessment frame. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 8, 2161. DOI: 10.3390/en14082161.
 13. Mobasser A., Ghadimi A.A., Tostado-Véliz M., Jurado F., Reza Miveh M. Multi-energy microgrid optimal operation with integrated power to gas technology considering uncertainties. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 333, pp. 130174. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130174.
 14. Hemmati R., Mehrjerdi H., Nosratabadi S.M. Resilience-oriented adaptable microgrid formation in integrated electricity-gas system with deployment of multiple energy hubs. *Sustainable Cities and Society*, 2021, vol. 71, pp. 102946. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102946.
 15. Wenzhi S., Zhang H., Xinyang L., Tseng M.-L., Weipeng Z. Hierarchical energy optimization management of active distribution network with multi-microgrid system. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 2021. DOI: 10.1080/21681015.2021.1972478.
 16. Zhou B., Zou J., Xu D., Chung C.Y., Wang H., Liu N., Voropai N. Multi-microgrid Energy Management Systems: Architecture, Communication, and Scheduling Strategies. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, vol. 9, no. 3, pp. 463–476. DOI: 10.35833/MPCE.2019.000237.
 17. Abid S., Javaid N., Alghamdi T.A., Haseeb A., Wadud Z., Ahmed A. An economical energy management strategy for viable microgrid modes. *Electronics (Switzerland)*, 2019, vol. 8, no. 12, pp. 1442. DOI: 10.3390/electronics8121442.
 18. Zhu J., Zhuo Y., Chen J., Guo Y., Mo X., Liu M. An expected-cost realization-probability optimization approach for the dynamic energy management of microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, vol. 136, pp. 107620. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107620.
 19. *Postanovleniye Pravitelstva RF ot 16.11.2021 № 1946 «Ob utverzhdenii perechnya rayonov Kraynego Severa i mestnostey, priravnennykh k rayonam Kraynego Severa»* [Decree of the Government of the Russian Federation of November 16, 2021 no. «On approval of the list of regions of the Far North and areas equated to regions of the Far North»]. Available at: <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/71874.html?ysclid=la4ww4m4i0735472096> (accessed 11 June 2022).
 20. *Arkticheskaya zona Rossiyskoy Federatsii (AZRF)* [Arctic zone of the Russian Federation (AZRF)]. Available at: <http://Neftegaz.RU> (accessed 11 June 2022).
 21. *Ekonomicheskie i sotsialnye pokazateli rayonov Kraynego Severa i priravnennykh k nim mestnostey v 2000–2021 godakh* [Economic and social indicators of the regions of the Far North and equivalent areas in 2000–2021]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13279> (accessed 13 February 2023).
 22. *Strategiya prostranstvennogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2025 goda (s izmeneniyami na 16 dekabrya 2021 goda)* [Spatial development strategy of the Russian Federation for the period up to 2025 (as amended as of December 16, 2021)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/552378463?marker=6560IO> (accessed 11 June 2022).
 23. *Federalny zakon «O gosudarstvennoy podderzhke predprinimatel'skoy deyatel'nosti v Arkticheskoy zone Rossiyskoy Federatsii» ot 13.07.2020 № 193-FZ* [Federal Law «On State Support of Entrepreneurship in the Arctic Zone of the Russian Federation» № 193 of 13 July 2020]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357078/ (accessed 11 July 2022).
 24. *Rasporyazheniye Pravitelstva RF ot 1 avgusta 2022 g. № 2115-r Ob utverzhdenii plana razvitiya Severnogo morskogo puti na period do 2035 goda (s izmeneniyami na 16 dekabrya 2021 goda)* [Decree of the Government of the Russian Federation of August 1, 2022 no. 2115 «On approval of the plan for the development of the Northern Sea Route for the period up to 2035»]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405010751/?ysclid=le33j7vkg194804839> (accessed 13 February 2023).
 25. Arkhipova O.V. Principles and tools of research of regionally isolated electrotechnical complex from the standpoint of system analysis. *Omsk Scientific Bulletin*, 2020, no. 3 (171), pp. 42–46. In Rus.
 26. *Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossii i obespecheniya natsionalnoy bezopasnosti do 2035 goda* [Strategy for the development of the Arctic zone of Russia and ensuring national security up to 2035]. Available at: <https://www.arctic2035.ru> (accessed 11 June 2022).
 27. Morgunova M.O., Solovyov. D.A. Energy supply in Russian arctic: hydrocarbons or renewables? *Energy policy*, 2016, no. 5, pp. 44–51. In Rus.
 28. Kiushkina V. R. Optimization of local energy in the decentralized territories of the northern regions through strengthening the positions of energy security (on the example of the Republic of Sakha (Yakutia)). *Internet journal «Naukovedeniye»*, 2017, vol. 9, no. 6, pp. 101. In Rus.
 29. *gosudarstvennoy programme Respubliki Sakha (Yakutiya) «Obespechenie bezopasnosti zhiznedejatel'nosti naseleniya Respubliki Sakha (Yakutiya) na 2020–2024 gody»* [About the state program of the Republic of Sakha (Yakutia) «Ensuring the safety of life of the population of the Republic of Sakha (Yakutia) for 2020–2024»], November 6 2019]. Available at: <http://docs.cntd.ru> (accessed 09 February 2023).
 30. *Proekt Federal'nogo zakona «O severnom zavoze» (podgotovlen Minvostokrazvitiya Rossii 21.08.2022)* [Draft Federal Law «On Northern Delivery» (prepared by the Ministry for the Development of the Russian Far East on August 21, 2022)]. Available at: <https://garant.ru> (accessed 09 February 2023).
 31. Ryvkina M.V. Socio-economic prognosis of the Far North regions and equivalent localities. *International research journal*, 2022, no. 7-3 (121), pp 194–197. In Rus.
 32. Sokolov Yu.I. Risks of northern delivery. *Issues of Risk Analysis*, 2019, no. 16 (4), pp. 32–47. In Rus.
 33. Arkhipova O.V., Dyuba E.A., Evstegneeva Y.D., Kovalev V.Z., Paramzin A.O., Petuhova O.A. Analysis of the load curve in the isolated areas of power supply abstract. *Engineering Journal of Don*, 2019, no. 8 (59), pp. 23–27.
 34. Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Arkhipova O.V., Esin S.S. Model of a regionally isolated electrical complex taking into account consumer electrical load schedules. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2018, no. 12-2, pp. 200–204. In Rus.
 35. Rani M.D., Rao M.V.G., Prakash P.S. Power quality assessment in grid connected mode hybrid microgrid with various loads. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2021, vol. 99, no. 18, pp. 4241–4252.

36. Ye L., Lu P., Zhao Y., Dai B., Tang Y. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao*, 2021, vol. 41, no. 18, pp. 6189–6197. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.202599.
37. Elkholy A. Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems. *Solar Energy*, 2019, vol. 183, pp. 315–326. DOI: 10.1016/j.solener.2019.03.009.
38. Mousavizadeh S., Haghifam M.-R., Ghanizadeh Bolandi T., Dardashzade A., Alahyari A. A novel unbalanced power flow analysis in active AC-DC distribution networks considering PWM converters and distributed generations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, vol. 138, pp. 107938. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107938.
39. Chen W., Fu W., Han Y., Li Q., Huang L., Xu C. Optimal configuration of wind-solar-hydrogen multi-energy complementary microgrid with demand side. *Xinan Jiaotong Daxue Xuebao*, 2021, vol. 56, no. 3, pp. 640–649. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20200163.
40. Iqbal A., Waqar A., Haider S., Ayoub A., Ul-Haq A., Zahid M. Voltage stability enhancement in grid-connected microgrid using enhanced dynamic voltage restorer (EDVR). *AIMS Energy*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 150–177. DOI: 10.3934/ENERGY.2021009.
41. Nadtoka I.I., Zvoznikova I.A., Turutkin S. Yu., Obydenko I.I. Effect of the duration of the electricity consumption measurement interval on the accuracy of determining the maximum design load. *Industrial Energy*, 2022, no. 12, pp. 21–25. In Rus.
42. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. *Time series analysis. Forecast and control*. New York, John Wiley & Sons Limited, 2016. 669 p.
43. Kantarovich G.G. *Lektsionnye i metodicheskie materialy. Analiz vremennykh ryadov* [Lectures and methodic materials. Time series analysis]. *Ekonomicheskii zhurnal VSHE*, 2002, no. 1, pp. 85–116.
44. Lukashin Yu.P. *Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya* [Adaptive methods of short-term predicting]. Moscow, Finansy i Statistika Publ., 2003. 416 p.
45. Hamelton J.D. *Time series analysis*. Princeton, New Jersey, Princeton university press, 1994. 799 p.
46. Wold H.A. *Study in the analysis of stationary time series*. Stockholm, Almqvist and Wiksel, 1938. 214 p.
47. Cryer J.D., Kung-Sik Chan. *Time series analysis*. Iowa City, Springer Science +Business Midea, LLC, 2008. 491 p.
48. Orfanidis S.J. *Optimal signal processing*. New York, McGraw-Hill Publishing Company, 2007. 377 p.
49. Anderson T.W. *The statistical analysis of time series*. New York, London, Sydney, Toronto, John Wiley&sons Inc., 1971. 757 p.
50. Isaev Yu.N., Kabalin D.A. Holomorphic immersion as an analytical method for calculating the electrical networks of oil and gas fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 115–125. In Rus.
51. Isaev Yu.N., Kabalin D.A., Filipas A.A. Holomorphic immersion as a method for calculating steady modes of electric networks of oil and gas fields and evaluating their stability. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 214–228. In Rus.

Received: 13 February 2023.

Reviewed: 20 February 2023.

Information about the authors

Yusup N. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Olga V. Arkhipova, senior lecturer, Yugra State University.

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., professor, Yugra State University; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., professor, Tyumen Industrial University; professor, Omsk State Technical University.