

В.М. Задачин

Харківський національний університет ім. С. Кузнеця, Харків

ПРОГНОЗУВАННЯ МІСЬКОГО ПОГОДИННОГО ВОДОСПОЖИВАННЯ

Розглянуто методи та моделі розрахунку прогнозу міського водоспоживання, запропоновано алгоритм прогнозування міського погодинного водоспоживання, заснований на розкладанні часового ряду на базову і залишкову складові та понятті однотипних днів. Представлений алгоритм був реалізований у вигляді програмного комплексу та пройшов багаторічну перевірку в реальних умовах, яка підтвердила його ефективність. Середня процентна похибка погодинного прогнозу міського водоспоживання на одну добу не перевищує 5 %.

Розроблена модель, а також програмний комплекс, в якому вона використовується, розрахунку прогнозу міського погодинного водоспоживання можуть бути застосовані в інформаційних службах міських комунальних підприємств, які надають послуги з постачання води населенню, що дасть цим підприємствам можливість оптимізувати свої операційні та інвестиційні рішення. Наприклад, знання погодинного попиту води протягом декількох наступних діб дає можливість оптимального управління роботою насосних станцій міста, тобто дозволяє економити витрати електроенергії в процесі закачування води в резервуари.

Ключові слова: водопостачання, водоспоживання, прогноз, прогнозування, часові ряди, модель, статистичний аналіз, регресія, штучна нейронна мережа.

Вступ

Постановка задачі. Прогнозування міського добового і годинного попиту на водні ресурси є основою для прийняття оперативних і тактичних рішень комунальними підприємствами (міськими водоканалами), що надають послуги з постачання води населенню. Наприклад, комунальні служби повинні знати потребу в чистій воді на декілька днів уперед для того, щоб забезпечити цю потребу достатньою роботою як насосних станцій, що перекачують воду, так і належною роботою очисних споруд. Крім того, знання годинного попиту води протягом доби дає можливість оптимального управління роботою насосних станцій, тобто дозволяє економити витрати електроенергії в процесі перекачування води.

Таким чином, облік невизначеності в прогнозах міського водоспоживання дає можливість комунальним підприємствам оптимізувати свої операційні та інвестиційні рішення. Тому актуальною задачею є розробка методів та моделей прогнозування міського водоспоживання, які б адекватно описували процес змін міського споживання води впродовж доби та надавали змогу будувати достовірні прогнози майбутнього погодинного споживання води у місті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день питання прогнозування міського добового водоспоживання є недостатньо розробленими та мало висвітленими в світі, а в Україні цим питанням зовсім не приділяється ніякої уваги. Тому приведемо огляд іноземної літератури з прогнозування міського водоспоживання з метою пошуку

найпопулярніших сучасних методів та моделей прогнозування.

Книга Девіда Батлера та Файяза Алі Мемона [1] є комплексним посібником з управління водоспоживанням. Концепцією книги було зібрання повної картини специфіки управління попитом на воду, починаючи від технічних до соціальних і правових аспектів. Тенденціям споживання води і методам прогнозування попиту водоспоживання присвячена перша глава цього посібника, в якій розглянуто методи та техніки прогнозування водоспоживання, такі як статичні методи, методи на основі сценаріїв та методи з використанням штучних нейронних мереж.

Книга Р. Брюса Біллінгса та Клайва В. Джонса [2] надає всі необхідні інструменти для досить точного прогнозування потреб питної води для міста в короткостроковий, середньостроковий і довгостроковий період. Вона розглядає повний спектр сфер впливу на міське водоспоживання населенням, включаючи погоду, клімат, цін на воду, тарифних ставок, і коротко- і довгострокових програм по збереженню. Книга детально описує всі методи прогнозування водоспоживання, що використовуються водоканалами Сполучених Штатів Америки:

- щорічні прогнози водоспоживання на душу населення;
- щорічні прогнози водоспоживання за основними класами користувачів;
- пікові прогнози на день;
- щомісячні прогнози водоспоживання;
- щоденні прогнози водоспоживання;

– зв'язок прогнозів доходів з прогнозами водоспоживання.

Книга Р. Брюса Біллінгса та Клайва В. Джонса являє собою посібник з вибору найбільш відповідного методу прогнозування, залежно від мети застосування прогнозу, такої як регулювання потужності системи водопостачання і запасів води, нормування, прогнозування доходів, або планування поліпшення системи розподілу. Крім того, в книзі описано, які дані потрібні для прогнозування, і показується, як використовувати такі методи, як підгонка кривої, статистичний регресійний аналіз та інші потужні методики.

За останні роки було опубліковано незначну кількість статей в спеціалізованих і економічних, фінансових та економетричних журналах світу, що стосуються проблем прогнозування водоспоживання.

Так, у публікації Е.А. Донкора, Т.А. Маззучі, Р. Сойера та Д.А. Робертсона [3] зроблено огляд літератури з прогнозування водоспоживання міст, опублікованої від 2000 до 2010 року з метою виявлення методів і моделей, корисних для вирішення проблеми водопостачання конкретного водоканалу. Результати їх дослідження показують, що, хоча широке розмаїття методів і моделей варті уваги, застосування цих моделей на практиці відрізняється, залежно від поведінки змінної (водоспоживання), її періодичності та горизонту прогнозу. В цій роботі зроблено висновок, що в той час як штучні нейронні мережі є більш зручні для короткострокового прогнозування, економетричні моделі, в поєднанні з моделюванням та прогнозуванням на основі сценаріїв, як правило, будуть більш ефективними при їх використанні для прийняття довгострокових стратегічних рішень. А якщо необхідно прийняти рішення, які включають невизначеність у майбутніх прогнозах водопостачання, то більше уваги має приділятися імовірнісним методам прогнозування.

В науковій статті [4] її автори пропонують для моделювання та прогнозування водоспоживання в містах відносно нову методику штучної нейронної мережі (ANN). Результати їх дослідження показали, що модель прогнозування водоспоживання за допомогою штучної нейронної мережі надає ефективний спосіб прогнозування внутрішнього попиту на воду в місті Вейнань у Китаї. Оцінка моделі показала, що коефіцієнти кореляції більше, ніж 90 %, як для даних навчання, так і для даних тестування.

Наукова праця нідерландських вчених Д.Х.Г. Врібурга, Л.К. Рітвелда, Т. Блома, М. Баккера та М. Ван дер Рура [5] розглядає побудову адаптивної моделі прогнозування водоспоживання, що була введена в експлуатацію у 1996 році і в даний час прогнозує водоспоживання в Нідерландах. Приведено реальні розрахунки та графіки, детально опи-

сано состав моделі прогнозування та проаналізовано її точність та результати її впровадження за 2007–2011 роки, а також виявлено, що ця модель дозволяє впоратися зі швидкими змінами в попиті, викликаними погодними умовами, повільними сезонними коливаннями і навіть соціально-економічними катаклізмами.

В статті [6] її автори, М.К. Тивари і Й. Адамовський, пропонують нову гібридну модель нейронної мережі (WBNN) для прогнозування міського попиту на водні ресурси на короткий строк (1, 3 і 5 діб, 1 та 2 тижні, а також 1 і 2 місяця). Автори протестували свій метод з використанням даних по місту Монреаль в Канаді. Ефективність методу WBNN автори порівнювали с методом авторегресії та інтегрованої ковзної середньої (ARIMA), моделлю авторегресії та інтегрованої ковзної середньої з екзогенними входними змінними (ARIMAX), традиційною нейронною мережею (NN), методом NN на основі wavelet-аналізу (WNN), методом NN на основі bootstrap-техніки (BNN). Модель WBNN була розроблена як комбінація з кількох нейромережових моделей та збудована з застосуванням бутстраповської передискретизації вейвлетовських часових підрядів замість початкових наборів даних. Результати досліджень показали, що гібридні моделі WBNN и WNN забезпечують значно більш точні результати прогнозування, ніж традиційні моделі NN, BNN, ARIMA та ARIMAX. Авторами також було виявлено, що модель WBNN зменшує невизначеність, пов'язану з прогнозами. При застосуванні моделі WBNN прогнозні довірчі смуги виявилися точнішими і надійнішими, ніж прогнозні довірчі смуги моделі BNN. Як було визначено в цьому дослідженні, використання при вейвлет-аналізі максимальної температури повітря та загальної кількості опадів поліпшує точність прогнозів попиту води.

В науковій публікації [7] пропонується підхід багатомасштабної релевантної векторної регресії (MSRVR) для прогнозування щоденного міського попиту на воду. Підхід використовує стаціонарне вейвлет-перетворення для розкладання часового ряду добових поставок води в різних масштабах. На кожному рівні вейвлет-коефіцієнти використовуються для комп'ютерного навчання моделі за методом релевантної векторної регресії (RVR). Розрахункові коефіцієнти виходів моделі RVR для всіх масштабів використовуються при відновленні результатів прогнозування за допомогою зворотного вейвлет-перетворення. Для того, щоб полегшити прогнозування при підході MSRVR, аналізуються особливості невизначеності добового часового ряду водоспоживання для визначення входних змінних моделі RVR. Підхід MSRVR оцінювався при використанні реальних даних, зібраних з двох гідротехнічних споруд, і порівнювався з традиційними методами.

Результати досліджень авторів показали, що запропонований метод MSRVR може прогнозувати щоденний попит на воду в містах набагато точніше, ніж традиційні, в термінах нормалізованої середньоквадратичної помилки, коефіцієнта кореляції і середньої абсолютної відсоткової помилки.

В статті [8] запропонована модель, яка дозволяє прогнозувати потребу в воді протягом наступних 48 годин з 15-ти хвилинним кроком в часі. У якості вхідних даних модель використовує виміряні раніше потреби у воді і статичні дані календаря. На основі цих даних модель буде шаблони для днів тижня і ряд нерегулярних днів. Не дивлячись на те, що дані про погоду не використовуються в якості вхідних даних, модель може ідентифікувати випадковий додатковий попит на воду ввечері при сприятливих погодних умовах і відповідним чином скоригувати прогноз.

В науковій праці [9] представлена нова адаптивна методологія прогнозування погодинного попиту на воду, заснована на базі нейронної мережі, основною перевагою якої є безперервна пристосованість до постійно мінливої моделі попиту на водні ресурси.

В науковій праці [10] представлена вірогіднісна методологія кількісної оцінки, діагностики, оптимізації структури моделі та зменшення прогнозних помилок при короткостроковому прогнозуванні попиту на воду.

На основі зробленого вище огляду літератури можна зробити висновок, що найбільш часто при прогнозуванні міського водоспоживання на короткостроковий період застосовуються моделі на базі нейронних мереж. Так як багато з дослідників підкреслюють наявність кореляції водоспоживання води з погодними умовами та іншими факторами, то саме ці моделі дозволяють впоратися зі швидкими змінами в попиті, викликаними погодними умовами, повільними сезонними коливаннями і навіть соціально-економічними катаклізмами.

Метою статті є розробка та представлення методу прогнозування, що не застосовує моделі нейронних мереж, та все ж дозволяє отримувати досить точні прогнози погодинного міського водоспоживання.

Виклад основного матеріалу

Алгоритм прогнозування міського годинного водоспоживання

Необхідність в прогнозуванні міського водоспоживання має місце як для довгострокових періодів (річного та місячного), так і короткострокових (добового і годинного). При цьому основна проблема, пов'язана з точністю прогнозу, виникає при короткостроковому прогнозуванні, незважаючи на існування основної сезонності в сім днів для до-

бового і основної сезонності в 24 години для годинного водоспоживання. Це пов'язано, перш за все, з наявністю свят, як з фіксованою датою (наприклад, 1 січня чи 8 Березня), так і свят, прив'язаних до вихідних днів (наприклад, православні Пасха чи Трійця), а також з переносами робочих днів на інші дні. Тому для підвищення точності прогнозу будемо застосовувати метод розкладання даних погодинного водоспоживання на складові та поняття однотипних днів.

Часовий ряд погодинного водоспоживання відноситься до календарних часових рядів. Календарні часові ряди (не обов'язково часові ряди водоспоживання) виникають завжди, коли містять показники, пов'язані з життєдіяльністю людей. Календарні часові ряди годинних показників характеризуються тим, що їх значення залежать від наступних факторів:

- який день тижня відповідає цій добі;
- чи збігаються ця доба зі святковими, передсвятковими або після святковими днями.

Для того, щоб розрізнити доби в календарних часових рядах, введемо поняття регулярних та нерегулярних днів. Під нерегулярними днями будемо розуміти дні, що мають нетиповий для данної доби тижня годинний графік. Нерегулярні дні будемо розрізнити по типу (наприклад, дні державних і релігійних свят, переноси вихідних, іноді дні перед 1-м вересня і т. п.). Регулярними днями будемо називати всі ті дні, які не належать до нерегулярних днів.

Ясно, що треба мати архів нерегулярних днів, в якому зберігаються дати, типи і почасові дані водоспоживання для кожного нерегулярного дня.

Алгоритм розрахунку годинного прогнозу засновано на розкладанні даних годинного водоспоживання на складові та виконується на базі попередньо розрахованого суточного прогнозу [11].

Позначемо через $W(h,d,y)$ – значення годинного водоспоживання за h -у годину d -ї доби y -го року. Значення h і d міняються відповідно в межах: $1 \leq h \leq 24$, $1 \leq d \leq ndy(y)$, де $ndy(y)$ – кількість днів в y -му році. Якщо зафіксувати d і y , то графічне представлення значень $W(h,d,y)$, $h=1, \dots, 24$, будемо називати годинним графіком водоспоживання за d -у добу y -го року.

Доцільно від часового ряду значень годинного водоспоживання $W(h,d,y)$ перейти до часового ряду індексів $D(h,d,y)$ по наступному правилу:

$$D(h,d,y) = \frac{24 \cdot W(h,d,y)}{\sum_{i=1}^{24} W(i,d,y)}. \quad (1)$$

В подальшому буде розглянуто алгоритм прогнозування саме цього часового ряду. Часовий ряд

індексів годинного водоспоживання має яскраво виражену тижневу періодичність. При цьому годинні графіки суботніх і недільних днів істотно відрізняються від графіків робочих днів, в той час як графіки різних робочих днів досить схожі між собою. Особливо різко виділяються графіки нерегулярних днів. Тому розроблені різні алгоритми для прогнозу на регулярні та нерегулярні дні.

Спочатку опишемо метод прогнозування на регулярні дні. Цей метод засновано на наступному розкладанні ряду $D(h,d,y)$ на базову $V(h,d,y)$ та залишкову $R(h,d,y)$ складові:

$$D(h,d,y) = V(h,d,y) + R(h,d,y). \quad (2)$$

Базова складова в свою чергу являє собою суму з двох доданків: $S(h,d,y)$ і $Q(h,d,y)$, які відповідно враховують середній рівень і тижневу періодичність процесу $D(h,d,y)$, тобто

$$V(h,d,y) = S(h,d,y) + Q(h,d,y). \quad (3)$$

Визначення цих додатків основано на понятті базового інтервалу. Базовий інтервал – це задана кількість днів (кратна 7), які безпосередньо передують першому прогнозованому дню. Нехай обраний базовий період містить n тижнів і відповідно $N = 7 \cdot n$ днів, і нехай він не містить нерегулярних днів. Тоді

$$S(h,d,y) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N D(h,d-i,y)}{N}, & \text{при } d > N, \\ \frac{\sum_{i=1}^d D(h,d-i,y) + \sum_{i=1}^{N-d+1} D(h,ndy(y-1)-i+1,y-1)}{N}, & \text{при } d \leq N, \end{cases}$$

де $ndy(y-1)$ – кількість днів у $(y-1)$ -му році.

Тижнева періодичність враховується за допомогою наступної складової:

$$Q(h,d,y) = \frac{\sum_{k=1}^N D'(h,d-7 \cdot k,y) - S(h,d-7 \cdot k,y)}{N},$$

де

$$D'(h,d-7 \cdot k,y) = \begin{cases} D(h,d-7 \cdot k,y), & \text{при } d-7 \cdot k \geq 1; \\ D(h,ndy(y-1)-7 \cdot k,y-1), & \text{при } d-7 \cdot k < 1. \end{cases}$$

Якщо в базовому інтервалі є нерегулярні дні, то при обчисленні базової складової необхідно значення $D(h,d,y)$ в нерегулярні дні замінювати на значення базової складової $V(h,d,y)$. Ця вимога є коректною, оскільки в році є досить довгі інтервали, що не містять нерегулярних днів, а величина базового періоду зазвичай коливається від 2-х до 4-х тижнів. Проведений аналіз якості прогнозування часового водоспоживання показав, що найкращим базовим інтервалом є інтервал довжиною у 4 тижня.

Залишкова складова $R(h,d,y)$ для регулярних днів визначається формулою (2). На жаль, часовий ряд, складений із залишкових помилок, не є однорідно-нестационарним рядом. Цей факт легко перевірити, якщо обчислити дисперсії залишкових помилок, що відповідають кожній годині доби. Крім того, дисперсії залишкових помилок однієї і той же години для робочих, суботніх та недільних днів також різні. Це призводить до необхідності нормування ряду $R(h,d,y)$.

Нехай ряд залишкових помилок обчислений для відрізка днів $[d_{\min}, d_{\max}]$. Позначимо через $f_y(d)$ функцію, що визначає за номером дня d у році у номер дня у тижні. Наприклад, якщо d -й день є понеділком, то $f_y(d) = 1$. Тоді обчислимо такі величини:

$$M(h,I,y) = \frac{\sum_{\substack{d=d_{\min} \\ f(d)=I}}^{d_{\max}} R(h,d,y)}{n(I)},$$

$$\sigma(h,I,y) = \sqrt{\frac{\sum_{\substack{d=d_{\min} \\ f(d)=I}}^{d_{\max}} (R(h,d,y) - M(h,I,y))^2}{n(I) - 1}},$$

де I – номер дня в тижні ($I = \overline{1,7}$); $n(I)$ – кількість днів на відрізку $[d_{\min}, d_{\max}]$ с номером дня в тижні, що дорівнює I . Тоді ряд залишкових помилок $R(h,d,y)$ нормується наступним чином:

$$RN(h,d,y) = \frac{R(h,d,y) - M(h,f(d),y)}{\sigma(h,f(d),y)}. \quad (4)$$

Ряд $RN(h,d,y)$ вже можна вважати однорідно-нестационарним часовим рядом і тому будемо розглядати його як функцію лише одного параметра – t (номера години) і позначати через $x(t)$.

Для прогнозування часового ряду $x(t)$ будемо застосовувати модель авторегресії [12]. Аналіз часового ряду показав, що хороші прогнозні властивості має наступна модель:

$$x(t) = a_1 \cdot x(t-1) + a_2 \cdot x(t-3) + a_3 \cdot x(t-8) + a_4 \cdot x(t-12) + a_5 \cdot x(t-13) + a_6 \cdot x(t-24) + e(t), \quad (5)$$

де $e(t)$ – часовий ряд залишкових помилок.

Таким чином, алгоритм прогнозування часового ряду годинного водоспоживання $W(h,d,y)$ на один регулярний день уперед складається з наступних кроків:

1. Для заданого базового інтервалу $[d_{\min}, d_{\max}]$ обчислюються базова $V(h,d,y)$ і залишкова $R(h,d,y)$ складові.

2. По заданому відрізьку залишкових помилок обчислюються нормувальні параметри $M(h, I, y)$, $\sigma(h, I, y)$ та формується ряд $RN(h, d, y)$.

3. За допомогою моделі авторегресії (5) обчислюються прогнози ряду $x(t)$, які позначимо через $x_{pred}(t+h)$, $h = \overline{1, 24}$.

Таким чином, отримані прогнози для нормованої залишкової складової, які позначимо через

$$RN_{pred}(h, d, y).$$

4. Розраховуються прогнози для залишкової складової за формулою:

$$R_{pred}(h, d, y) = M(h, f(d), y) + \sigma(h, f(d), y) \cdot RN_{pred}(h, d, y).$$

5. Розраховуються прогнози для ряду індексів $D(h, d, y)$ за формулою:

$$D_{pred}(h, d, y) = B(h, d, y) + R_{pred}(h, d, y). \quad (6)$$

6. На основі попередньо розрахованого суточного прогнозу $D''(d, y)$ прогнози для ряду погодинного водоспоживання розраховуються за формулою:

$$W_{pred}(h, d, y) = D''(d, y) \cdot D_{pred}(h, d, y) / 24. \quad (7)$$

При розрахунку погодинного прогнозу на кілька днів вперед відсутні значення часового ряду $D(h, d, y)$ замінюються на прогнозні $D_{pred}(h, d, y)$. Тоді всі величини в формулах (1–7) стають коректно визначеними.

Прогноз $D_{pred}(h, d, y)$ для ряду індексів $D(h, d, y)$ на нерегулярний день розраховується як середнє значення ряду індексів за попередні дні того ж самого типу, що і прогнозний день, за заданий період часу (наприклад, три роки). Цей період часу для конкретного розрахунку може бути різним в залежності від соціальних змін в суспільстві. Прогноз для ряду погодинного водоспоживання на нерегулярний день також розраховується по формулі (7).

Наведений вище метод розрахунку прогнозу погодинного водоспоживання був програмно реалізований та включений в програмний комплекс «Прогноз», що впроваджено в водоканалах м. С-Петербургу і м. Москва (Росія).

Наведемо короткий опис програмного комплексу «Прогноз», призначеного для прогнозування міського водоспоживання, як довгострокового (річного, місячного), так і короткострокового (добового, годинного).

Розрахунок поточного прогнозу міського водоспоживання проводиться послідовно, починаючи з річного і далі по низхідній. При цьому річний прогноз є основою для місячного, місячний – для добового, а добовий – для годинного.

У годинному прогнозі введені режими ретроспективного прогнозу та поточного прогнозу. Під ретроспективним прогнозом розуміється прогноз на період часу, для якого вже є фактичні данні, але

вони не застосовуються для побудови прогнозної моделі.

Для підвищення точності годинного прогнозу потрібно враховувати вплив нерегулярних днів. Список нерегулярних днів та їх типів повинен бути підготовлений заздалегідь.

Для ілюстрації ефективності запропонованого методу прогнозування на рис. 1 і рис. 2 наведені графіки ретроспективного прогнозу погодинного водоспоживання в м. Москва на 31 грудня 2006 року і 1 січня 2007 року. На рис. 1 відображено випадок, коли дні 31 грудня і 1 січня розглядаються як регулярні дні, а на рис. 2 відображено випадок, коли ці дні вже відзначені як нерегулярні.

Як видно з рис. 1 та рис. 2 прогноз на дні 31 грудня і 1 січня у випадку, коли ці розглядаються як нерегулярні дні, значно кращий.



Рис. 1. Графік ретроспективного прогнозу годинного водоспоживання для випадку, коли дні 31 грудня і 1 січня розглядаються як регулярні



Рис. 2. Графік ретроспективного прогнозу годинного водоспоживання для випадку, коли дні 31 грудня і 1 січня розглядаються як нерегулярні

В цілому, механізм використання поняття нерегулярних днів при годинному прогнозі дозволяє отримувати прогноз з відносною середньою похибкою, що не перевищує 5%. Так на рис. 3 приведена гістограма відносних похибок (%) прогнозу годинного водоспоживання для випадку, коли 1 січня 2007 року розглядаються як нерегулярний день (див. рис. 2).

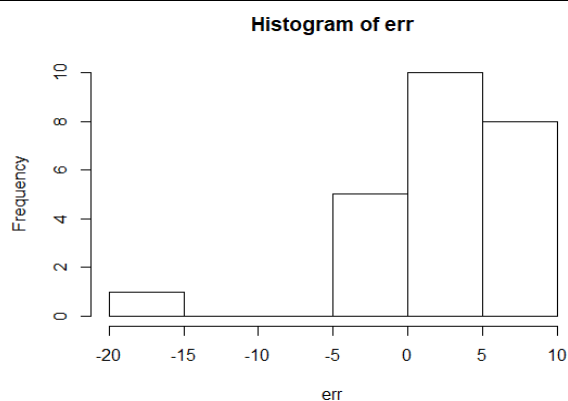


Рис. 3. Гістограма відносних похибок (%) прогнозу годинного водоспоживання для випадку, коли дні 31 грудня і 1 січня розглядаються як нерегулярні

Висновки

Представлено огляд літератури з прогнозування попиту на водні ресурси, яка була опублікована за останній час. На основі зробленого огляду можна зробити висновок, що найбільш часто при прогнозуванні міського водоспоживання на короткостроковий період застосовуються моделі на базі нейронних мереж та комбіновані (гібридні) моделі. Нейромереві та гібридні моделі, на відміну від класичних, можуть модулювати нелінійні зв'язки, є масштабо-

ваними, високо адаптивними та мають безліч прикладів застосування.

Запропоновано метод, що не застосовує моделі нейронних мереж, та все ж дозволяє отримувати досить точні прогнози годинного міського водоспоживання. Метод засновано на розкладанні часового ряду на базову і залишкову складові та понятті однотипних днів. Алгоритм методу програмно реалізований та включений в програмний комплекс «Прогноз», що впроваджено в водоканалах м. С-Петербургу і м. Москва (Росія).

Запропонований метод пройшов багаторічну перевірку в реальних умовах застосування, яка підтвердила його ефективність. Середня процентна похибка погодинного прогнозу міського водоспоживання на один день не перевершує 5 %.

Мета статті була досягнена, тобто розроблено та представлено метод прогнозування, що не застосовує моделі нейронних мереж та все ж дозволяє отримувати досить точні прогнози погодинного міського водоспоживання. Розроблена модель розрахунку прогнозу міського годинного водоспоживання (у вигляді програмного комплексу) може бути застосована на комунальних підприємствах, що дасть їм можливість оптимізувати свої операційні та інвестиційні рішення.

Список літератури

1. Butler D. Water Demand Management / D. Butler, F.A. Memon. – London: IWA Publishing, 2006. – 360 p.
2. Billings R.B. Forecasting Urban Water Demand / R.B. Billings, C.V. Jones. – Denver: American Water Works Association, 2008. – 350 p.
3. Donkor E. Urban Water Demand Forecasting: Review of Methods and Models / E. Donkor, T. Mazzuchi, R. Soyer, A. Roberson // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2014. – № 140 (2). – P. 146-159.
4. Junguo L. Forecast of Water Demand in Weinan City in China using WDF-ANN model / L. Junguo, H. Savenije, J. Xu // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2003. – № 28. – P. 219-224.
5. Bakker M. The Use of An Adaptive Water Demand Prediction Model / M. Bakker, J.H.G. Vreeburg, L.C. Rietveld, T. Blom, M. Van der Roer // *Journal of Water Distribution Systems Analysis*. – 2012. – № 14. – P. 1-18.
6. Tiwari M.K. Urban water demand forecasting and uncertainty assessment using ensemble wavelet-bootstrap-neural network models / M.K. Tiwari, J. Adamowski // *Water Resources Research*. – 2013. – Vol. 49. – P. 6486-6507.
7. Yun Bai. A multi-scale relevance vector regression approach for daily urban water demand forecasting / Yun Bai, Pu Wang, Chuan Li, Jingjing Xie, Yin Wang // *Journal of Hydrology*. – 2014. – Vol. 517. – P. 236-245.
8. Bakker M. A fully adaptive forecasting model for short-term drinking water demand / M. Bakker, J.H.G. Vreeburg, K.M. van Schagen, L.C. Rietveld // *Environmental Modelling & Software*. – 2013. – Vol. 48. – P. 141-151.
9. Romano M. Adaptive water demand forecasting for near real-time management of smart water distribution systems / M. Romano, Z. Kapelan // *Environmental Modelling & Software*. – 2014. – Vol. 60. – P. 265-276.
10. Hutton C.J. A probabilistic methodology for quantifying, diagnosing and reducing model structural and predictive errors in short term water demand forecasting / C.J. Hutton, Z. Kapelan // *Environmental Modelling & Software*. – 2015. – Vol. 66. – P. 87-97.
11. Інформаційні технології: проблеми та перспективи: монографія / за заг. ред. В.С. Пономаренко. – Харків: Вид. Рожко С.Г., 2017. – 447 с.
12. Box G.E.P. Time Series Analysis: Forecasting and Control / G.E.P. Box, G.M. Jenkins. – San Francisco: Holden-Day, 1970. – 575 p.

References

1. Butler, D. and Memon, F.A. (2006), *Water Demand Management*, IWA Publishing, London, 360 p.
2. Billings, R.B. and Jones, C.V. (2008), *Forecasting Urban Water Demand*, American Water Works Association, Denver, 350 p.
3. Donkor, E., Mazzuchi, T., Soyer, R. and Roberson, A. (2014), Urban Water Demand Forecasting: Review of Methods and Models, *Journal of Water Resources Planning and Management*, No. 140 (2), pp. 146-159.
4. Junguo, L., Savenije, H. and Xu, J. (2003), Forecast of Water Demand in Weinan City in China using WDF-ANN model, *Physics and Chemistry of the Earth*, No. 28, pp. 219-224.

5. Bakker, M., Vreeburg, J.H.G., Rietveld, L.C., Blom, T. and Van der Roer, M. (2012), The Use of An Adaptive Water Demand Prediction Model, *Journal of Water Distribution Systems Analysis*, No. 14, pp. 1-18.
6. Tiwari, M.K. and Adamowski, J. (2013), Urban water demand forecasting and uncertainty assessment using ensemble wavelet-bootstrap-neural network models, *Water Resources Research*, Vol. 49, pp. 6486-6507.
7. Bai, Y., Wang, P., Li, C., Xie, J. and Wang, Y. (2014), A multi-scale relevance vector regression approach for daily urban water demand forecasting, *Journal of Hydrology*, Vol. 517, pp. 236-245.
8. Bakker, M., Vreeburg, J.H.G., van Schagen, K.M. and Rietveld, L.C. (2013), A fully adaptive forecasting model for short-term drinking water demand, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 48, pp. 141-151.
9. Romano, M. and Kapelan, Z. (2014), Adaptive water demand forecasting for near real-time management of smart water distribution systems, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 60, pp. 265-276.
10. Hutton, C.J. and Kapelan, Z. (2015), A probabilistic methodology for quantifying, diagnosing and reducing model structural and predictive errors in short term water demand forecasting, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 66, pp. 87-97.
11. Ponomarenko, V.S. (2017), "Informacijni tehnologii: problemy ta perspektivy: monohrafiia" [*Information technology: challenges and perspectives*], Rozhko S.H., Kharkiv, 447 p.
12. Box, G.E.P. and Jenkins, G.M. (1970), *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, Holden-Day, San Francisco, 575 p.

Надійшла до редколегії 16.05.2018

Схвалена до друку 19.06.2018

Відомості про автора:

Задачин Віктор Михайлович

кандидат фізико-математичних наук доцент
доцент кафедри Харківського національного
економічного університету ім. С. Кузнеця,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8107-4639>

Information about the author:

Viktor Zadachyn

Candidate of Physics and Mathematics
Associate Professor Senior Lecturer of Department of
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8107-4639>

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГОРОДСКОГО ЧАСОВОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

В.М. Задачин

Рассмотрены методы и модели расчета прогноза городского водопотребления, предложен алгоритм прогнозирования городского часового водопотребления, основанный на разложении временного ряда на базовую и остаточную составляющие и понятия однотипных дней. Представленный алгоритм был реализован в виде программного комплекса и прошел многолетнюю проверку в реальных условиях, которая подтвердила его эффективность. Средняя процентная ошибка часового прогноза городского водопотребления на одни сутки не превышает 5 %.

Разработанная модель, а также использующий ее программный комплекс расчета прогноза городского часового водопотребления могут быть применены в информационных службах городских коммунальных предприятий, предоставляющих услуги по поставке воды населению, что даст им возможность оптимизировать свои операционные и инвестиционные решения. Например, знание часового спроса воды в течение нескольких последующих суток дает возможность оптимального управления работой насосных станций, то есть позволяет экономить расход электроэнергии в процессе закачивания воды в резервуары.

Ключевые слова: водоснабжение, водопотребление, прогноз, прогнозирование, временные ряды, модель, статистический анализ, регрессия, искусственная нейронная сеть.

FORECASTING OF URBAN HOURLY WATER CONSUMPTION

V. Zadachyn

The forecasting of urban daily and hourly demand for water resources are the basis for making immediate and tactical decisions by public utilities that provide water supply services to the population. For example, knowing of the hourly water demand during the day (24 hours) gives an opportunity for optimal control over the operation of pumping stations, that is, it saves energy consumption in the process of pumping water. Therefore, the crucial task is to develop methods and models for forecasting of urban water consumption that could properly describe the process of changes in urban water consumption during the day (24 hours) and provide an opportunity to build reliable forecasts of the future hourly water consumption in the city.

For the analysis and construction of the model of the time series of urban hourly water consumption the autoregression method is applied. The methods and models for calculating the forecast of urban water consumption are considered, an algorithm for predicting urban hourly water consumption is proposed, based on the resolution of the time series into the basic and residual components and the concept of the same type of days. The presented algorithm was implemented in the form of a software package and underwent a multi-year check in real conditions which confirmed its effectiveness. The average relative error of the hourly forecast of urban water consumption per day does not exceed 5%.

The newly developed model (and its software package) for calculating the forecast of urban hourly water consumption can be applied in public utilities which will enable them to optimize their operational and investment decisions.

Keywords: water supply, water consumption, forecast, forecasting, time series, model, statistical analysis, regression, neural network.