

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ СТОКУ РІКИ ДНІСТЕР ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

М.І.Горбійчук, О.В.Пендерецький

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул.Карпатська, 15, тел. (0342) 504521
e-mail: gorb@nung.edu.ua*

Созданы математические модели прогнозирования стока р. Днестр, которые охватывают постоянную, линейную, квадратичную и нейросетевую модели. Дана оценка точности прогноза на данных, которые получены в течение столетних наблюдений за стоком г. Днестр. На основе анализа точности прогноза выбранная модель, которая обеспечивает минимальную погрешность прогноза.

The mathematical models of prognostication of flow are created r. Dniester, which engulf permanent, linear, quadratic and neuron models. This estimation of exactness of prognosis is on information which is got during the centenary looking after a flow r. Dniester. On the basis of analysis of exactness of prognosis the chosen model which provides the minimum error of prognosis.

Газотранспортна мережа України включає близько 35 тис. км газопроводів, 71 компресорну станцію загальною потужністю 5,4 млн. кВт. Важливою складовою газотранспортної мережі нашої держави є управління магістральних газопроводів “Прикарпаттрансгаз”, яке в своєму складі має 18 компресорних станцій загальною продуктивністю 380×106 м³/добу.

Через річку Дністер також прокладені газопроводи такі, як: газопровід “Союз” (с. Коропець, Тернопільська обл.), газопровід “Прогрес” та газопровід “Урингой-Помари-Ужгород” (с. Михальче, Івано-Франківська область).

Тому, для забезпечення надійної та безаварійної роботи газопроводів, що проходять через річку Дністер, важливе значення має прогнозування його паводків. Часто паводки призводять до розмивання берегів, що може викликати пошкодження газопроводу “Торжок-Долина” (Івано-Франківська область), який прокладено біля русла р. Дністер.

Згідно з результатами багаторічних спостережень за режимом Дністра на гідропості м. Галича найхарактернішою рисою його водного режиму є дуже часті паводки протягом усього року як дощового, так і снігового походження. При цьому паводки високого рівня можуть спостерігатися в усі пори року. Загалом Дністер, як і решта карпатських рік, характеризується паводковим режимом.

Роки з різко вираженими літніми паводками залежать від метеорологічних умов у цей період року, особливо коли настає холоднувата і нестійка, з частими дощами погода. У слід за невеликою весняною повінню (березень – квітень) протягом наступних весняних, літніх і осінніх місяців спостерігаються майже безперервні паводки, зумовлені довгочасними липневими дощами як в Карпатах, так і на Подільській височині. У зимову пору року паводки на Дністрі інколи також досягають великих розмірів. Вони пов’язані переважно з настанням відлиг, які часто супроводжуються дощами. Це сприяє швидкому таненню снігу, що зумовлює різке підняття рівня води. Зі сказаного вище

впливає, що кількість паводків на Дністрі є дуже великою. Так, в Галичі їх налічується за рік понад 200. Найменша кількість паводків припадає на січень і лютий, потім – на квітень і листопад. У березні внаслідок танення снігу, а в червні і серпні через дощі кількість паводків збільшується. Висота паводків (поблизу Галича) коливається в межах 0,5-5 м. Для характеристики режиму ріки Дністер використані матеріали спостережень діючого гідрологічного поста, що має довгий ряд спостережень. Максимальні витрати води у Дністрі зумовлені інтенсивними дощами і вони, як правило, більші, ніж весняні витрати талих вод. На водомірному пості м. Галича з 1895 року ведуться заміри витрат води ріки Дністер [1]. Середньорічні витрати води з початку спостережного періоду відтворює графік, зображений на рис. 1. З графіка видно, що загальна тенденція за столітній період спостережень залишається сталою – коливається в межах 100-200 м³/с. Найбільша витрата води у м. Галич зафіксована у 1943 році – 770 м³/с, яка зумовлена наймасштабнішою за цей період повінню.

Для господарської діяльності різних суб’єктів господарювання, які розташовані на берегах р. Дністра, важливе значення має прогнозування його паводків. Таке прогнозування можна здійснити двома способами: за допомогою експоненціального згладжування і за допомогою нейромереж. В даній роботі поставлено мету – зробити порівняльний аналіз цих методів прогнозування і дати рекомендації щодо вибору ефективнішого.

Метод експоненціального згладжування поширюється на процеси, детермінована основа яких подається як поліном n -ого степеня [2]:

$$\hat{\varphi}(\bar{a}, t) = a_0 + a_1 t + \frac{1}{2} a_2 t^2 + \dots + \frac{1}{n!} a_n t^n, \quad (1)$$

де: t – час;

$\bar{a}^T = (a_0, a_1, \dots, a_n)$ – вектор параметрів моделі.

Як свідчать розрахунки з достатньою для практики точністю прогнозування на один крок

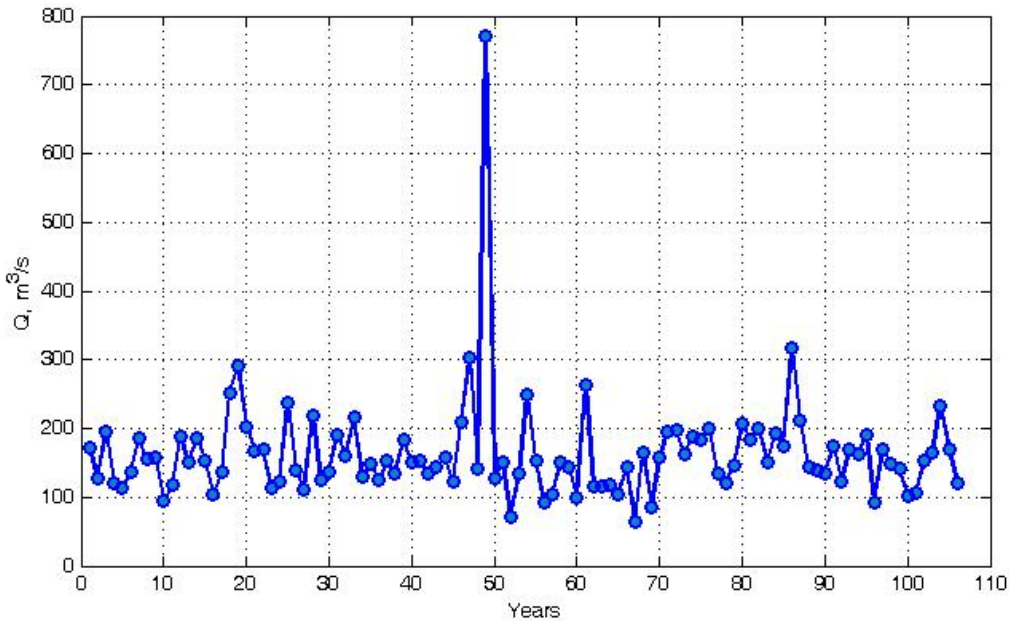


Рисунок 1 — Середні річні витрати води р. Дністер (початок спостережень – 1895 рік)

Таблиця 1 — Коефіцієнти моделі (2)

Модель	Коефіцієнти моделі	\hat{y}_t
Постійна ($n = 0$)	$\hat{a}_{0t} = y_t + \beta(\hat{y}_t - y_t)$.	$\hat{y}_t = \hat{a}_{0(t-1)}$
Лінійна ($n = 1$)	$\hat{a}_{0t} = y_t + \beta^2(\hat{y}_t - y_t)$, $\hat{a}_{1t} = a_{1(t-1)} - \alpha^2(\hat{y}_t - y_t)$.	$\hat{y}_t = \hat{a}_{0(t-1)} + \hat{a}_{1(t-1)}$
Квадратична ($n = 2$)	$\hat{a}_{0t} = y_t + \beta^3(\hat{y}_t - y_t)$, $\hat{a}_{1t} = \hat{a}_{1(t-1)} + \hat{a}_{2(t-1)} - \frac{3\alpha^2}{2}(2 - \alpha)(\hat{y}_t - y_t)$, $\hat{a}_{2t} = \hat{a}_{2(t-1)} - \alpha^3(\hat{y}_t - y_t)$.	$\hat{y}_t = \hat{a}_{0(t-1)} + \hat{a}_{1(t-1)} + \frac{1}{2}\hat{a}_{2(t-1)}$

(рік) можна обмежитись $n \leq 2$. Тоді експоненціальне згладжування на крок вперед $\Delta t = t_i - t_{i+1}$ буде визначатися співвідношенням:

$$\hat{Q}_{t+\Delta t} = \hat{a}_{0t} + \hat{a}_{1t}\Delta t + \frac{1}{2}\hat{a}_{2t}\Delta t^2. \quad (2)$$

Коефіцієнти залежності (1) виражаються формулами експоненціального згладжування. Для $n = 1$ формула експоненціального згладжування буде такою [3]:

$$S_t = \alpha Q_t + \beta S_{t-1}.$$

При переході до поліномів порядку, вищого за одиницю, використовують експоненціальне згладжування p -го порядку [2]:

$$S_t^{(p)} = \alpha Q_t + \beta S_{t-1}^{(p)}. \quad (3)$$

Взаємозв'язок між коефіцієнтами залежності (2) і величинами $S_t^{(p)}$ і $S_{t-1}^{(p)}$, які входять до формули (3) можна отримати із критерію мінімуму зваженої суми квадратів [2]

$$\alpha \sum_{j=0}^{\infty} \beta^j \left(y_{t-j} - \sum_{i=0}^n \frac{a_{it}}{i!} (t-j)^i \right)^2 \rightarrow \min,$$

де: $y_t = Q_t$;

j – порядкові номери відліку значень Q у моменти часу t_0, t_1, \dots, t_n .

Виявляється [2], що величини $S_t^{(p)}$ і $S_{t-1}^{(p)}$ можна виразити через коефіцієнти a_{it} і згладжені значення \hat{y}_t . У результаті отримаємо рекурентні процедури, які наведені в табл. 1 [2, с. 165].

У формулах, наведених у табл. 1, t набуває значень $0, 1, \dots, n$. Тобто у процесі прогнозу враховуються поточні значення стоку $y_t = Q_t$ для прогнозування майбутніх значень $y_{t+i} = Q_{t+i}$, де $i = 1, 2, \dots$ – крок прогнозу. Для $t = 0$ приймають, що $\hat{y}_0 = y_0 = Q_0$.

Як альтернативний експоненціальному згладжуванню розглянутий метод прогнозування, який базується на використанні нейромереж. Для прогнозу майбутніх значень функції $Q = \varphi(t)$ за її минулими значеннями використовується адаптивний лінійний зважений суматор, який відомий в літературі [4] як

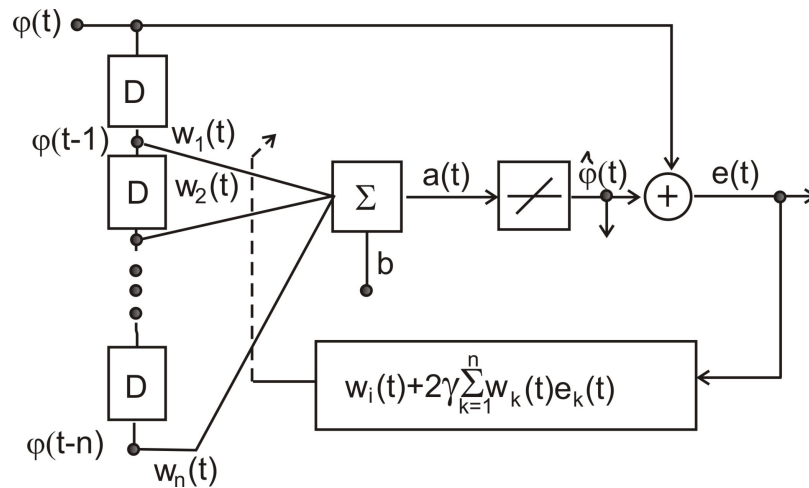


Рисунок 2 — Нейромережа прогнозу стоку р. Дністер

Адаптивна (Adaptive Linear Neuron) (рис. 2). Він складається із двох частин: лінійно-зваженого суматора з адаптивно корегувальними вагами і підсистеми, яка призначена для адаптивної корекції цих ваг і яка реалізує так званий LMS-алгоритм

$$\hat{w}_i(t+1) = \hat{w}_i(t) + 2\gamma \sum_{k=1}^n w_k(t) e_k(t), \quad k = \overline{1, N},$$

де: $w_i(t)$ – ваги нейромережі;

$e(t)$ – похибка прогнозу;

γ – коефіцієнт навчання;

t – номер відліку ординати функції $\varphi(t)$;

n – кількість минулих значень $\varphi(t)$, які використовуються для прогнозу.

До виходу суматора приєднують, як правило, лінійну сигмоїду [4]. Минулі значення $y(t)$, $t = \overline{1, n}$ подаються в секційну лінію затримки. Кожна лінія затримки на рис. 2 позначена буквою D . Вихід адаптивного фільтра $a(t)$ обчислюється за такою формулою:

$$a(t) = \sum_{i=1}^n w_{i1} \varphi(t-i+1) + b,$$

де b – величина зсуву.

Відбір моделі здійснюється за допомогою двох ознак. Першою ознакою слугувала величина [2]

$$\hat{S}_0^2 = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^n (y_i - \varphi(\hat{a}, t))^2, \quad (4)$$

де: $v = n - k$;

n – розмір статистики;

k – розмір вектора оцінки \hat{a} .

Ознака \hat{S}_0^2 характеризує ступінь згладжування статистичних даних $y(t)$ і разі співпадання детермінованої основи $\varphi(\hat{a}, t)$ і функції $\hat{\varphi}(\hat{a}, t)$ є незміщеною оцінкою дисперсії [2].

Тому, як правило, та пробна функція, для якої \hat{S}_0^2 менше, точніше описує детерміновану

основу. Проте не завжди мінімум \hat{S}_0^2 відповідає мінімуму помилки апроксимації. Можливі випадки, коли використання лише цієї ознаки спричиняє грубі помилки, виникнення яких пояснюється [2] як неповнотою системи ознак, так і тим, що розглядається, як правило, неповний клас пробних функцій.

Другою ознакою вибору пробної функції детермінованої основи є коефіцієнт кореляції [4]

$$\hat{r}_y = \frac{1}{v \hat{S}_0^2} \sum_{t=1}^n \Delta y(t) \Delta y(t-1), \quad (5)$$

де $\Delta y(t) = y(t) - \hat{\varphi}(\hat{a}, t)$.

У випадку співпадання детермінованої основи і пробної функції значення коефіцієнта кореляції \hat{r}_y буде прямувати до нуля [2], оскільки $y(t) \rightarrow \hat{\varphi}(\hat{a}, t)$. Ця властивість коефіцієнта кореляції слугує основою для відбору пробних функцій. Ознака \hat{r}_y не тільки вказує, яка функція із системи функцій найкраще апроксимує експериментальні дані, але й дає змогу зробити висновок “погана” чи “добра” сама по собі функція, яка розглядається [2]. Дійсно, якщо функція, що розглядається, дає значення \hat{r}_y близьке до одиниці, то це є ознакою того, що існує інша функція, яка краще відповідає статистиці, ніж вихідна функція.

Для даних, які наведені на рис. 1, прогноз здійснювався за допомогою нейромережі та експоненціального згладжування. В останньому випадку було взято три пробних функції у вигляді полінома (1) зі значеннями $n = 0$, $n = 1$ і $n = 2$, а величина α і β були взяті такими: $\alpha = 0,2$ і $\beta = 0,5$. У табл. 2 занесено значення ознак відбору пробних функцій. Аналіз табл. 2 свідчить, що найменший коефіцієнт кореляції (5) і найменше значення \hat{S}_0^2 відповідає квадратичній моделі.

На рис. 3 зображено графіки стоку р. Дністер і його прогнозованих значень, які отримані за допомогою нейромережі і квадратичної моделі.

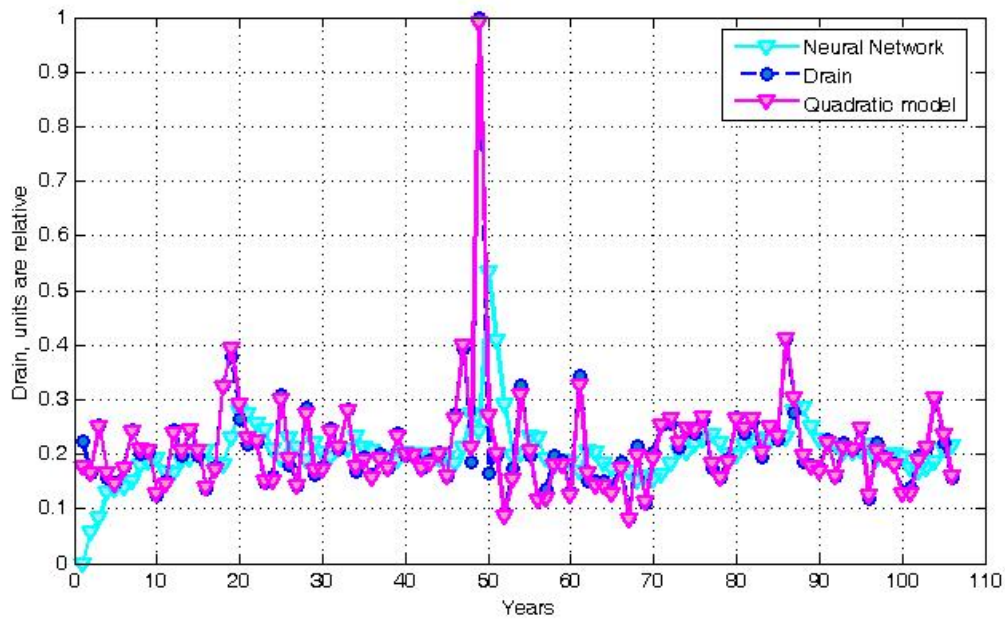


Рисунок 3 — Дійсні і прогнозовані значення стоків р. Дністер

Таблиця 2 — Значення ознак відбору пробних функцій

Модель	Ознака відбору	
	$\hat{S}_0, m^3 / c$	\hat{r}_y
Постійна	6.5643	0.27713
Лінійна	4.7434	0.39821
Квадратична	3.3466	0.06626
Нейромережа	9.1712	0.18363

На цьому рисунку значення стоків подані у безрозмірних одиницях – $q(t) = \frac{Q(t)}{\max_t Q(t)}$, де $\max_t Q(t)$, максимальне значення стоку на інтервалі спостереження $t \in [0; n]$. Похибки прогнозування визначимо за формулою

$$\delta = \frac{|\hat{Q}(t) - Q(t)|}{Q(t)},$$

де $\hat{Q}(t)$, $Q(t)$ – прогнозоване і дійсне значення стоку у момент часу t .

Аналіз похибок прогнозування стоку р. Дністер δ свідчить, що найбільше її значення $\delta = 0,63$ відноситься до 1944 року. Це пояснюється тим, що у 1943 р. був аномально високий стік води і наслідком цього був завищений прогноз стоку на 1944 р. Протилежна ситуація спостерігалась у 1942, 1947 і 1951 рр., коли після засушливих років наставали дощові періоди, що і викликало завищені похибки прогнозу $0,1 < \delta < 0,15$. Для інших років похибка прогнозу не перевищувала значення 0,1. Звичайно, зі збільшенням глибини прогнозу похибка δ буде зростати.

Таким чином, доведено, що із двох методів короткотермінового прогнозування стоку р. Дністер (експоненціального і з використанням теорії нейромереж) найкращі результати отримані з використанням експоненціального згладжування з поліномом другого порядку. Отримана математична модель прогнозування стоку ріки Дністер може бути використана для планування протипаводкових заходів з метою запобігання техногенних аварій газопроводів, які прокладені через р. Дністер або біля її русла.

Література

- 1 Пендерецький О.В. Екологія Галицького району: Монографія. – Івано-Франківськ: Нова зоря, 2004. – 198 с.
- 2 Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. – М.: Советское радио, 1975. – 400 с.
- 3 Івахненко О.Г., Лапа В.Г. Передбачення випадкових процесів. – К.: Наукова думка, 1969. – 420 с.
- 4 Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.