

ГІСТОГРАМНИЙ МЕТОД ФІЛЬТРАЦІЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИГНАЛІВ



І.В. Суrowцев, канд. техн. наук

Вступ. Забруднення навколишнього середовища токсичними хімічними елементами під час промислового виробництва та необхідність постійного моніторингу цього процесу потребує подальшого розвитку аналітичного приладобудування та вдосконалення методів обробки даних вимірювання. Найбільш чутливими для визначення концентрації елементів у різних об'єктах навколишнього середовища є електрохімічні способи дослідження, серед яких – методи інверсійної хронопотенціометрії. Вони активно використовуються в приладах та аналізаторах, що серійно випускаються в Україні.

Однією із основних проблем, яка виникає перед розробниками, є цифрова фільтрація даних, зашумлених випадковою високочастотною перешкодою. Особливо це стосується випадків, коли потрібно створити автономний прилад для роботи у реальному часі на базі мікропроцесора з обмеженим об'ємом пам'яті. Як правило, вирішення цієї задачі дуже специфічне для кожного типу вхідних сигналів, але загальні підходи та набутий досвід можуть бути використані при розробці нових приладів або технічних систем вимірювання.

На практиці при виконанні фільтрації вхідного сигналу у реальному часі застосовують методи, що не потребують його запам'ятовування та не залежать від допоміжних параметрів, пов'язаних із значеннями даних. До них можна віднести: відомий рекурентний метод експоненціального згла-

дження, запропонований Р. Брауном [1], у вигляді суми попередніх даних часового ряду з ваговими коефіцієнтами, що експоненціально зменшуються; двопараметричний метод Холта [2] або трипараметричний метод Уінтерса [3] як різновидності попереднього методу; різні варіанти методу середнього змінного [4] із заданою шириною вікна згладжування; цифровий фільтр Баттерворта [5], що має максимально плоску амплітудно-частотну характеристику у полосі пропускання. Недоліками використання цих методів є спотворення форми вихідного сигналу після фільтрації, особливо на ділянках швидкої зміни потенціалів інверсії при переході від одного елемента до іншого, що призводить до значного збільшення похибки вимірювання концентрацій елементів [6].

Найбільш простим розв'язком цієї проблеми є використання способу групування даних вхідного сигналу в межах постійних за амплітудою та часом розмірах вікна фільтрації, з підрахунком середніх значень і подальшою їх інтерполяцією на весь сигнал [7; 8]. Недоліком цього підходу є складність автоматичного вибору ширини вікна за часом для електрохімічних сигналів різної тривалості (від 0,05 до 800 с) та проблеми реалізації способу у форматі реального часу.

Підсумовуючи, можна дійти висновку, що створення методу цифрової фільтрації електрохімічних сигналів у хронопотенціометрії для обробки даних у реальному часі є важливою задачею та потребує вирішення.

Мета статті – викладення нового розробленого методу цифрової фільтрації для електрохімічних сигналів у хронопотенціометрії в реальному часі. Ця проблема може бути сформульована так: необхідно відновити

монотонно зростаючий корисний сигнал $f(t)$ по випадковій реалізації $F(t) = f(t) + \xi(t)$ на тлі адитивної перешкоди $\xi(t)$. Вважають, що $\xi(t)$ є рівномірно розподіленою у вхідному сигналі $F(t)$, з нульовим математичним очікуванням та обмеженим значенням дисперсії, та складається із суми різних типів перешкод, які присутні одночасно та незалежно спотворюють корисний сигнал [4; 5; 9].

При електрохімічному визначенні концентрації токсичних елементів у розчинах проби методами інверсійної хронопотенціометрії сигнал від електродів являє собою інтегральну суму послідовного вимірювання у часі монотонно зростаючих потенціалів інверсії окремих елементів після їх попереднього накопичення на вимірювальному електроді.

Розглянемо метод гістограмної цифрової фільтрації електрохімічного сигналу, що виконує обробку даних у режимі реального часу. Суть методу полягає в наступному:

- перед початком роботи діапазон вимірювання сигналу ділять на рівні за амплітудою інтервали та встановлюють адреси елементів пам'яті, що відповідають числу спостережень і середній амплітуді в кожному інтервалі;

- припускають, що для монотонно зростаючого (спадаючого) корисного сигналу під час виконання цифрової фільтрації адитивна перешкода буде взаємно гаситися при попаданні у різні амплітудні інтервали;

- поточні значення сигналу поступають на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП), одержані дискретні дані квантують за амплітудою, визначають номер інтервалу та адреси відповідних елементів пам'яті, в яких підраховують нарощуване значення числа спостережень і середньозважене значення амплітуди в інтервалі;

- поступово у пам'яті формують гістограму розподілу амплітуд вхідного сигналу (звідси назва способу гістограмної цифрової фільтрації [10]);

- знаючи постійний час дискретизації АЦП і число спостережень, а також середнє зна-

чення амплітуди в кожному інтервалі, будують фільтрований сигнал як суму поточних значень тривалості кожного інтервалу.

Алгоритм методу гістограмної цифрової фільтрації такий:

- визначають об'єм елементів пам'яті N за граничними значеннями діапазону вимірювання сигналу $[f_{max}, f_{min}]$ та заданій висоті інтервалу за амплітудою Δf

$$N = (f_{max} - f_{min}) / \Delta f; \quad (1)$$

- виділяють пам'ять та обнуляють значення числа спостережень p_k і середньої амплітуди f_k у всіх інтервалах k

$$p_k = 0, f_k = 0, k = 1, \dots, N;$$

- для поточної амплітуди сигналу F_i визначають номер інтервалу k

$$k = (F_i - f_{min}) / \Delta f; \quad (2)$$

- визначають для інтервалу k нове значення числа спостережень p_k

$$p_k = p_k + 1 \quad (3)$$

та середньозважене значення амплітуди f_k

$$f_k = (f_k(p_k - 1) + F_i) / p_k; \quad (4)$$

- після обробки всіх даних розраховують тривалість спостережень амплітуд сигналу Δt_k в кожному інтервалі k за числом спостережень p_k та часом дискретизації АЦП τ

$$\Delta t_k = p_k \cdot \tau; \quad (5)$$

- визначають координати динати часу t_k для кожного інтервалу k

$$t_k = t_{k-1} + \Delta t_k, \text{ при } t_0 = 0;$$

$$y_0 = 0; k = 1, \dots, N; \quad (6)$$

– координати точок фільтрованого сигналу (t_i, f_i) розраховують шляхом інтерполяції знайдених координат часу та амплітуд інтервалів (t_k, f_k) , наприклад, використовуючи локальні кубічні ермітові сплайни [7].

Після закінчення виконання методу гістограмної цифрової фільтрації для подальшої обробки визначають для кожного інтервалу абсциси точок сигналу інтенсивності $(f_{0k}, \Delta t_k)$

$$f_{0k} = f_{0k-1} + \Delta f, \text{ при } f_{01} = f_{\min}; k = 2, \dots, N. \quad (7)$$

Сигнал інтенсивності $\Delta T(f)$ розглядають як лінійну суму компонентів вимірювання інверсії окремих хімічних елементів. Кожний компонент описують у вигляді моделі, апроксимуючи значення сигналу математичною функцією, наприклад, функціями нормального розподілу з різними дисперсіями [6], при цьому намагаються найбільш точно визначити значення часу інверсії, за яким буде проводитись розрахунок концентрації елемента.

Час інверсії обчислюється як площа компонента сигналу інтенсивності $\Delta T(f)$

$$t_j = \int_{f_{1j}}^{f_{2j}} \Delta T(f) df = \sum_{i=f_{1j}}^{f_{2j}} \Delta t_i, \quad (8)$$

де t_j – час інверсії; f_{1j}, f_{2j} – граничні значення потенціалів діапазону вимірювання j компонента. При багатокомпонентному аналізі використовують ітераційну процедуру синтезу моделей для розділення суми компонентів.

Простий, на перший погляд, алгоритм методу гістограмної фільтрації насправді виконує цілеспрямоване перетворення структури вхідних даних вимірювання [11], згідно з яким вхідний сигнал $F(t)$ очищають від адитивної перешкоди $\zeta(t)$ методом цифрової фільтрації для одержання монотонно зростаючого сигналу. Потім сигнал $f(t)$ перетворюють у зворотний сигнал $t(f)$ з шагом дискретизації Δf та диференціюють. Так одержують сигнал інтенсивності $\Delta T(f) = dt/df$, координати якого визначають по залежностях (5) та (7).

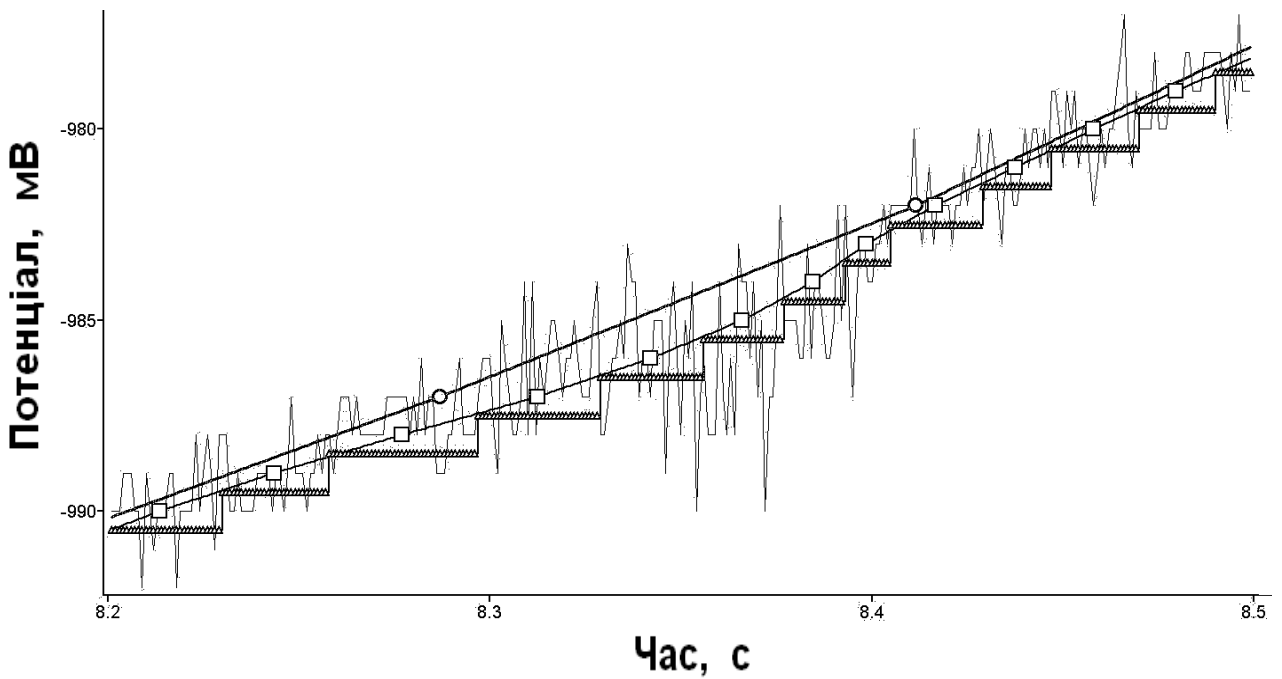
Описаний підхід до попередньої обробки вхідних даних у реальному часі має універсальний характер і може застосовуватись для аналізу сигналів різної природи, в яких корисні значення монотонно збільшуються або зменшуються.

Використання методу гістограмної цифрової фільтрації для обробки електрохімічних сигналів. Розглянемо невеликий фрагмент сигналу інверсії елемента Zn (цинк) з повною вибіркою $N = 11225$ точок, частотою дискретизації $\Delta \tau = 0,001$ с, у від'ємній області потенціалів із межами діапазону вимірювання всього сигналу $f_{\min} = -2500$ мВ та $f_{\max} = +1500$ мВ. Задамо висоту інтервалу по потенціалу $\Delta f = 1$ мВ та виконаємо гістограмну фільтрацію вхідного сигналу. Фрагменти сигналу «вхідний», інтегрованого сигналу інтенсивності «гістограмний» і фільтрованого сигналу з інтервалом по потенціалу 1 мВ «фільтр 1 мВ» приведено на рис. 1.

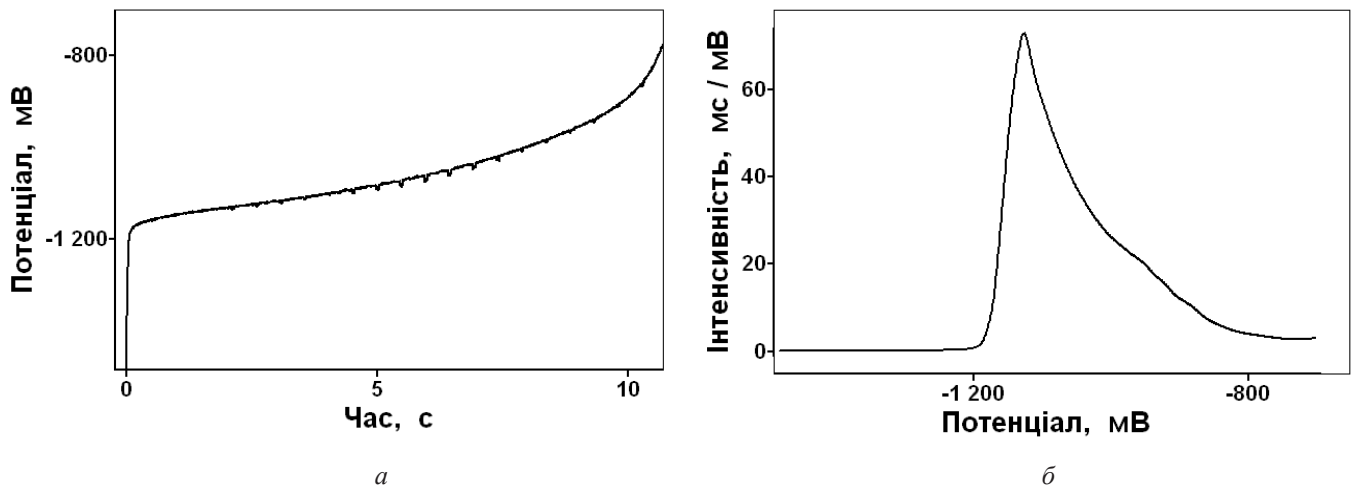
Результати цифрової фільтрації показують, що одержаний сигнал «фільтр 1,0 мВ» майже повністю повторює всі особливості корисного сигналу. Збільшимо інтервал по потенціалу $\Delta f = 5$ мВ і знову виконаємо гістограмну фільтрацію вхідного сигналу. Одержаний фільтрований сигнал «фільтр 5 мВ», приведений на рис. 1, уже набагато краще описує корисний сигнал інверсії.

Значення вхідного сигналу інверсії вимірювання цинку приведено на рис. 2а, одержаний сигнал інтенсивності зображено на рис. 2б.

Описаний метод гістограмної цифрової фільтрації був використаний при створенні автономного приладу визначення концентрації важких металів «МА-1020» для роботи у реальному часі, а також застосовувався у блоках вимірювання приладів: «Хронополярограф», «Аналізатор ТМ» та «М-ХА1000». Спочатку у пам'яті блоку формувався сигнал інтенсивності, а потім його використовували для подальшого аналізу. Чутливість визначення концентрації чотирьох важких металів на цих аналізаторах була $0,01$ мкг/см³, при інтер-



— вхідний, - - - гістограмний, —□— фільтр 1,0 мВ, —○— фільтр 5,0 мВ
Рис. 1. Гістограмна фільтрація електрохімічного сигналу



a *б*
Рис. 2. Сигнали інверсії та інтенсивності вимірювання цинку:
 а – сигнал інверсії, б – сигнал інтенсивності

валі по потенціалу 5 мВ, що не задовольняло практичні потреби аналізу. Було створено новий прилад «Аналізатор ІХП», в якому спочатку зчитується та передається в комп'ютер увесь сигнал, а потім виконується його попередня цифрова обробка. При цьому метод гістограмної фільтрації використовується як допоміжний спосіб для цифрової фільтрації слабо зашумлених сигналів. Прилад «Аналізатор ІХП» нині дозволяє виконувати аналіз чотирнадцяти токсичних елементів (ртуть, миш'як, селен, залізо, нікель, кобальт, свинець,

кадмій та інші) з необхідною для практики чутливістю $0,0001 \text{ мкг/см}^3$, при інтервалі по потенціалу 1 мВ [12].

Використання методу гістограмної фільтрації в технічних системах. Метод гістограмної цифрової фільтрації даних одержав широке застосування у різних областях техніки при створенні систем вимірювання, в яких корисні значення монотонно збільшуються або зменшуються.

Цей метод використовується у діючих системах поосного зважування автомобілів

на платформних вагах [13] для фільтрації динамічних тензометричних сигналів при заїзді на платформу та з'їзді з платформи ваг. Під час в'їзду транспортних засобів в Україну на митниціях, у міжнародних автомобільних пунктах пропуску визначають і контролюють осьові навантаження та загальну масу автомобіля для запобігання руйнуванню доріг.

Наведемо приклад вхідного сигналу зважування двохосного автомобіля під час його заїзду на платформу ваг (лінія з маркерами) та сигналу після гістограмної цифрової фільтрації (товста лінія), які приведено на рис. 3а. Навантаження на осі та загальна маса автомобіля визначаються за сигналом інтенсивності, приведеним на рис. 3б.

Метод гістограмної цифрової фільтрації також застосовується у багатьох діючих системах дозування для попередньої обробки сигналів зважування при виконанні контролю

поступового збільшення загальної ваги. Наприклад, його використовують у системі безперервного дозування руди, штибу та вапняку на Побужському феронікелевому комбінаті Кіровоградської області; при дозуванні сухих компонентів сумішів на вузлах підготовки бетону; при контролі складових рецептів під час виготовлення комбікормів та в інших аналогічних технічних системах вимірювання.

Висновки

У Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій та систем НАН та МОН України розроблено метод гістограмної цифрової фільтрації електрохімічних сигналів для роботи у режимі реального часу [10], який тривалий час успішно використовується у приладах, що визначають концентрацію токсичних елементів способом інверсійної хронопотенціометрії у розчинах проби різних об'єктів навколишнього середовища.

Метод підтвердив свою працездатність і надійність при виконанні попередньої цифрової обробки різноманітних сигналів і був упроваджений у програмне забезпечення багатьох систем вимірювання. Сфери застосування методу не обмежуються наведеними прикладами технічних систем і можуть значно розширитись. Пояснюється це тим, що запропонований метод гістограмної цифрової фільтрації є універсальним, тому може застосовуватись при аналізі різноманітних сигналів фізичної або хімічної природи, для яких корисний сигнал після попередньої обробки монотонно зростає чи зменшується.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Brown R.G.* The fundamental theorem of exponential smoothing / *R.G. Brown, R.F. Meyer* // *Oper. Res.* – 1961. – 9, № 5. – Р. 23–34.
2. *Holt C.C.* Forecasting trend and seasonal by exponentially weighted moving averages / *C.C. Holt* // *O.N. R. Memorandum, Carnegie Inst. of Technology.* – 1957. – № 52. – Р. 17–23.
3. *Winters P.R.* Forecasting sales by exponentially weighted moving averages / *P.R. Winters* // *Management Science.* – 1960. – 6, № 3. – Р. 34–46.
4. *Файнзильберг Л.С.* Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика / *Л.С. Файнзильберг.* – К. : Наукова думка, 2008. – 333 с.

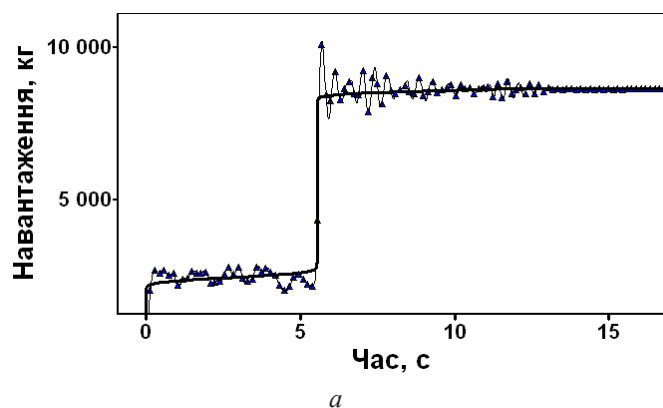


Рис. 3. Сигнали зважування та інтенсивності двохосного автомобіля:
а – сигнали вхідний та фільтрації,
б – сигнал інтенсивності

5. *Оппенгейм А.В.* Цифровая обработка сигналов / *А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер.* – М. : Техносфера, 2006. – 856 с.

6. *Суровцев И.В.* Моделирование дифференциальных хронопотенциограмм суммой нормальных распределений / *И.В. Суровцев, А.Э. Татаринцев, С.К. Галимов* // Управляющие системы и машины. – 2009. – № 5. – С. 40–45.

7. *Шелевицкий И.В.* Сплайны в цифровой обработке данных и сигналов / *И.В. Шелевицкий, М.О. Шутко, В.М. Шутко, О.О. Колганова.* – Кривий Ріг: Видавничий дім. – 2008. – 232 с.

8. *Васильев В.Н.* Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам / *В.Н. Васильев, И.П. Гуров* // – СПб. : БХВ – Санкт-Петербург, 1998. – 240 с.

9. *Задирака В.К.* Цифровая обработка сигналов / *В.К. Задирака, С.С. Мельникова* – К. : Наук. думка, 1993. – 294 с.

10. Спосіб гістограмної цифрової фільтрації хронопотенціометричних даних: пат. 96367 Україна: МПК G01N 27/48 / *И.В. Суровцев, В.М. Галимова, О.В. Бабак*; Опубл. 25.10.2011. – Бюл. № 20.

11. *Суровцев И.В.* Преобразование структуры данных при определении концентрации методом инверсионной хронопотенциометрии / *И.В. Суровцев* // Кибернетика и вычислительная техника. – 2015. – № 180. – С. 4–14.

12. Пристрій для вимірювання концентрації токсичних елементів: пат. 107412 Україна: МПК G01N 27/48 / *И.В. Суровцев, С.К. Галимов, І.А. Мартинов, О.В. Бабак, В.М. Галимова*; Опубл. 25.12.2014. – Бюл. № 24.

13. Система поєсового зважування на платформних вагах: пат. 106013 Україна: МПК G01G 19/02 / *И.В. Суровцев, О.В. Бабак, О.Е. Татаринцев, Ю.А. Крижановський*; Опубл. 10.07.2014. – Бюл. 13.

УДК 658.52.011.56:621.771.23-413

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПЛОЩИННОСТІ ТОВСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ



М.Г. Ієвлєв,
канд. техн. наук,
Г.Г. Грабовський,
докт. техн. наук

Актуальність проблеми. Підвищення вимог до точності розмірів і форми гарячекатаних смуг і листів продиктовано тим, що збільшується частка продукції таких галузей промисловості, як машинобудування, виготовлення будматеріалів і труб, котра проводиться на автоматичних потокових лініях. Нормальне функціонування таких ліній залежить не тільки від точності товщини, а й ширини і площинності металу, який поставляється. Таким чином, одним із найважливіших якісних показників прокату є площинність готових листів.

Мета роботи – дослідження математичного опису формоутворення товстого листа в просторі щодо автоматизованої системи керування технологічним процесом товстолистого стану (АСКТП ТЛС).

Виклад основного матеріалу. Механізм виникнення неплщинності прокату, як відомо, пояснюється нерівномірністю його витяжок у різних поздовжніх перерізах по ширині смуги, що призводить до появи додаткових напружень. У зонах підвищених обтискань виникають напруження стиснення, а в менш обтиснутих частинах смуги – напруження розтягнення. При цьому є два нейтральних перерізи по ширині смуги, в яких немає додаткових напружень і які знаходяться приблизно на відстані $B/4$ від осі смуги, де B – ширина смуги. Величина стискаючих додаткових напружень пропорційна різниці відносних поперечних різнотовщинностей до і після пропуску:

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{C_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{C_i}{h_i}, \quad (1)$$

де C_{i-1} , h_{i-1} , C_i , h_i – відповідно поперечні різнотовщинності й товщини прокату до i -го пропуску та після нього; $\sigma_{\text{доп}}$ – додаткові напруження [1; 2].