

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КАБЕЛІВ

Островерхов М. Я., Сільвестров А. М., Кривобока Г. І.

1. Вступ

Технологічно провідні країни перейшли чи здійснюють перехід на передачу електроенергії за допомогою надвисоковольтних кабелів з полімерною ізоляцією. Виробництва кабелю здійснюється на неперервних технологічних лініях в умовах дії багатьох дестабілізуючих факторів: транспортне запізнення, шуми вимірювання, неможливість точного узгодження роботи всіх систем, коливання параметрів сировини та різні фізико-механічні властивості компонентів кабелю.

Отримання об'єктивної інформації про параметри та хід технологічного процесу дозволяє підвищити якість систем оптимального керування, діагностики та прогнозування. Проблемі параметричної ідентифікації в промисловому виробництві кабелів присвячена значна кількість наукових досліджень [1–13]. Проте в сучасній теорії ідентифікації існує значний розрив між теоретичною частиною і реальною ситуацією. Внаслідок природної нестаціонарності процесів, теорема великих чисел на практиці часто не виконується, а в умовах обмежених вибірок статистично оптимальні методи ідентифікації можуть втратити не лише оптимальність, але і коректність.

Таким чином, актуальним є вдосконалення методів параметричної ідентифікації технологічного процесу виробництва кабелів та впровадження їх в системах адаптивного оптимального керування. Це дозволить підвищити якість продукції в реальних умовах параметричної і сигнальної невизначеності, що буде сприяти більш широкому застосуванню високовольтного кабелю з полімерною ізоляцією в електроенергетичній галузі.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є процес виробництва електричних кабелів з полімерною ізоляцією на надвисокій напрузі.

Виробництво електричних кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену здійснюється на електротехнічних комплексах, які складаються з десятків взаємозв'язаних через рухоми кабельну продукцію локальних систем в умовах дії багатьох невизначених збурюючих факторів [1–3]. Нанесення поліетиленової ізоляції на струмопровідну жилу, яка рухається зі швидкістю біля 50 м/хв здійснюється за допомогою блоку з трьох екструдерів 1 (рис. 1). Зовнішній діаметр кожного шару ізоляції вимірюється з випадковими шумами блоком рентген-датчиків 2 на відстані близько 0,5 м від виходу екструдерів (рис. 1). Товщина кожного шару ізоляції регулюється автоматизованими електроприводами екструдерів шляхом зміни швидкості обертання черв'яків.

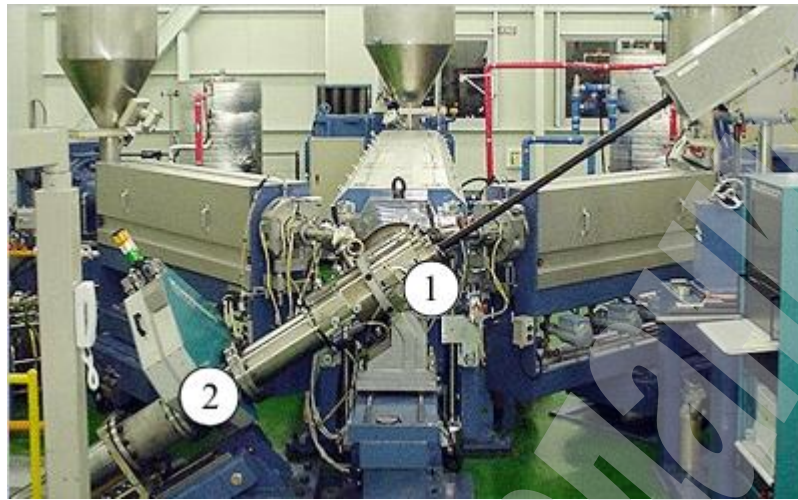


Рис. 1. Блоки: 1 – екструдерів; 2 – датчиків

Підвищення якості керування за наявності шумів вимірювання на основі концепції цілеспрямованої ідентифікації [4] є важливою задачею і для даної системи сприяє зменшенню радіального та осевого зміщення ізоляції відносно металічної жили в процесі її багатошарового нанесення. Схему системи регулювання товщини (зовнішнього діаметру) шарів ізоляції в умовах дії дестабілізуючих факторів представлено на рис. 2.

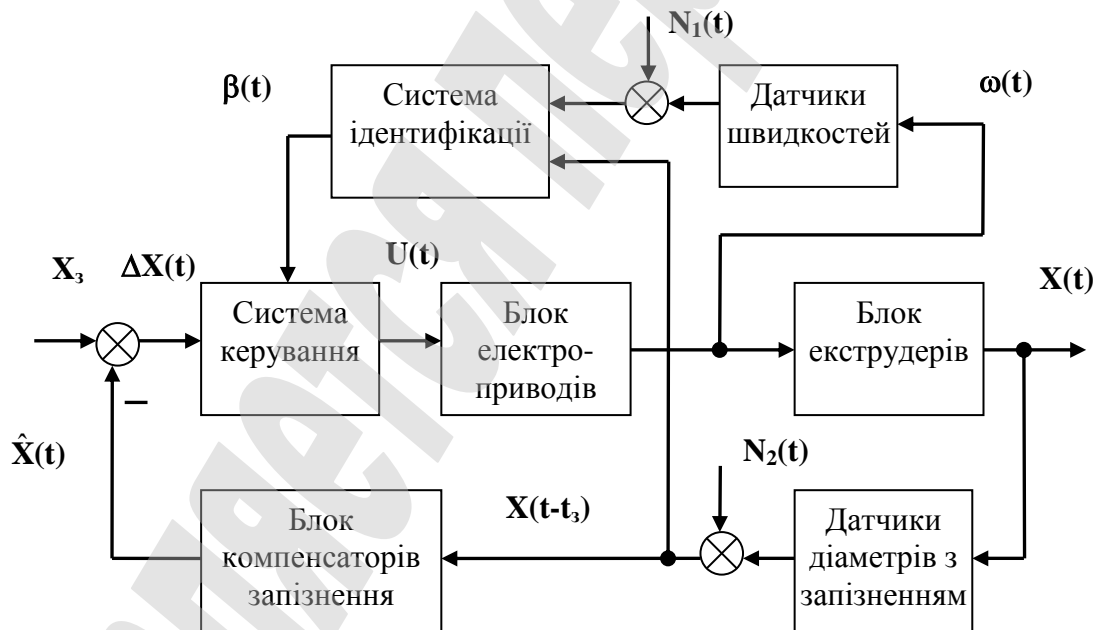


Рис. 2. Функціональна схема системи стабілізації товщини ізоляції

На рис. 2 показано:

X_3 , $X(t)$, $X(t-t_3)$, $\hat{X}(t)$ – вектор-функції заданих, дійсних, виміряних та прогнозованих діаметрів;

$\Delta X(t)$, $U(t)$, $\omega(t)$ – вектор-функції похибок регулювання діаметрів, керуючих впливів та швидкостей обертання черв'яків трьох екструдерів;

$N_1(t)$, $N_2(t)$ – вектор-функції шумів вимірювання швидкостей екструдерів та діаметрів шарів ізоляції;

$\beta(t)$ – вектор-функція ідентифікованих параметрів математичної моделі зв'язку $\omega(t)$ і $X(t)$.

Одними з найбільш проблемних місць в процесі виробництва кабелю є наявність в контурах регулювання товщини ізоляції часового запізнення t_3 приблизно 0,5 с та шумів вимірювання швидкостей черв'яків та діаметрів шарів ізоляції. Часове запізнення негативно впливає на точність керування товщиною шарів та може призвести до втрати стійкості системи, а зашумленість корисних сигналів обумовлює зменшення точності та швидкодії регулювання [5].

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення точності нанесення багатошарової полімерної ізоляції технологічного процесу з виготовленням високовольтного кабелю в реальних умовах невизначеності характеристик об'єкту керування на основі методу параметричної ідентифікації.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Розробити метод параметричної ідентифікації, який би в реальних умовах зашумленості вимірів змінних об'єкта керування давав оцінку, близьку для точних значень параметрів.

2. Провести дослідження властивостей запропонованого методу параметричної ідентифікації в порівнянні з традиційним методом найменших квадратів (НМК).

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Теорія ідентифікації встановлює математичну модель (ММ) зв'язку між вхідними змінними досліджуваного об'єкта $\omega(t)$ (причини, незалежні регресори, керуючі впливи) і вихідними $X(t)$ (наслідки, залежні змінні) шляхом спостережень за поведінкою об'єкта в режимі пасивного чи активного експерименту. За минуле століття відбувся суттєвий розвиток методів і засобів ідентифікації [6, 7], які використовують сучасні автоматизовані системи збору і обробки даних (АСОД). Це дозволило значно підвищити частоту опитування датчиків, швидкість і точність обробки інформації, збільшити інформативність даних на обмежених у часі вибірках. Однак, природні властивості реальних об'єктів (нерозривність матерії і руху, загального взаємозв'язку всього з усім) не дають можливості будувати ММ ідентичні (ізоморфні) реальному об'єкту. Реальному об'єкту відповідають не автономність, не стаціонарність, не лінійність взаємозв'язків змінних стану, нескінченно мірність і т. ін. Найдосконаліша АСОД має можливість спостерігати за обмеженою множиною змінних стану $X(t)$ об'єкта в обмеженому діапазоні. Тому ММ лише наближено відображає взаємозв'язок компонентів $x_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, n -мірної вектор функції $X(t)$ та обмеженої за розмірністю m вектор-функції $U(t)$ вхідних (керуючих) впливів:

$$\dot{X}^*(t) = f(X^*(t), U^*(t), t), \quad (1)$$

де $\dot{X}^*(t)$ – вектор-функція швидкості зміни $X^*(t)$.

В таких умовах змінилися вимоги до систем ідентифікації та керування промислових об'єктів [4, 8–13]: узгоджене виконання функцій ідентифікації та керування; використання даних поточної експлуатації об'єкта; врахування особливостей структури об'єкта; ідентифікація з отриманням оцінок коефіцієнтів з необхідними статистичними властивостями; багатоваріантна ідентифікація з отриманням декількох варіантів різнотемпових оцінок; спільне досягнення дослідних і виробничих цілей функціонування; цілеспрямована ієрархічно-побудована, структурно-параметрична ідентифікація.

Одним з варіантів вирішення проблеми можуть бути методи, що розглянуті в роботах [4, 8, 10–13]. За обмежених відхилень ΔX^* , ΔU^* від базового режиму (X_0, U_0) , часу t та наявності природної гладкості відображення f , нелінійну нестационарну модель (1) можна подати допустимою похибкою $\varepsilon^*(t)$ лінійною стаціонарною системою [4]:

$$\Delta \dot{X}^*(t) = A_0 X^*(t) + B_0 U^*(t) + \varepsilon^*(t), \quad (2)$$

або її скалярним представленням:

$$\Delta \dot{x}_i^*(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \Delta x_j^*(t) + \sum_{k=1}^m b_{ik} \Delta U_k^*(t) + \varepsilon_i^*(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Задача параметричної ідентифікації полягає у визначенні оцінок \hat{a}_{ij} , \hat{b}_{ik} коефіцієнтів a_{ij} , b_{ik} за умови мінімуму функціоналу I_i похибки $\varepsilon_i^*(t)$. Логічно в якості I_i взяти середній на інтервалі T спостереження квадрат похибки $\varepsilon_i^*(t)$, де в (1)–(3) фігурують точні значення відповідних змінних [4]. Тоді в якості найкращої моделі (2) буде та, коефіцієнти a_{ij} , b_{ik} якої обчислено по МНК для точних даних $\dot{X}^*(t)$, $X^*(t)$, $U^*(t)$. Якщо в АСОД є можливість безпосередньо вимірювати $X^*(t)$, $U^*(t)$ чи обчислювати $\dot{X}^*(t)$, то формально динамічні моделі (2), (3) можна подати як регресійні. Наприклад, кожний i -ий рядок системи (2) подамо у вигляді:

$$y^*(k) = \sum_{i=1}^{n+m} \beta_i x_i^*(k) + \varepsilon^*(k), \quad (4)$$

де $y^*(k) = \Delta \dot{x}_i^*(k)$, $x_i^*(k)$ включає множину $\Delta x_j^*(k)$, $\Delta U_k^*(k)$; β_i включає a_{ij} , b_{ik} в рівнянні (3); k – номер дискети t_k часу t , $k = \overline{1, m}$.

Теоретично найкращою оцінкою вектора β параметрів a_{ij} , b_{ik} буде МНК-оцінка за умови точного вимірювання змінних:

$$\hat{\beta}^* = \left((X^*)^T X^* \right)^{-1} (X^*)^T Y^*. \quad (5)$$

Таким чином, результати аналізу методів ідентифікації дозволяють зробити висновок, що досягнення мети роботи можливе при використанні методів цілеспрямованої структурно-параметричної ідентифікації [4]. Завдання полягає в побудові такого методу параметричної ідентифікації, який би в реальних умовах зашумленості вимірів змінних $X^*(t)$, $Y^*(t)$ об'єкта давав оцінку $\hat{\beta}$, близьку до МНК-оцінки (5) для точних даних.

5. Методи дослідження

На практиці МНК-оцінку доводиться отримувати за вимірами, збуреними випадковими перешкодами N_x і N_y :

$$X = X^* + N_x; \quad Y = Y^* + N_y. \quad (6)$$

МНК-оцінка (5) $\hat{\beta}$ вектора β^* для реальних даних (6):

$$\hat{\beta} = (X^T X) X^T Y = C Y, \quad C = (X^T X) X^T. \quad (7)$$

Покладемо, що перешкоди N_x і N_y – гаусівські білі взаємонекоректовані шуми і розрахуємо зсув $\Delta\beta$ оцінки (7) відносно точного значення (5):

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= M\{\hat{\beta}\} - \beta^* = M\left\{ \left[C^* + \delta C(N) \right] \left[Y^* + \varepsilon^* + N_y \right] \right\} - \beta^* = \\ &= M\left\{ \left[C^* + \delta C(N) \right] Y^* \right\} - \beta^* = \left[X^{*T} X^* + M\{N_x^T N_x\} \right]^{-1} X^{*T} Y^* - \beta^* = \\ &= \left[X^{*T} X^* + \text{diag} \sigma_i^2 M \right]^{-1} X^{*T} Y^* - \beta^*. \end{aligned} \quad (8)$$

Введемо позначення:

$$X^{*T} X^* = A^*, \quad M\{N_x^T N_x\} = \delta A, \quad X^{*T} Y^* = B^* = M\{X^T Y\} = B,$$

тоді

$$(A^*)^{-1} B^* = \hat{\beta}^*, \quad [A^* + \delta A] \hat{\beta} = B^*,$$

звідси

$$\delta A \hat{\beta} = -A^* (\hat{\beta} - \hat{\beta}^*) = -A^* \Delta\hat{\beta},$$

тобто

$$\delta A(\beta^* + \Delta\hat{\beta}) = -A^* \Delta\hat{\beta},$$

або

$$\Delta\hat{\beta} = -(A^* + \delta A)^{-1} \delta A \beta^*. \quad (9)$$

Оцінку (7) $\hat{\beta}$ зміщена відносно істинної β^* на величину (9). За умови, що норма $\|\delta A\| \rightarrow 0$, $\hat{\beta}$ прямує до β^* ; $\Delta\hat{\beta} \rightarrow 0$, за умови $\|\delta A\| \rightarrow \infty$ оцінка $\hat{\beta}$ прямує до нуля, а $\Delta\hat{\beta}$ до $-\beta^*$. Коваріація оцінки (7) за наведених вище умов та, приймаючи, що норма $\|N_x^T \varepsilon\|$ набагато менша, ніж $\|X^{*T}\|$ або $\|N_x^T Y^*\|$, наближено дорівнює [8]:

$$\begin{aligned} \text{cov}[\hat{\beta}] &\cong M\{[C_1 \varepsilon + C_2 N_x][C_1 \varepsilon + C_2 N_x]^T\} \\ &= C_1 M\{\varepsilon \varepsilon^T\} C_1^T + C_2 M\{N_x N_x^T\} C_2^T, \end{aligned} \quad (10)$$

де $\varepsilon = \varepsilon^* + N_y$,

$$\begin{aligned} C_1 &= [X^{*T} X^* + M\{N_x N_x^T\}]^{-1} X^{*T}, \\ C_2 &= [X^{*T} X^* + M\{N_x N_x^T\}]^{-1} Y^{*T}. \end{aligned}$$

Перша складова виразу (10) зі зростанням N_x зменшується, в другій C_2 зменшується, а $M\{N_x N_x^T\}$ збільшується. Але C_2 входить до виразу (10) квадратично, тоді як $M\{N_x N_x^T\}$ – лінійно. Тому для білого шуму, якщо $M\{N_x N_x^T\} = \sigma_{N_x}^2 M$, зі зростанням $\sigma_{N_x}^2$ коваріація оцінки $\hat{\beta}$ зменшуватиметься. Таким чином, МНК за умов (6) має властивість регуляризації, подібно до регуляризації за Тихоновим. Остання полягає в мінімізації функціонала:

$$I = \varepsilon^m \varepsilon = (Y - X^*)^T (Y - X^*) + \alpha \hat{\beta}^T \hat{\beta}, \quad (11)$$

де α – параметр регуляризації.

З необхідної умови мінімуму виразу (11):

$$\frac{\partial I}{\partial \hat{\beta}} = 0 = 2(X^{*T} X^* \hat{\beta} - X^{*T} Y + \alpha \hat{\beta}), \quad (12)$$

отримаємо дещо занижену по нормі $\|\hat{\beta}\|$, але регуляризовану МНК-оцінку:

$$\hat{\beta} = (X^{*T}X^* + \alpha I)^{-1} X^{*T}Y. \quad (13)$$

Таким чином, зіставляючи (8) і (13), бачимо, що в МНК параметр Тихонова дорівнює $\text{diag } \sigma_i^2 \cdot M$. МНК-оцінки (7) знаходяться як координата точки мінімуму функціоналу $\varepsilon^T \varepsilon$. Оскільки функціонал є усередненим на кінцевому інтервалі T значенням квадрата ε , яке є сумішшю корисного сигналу $Y^* - X^* \beta$ і випадковою збурення $N_y - N_x \beta$, то він, як функція від β , не є точним. Тому операція диференціювання $\frac{\partial}{\partial \beta} (\varepsilon^T \varepsilon)$ зашумленої функції $\varepsilon^T \varepsilon$ є некоректною [4]. Саме цим обумовлено невисоку точність МНК-оцінок на коротких сильно зашумлених вибірках даних Y , навіть за точних X^* .

6. Результати дослідження

Для підвищення якості ідентифікації бажано зменшити розкид значень функціонала I , майже не зменшуючи його кривизни і координати екстремуму. Це можливо зробити шляхом додаткового усереднення по множині квазістатистично незалежних функціоналів, близьких до середньоквадратичного для точних даних [4]. Такими функціоналами можуть бути зсунуті у часі t на інтервал θ середні добутки $\frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon(t) \varepsilon(t+\theta) dt$. Усереднюючи їх на інтервалі $[-\tau_1, \tau_1]$, отримаємо наступний функціонал:

$$I = \frac{1}{2} \int_{-\tau_1}^{\tau_1} \eta(\theta) \int_0^T \varepsilon(t) \varepsilon(t+\theta) dt d\theta, \quad (14)$$

де $\eta(\theta)$ – функція ваги.

З необхідної умови мінімуму по β_k , $k = \overline{1, n}$ показника (14):

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial \beta_k} &= \frac{1}{2} \int_{-\tau_1}^{\tau_1} \eta(\theta) \int_0^T \left[\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial \beta_k} \varepsilon(t+\theta) + \varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon(t+\theta)}{\partial \beta_k} \right] dt d\theta = \\ &= \int_{-\tau_1}^{\tau_1} \eta(\theta) \int_0^T (-x_k(t)) \left[y(t+\theta) - \sum_{i=1}^n \beta_i x_i(t+\theta) \right] + \\ &+ (-x_k(t+\theta)) \left[y(t) - \sum_{i=1}^n \beta_i x_i(t) \right] dt d\theta = 0, \quad k = \overline{1, n}; \end{aligned} \quad (15)$$

отримаємо систему рівнянь:

$$A \cdot \hat{\beta} = B, \quad (16)$$

де A – матриця $n \times n$ з елементами a_{ik} ; B – матриця-стовпчик $n \times 1$ з елементами b_k :

$$a_{ik} = \int_{-t_1}^{t_1} \eta(\theta) \int_0^T [(x_i(t+\theta))x_k(t) + x_i(t)x_k(t+\theta)] dt d\theta,$$

$$b_k = \int_{-t_1}^{t_1} \eta(\theta) \int_0^T [(y_i(t+\theta))x_k(t) + y_i(t)x_k(t+\theta)] dt d\theta.$$

Для дискретних у часі t_j вибірок інтеграли замінимо сумами. Тоді:

$$a_{ik} = \sum_{l=-p}^p \eta(l) \sum_{j=1}^M [(x_i(j+l))x_k(j) + x_i(j)x_k(j+l)],$$

$$b_k = \sum_{l=-p}^p \eta(l) \sum_{j=1}^M [(y_i(j+l))x_k(j) + y_i(j)x_k(j+l)].$$

Розв'язок системи (16) дає шукану оцінку $\hat{\beta}$:

$$\hat{\beta} = A \cdot B. \quad (17)$$

Вагову функцію $\eta(m)$ знаходитимемо у класі симетричних відносно $m = 0$ фінітних функцій (таких, що $\eta(0) = \eta(\pm m_{кр}) = 0$). Наприклад:

$$\eta(m) = \eta(m, \gamma, \theta) = (1 + |m|)^\theta \left(1 - \cos \frac{\pi m}{m_{кр}} \right)^\gamma, \quad (18)$$

де $\theta \in (\pm\infty)$, $\gamma \in (0, \infty)$, $m_{кр}$ визначається за умови:

$$\det \left[X^T \left(X_{m_{кр}} + X_{-m_{кр}} \right) \right] \cong 0. \quad (19)$$

Параметри θ і γ оптимізуються за головним (зовнішнім) показником I [6, 11]. Параметр γ впливає на ширину імпульсу $\eta(m)$, а θ – на його асиметрію відносно максимуму (рис. 3).

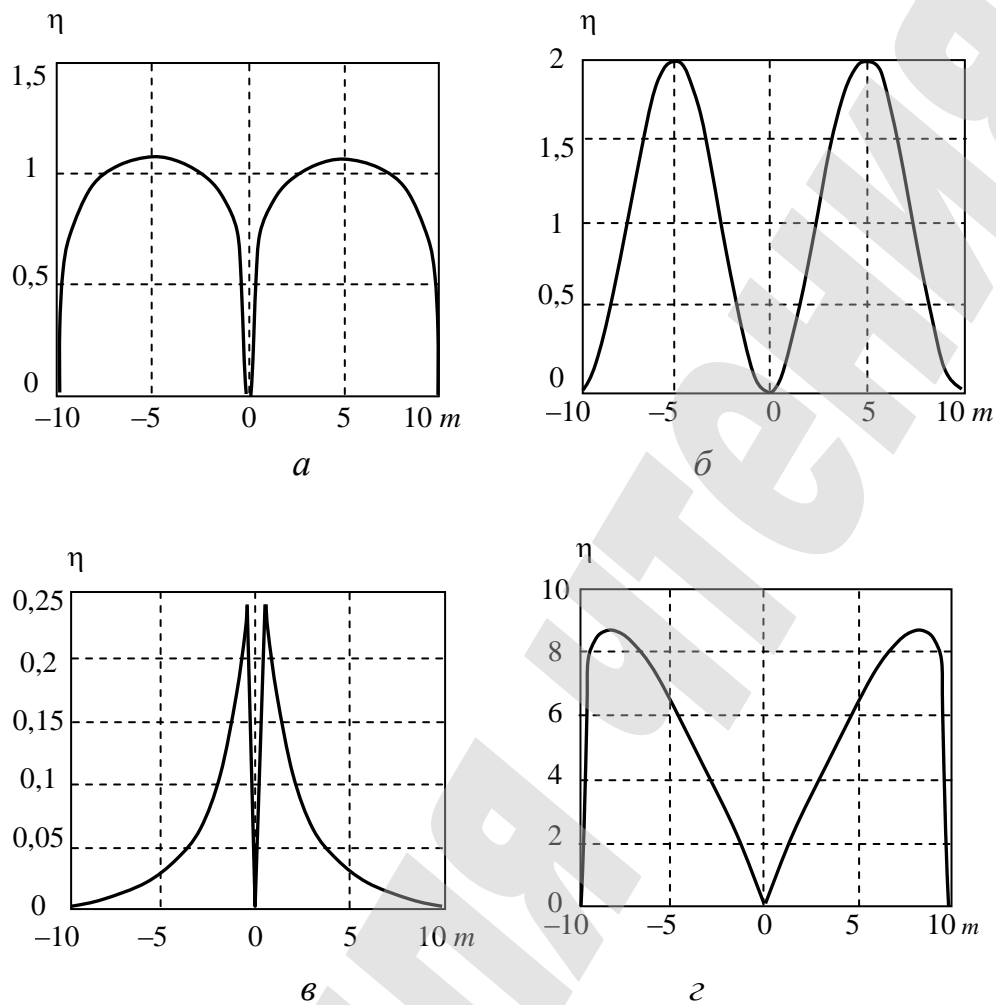


Рис. 3. Залежність $\eta(m, \theta, \gamma)$:

$a - \theta=0, \gamma=0,1$; $б - \theta=0, \gamma=1$; $в - \theta=2, \gamma=0,1$; $г - \theta=2, \gamma=0,1$

Теоретичний аналіз незміщеності і ефективності оцінок $\hat{\beta}$ (16) наведено в роботі [6], числовий аналіз розглянуто далі на конкретному прикладі.

На якість параметричного оцінювання, тобто вирішення зворотної задачі математики [10], впливає ступінь взаємозв'язку змінних $x_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, а не їх кількість. Тому обмежимося простим прикладом. Зв'язок між $\omega^*(t)$ і $X^*(t)$ (рис. 2):

$$x^*(t - t_3) = k\omega^*(t), \quad (20)$$

де t_3 – наближено відоме значення запізнення вимірів $x^*(t)$.

Якщо оператор $e^{-pt_3} = 1/e^{pt_3}$ розкласти в ряд і обмежитись (внаслідок невеликого t_3 відносно періоду зміни корисного сигналу) першими членами, тобто:

$$e^{-pt_3} \cong 1 + t_3 p \quad (21)$$

то, повертаючись до виразу (20) у часі, отримаємо рівняння:

$$\frac{d\omega^*}{dt} = \beta_1^* \omega^*(t) + \beta_2^* x^*(t), \quad (22)$$

де $\beta_1^* = -\frac{1}{t_3}$, $\beta_2^* = -\frac{1}{t_3 \cdot k}$.

Рівняння (22) подамо у вигляді (4), де $y^* = \frac{d\omega^*}{dt}$, $x_1^* = \omega^*$, $x_2^* = x^*$, $\beta_1^* = \beta_2^* = 1$:

$$y^*(k) = \beta_1^* x_1^*(k) + \beta_2^* x_2^*(k); k = \overline{1, 1000};$$

$$\beta_1^* = \beta_2^* = 1; x_1^* = \sin \frac{\pi k}{500}; x_2^* = \sin \left(\frac{\pi k}{500} + \frac{\pi}{6} \right).$$

На виміри $y(k)$, $x_1(k)$ $x_2(k)$ накладено білий шум – випадкові числа з рівномірним розподілом в діапазоні $[\pm 1]$. Для об'єктивного оцінювання зміщення і розкиду оцінок $\hat{\beta}_1$, $\hat{\beta}_2$ відносно істинних β_1 , β_2 згенеровано 10 статистично незалежних реалізацій шумів. Результати ідентифікації коефіцієнтів β_1 , β_2 по МНК та запропонованим методом наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати оцінювання параметрів при зашумленості вхідних та вихідних змінних

N	МНК-оцінювання		Оцінювання запропонованим методом	
	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$
1	0,479064	0,498144	1,028277	0,909424
2	0,460761	0,449362	1,017960	0,884437
3	0,484336	0,566314	1,091629	0,8435981
4	0,502460	0,540129	1,002014	0,929065
5	0,524662	0,465954	1,031359	0,979809
6	0,499727	0,505891	1,290496	0,743785
7	0,484993	0,525599	0,709392	1,230719
8	0,491984	0,443124	0,828313	1,191077
9	0,467612	0,485666	1,082564	0,719709
10	0,464255	0,601529	0,965397	1,011236
$\bar{\beta}$	0,4860	0,5082	1,0047	0,943
$\sigma_{\beta_i}^2$	0,00038	0,0026	0,0241	0,0283
σ_{β_i}	0,0197	0,0511	0,1551	0,1682

Результати оцінювання параметрів в ситуації зашумленості тільки вихідних змінних запропонованим методом і МНК представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати оцінювання параметрів при зашумленості тільки вихідних змінних

N	МНК-оцінювання		Оцінювання запропонованим методом	
	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$
1	0,978163	0,921239	0,949749	1,101904
2	1,054159	0,937174	1,023444	0,855408
3	0,932957	1,081755	0,982595	1,061898
4	1,118181	0,881928	1,011197	0,913209
5	0,984799	1,032784	1,190762	0,980720
6	1,000925	1,019233	1,101843	0,982305
7	1,154927	0,825866	0,986680	1,124493
8	0,940740	1,076540	1,021694	0,987923
9	0,957818	1,082379	0,963915	1,086121
10	1,000738	0,941259	1,096120	0,994633
$\bar{\beta}$	1,0123	0,9800	1,0280	1,0089
$\sigma_{\beta_i}^2$	0,0055	0,0083	0,0027	0,0073
σ_{β_i}	0,0744	0,0911	0,0522	0,0854

Як видно з табл. 1, оцінки β_1 і β_2 по МНК в середньому занижено на 50 % (9). Проте має місце регуляризації (13): розкид σ_{β_i} оцінок β_i складає 0,02 і 0,05. В запропонованому методі (табл. 1) оцінки майже не зміщені: 1,005 і 0,943, але розкид більший, ніж у регуляризованому МНК (0, 15; 0,16). Зменшення розкиду можливе за рахунок компромісу між зміщенням і розкидом шляхом зміни параметрів θ і γ вагової функції $\eta(\theta)$. У випадку шуму тільки у вихідній змінній (табл. 2) (ідеальна ситуація для МНК) оцінки незміщені, але розкид оцінок по МНК (0,07 і 0,09) більший розкиду (0,05 і 0,08) оцінок запропонованим методом без оптимізації параметрів θ і γ функції $\eta(m)$. У випадку, якщо є можливість оптимізації $\eta(m)$, вигаш запропонованого методу у сенсі незміщеності і ефективності оцінок відносно МНК суттєво більший.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Запропонований метод ідентифікації параметрів технологічного процесу багатошарового нанесення ізоляції високовольтного кабелю в реальних умовах зашумленості вимірів змінних об'єкта керування на відміну від традиційного методу найменших квадратів дає оцінку параметрів, яка близька до точних значень параметрів. Впровадження методу дозволить підвищити точність нанесення шарів полімерної ізоляції кабелю на надвисоку напругу.

Weaknesses. Розроблений метод ідентифікації параметрів технологічного процесу багатошарового нанесення ізоляції високовольтного кабелю не апробовано на діючому виробництві, яке має неперервний технологічний цикл. Проведення дослідження на виробництві пов'язано з додатковими фінансовими та матеріальними витратами.

Opportunities. Перспективним напрямом подальших досліджень є створення загального методу оперативної ідентифікації для керування об'єктами на основі цілеспрямованої ієрархічно-побудованої системи ідентифікації як допоміжної функції по відношенню до головної функціональної цілі в задачах адаптивного оптимального керування, діагностики та прогнозування. Підвищення якості кабелю шляхом стабілізації технологічних параметрів, оцінки значень технологічних показників, прогнозування значень параметрів та технологічних змінних, зменшення радіального та осьового зміщення ізоляції відносно металічної жили в процесі її багатошарового нанесення, зменшення подовжніх коливань металічної жили в процесі переміщення буде сприяти більш широкому його впровадженню в електроенергетичній галузі України та інших країнах світу.

Threats. Обладнання та програмне забезпечення автоматизованих систем управління для технологічних ліній з випуску високовольтних кабелів з полімерною ізоляцією виготовляється декількома відомими закордонними фірмами. Впровадження результатів дослідження пов'язане з додатковими витратами підприємства на корекцію програмного забезпечення існуючої автоматизованої системи управління.

8. Висновки

1. Розроблено метод ідентифікації параметрів технологічного процесу багатошарового нанесення ізоляції надвисоковольтного кабелю в реальних умовах зашумленості вимірів змінних об'єкта керування, який на відміну від традиційного методу найменших квадратів, дає оцінку, близьку для точних значень параметрів. Впровадження методу дозволить підвищити точність нанесення шарів полімерної ізоляції кабелю.

2. Аналіз результатів дослідження показав, що запропонований метод дозволяє в реальній ситуації зашумлених вимірів вхідних і вихідних сигналів первинних перетворювачів отримати незміщені оцінки параметрів, близькі до оцінок по МНК для точних вимірів. У випадку шуму тільки у вихідних змінних (ідеальна ситуація для МНК) оцінки незміщені, проте розкид оцінок по МНК (0,07 і 0,09) більший, ніж розкид оцінок у запропонованого методу (0,05 і 0,08). Це дає можливість ефективно використовувати його в системах адаптивного керування товщиною шарів полімерної ізоляції при виробництві кабелів на надвисокій напрузі.

Література

1. Shidlovskii, A. K. Kabeli s polimernoї izoliatsiei na sverhvysokie napriazheniia [Text]: Monograph / A. K. Shidlovskii, A. A. Shcherba,

V. M. Zolotarev, A. D. Podoltsev, I. N. Kucheriavaia. – Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2013. – 551 p.

2. Vahedy, V. Polymer insulated high voltage cables [Text] / V. Vahedy // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2006. – Vol. 22, No. 3. – P. 13–18. doi:[10.1109/mei.2006.1639025](https://doi.org/10.1109/mei.2006.1639025)

3. Bikineeva, Yu. L. Integrirovannaia sistema avtomatizatsii kabel'nogo proizvodstva [Text] / Yu. L. Bikineeva, E. I. Gromakov, V. M. Pavlov, A. M. Malysenko // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2009. – Vol. 314, No. 5. – P. 69–74.

4. Silvestrov, A. M. Systemy i metody identyfikatsii elektrotekhnichnykh ob'ektiv [Text]: Monograph / A. M. Silvestrov, M. Ya. Ostroverkhov, O. M. Skrynnik. – Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. – 324 p.

5. Egupov, N. D. Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia [Text] / ed. by N. D. Egupov. – Moscow: MSTU n. a. N. E. Bauman, 2000. – 748 p.

6. Walter, E. Identification of Parametric Models from Experimental Data [Text] / E. Walter, L. Pronzato. – London: Communications and Control Engineering, 1997. – 413 p.

7. Ljung, L. System Identification: Theory for the User [Text] / L. Ljung. – Ed. 2. – Prentice Hall, 1999. – 672 p.

8. Nelles, O. Nonlinear System Identification [Text] / O. Nelles. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. – 785 p. doi:[10.1007/978-3-662-04323-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04323-3)

9. Pintelon, R. System Identification: A Frequency Domain Approach [Text] / R. Pintelon, J. Schoukens. – Ed. 2. – Wiley-IEEE Press, 2012. – 788 p. doi:[10.1002/9781118287422](https://doi.org/10.1002/9781118287422)

10. Kuz'menko, A. A. Nonlinear adaptive control of a shipboard power plant turbine [Text] / A. A. Kuz'menko // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2012. – Vol. 51, No. 4. – P. 512–525. doi:[10.1134/s1064230712030069](https://doi.org/10.1134/s1064230712030069)

11. Billings, S. A. Nonlinear System Identification: NARMAX Methods in the Time, Frequency, and Spatio-Temporal Domains [Text] / S. A. Billings. – Wiley, 2013. – 574 p. doi:[10.1002/9781118535561](https://doi.org/10.1002/9781118535561)

12. Ginsberg, K. S. The problem of structure identification for the purpose of design of an automatic control system [Text] / K. S. Ginsberg // Proceedings of the X International Conference «System Identification and Control Problems. SICPRO'15». – Moscow, January 26–29, 2015. – P. 43–80.

13. Ljung, L. System Identification Toolbox. Getting Started Guide [Text] / L. Ljung. – The MathWorks, Inc., 2017. – 226 p.