

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ТИСКУ

Д.т.н. О. В. Полярус, Я. С. Бровко, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

У статті розглядаються основні підходи, що використовуються при аналізі вимірювальних каналів тиску. Запропонований комплексний підхід, що є загальним для різних варіантів побудови каналів.

В статье рассматриваются основные подходы, которые используются при анализе измерительных каналов давления. Предложен комплексный подход, который является общим для разных вариантов построения каналов.

The article represents primary approaches which are used during analysis of pressure measurements channels. The complex approach which is common for the different variants of channels building has been suggested.

Ключові слова: вимірювальний канал тиску, нелінійні перетворення, ядра Вольтерра, постійна часу, нестационарна вхідна дія.

Постановка задачі. Вимірювальний канал тиску (ВКТ) є незмінним структурним елементом будь-якої вимірювальної інформаційної системи тиску. Він складається з вимірювальної лінії (ВЛ) та датчика (датчиків) тиску. ВЛ являє собою трубопровід, що наповнений рідиною або газом. На окремих технічно складних об'єктах (ТСО) довжина ВЛ може досягти сотень метрів. У процесі експлуатації ВЛ може забруднюватись, частково замерзати; в ній іноді з'являються повітряні бульби, кавітація тощо. В цих умовах рідина всередині ВЛ може стискуватись. Отже, при експлуатації статичні і динамічні характеристики ВКТ змінюються і можуть спотворювати вимірювальну інформацію про тиск технологічного процесу на ТСО. Це накладає жорсткі вимоги щодо проведення технічного обслуговування ВКТ і, зокрема, ВЛ. Таке обслуговування потребує значних коштів і тому для раціональної організації роботи повинно ґрунтуватись на наукових основах функціонування ВКТ у різних режимах роботи ТСО. Для цього необхідно розробляти надійні методи аналізу ВКТ.

У відомих працях з ідентифікації нелінійних систем припускається, що вхідні сигнали є відомими. У задачах, що розглядаються, точна інформація про вхідні дії відсутня. Вона може з'явитись після детального математичного моделювання технологічного процесу і ВЛ, але це буде справедливим тільки для окремого випадку, а з плином часу вхідна дія внаслідок своєї нестационарності може значно змінитись. Крім того, датчики тиску з часом також змінюють свої характеристики. На практиці важко отримати достовірні експериментальні результати, що характеризують весь ВКТ, оскільки втручання в технологічний процес на ТСО часто є неприпустимим. Усе це свідчить про неможливість розв'язання у загальному випадку задачі аналізу нелінійних інерційних ВКТ. Основним завданням цієї статті є оцінка можливостей достовірного аналізу ВКТ для практично важливих випадків.

Аналіз публікацій. Найбільш повно функціонування ВКТ описане в роботах Хашеміана Х. М. [1, 2]. Автор на наукових даних доводить, що на експлуатацію ТСО з ВКТ можна зменшувати кошти при дотриманні встановлених вимог. Він запропонував метод аналізу шумів, що в окремих випадках є ефективним при визначенні динамічних характеристик (ДХ) ВКТ. Як технічна система ВКТ є в загальному випадку нелінійною інерційною системою. Методи аналізу подібних систем є надзвичайно складними і описані в багатьох роботах. У [3] накреслені підходи до розв'язання задач проходження сигналів по нелінійним інерційним системам і зазначається, що такі підходи є непривабливими для практики. В останні роки істотно збільшився обсяг публікацій за цією проблемою, наприклад, [4-15], але в усіх наукових працях аналізуються проблеми ідентифікації нелінійних інерційних систем, розглядаються математичні проблеми при розв'язанні інтегральних та нелінійних диференціальних рівнянь, але не аналізуються особливості ВКТ, що обумовлені змінюванням у часі його ДХ, наявністю на вході нестационарних вхідних дій. У роботах [1, 2], навпаки, всебічно аналізується ВКТ, але не враховується мінливість його ДХ. Звідси виникає завдання створення методів аналізу нелінійних інерційних ВКТ з урахуванням особливостей його експлуатації.

Метою роботи є обґрунтування підходів до аналізу нелінійного інерційного вимірювального каналу тиску з урахуванням нестационарних вхідних дій та мінливості статичних і динамічних характеристик каналу.

Аналіз вимірювального каналу тиску у загальному випадку. На вході ВКТ існує нестационарна дія у вигляді тиску $\xi(t)$, ширина спектру якої та інтервал кореляції τ_c для стаціонарних часових інтервалів може значно змінюватись. Аналогічно поводить себе математичне сподівання та дисперсія вхідної дії. Сам ВКТ є нелінійною інерційною системою зі смугою пропускання, що може змінюватись у процесі експлуатації. Внаслідок нелінійності каналу спектр вихідного сигналу $\eta(t)$ може містити додаткові спектральні складові, що істотно спотворюють інформацію про вхідну дію. Розглядаємо випадок однозначності, коли кожній вхідній дії $\xi(t)$ ставиться у відповідності тільки один вихідний процес $\eta(t)$. Опис роботи ВКТ повинен здійснюватись за допомогою стохастичних нелінійних диференціальних рівнянь, але відсутність повної інформації про випадкову вхідну дію $\xi(t)$ ускладнює створення математичної моделі ВКТ. Нелінійні динамічні системи, як правило, описуються стохастичними диференціальними рівняннями k -го порядку. При $k=1$ маємо [3]

$$\frac{d\eta}{dt} = f(t, \eta(t)) + g(t, \eta(t), \xi(t)). \quad (1)$$

де функції $f(\cdot)$ та $g(\cdot)$ характеризують нелінійні особливості ВКТ і змінюються з часом.

Відомо [3], що метод розрахунку нелінійних інерційних систем ґрунтується на використанні рядів Вольєрра, для яких

$$\eta(t) = h_0(t) + \sum_i \int \dots \int h_i(t, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i) \times \xi(\tau_1) \cdot (\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_i. \quad (2)$$

Співвідношення (2) є доцільним при апроксимації функції $f(t, \eta(t))$ в (1) рядом Тейлора при умові, що функція $g(t, \eta(t), \xi(t)) = g(t, \xi(t))$, тобто вона не залежить від $\eta(t)$. Для ВКТ, який не має зворотних зв'язків між виходом і входом (типова ситуація), таке припущення є обґрунтованим.

Використання формули (2) для аналізу ВКТ, у якого змінюється з часом ДХ, є неможливим. Оскільки це єдина точна формула, що придатна для аналізу нелінійних інерційних систем, то потрібно для її застосування зробити припущення. Для цього обмежимося ВКТ з постійними в часі параметрами, тобто весь час роботи ВКТ розбивається на інтервали, на яких параметри ВКТ вважаються постійними або такими, що повільно змінюються. На практиці це потребує розробки методів ідентифікації змінювань характеристик ВКТ з часом. Для таких ВКТ формула (2) спрощується [3].

$$\begin{aligned} \eta(t) &= h_0 + \sum_i \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_i(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i) \times \\ &\times \xi(t - \tau_1) \xi(t - \tau_2) \dots \xi(t - \tau_i) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_i = \\ &= h_0 + \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau_1) \xi(t - \tau_1) d\tau_1 + \\ &+ \int \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2) \xi(t - \tau_1) \xi(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \\ &+ \int \int \int_{-\infty}^{\infty} h_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \xi(t - \tau_1) \xi(t - \tau_2) \times \\ &\times \xi(t - \tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Реально в формулу (3) потрібно було підставити не вхідні випадкові процеси $\xi(t - \tau_i)$, а їх реалізації $x(t - \tau_i)$. Функції $h_i(t, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i)$ називаються ядрами Вольєрра даного ВКТ. Вони є аналогічними імпульсній характеристиці $h(t)$ для лінійного каналу, що описується рівнянням згортки. В [3] зазначено, що метод рядів Вольєрра має тільки теоретичний інтерес. Розвиток комп'ютерної математики привів до того, що цей метод хоча і не набув ще широкого практичного значення, все ж починає використовуватись для розв'язання актуальних задач, як показано в багатьох роботах, наприклад, в [5, 10, 11, 12, 15].

Перша складова h_0 в (3) є постійною величиною, що характеризує початкове значення тиску. В другій

складовій функція $h_1(t)$ є імпульсною характеристикою лінійної частини ВКТ.

При наявності нелінійності в каналі у вихідному сигналі з'являються додаткові складові $\eta_i(t)$. Перша з них

$$\eta_2(t) = \int \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2) \cdot \xi(t - \tau_1) \times \xi(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (4)$$

є двомірною згортою вхідної дії $\xi(t)$ та двомірної імпульсної характеристики $h_2(\tau_1, \tau_2)$. Двомірність виникає внаслідок перемноження функцій, що описують вхідну дію. Наприклад, якщо у ВКТ відсутні перехресні зв'язки і є тільки квадратична складова нелінійності, то маємо

$$\begin{aligned} \xi^2(t) &= \xi(t) \cdot \xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1) \cdot \xi(t - \tau_1) d\tau_1 \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_2) \cdot \xi(t - \tau_2) d\tau_2 = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \cdot \xi(t - \tau) \cdot \xi(t - \tau) d\tau. \end{aligned}$$

У даному випадку двомірна згортка ВКТ

$$h(\tau_1, \tau_2) = h_1(\tau) \cdot h_2(\tau). \quad (5)$$

Отже, вираз (4) описує внесок квадратичної нелінійності ВКТ у сумарний сигнал. Аналогічно, четверта складова в (3) характеризує внесок кубічної складової нелінійності каналу. Якщо в каналі присутня тільки ця складова, то трьохмірна згортка має вигляд, що аналогічний (5).

Перед застосуванням методу необхідно впевнитись, що ряд Вольєрра збігається. Це накладає конкретні обмеження на використання описаного методу. Кількість наукових праць, у яких пропонується різні варіанти застосування рядів Вольєрра, вже багато. Але все ж цей метод залишається складним для застосування при аналізі ВКТ, оскільки він потребує інформацію про вхідний випадковий процес $\xi(t)$. Розглянемо спрощені підходи до аналізу каналу тиску.

Аналіз вимірювального каналу тиску в окремих випадках. Найбільш прийнятним випадком при аналізі ВКТ є моделювання лінійного каналу. Якщо датчик тиску можна вважати лінійним, ВЛ описується лінійним рівнянням типу згортки, коли в лінії рідина є ідеальною (не стискається), а трубопровід не забруднений. У цьому випадку шляхом розв'язання оберненої задачі вимірювань можна визначити вхідну дію [16, 17], а при наявності апріорної інформації і імпульсну характеристику каналу. При аналізі необхідно бути впевненим, що ВКТ є лінійним. Для цього потрібно періодично розраховувати згортки високих порядків $h_i(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i)$, а це зробити, як зазначалось, непросто. Дійсно, якщо ці згортки є близькими до нуля, то формула (3) зводиться до згортки $h_1(\tau_1)$, що властиве тільки лінійному каналу. На практиці канал можна вважати

близьким до лінійного, якщо в ньому проведене якісне технічне обслуговування. Реально постійна часу лінійного ВКТ $\tau_{\text{ВКТ}}$ визначається методом, який запропонував Хашеміан Х. М. [1, 2]. Метод ґрунтується на аналізі шумів, коли вважається, що вхідний шум є близьким до білого зі спектральною щільністю потужності $S_0 = \text{const}$. У цьому випадку вихідний сигнал $y(t)$ в каналі з комплексною частотною характеристикою $K(j\omega)$ визначається як

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_0 \cdot K(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega = \frac{S_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega = S_0 \cdot h(t) \quad (6)$$

Звідси для визначення імпульсної характеристики лінійного ВКТ треба вхідний сигнал розділити на спектральну щільність S_0 . Після визначення $h(t)$ легко оцінити і постійну часу ВКТ. Гідравлічні шуми у ВЛ дійсно можуть мати рівномірний спектр у межах смуги пропускання ВКТ (квазібілий шум) тільки для вузької смуги пропускання ВКТ ($\tau_{\text{ВКТ}} \gg \tau_c$), де τ_c - інтервал кореляції вхідної дії, який для квазібілого шуму $\tau_c \rightarrow 0$.

Формула (3) дає підстави для розділення математичної моделі ВКТ на дві частини: лінійну інерційну та нелінійну неінерційну (модель Вінера) або нелінійну неінерційну та лінійну інерційну (модель Гаммерштейна). Проведене нами моделювання показало, що при цьому потрібно враховувати ще і співвідношення між постійною часу лінійної частини ВКТ $\tau_{\text{ВКТ}}$ та інтервалом кореляції вхідної дії τ_c . Нелінійність каналу потребує також врахування особливостей його аналізу для малих і великих амплітуд вхідної дії.

При великих амплітудах вхідного тиску $\xi(t)$ аналіз ВКТ залежить від співвідношення між $\tau_{\text{ВКТ}}$ та τ_c або між смугою пропускання ВКТ та шириною спектра вхідної дії. Якщо $\tau_{\text{ВКТ}} \gg \tau_c$ (ВКТ має вузьку смугу пропускання порівняно з шириною спектра вхідної дії), то, як зазначено в [3], для аналізу каналу доцільно застосовувати рівняння Фокера-Планка-Колмагорова, якщо вхідні дії є гаусівським випадковим процесом. Математичним апаратом для цього випадку є апарат марковських процесів.

При аналізі може також застосовуватись метод статистичної лінеаризації.

Якщо $\tau_{\text{ВКТ}} = \tau_c$ (смуга пропускання каналу дуже широка порівняно з шириною спектра вхідної дії), то ВКТ має високу швидкодію і сигнал практично без інерційних спотворень проходить на вихід. Аналіз ВКТ зводиться до нелінійного безінерційного перетворення, а якщо рідина у ВЛ є ідеальною, - то до лінійного перетворення. Така ситуація є найбільш зручною для проведення аналізу. Для цього потрібно встановлювати датчики тиску з малими постійними часу, а у вимірювальній лінії шляхом технічного обслуговування досягати малої інерційності (відсутності повітряних бульб, забруднення тощо).

Якщо $\tau_{\text{ВКТ}}$ є сумірним з τ_c , то залишається для аналізу ВКТ тільки один метод – метод ядер Вольтерра, який постійно розвивається і удосконалюється.

З інженерної точки зору зручно замість методу ядер Вольтерра використовувати моделі Вінера або Гаммерштейна. Порівняємо вплив вибору цих моделей на вихідний сигнал ВКТ при заданій реалізації вхідного тиску $p(t)$ та при однаковій нелінійності моделей, що задається коефіцієнтами полінома β_i , де $i = 0, 1, k-1$. Тоді вихідний сигнал для моделі Вінера на інтервалі спостереження T записується у вигляді

$$y(t) = \sum_{i=0}^{k-1} \beta_i \left(\int_0^T h(t-\tau) \cdot p(\tau) d\tau \right)^i, \quad (8)$$

а для моделі Гаммерштейна

$$y(t) = \int_0^T h(t-\tau) \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \beta_i \cdot p^i(\tau) d\tau. \quad (9)$$

Перевіримо якісно еквівалентність цих моделей для квадратичної нелінійності ($k=3$) при $\beta_0=0,1$, $\beta_1=0,3$, $\beta_2=0,5$ для заданої типової імпульсної

характеристики інерційної ланки ВКТ $h(t) = \frac{U}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}}$, де

U - амплітудне значення характеристики, яке вибиралось рівним одиниці, а τ_0 - постійна часу. Розглядалось два варіанта: слабоінерційний ВКТ ($\tau_0 = 10$ мс) та інерційний канал ($\tau_0 = 300$ мс - теоретично визначене середнє значення постійної часу датчиків тиску). Моделювання проводилось для реалізації тиску, що зображена на рис. 1.

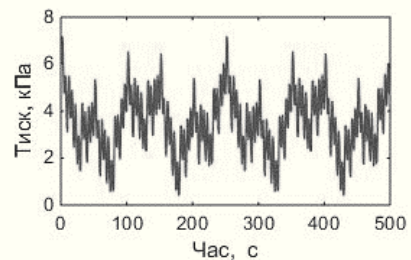


Рис. 1 – Приклад реалізації вхідної дії

На рис. 2 а, б зображені реалізації вихідних сигналів для моделі Вінера (рис. 2, а) та моделі Гаммерштейна (рис. 2, б) для слабоінерційного каналу. Аналогічні реалізації вихідних сигналів для інерційного ВКТ показані на рис. 3 а, б. З рисунків випливає, що ці сигнали для обох моделей практично не відрізняються при різних значеннях постійної часу каналу ($\tau_0 = 10$ мс і $\tau_0 = 300$ мс).

При більших значеннях постійної часу ВКТ необхідність застосування моделей Вінера або Гаммерштейна необхідно додатково обґрунтувати, оскільки між вихідними сигналами в цих моделях можуть з'явитись відмінності.

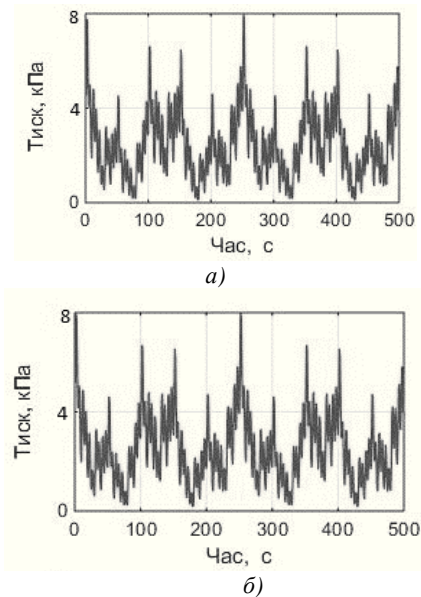


Рис. 2 - Реалізації вихідних сигналів для моделі: а) – Вінера та б) - моделі Гаммерштейна для слабкоінерційного каналу

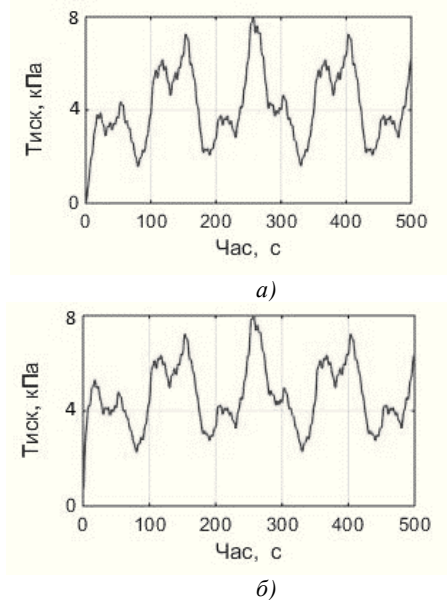


Рис. 3 - Реалізації вихідних сигналів для моделі: а) – Вінера та б) - моделі Гаммерштейна для інерційного каналу

Висновки

На цей час зростає актуальність аналізу нелінійних інерційних (з пам'яттю) вимірювальних каналів тиску. Існує загальна теорія ідентифікації нелінійних інерційних систем, що побудована на використанні ядер Вольтерра. Така теорія є громіздкою в інженерному сенсі. Треба доводити, що ряд Вольтерра збігається. Визначення багатомірних згорток викликає практичні труднощі. І, нарешті, для ідентифікації каналу потрібний опис вхідної дії, що складно зробити для вимірювального каналу тиску. Звідси виникає практична потреба переходу до більш простих моделей каналів, основними з яких є моделі Вінера і Гаммерштейна. З точки зору результатів моделювання в різних практичних ситуаціях ці моделі рівноцінні. При їх використанні з'являється можливість впровадження наближених методів розв'язання обернених задач вимірювання, розроблених авторами для лінійних систем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Хашемиан Х. М. Техническое обслуживание измерительных устройств на атомных электростанциях / Х. М. Хашемиан. – М. : Издательство Бином, 2012. – 354 с.
2. Хашемиан Х. М. Датчики технологических процессов : характеристики и методы повышения надежности / Х. М. Хашемиан. – М. : Издательство Бином, 2008. – 336 с.
3. Тихонов В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1986. – 296 с.
4. Brouri A. Identification of Nonlinear Systems Structured by Hammerstein-Wiener Model / A. Brouri, F. Giri, A. Mkhida, F. Z. Chaoui, A. Elkarkri, M. L. Chhibat // *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*. – 2014. – Vol. 8. – N. 5 – Pp. 738-741.
5. Jozsef G. Identification of Volterra Kernels Using Interpolation / G. Jozsef, N. I. Kollar, Jh. Schoukens // *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Budapest, Hungary, May 21-23), 2001*. – P. 2026-2047.
6. Amari Sh. Adaptive Blind Signal Processing – Neural Network Approaches / Sh. Amari // *Proceedings of the IEEE*, 1998. – Vol. 86. – N. 10. – Pp. 2026-2047.
7. Kashiwagi H. Identification of Volterra Kernels of Nonlinear Van de Vusse Reactor / H. Kashiwagi, L. Rong. – *Transactions of Control, Automation and Systems Engineering*, 2002. – Vol. 4. – Pp. 109-113.
8. Spina D. Stochastic macromodeling of nonlinear systems via polynomial chaos expansion and transfer function trajectories / D. Spina, D. De Jonghe, D. Deschrijver, G. Gielen, L. Knockaert, T. Dhaene. // *IEEE Transactions and Microwave Theory of Techniques*, 2014. – Vol. 62. – N. 7. – Pp. 1454-1460.
9. Astolfi A. Model reduction by moment matching for linear and nonlinear system / A. Astolfi. // *Transactions of Automatic Control*, 2010. – Vol. 55. – N. 10. – P. 2321-2336.
10. Budura G. Kernels Measurement Techniques for Constructing Nonlinear Models / G. Budura, J. Naforntita // *Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Seria ELECTRONICĂ și TELECOMUNICAȚII, TRANSACTIONS on ELECTRONICS and COMMUNICATIONS*, 2002. – Tom 47(61) – Fascicola 1-2. – Pp. 38-43.
11. Boyd S. Measuring Volterra Kernels / S. Boyd, Y. S. Tang, Y. O. Chua // *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1983. – Vol. CAS-30. – N. 8. – Pp. 571-577.
12. Sang L. Extracting Volterra series representation from X-parameters for the modeling of microwave device / L. Sang, J. Wang, Y. Xu, R. Xu // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2013. – Vol. 27. – Pp. 299-308.
13. Lin. H. DPOAE Biological Feature Modeling and Identity Authentication / H. Lin, B. Zhang, X. Zhang, B. Duan // *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 2015. – Vol. 10. – N. 10. – Pp. 75-83.
14. Мокін Б. І. Метод ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів з екстремальними статическими характеристиками / Б. І. Мокін, А. Б. Мокін. – *Наукові праці ВНТУ*, 2009. – № 2. – С. 1-8.
15. Павленко С. В. Регуляризація процедури ідентифікації нелінійних систем в виде моделей Вольтерра / С. В. Павленко, В. Д. Павленко // *Труды X Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (26-29 января)*. – М., 2015. – С. 230-237.
16. Полярус О. В. Наближене розв'язання оберненої задачі вимірювань та його метрологічне забезпечення. Монографія / О. В. Полярус, Є. О. Поляков // *Монографія*. – Х. : Видавництво «Лідер», 2014. – 120 с.
17. Полярус О. В. Визначення динамічних характеристик вимірювань каналів тиску // О. В. Полярус, А. О. Коваль, Я. С. Бровко. – *Вестник ХНАДУ*, 2016. – Вып. 73. – С. 43-46.