

що дає змогу з певною інерційністю її контролювати додатковим ключем VT2, який вмикав баластний опір  $R_6$ , при досягненні допустимого значення перенапруг в мережі. "Зайва" енергія двигуна витрачається не тільки на обмотках а і на баластному опорі. За наявності інших споживачів енергія, що накопичена в ємності С, передається до них не тільки під час паузи, а і під час імпульсу, що збільшує кількість поверненої енергії щодо інших способів гальмування розглянутих раніше. Своєю чергою, накопичення і контроль енергії рекуперації дає змогу застосувати ШІМ з фіксованою частотою, спростити ФНЧ і схему керування.

## 5. Висновки

Отже, оптимізація режиму гальмування ДПС, зокрема при використанні ШІМ стає можливою при введенні проміжного накопичення енергії і додаткового її споживання. Забезпечуються безпечні режими електропривода і мережі, як при різкій зміні стану мережі, так і електропривода, наприклад при розриві струмознімача.

Ефективність таких заходів була експериментально підтверджена при керуванні і гальмуванні тягового двигуна потужністю 120 кВт.

1. *Электрические машины и микромашины / Д.З. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М., 1990.* 2. *Быстродействующие электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями / М.Е. Гольц, А.Б. Гудзенко, В.М. Остреров и др. – М., 1986.* 3. Пат. 47111А МКІ Н02 Р3/08. *Спосіб гальмування двигуна постійного струму та пристрій для його реалізації / О.О. Дрючин; Опубл.17.06.02, Бюл. №6.*

УДК 621.317.77

В.О. Поджаренко, В.Ю. Кучерук, В.М. Севастьянов, О.П. Войтович

Вінницький національний технічний університет,  
кафедра метрології і промислової автоматики

## ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ДЛЯ ПОВІРКИ ТАХОМЕТРІВ

© Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Войтович О.П., 2005

Виконано дослідження та оцінювання достовірності відтворення зразкового сигналу моделлю системи для повірки тахометрів у динамічному режимі. Показано, що при різних законах розподілу шуму, зокрема і нормальному, на виході системи отримують сигнал з похибкою, відмінною від нормального.

The reliability of a reference signal reproduction by model of system for checking tachometers in a dynamic mode is investigated and estimated in this article. It is shown, that at different noise signals including normal, in system output we received a signal with an error which distribution differs from normal.

### 1. Вступ

Вимірювання кутової швидкості є доволі важливим для визначення характеристик електродвигунів. Зокрема, залежність кутової швидкості в часі є вихідною для опосередкованих вимірювань кутового пришвидження, моменту інерції ротора, динамічного моменту. Вимірювання кутової швидкості в сучасній техніці здійснюється за допомогою тахометричних перетворювачів з нормованими метрологічними характеристиками у статичному режимі. Проте сучасні інформаційно-вимірювальні системи все частіше працюють в динамічних режимах, що вимагає нормування метрологічних характеристик тахометричних перетворювачів у цьому самому режимі. Однак наявне метрологічне забезпечення не дає змоги повірити тахометри в динамічному режимі, а отже, і визначити їх динамічні метрологічні характеристики.

## 2. Аналіз джерел

Запропонована в [1,2] модель установки для перевірки тахометрів дає змогу реалізувати визначення динамічних характеристик тахометрів і здійснювати їх випробовування не тільки в статичному, а й в динамічному режимі.

Однією з основних задач метрології є задача оцінки метрологічних характеристик. Однак ця задача не розв'язується при вимірюванні миттєвих значень швидкозмінних процесів загального вигляду. Здебільшого знаходять метрологічні характеристики в статичному режимі, і їх застосовують для динамічного, що є невірним [3].

## 3. Мета:

дослідження, аналіз та оцінювання достовірності відтворення зразкового сигналу моделі системи для перевірки тахометрів, яка здійснює оцінку метрологічних характеристик тахометричних перетворювачів у динамічному режимі.

## 4. Основна частина

Модель системи для перевірки тахометрів подана на рис.1. Модель працює так. Блоки Clock (задавач зразкового часу), Gain (підсилювач), Transport Delay (затримка часу) та суматор 1 задають форму заданого зразкового сигналу  $U_i(t)$ , що надходить на вхід блока DC\_EP, який моделює частотний перетворювач та електродвигун постійного струму. На виході блока DC\_EP формується кутова швидкість, яка відтворює форму заданого сигналу і надходить на входи блока ЗТХ та ТХ, які моделюють зразковий тахометр та тахометр, що перевіряється відповідно. На блок підсистеми S надходить заданий зразковий сигнал  $U_i(t)$  та сигнал з виходу ЗТХ  $U_x(t)$ . З виходу S отримуємо відносну похибку відтворення заданого зразкового сигналу.

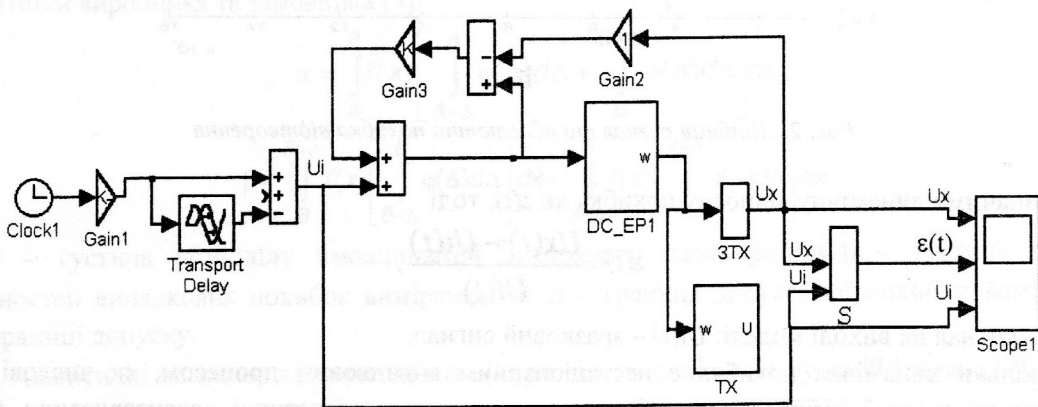


Рис. 1. Модель системи для перевірки тахометрів

В цій моделі

1. Clock – задавач модельного часу.
2. Gain – підсилювач, виконує операцію множення сигналу на певний коефіцієнт.
3. Transport Delay – затримка часу.
4. DC\_EP – модель електричного двигуна постійного струму з частотним перетворювачем з бібліотеки Demo Blocksets середовища MATLAB.
5. ЗТХ, ТХ – блоки, що задають модель зразкового тахометра та тахометра, що перевіряється відповідно.
6. S – блок підсистем
7. Scope – блок побудови часових діаграм.

Як зразковий використано лінійний сигнал (рис.2, а), за допомогою якого можна перевірити тахометри в динамічному режимі, з найменшою похибкою (рис.2, б) [1,2].

Для дослідження достовірності відтворення зразкового сигналу припустимо, що зразковий тахометр є ідеальним, а, отже, не має перехідних процесів та похибок.

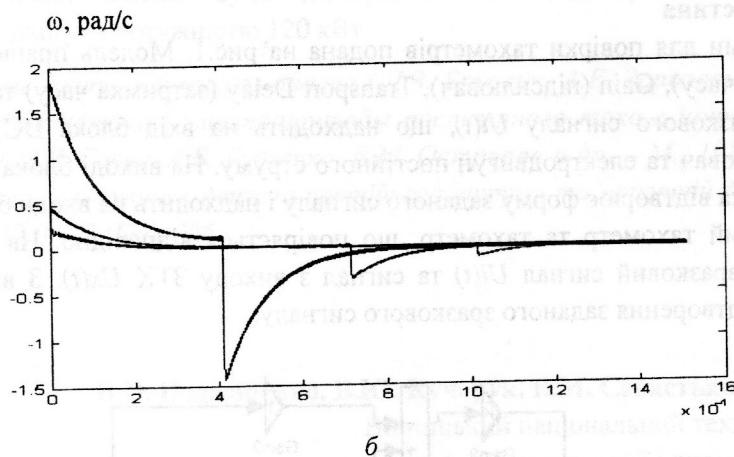
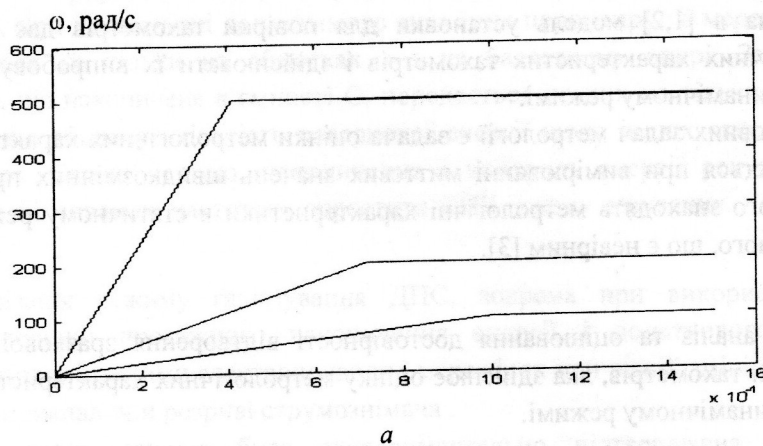


Рис. 2. Лінійний сигнал та абсолютна похибка відтворення

Позначимо динамічну відносну похибку як  $\varepsilon(t)$ , тоді

$$\varepsilon(t) = \frac{U_x(t) - U_i(t)}{U_i(t)}, \quad 7 \quad (1)$$

де  $U_x(t)$  – сигнал на виході моделі;  $U_i(t)$  – зразковий сигнал.

Оскільки динамічна похибка є нестационарним випадковим процесом, як числові характеристики динамічної похибки повинні використовуватися статистичні характеристики, такі, як математичне очікування, СКВ та інші моменти вищих порядків [3]. Розглянемо задачу оцінки вказаних характеристик динамічних похибок, якщо відома модель системи [1, 2]. У такому разі динамічна похибка визначається з (1) за результатами вимірювання. Після цього можна скористатися загальновідомими методами оцінки статистичних характеристик.

Для того, щоб дослідити похибку в динамічному режимі, виконаємо ряд вимірювань, при яких на зразковий заданий сигнал накладається сигнал шуму, який являє собою нестационарний випадковий процес.

У перших двох випадках як шум використовують псевдовипадкові числа, згенеровані за нормальним розподілом ( $\sigma_1=0,01$ ;  $\sigma_2=0,05$ ). В третьому та четвертому як сигнал шуму використовувались псевдовипадкові числа, розподілені за рівномірним законом розподілу ( $a_1=0,02$ ;  $a_2=0,04$ ).

Виконувалися по тридцять вимірювань для чотирьох варіантів розподілу в режимі зміни кутової швидкості від 10 до 200 рад/с. Знімалось по 100 тис. значень вихідного сигналу та абсолютної динамічної похибки для кожного вимірювання, потім вираховувалась відносна динамічна похибка вимірювань. Далі вибирали 10 точок часу, в яких брали по 30 значень (відповідно до кількості вимірювань) вимірювального сигналу та відносної динамічної похибки. За цими даними за допомогою пакета прикладних програм MATLAB [4] отримані значення математичного очікування та СКВ.



Для визначення необхідної точності моделювання системою повірки тахометрів зразкового сигналу використаємо теорію точності вимірювань [5, 6].

За допомогою критерію Колмогорова–Смірнова визначено, що для всіх чотирьох варіантів зашумленого сигналу дані розподілені за законом, відмінним від нормального. Тому визначення точності моделювання значно ускладнюється. Оскільки здебільшого закон розподілу похибки та вихідної кутової швидкості не є нормальним, то пропонується використання як закону розподілу функції Йордана, яка має здатність описувати всі симетричні закони розподілу від прямокутного до дельта-функції. Вид закону розподілу визначається значенням коефіцієнта  $\varepsilon$  [7].

Опишемо густину розподілу ймовірностей вихідної (вимірної) величини  $f(x)$  та густину розподілу ймовірностей випадкових похибок вимірювання  $\varphi(\Delta)$  за допомогою функції Йордана:

$$f(x) = \frac{k_1 \cdot \cos(c_1 x)}{\sqrt{1 + \varepsilon_1 \sin^2(c_1 x)}}; \quad \varphi(\Delta) = \frac{k_2 \cdot \cos(c_2 \Delta)}{\sqrt{1 + \varepsilon_2 \sin^2(c_2 \Delta)}}, \quad (2)$$

$$\text{де } k_{1,2} = \begin{cases} c_{1,2} \sqrt{|\varepsilon_{1,2}|} / 2 \arcsin \sqrt{|\varepsilon_{1,2}|}, & \text{якщо } 1 \leq \varepsilon_{1,2} < 0; \\ c_{1,2} / 2, & \text{якщо } \varepsilon_{1,2} = 0; \\ c_{1,2} \sqrt{|\varepsilon_{1,2}|} / 2 \ln(\sqrt{|\varepsilon_{1,2}|} + \sqrt{1 + \varepsilon_{1,2}}), & \text{якщо } \varepsilon_{1,2} > 0. \end{cases}$$

$$c_1 = \sigma_1(\varepsilon_1) / \sigma_s; \quad c_2 = \sigma_2(\varepsilon_2) / \sigma_p; \quad \sigma(\varepsilon) = \sqrt{\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} x^2 \varphi_\varepsilon(x) dx};$$

$\sigma, \sigma_p$  – СКВ розподілу  $f(x)$  і  $\varphi(\Delta)$  відповідно.

Знайдемо ризики виробника та замовника для законів розподілу, описаних на основі функції Йордана з урахуванням того, що отримані дані не завжди належать до нормального закону розподілу.

Ризики виробника та замовника [3]:

$$\alpha = \int_A^B f(x) \left[ \int_{A-\Delta}^A \varphi(\Delta) d\Delta + \int_B^{B+\Delta} \varphi(\Delta) d\Delta \right] dx, \quad (3)$$

$$\beta = \int_B^{B+\Delta} f(x) \left[ \int_{B-\Delta}^B \varphi(\Delta) d\Delta \right] dx + \int_{A-\Delta}^A f(x) \left[ \int_A^{A+\Delta} \varphi(\Delta) d\Delta \right] dx, \quad (4)$$

де  $f(x)$  – густина розподілу ймовірностей вимірюваного параметра;  $\varphi(\Delta)$  – густина розподілу ймовірностей випадкових похибок вимірювання;  $\Delta$  – границя допустимої похибки вимірювання;  $A, B$  – границі допуску.

Аналитичні залежності для ризиків  $\alpha$  і  $\beta$  при підстановці в них функцій Йордана [7]:

$$\alpha = \frac{k_1 k_2}{c_1 c_2 \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2}} \left[ \ln \left[ \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \sin((A-\Delta)c_2) + \sqrt{1 + \varepsilon_2 \sin^2((A-\Delta)c_2)}}{\sqrt{\varepsilon_2} \sin(Ac_2) + \sqrt{1 + \varepsilon_2 \sin^2(Ac_2)}} \right] - \right.$$

$$\left. - \ln \left[ \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \sin((B+\Delta)c_2) + \sqrt{1 + \varepsilon_2 \sin^2((B+\Delta)c_2)}}{\sqrt{\varepsilon_2} \sin(Bc_2) + \sqrt{1 + \varepsilon_2 \sin^2(Bc_2)}} \right] + \right.$$

$$\left. + \ln \left[ \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \sin(Ac_1) + \sqrt{1 + \varepsilon_1 \sin^2(Ac_1)}}{\sqrt{\varepsilon_1} \sin(Bc_1) + \sqrt{1 + \varepsilon_1 \sin^2(Bc_1)}} \right] \right]; \quad (5)$$

$$\beta = \frac{k_1 k_2}{c_1 c_2 \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2}} \left[ \ln \left[ \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \sin((B-\Delta)c_2) + \sqrt{1 + \varepsilon_2 \sin^2((B-\Delta)c_2)}}{\sqrt{\varepsilon_2} \sin(Bc_2) + \sqrt{1 + \varepsilon_2 \sin^2(Bc_2)}} \right] \times \right.$$

$$\left. \times \ln \left[ \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \sin(Bc_1) + \sqrt{1 + \varepsilon_1 \sin^2(Bc_1)}}{\sqrt{\varepsilon_1} \sin((B+\Delta)c_1) + \sqrt{1 + \varepsilon_1 \sin^2((B+\Delta)c_1)}} \right] - \right.$$



$$\begin{aligned}
 & -\ln \left[ \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \sin(Ac_2) + \sqrt{1 + \varepsilon_2 \sin^2(Ac_2)}}{\sqrt{\varepsilon_2} \sin((A+\Delta)c_2) + \sqrt{1 + \varepsilon_2 \sin^2((A+\Delta)c_2)}} \right] \times \\
 & \times \ln \left[ \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \sin(Ac_1) + \sqrt{1 + \varepsilon_1 \sin^2(Ac_1)}}{\sqrt{\varepsilon_1} \sin((A-\Delta)c_1) + \sqrt{1 + \varepsilon_1 \sin^2((A-\Delta)c_1)}} \right]. \quad (6)
 \end{aligned}$$

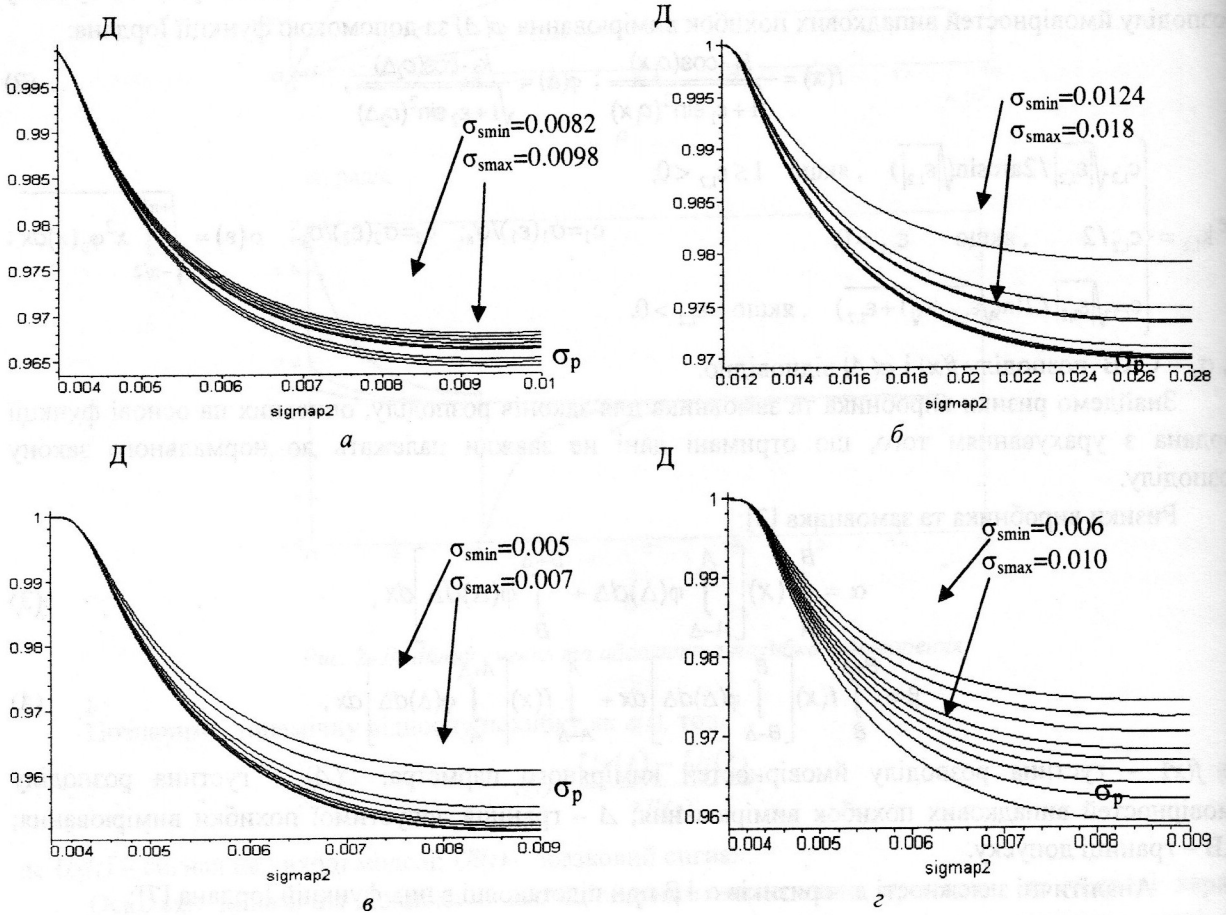


Рис. 3. Залежність  $D(\sigma_p)$  при різних зашумлених сигналах:  
 а; б – нормальний розподіл; в, г – рівномірний розподіл

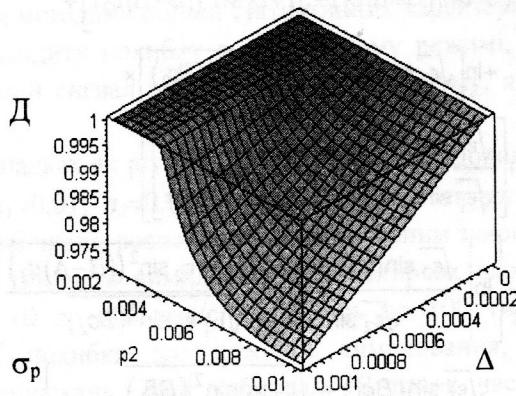


Рис. 4. Залежність  $D(\sigma_p, \Delta)$

Достовірність обчислюється за формулою:

$$D=1-\alpha-\beta \quad (7)$$

З використанням (2), (5), (6) та (7) побудовані графіки залежності достовірності  $D$  від СКВ відносної динамічної похибки вимірювання  $\sigma_p$  (рис. 3). На графіках зображена сім'я кривих при різних значеннях СКВ вимірювального сигналу  $\sigma_s$ , отриманих за допомогою вищеописаного моделювання, та при різних законах розподілу зашумлених даних.

На рис. 4. показана залежність достовірності  $D$  від СКВ відносної динамічної похибки вимірювання  $\sigma_p$  та границі допуску похибки вимірювання  $\Delta$ .

Аналіз отриманих результатів показав, що при різних законах розподілу накладеного на заданий зразковий сигнал шуму достовірність відтворення не меншою за 0,95. Отже, можна вважати, що ця установка буде відтворювати зразковий заданий сигнал з достатньою точністю для повірки тахометрів.

## 5. Висновки

1. Показано, що за наявності впливу шумів на зразковий заданий сигнал динамічна відносна похибка має закон розподілу, відмінний від нормального.

2. Для визначення достовірності відтворення зразкового сигналу запропоновано використовувати функцію Йордана, оскільки вона дає змогу враховувати вид закону розподілу вихідного сигналу та випадкової похибки.

3. Отримані графіки залежності достовірності від СКВ відносної динамічної похибки для чотирьох зашумлених зразкових сигналів (два розподілені за нормальним законом і два за рівномірним при різних параметрах цих розподілів). Показано, що достовірність у всіх випадках не менша за 0,95. Такий результат показує високу точність відтворення зразкового сигналу, а отже, розроблену модель установки для повірки тахометрів можна використовувати для побудови реальної установки.

4. Проте отриманої точності недостатньо для повірки методом зразкових мір. Тому надалі планується дослідити як метод повірки метод зразкових приладів.

1. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Войтович О.П. Установка для повірки тахометрів // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Обчислювальна техніка та автоматизація". Випуск 7., – 2004. – С.396–400. 2. Деклараційний патент на винахід № 71265 А. від 15.11.2004. Установка для повірки тахометрів. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Войтович О.П. 3. Кавалеров Г.И., Мандельштам С.М. Введение в информационную теорию измерений. – М., 1974. 4. Гультьев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс – СПб., 2000. 5. Дунаев Б.Б. Точность измерений при контроле качества. – К., 1981. 6. Автоматическая аппаратура контроля радиоэлектронного оборудования (вопросы проектирования) // Под ред. Н.Н. Пономарева. – М., 1975. 7. Поджаренко В.О., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Войтович О.П. Визначення вимог до точності вимірювань в системах технічної діагностики // Вимірювальна техніка та метрологія. – №58. – 2001. – С. 138–142.

1. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Войтович О.П. Установка для повірки тахометрів // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Обчислювальна техніка та автоматизація". Випуск 7, 2004. - с. 396-400.
2. Деклараційний патент на винахід №71265А від 15.11.2004. Установка для повірки тахометрів. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Войтович О.П.
3. Кавалеров Г.И., Мандельштам С.М. Введение в информационную теорию измерений. - М.: 1974
4. Гультьяев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс - СПб., 2000
5. Дунаев Б.Б. Точность измерений при контроле качества. - К., 1981
6. Автоматическая аппаратура контроля радиоэлектронного оборудования (вопросы проектирования) // Под ред. Н.Н.Пономарева. - М., 1975
7. Поджаренко В.О., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Войтович О.П. Визначення вимог до точності вимірювань в системах технічної діагностики // Вимірювальна техніка та метрологія. - №58. - 2001. - с. 138-142