

**С.І. КОНДРАШОВ**, д-р техн. наук, зав. кафедрою НТУ "ХПІ", Харків  
**І.В. ГРИГОРЕНКО**, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПІ", Харків  
**Г.О. ДЕНИСЕНКО**, студентка, магістр НТУ "ХПІ", Харків

### ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ КОРЕКЦІЇ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ ПРИ ТЕСТОВОМУ КОНТРОЛІ У ВИПАДКУ ЕКСПОНЕНЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ЗМІНИ ВХІДНОГО СИГНАЛУ

Визначено вплив нелінійності зміни вхідного сигналу на динамічну похибку вимірювального перетворювача під час проведення тестового контролю. Загальні моделі конкретизовано для вимірювального перетворювача з передаточною функцією інерційної аперіодичної ланки.

This article determines the possibility of the correction of dynamic error for the measuring transducer test control systems in automatic test equipment considering non-linear input signal. Generalized models are defined concretely for measuring transducer with aperiodic transfer function.

**Постановка проблеми.** Тестовий контроль у динамічному режимі проводиться з метою визначення вимірюваної величини на вході вимірювальних перетворювачів (ВП) за вимірюваним вихідним сигналом та відомій або вимірюваній динамічній характеристиці ВП. Вирішення цієї задачі призводить до необхідності корекції часових динамічних складових похибок, які можуть розглядатися як режимні складові похибок випробувань. Також потрібно визначити моделі динамічних похибок статичних перетворювачів для відновлення вхідного сигналу.

Для вирішення цієї задачі, якщо справа стосується нелінійних вхідних сигналів ВП, потрібно визначити значення параметру нелінійності  $\beta$  при якому матимемо найменшу динамічну похибку.

**Аналіз літератури.** У роботах [1, 2, 3] розроблено математичну модель для параболічного вхідного сигналу ВП з аперіодичної передаточною функцією, та проведено дослідження похибок вимірювання вхідного сигналу ВП у динамічному режимі роботи системи тестового контролю. Однак не проведено досліджень впливу параметру нелінійності  $\beta$  на динамічну складову похибки ВП при експоненційній моделі зміни вхідного сигналу.

**Ціль статті** є дослідження впливу експоненційної зміни вхідного сигналу на динамічну похибку вимірювального перетворювача під час проведення тестового контролю.

**Математична модель динамічної похибки для суми лінійного та експоненційного вхідних сигналів ВП з аперіодичною передаточною функцією.** Для визначення реакції аналогової частини ВК на тестовий вплив

при діючому вхідному сигналі, задаємося експоненційною моделлю вхідного сигналу:

$$U(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}, \quad (1)$$

де  $t$  – час дії сигналу,

$T$  – стала часу.

Як модель аналогової частини ВК в цьому випадку може бути використано інерційна ланка першого порядку [4] з передаточною функцією:

$$H(p) = \frac{K_H}{T \cdot p + 1}, \quad (2)$$

де  $K_H$  – номінальний статичний коефіцієнт перетворення.

На діючий сигнал будемо накладати адитивний та мультиплікативний тестові впливи, які являють собою систему двох імпульсів.

Оригінал функції вхідного сигналу ВП представимо у вигляді системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1(t_1) = X(0) + \alpha \cdot t_1 + (1 - e^{-t_1/\tau}); \quad [t_1 \in 0, T] \\ X_2(t_2) = X(0) + \alpha \cdot t_2 + (1 - e^{-t_2/\tau}) + \Theta \cdot (1 - e^{-t_2/\tau}); \quad [t_2 \in T, 2T] \\ X_3(t_3) = X(0) + \alpha \cdot t_3 + (1 - e^{-t_3/\tau}) - \Theta \cdot (1 - e^{-t_3/\tau}) - \\ \quad - (X(0) + \alpha \cdot t_3 + (1 - e^{-t_3/\tau})) + k \cdot (\alpha \cdot (t_3 - 2T) - \alpha\tau(X(0) + \\ \quad + \alpha \cdot t_3) + X(0) + (1 - e^{-t_3/\tau}) + \tau \cdot (1 - e^{-t_3/\tau})); \quad [t_3 \in 2T, 3T] \\ X_4(t_4) = X(0) + \alpha \cdot t_4 + (1 - e^{-t_4/\tau}) + k \cdot (\alpha \cdot (t_4 - 2T) - \alpha\tau(X(0) + \alpha \cdot t_4) + \\ \quad + X(0) + (1 - e^{-t_4/\tau}) + \tau \cdot (1 - e^{-t_4/\tau})) - k \cdot (\alpha \cdot (t_4 - 3T) - \alpha\tau(X(0) + \\ \quad + \alpha \cdot t_4) + X(0) + (1 - e^{-t_4/\tau}) + \tau \cdot (1 - e^{-t_4/\tau})); \quad [t_4 \in 3T, 4T] \end{array} \right. \quad (3)$$

де  $x(0)$  – значення сигналу на початку контролю;

$\alpha$  – розрахункове значення оцінки швидкості зміни вхідного сигналу ВП;

$t_1, t_2, t_3, t_4$  – моменти поточного часу, віддалені одне від одного на інтервал  $T$ ;

$T$  – стала часу

$k$  – рівень мультиплікативного тестового впливу;

$\tau$  – постійна часу динамічної моделі ВП;

$1 - e^{-t/\tau}$  – вхідний експоненційний сигнал;

$\Theta$  – рівень адитивного тестового впливу.

Часові діаграми зміни вхідного сигналу ВП при статичній моделі наведено на рис. 1.

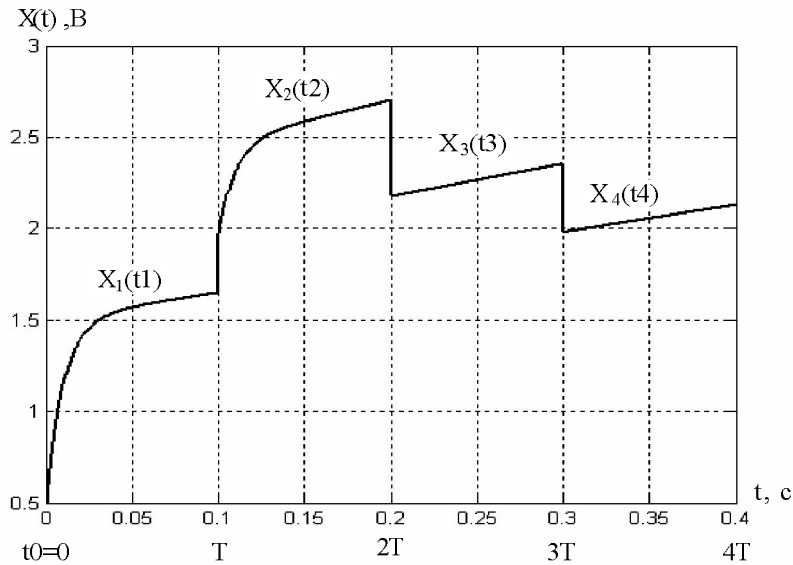


Рис. 1. Часові діаграми зміни вхідного сигналу ВП

Оригінал функції вихідного сигналу ВП представимо у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} Y_1(t_1) = (1 + \delta_m) \cdot [X(0) + \alpha \cdot t_1 + (1 - e^{-t_1/\tau})]; \\ Y_2(t_2) = (1 + \delta_m) \cdot [X(0) + \alpha \cdot t_2 + (1 - e^{-t_2/\tau}) + \Theta \cdot (1 - e^{-(t_2-T)/\tau})]; \\ Y_3(t_3) = (1 + \delta_m) \cdot [X(0) + \alpha \cdot t_3 + (1 - e^{-t_3/\tau}) + \Theta \cdot ((1 - e^{-(t_3-T)/\tau}) - (1 - e^{-(t_3-2T)/\tau})) + \\ + k \cdot (\alpha \cdot (t_3 - 2T) - \alpha\tau(1 - e^{-(t_3-2T)/\tau}) + X(0)(1 - e^{-(t_3-2T)/\tau}) + \tau \cdot (1 - e^{-t_3/\tau}))]; \\ Y_4(t_4) = (1 + \delta_m) \cdot [X(0) + \alpha \cdot t_4 + (1 - e^{-t_4/\tau}) + k \cdot (\alpha \cdot (t_4 - 2T) - \alpha\tau(1 - e^{-(t_4-2T)/\tau})) + \\ + X(0)(1 - e^{-(t_4-2T)/\tau}) + \tau \cdot (1 - e^{-t_4/\tau}) - k \cdot (\alpha \cdot (t_4 - 3T) - \alpha\tau(1 - e^{-(t_4-2T)/\tau}) + \\ + X(0) \cdot (1 - e^{-(t_4-3T)/\tau}) + \tau \cdot (1 - e^{-t_4/\tau}))]; \end{cases} \quad (4)$$

де  $(1 + \delta_m)$  – мультиплікативна складова похибки.

Часові діаграми зміни вихідного сигналу ВП при динамічному контролі (з урахуванням інерційності) наведено на рис. 2.

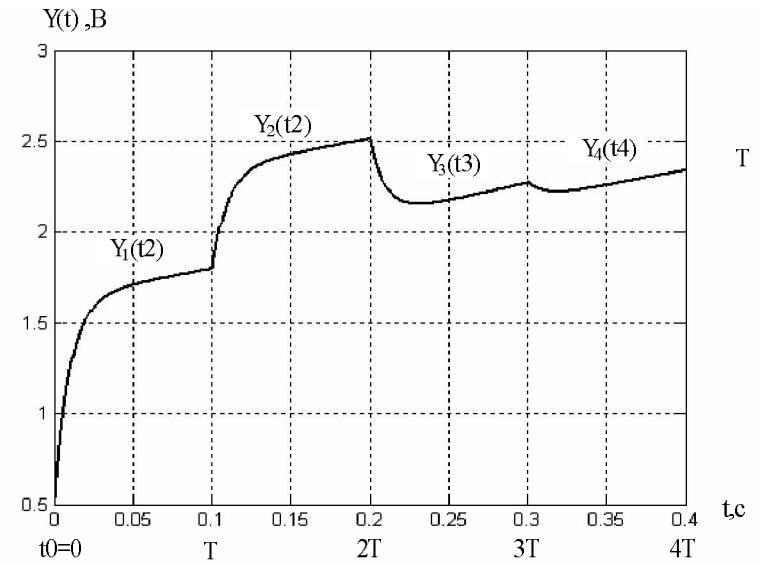


Рис. 2. Часові діаграми зміни вихідного сигналу ВП при динамічному тестовому контролі

Для оцінки динамічних складових похибок, зумовлених зміною вхідного сигналу ВП і наявністю його інерційних властивостей, необхідна модель ідеального ВП, для якого  $K(p) \equiv K_I = 1$ . На рис. 3 показані часові діаграми зміни динамічних складових похибок для рівнянь системи (4) відносно статичної ідеальної моделі, які описуються системою рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta dyn_0 = -\alpha\tau - e^{-t_1/\tau}, \\ \Delta dyn_1 = -\alpha\tau - e^{-t_2/\tau} - \Theta \cdot e^{-(t_2-T)/\tau}, \\ \Delta dyn_2 = -\alpha\tau - e^{-t_3/\tau} - \Theta \cdot e^{-(t_3-2T)/\tau} - k \cdot \tau \left( -e^{-(t_3-2T)/\tau} + \right. \\ \left. + k \cdot X(0) \cdot e^{-(t_3-2T)/\tau} + \Theta \cdot e^{-(t_3-2T)/\tau} \right). \end{cases} \quad (5)$$

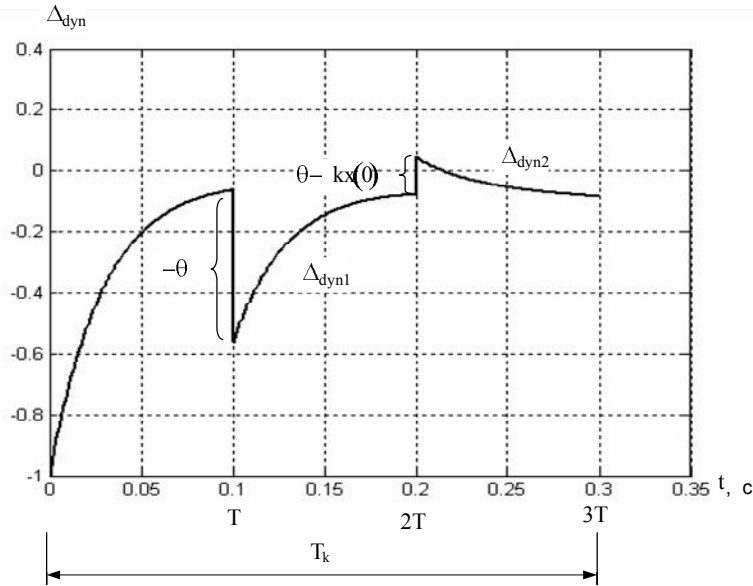


Рис. 3. Часові діаграми зміни динамічних складових похибки при експоненційній моделі вхідного сигналу

Слід відзначити, що значення похибки  $\Delta_{dyn0}$  визначається постійним запізнюванням, тому що у реальних ВП сигнал  $x(t)$  існує і до моменту початку тестування  $t = t_0 = 0$ . Ступінчаста зміна сигналу  $x(t)$ , коли  $x(t) = 0$  при  $t < 0$ , дозволяє застосувати операторний метод [2].

Запишемо динамічну реляційно-різницеву модель (PPM) оператора корекції по формі:

$$\Delta Y(t) = \begin{cases} \Delta Y_{21}(t_2, t_1) = (1 + \delta_m) \cdot [(\alpha \cdot t_2 + (1 - e^{-(t_2)/\tau}) + \Theta \cdot (1 - e^{-(t_2-T)/\tau})) - \\ - \alpha \cdot t_1 - (1 - e^{-(t_1)/\tau})]; \\ \Delta Y_{31}(t_3, t_1) = (1 + \delta_m) \cdot [\alpha \cdot t_3 + (1 - e^{-t_3/\tau}) + \Theta \cdot ((1 - e^{-(t_3-T)/\tau}) - \\ - (1 - e^{-(t_3-2T)/\tau})) + k \cdot (\alpha \cdot (t_3 - 2T) - \alpha \tau \cdot (1 - e^{-(t_3-2T)/\tau}) + \\ + k(X(0)(1 - e^{-(t_3-2T)/\tau}) + \tau(1 - e^{-t_3/\tau})) - \alpha \cdot t_1 - (1 - e^{-(t_1)/\tau})]; \end{cases} \quad (6)$$

Система різницевих рівнянь (6) набуває вигляду:

$$\Delta Y(t) = \begin{cases} \Delta Y_{21}(t_2, t_1) = \Theta \cdot (1 + \delta_m) \cdot \left[ \frac{\alpha \cdot t_2}{\Theta} + \frac{(1 - e^{-t_2/\tau})}{\Theta} + (1 - e^{-(t_2-T)/\tau}) - \right. \\ \left. - \frac{\alpha \cdot t_1}{\Theta} - \frac{(1 - e^{-(t_1-T)/\tau})}{\Theta} \right]; \\ \Delta Y_{31}(t_3, t_1) = k \cdot X(0) \cdot (1 + \delta_m) \cdot \left[ \frac{\alpha \cdot t_3}{kX(0)} + \frac{(1 - e^{-t_3/\tau})}{kX(0)} + \right. \\ \left. + \frac{\Theta \cdot (1 - e^{-(t_3-2T)/\tau})}{kX(0)} + \frac{k \cdot \alpha \cdot (t_3 - 2T - \tau)}{kX(0)} + \right. \\ \left. + (1 - e^{-(t_3-2T)/\tau}) + \frac{k \cdot \tau \cdot (1 - e^{-(t_3-2T)/\tau})}{kX(0)} - \frac{\alpha t_1}{kX(0)} - \right. \\ \left. - \frac{(1 - e^{-(t_1-2T)/\tau})}{kX(0)} \right]; \end{cases} \quad (7)$$

Систему (7) перепишемо відносно тестових впливів:

$$\frac{\Delta Y_{21}(t_2, t_1)}{\Delta Y_{31}(t_3, t_1)} = \frac{(1 + \delta_m) \cdot \Theta \cdot \left[ \frac{\alpha \cdot t_2}{\Theta} + \frac{(1 - e^{-t_2/\tau})}{\Theta} + (1 - e^{-(t_2-T)/\tau}) - \frac{\alpha \cdot t_1}{\Theta} - \frac{(1 - e^{-(t_1-T)/\tau})}{\Theta} \right]}{(1 + \delta_m) \cdot k \cdot X(0) \cdot \left[ \frac{\alpha \cdot t_3}{kX(0)} + \frac{(1 - e^{-t_3/\tau})}{kX(0)} + \frac{\Theta \cdot (1 - (1 - e^{-(t_3-2T)/\tau}))}{kX(0)} + \frac{k \cdot \alpha \cdot (t_3 - 2t - \tau)}{kX(0)} + (1 - e^{-(t_3-2T)/\tau}) + \frac{k \cdot \tau \cdot (1 - e^{-(t_3-2T)/\tau})}{kX(0)} - \frac{\alpha t_1}{kX(0)} - \frac{\Theta(1 - e^{-(t_3-2T)/\tau})}{kX(0)} \right]}$$

З урахуванням того, що  $t_2 = t_1 + T$ , отримаємо відношення різницевих значень тестових впливів:

$$\frac{\Delta y_{21}(t_2, t_1)}{\Delta y_{31}(t_3, t_1)} = \frac{\Theta}{k \cdot X(0)} \cdot \frac{(1 - \delta_{dyn1})}{(1 - \delta_{dyn2})}, \quad (8)$$

$$\text{де } (1 - \delta_{dyn1}) = 1 - \left[ \frac{\alpha \cdot t_2}{\Theta} + \frac{(1 - e^{-t_2/\tau})}{\Theta} + (1 - e^{-(t_2-T)/\tau}) - \frac{\alpha \cdot t_1}{\Theta} - \frac{(1 - e^{-(t_1-T)/\tau})}{\Theta} \right];$$

$$(1 - \delta_{\text{dyn}2}) = 1 - \left[ \frac{\alpha \cdot t3}{kX(0)} + \frac{(1 - e^{-t3/\tau})}{kX(0)} + \frac{\Theta \cdot (1 - (1 - e^{-(t3-2T)/\tau}))}{kX(0)} + \frac{k \cdot \alpha \cdot (t3 - 2t - \tau)}{kX(0)} + (1 - e^{-(t3-2T)/\tau}) + \frac{k \cdot \tau \cdot (1 - e^{-(t3-2T)/\tau})}{kX(0)} - \frac{\alpha \cdot t1}{kX(0)} - \frac{\Theta(1 - e^{-(t3-2T)/\tau})}{kX(0)} \right].$$

$$\frac{\Theta}{k \cdot X(0)} = \frac{\Delta y_{21}(t2, t1) \cdot (1 - \delta_{\text{dyn}2})}{\Delta y_{31}(t3, t1) \cdot (1 - \delta_{\text{dyn}1})} \cong 1 + \delta_{\text{dyn}2} - \delta_{\text{dyn}1}, \quad (9)$$

де  $\delta_{\text{dyn}2} + \delta_{\text{dyn}1} = \delta_{\text{dyn}\Sigma}$  - сумарна динамічна похибка.

Реляційно-різницева динамічна модель оператора корекції може бути записана [4]:

$$\frac{X(0)}{X(0)_{\text{H}}} = \Psi_{R \text{ dyn}} = \frac{\Delta y_{21}(t2, t1)}{\Delta y_{31}(t3, t1)} \cdot \frac{\Delta y_{21\text{H}}(t2, t1)}{\Delta y_{21}(t2, t1)} \cdot \frac{(1 - \delta_{\text{dyn}2})}{(1 - \delta_{\text{dyn}2\text{H}})} \times \frac{(1 - \delta_{\text{dyn}1\text{H}})}{(1 - \delta_{\text{dyn}1})} \cdot \frac{\theta}{\theta_{\text{H}}} \cdot \frac{k_{\text{H}}}{k}. \quad (10)$$

У статичному режимі тестового контролю ВП РРМ оператора динамічної корекції стає моделлю  $\Psi_{\text{R}}$ . Введемо позначення динамічної похибки РРМ коефіцієнта корекції [4]:

$$1 + \delta_{\text{dyn}} = \frac{1 - \delta_{\text{dyn}2}}{1 - \delta_{\text{dyn}2\text{H}}} \cdot \frac{1 - \delta_{\text{dyn}1\text{H}}}{1 - \delta_{\text{dyn}1}}. \quad (11)$$

Зроблено припущення, що  $1 - e^{-(t3-2T)/\tau} \approx 1$ .

Система тестового контролю повинна забезпечувати значення динамічних похибок на рівні, близькому до значень похибок у статичному режимі. У такому разі динамічна похибка РРМ запишеться у вигляді:

$$1 + \delta_{\text{dyn}} = \frac{\left[ 1 - \left( \frac{\alpha^* \cdot t2}{\Theta} + \frac{(1 - e^{-t2/\tau})}{\Theta} + (1 - e^{-(t2-T)/\tau}) - \frac{\alpha^* \cdot t1}{\Theta} - \frac{(1 - e^{-(t2-T)/\tau})}{\Theta} \right) \right] / \Delta Y_{21\text{H}}}{\left[ 1 - \left( \frac{\alpha \cdot t2}{\Theta} + \frac{(1 - e^{-t2/\tau})}{\Theta} + (1 - e^{-(t2-T)/\tau}) - \frac{\alpha \cdot t1}{\Theta} - \frac{(1 - e^{-(t2-T)/\tau})}{\Theta} \right) \right] / \Delta Y_{21}} \times$$

$$\times \frac{\left[ 1 - \left( \frac{\alpha \cdot t3}{kX(0)} + \frac{(1 - e^{-t3/\tau})}{kX(0)} + \frac{\Theta \cdot (1 - e^{-(t3-2T)/\tau})}{kX(0)} + \frac{k \cdot \alpha \cdot (t3 - 2t - \tau)}{kX(0)} + (1 - e^{-(t3-2T)/\tau}) + \frac{k \cdot \tau \cdot (1 - e^{-(t3-2T)/\tau})}{kX(0)} - \frac{\alpha \cdot t1}{kX(0)} - \frac{\Theta(1 - e^{-(t3-2T)/\tau})}{kX(0)} \right] / \Delta Y_{31}}{\left[ 1 - \left( \frac{\alpha^* \cdot t3}{kX(0)} + \frac{(1 - e^{-t3/\tau})}{kX(0)} + \frac{\Theta \cdot (1 - e^{-(t3-2T)/\tau})}{kX(0)} + \frac{k \cdot \alpha^* \cdot (t3 - 2t - \tau)}{kX(0)} + (1 - e^{-(t3-2T)/\tau}) + \frac{k \cdot \tau \cdot (1 - e^{-(t3-2T)/\tau})}{kX(0)} - \frac{\alpha^* \cdot t1}{kX(0)} - \frac{\Theta(1 - e^{-(t3-2T)/\tau})}{kX(0)} \right] / \Delta Y_{31\text{H}}}, \quad (12)$$

де де  $\alpha^*$  - оцінка параметра  $\alpha$ .

**Висновки:** 1. Аналізуючи отримані данні можна зробити висновок, що похибка визначення динамічної складової  $\delta_{\text{dyn}}$  (12) для заданої перехідної функції втрачає свою наочність та становить значні труднощі, тому можна вважати доречним розкладання функції в ряд та обмеження першими трьома членами ряду. 2. Наведено формули для оцінки динамічної складової похибки.

**Список літератури:** 1. Кондрашов С.І. Підвищення точності вимірювальних перетворювачів з формуванням у реальних умовах тестових впливів: дис. на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: 05.11.05 / С.І. Кондрашов– Харків, 2004. – 412 с. 2. Григоренко І.В. Дослідження впливу не лінійності зміни вхідного сигналу на динамічну похибку вимірювального перетворювача під час проведення тестового контролю / І.В. Григоренко // Вестник Национального Технического Университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – №. 57. С. 50 – 57. 3. Кондрашов С.І. Дослідження можливості корекції динамічної похибки тестового контролю при нелінійній моделі зміни вхідного сигналу / С.І. Кондрашов, І.В. Григоренко, М.С. Турин // Вістник НТУ «ХП» – Харків: НТУ «ХП», 2008. – № 31, – С. 95 – 98. 4. Григоренко І.В. Розвиток тестових методів підвищення точності електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів у динамічних режимах: дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.11.05 / І.В. Григоренко– Харків, 2010. – 224 с.

Поступила в редколегію 17.03.11