

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА КОМПЛЕКСАМИ

УДК 681.518.54

Р. П. МИГУЩЕНКО

РОЗРАХУНОК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ВІБРАЦІЇ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СКЛАДНИХ ПРОМИСЛОВИХ АГРЕГАТІВ

В статті розглядається синтез вимірювального каналу вібрації і аналітичний розрахунок його точнісних характеристик. Показано, що для ідентифікації поточного функціонального стану складних промислових агрегатів, в умовах експрес-контролю, найбільш доцільно оцінювати механічну вібрацію основних вузлів таких агрегатів, а для вимірювання вібрації використовувати п'єзоелектричні датчики. В статті розроблена структура перетворення механічної вібрації в електричний сигнал, проведені розрахунки елементів вимірювального каналу. Результати досліджень використані при контролі стану двигунів танків Т-64.

Ключові слова: промисловий агрегат, механічна вібрація, вимірювальний канал, похибка вимірювання, експрес-контроль

Вступ. Підвищення якості і експлуатаційної надійності будь-якої технологічно і технічно складної промислової продукції, особливо, якщо остання енергонасичена і має динамічні властивості, неможливе без удосконалення методів, приладів та інформаційно-вимірювальних технологій контролю і функціональної діагностики [1]. При цьому виникає комплексна наукова проблема, вирішення якої визначається як обсягом і точністю отримання первинної вимірювальної інформації, так і правильністю перетворень останньої в логічні висновки відносно фактичного технічного стану об'єкта [2].

Однією з найважливіших наукових і технічних задач при оцінці стану промислового об'єкта є отримання первинної вимірювальної інформації, яка однозначно характеризує його поточний стан. Для переважної більшості промислових агрегатів такою інформацією є механічна вібрація [3, 4]. Технічним аспектам прийому, перетворенню і опрацюванню механічної вібрації присвячена дана стаття.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. При проведенні експериментів в межах досліджень даної статті виникла необхідність в застосуванні різного роду інженерних розробок. Для цього на практиці необхідні досить добре вивчені і широко застосовувані засоби [5]:

- первинні перетворювачі механічної вібрації в активні або пасивні електричні величини;
- локальні вимірювальні канали, які реалізують нижній рівень ієрархічної системи контролю чи діагностики;
- цифрові канали, необхідні для індикації і для введення цифрових еквівалентів вібрації в координатор верхнього рівня ієрархії.

Відомо, що на точність визначення поточного стану промислових агрегатів, в першу чергу, впливає первинна інформація, яка визначається вибором датчика і побудовою вимірювального каналу.

Особливістю п'єзоелектричного перетворювача вібрації, який найчастіше використовується для вимірювання механічної вібрації, є високий вихідний опір [6], саме тому такий перетворювач можна представити у вигляді джерела струму. У цьому випадку величина вібро-

прискорення механічної вібрації технічних об'єктів є пропорційною струму з первинного перетворювача, а це зумовлює необхідність в побудові вимірювального каналу струму [7].

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є синтез вимірювального каналу механічної вібрації для забезпечення експрес-контролю стану складних промислових агрегатів.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

1. Розробка вимірювального каналу механічної вібрації.
2. Оцінка точнісних характеристик вказаного каналу.
3. Натурні випробування результатів розробки.

Синтез вимірювального каналу вібрації. При проведенні досліджень вібрації промислових агрегатів автор виконував розробку такого вимірювального каналу відповідно до виробленого технічного завдання (ТЗ). Необхідний за ТЗ діапазон вимірювання електричного струму ($1 \div 100 \text{ A}$) можна розбити на наступні діапазони:

- $0.1 \text{ A} \div 1 \text{ A}$;
- $1 \text{ A} \div 10 \text{ A}$;
- $10 \text{ A} \div 100 \text{ A}$.

Структурна схема вимірювального каналу струму являє блок перетворення струм-напруга, який складається з вимірювального трансформатора, дільника, випрямляча і перетворювача рівнів (рис 1). Надалі сигнал з цього каналу надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

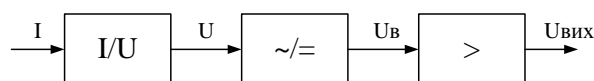


Рис. 1 – Структурна схема вимірювального каналу

Для перетворення струму в напругу використовується трансформаторна розв'язка і резистивний дільник. Для такого перетворення використовується зняття значення падіння напруги на резистивному дільнику, через який пропущений струм вторинної обмотки трансформатора. У схемі використовується

трансформатор з коефіцієнтом перетворення $K = 1000$. Сумарний опір резистивного дільника $R_{\Sigma} \neq 75$.

Розрахункова частина при розробці вимірювального каналу полягає в розрахунку опорів дільника, а також опорів перетворювача рівнів, для прямого узгодження величини вимірюваного струму з вхідним сигналом АЦП. Номінальне значення вимірюваної величини кожного діапазону повинне дати 1 В на вході АЦП.

Принципова схема перетворювача струм-напруга показана на рис. 2.

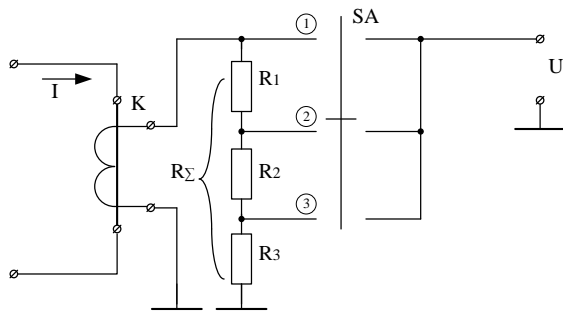


Рис. 2 – Схема перетворювача струм-напруга

Розрахуємо для схеми перетворення з рис. 2 вихідну напругу. Для першого діапазону:

$$I_{\Sigma 1} = \frac{I_{n1}}{K}; \quad I_{\Sigma 1} = \frac{1}{10^3} = 10^{-3} \text{ А};$$

$$U_1 = I_{\Sigma 1} R_{\Sigma}; \quad U_1 = 10^{-3} \cdot 75 = 0.075 \text{ В}.$$

Вибираємо коефіцієнт ділення резистивного дільника на інших діапазонах так, щоб вихідна напруга залишалася незмінною. Тоді, для другого діапазону:

$$I_{\Sigma 2} = \frac{I_{n2}}{K}; \quad I_{\Sigma 2} = \frac{10}{10^3} = 10^{-2} \text{ А};$$

$$R_{\Sigma 2} \neq \frac{U_2}{I_{\Sigma 2}} = \frac{0.075}{10^{-2}} = 7.5.$$

Для третього діапазону:

$$I_{\Sigma 3} = \frac{I_{n3}}{K}; \quad I_{\Sigma 3} = \frac{100}{10^3} = 10^{-1} \text{ А};$$

$$R_{\Sigma 3} \neq \frac{U_3}{I_{\Sigma 3}} = \frac{0.075}{10^{-1}} = 0.75.$$

Таким чином:

$$R_3 = R_{\Sigma 3} = 0.75 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_{\Sigma 2} - R_{\Sigma 3} = 7.5 - 0.75 = 6.75;$$

$$R_1 = R_{\Sigma 1} - R_{\Sigma 2} = 75 - 7.5 = 67.5.$$

Рівняння перетворення струму в напругу матимуть наступний вигляд.

Для першого діапазону:

$$U = \frac{I}{K} \cdot (R_1 + R_2 + R_3);$$

Для другого діапазону:

$$U = \frac{I}{K} \cdot (R_2 + R_3).$$

Для третього діапазону:

$$U = \frac{I}{K} \cdot R_3.$$

В якості випрямляча і перетворювача рівнів, які слідують у вимірювальному каналі за вимірювальним трансформатором та дільником, використана схема інвертуючого підсилювача на операційному підсилювачі з включеними діодами в колі оберненого зв'язку та вихідним фільтром.

Схема випрямляча і перетворювача рівнів показана на рис. 3 [8].

Рівняння перетворення для схеми на рис. 3 матиме наступний вигляд:

$$U_{вих} = U_{вх} \frac{R_{y2}}{R_{y1}},$$

при виконанні умови $C_1 R_2 \gg T$.

З іншого боку

$$K_{oc} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}; \quad K_{oc} = \frac{1}{0.075} = 13.3.$$

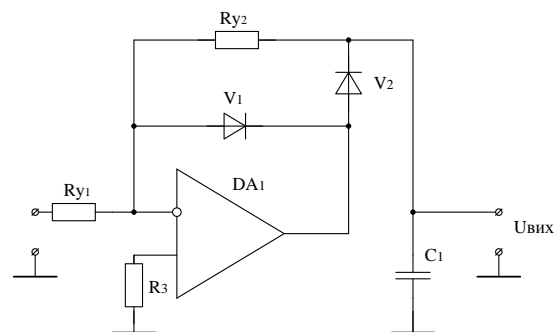


Рис. 3 – Схема випрямляча і перетворювача рівнів

Прийmemo $R_{y2} = 100 \text{ кОм}$, тоді:

$$R_{y1} = \frac{R_{y2}}{K}; \quad R_{y1} = \frac{100 \cdot 10^3}{13.3} = 7.5 \cdot 10^3.$$

Визначення характеристик вимірювального каналу вібрації. Проаналізуємо похибки, які виникають у побудованому вимірювальному каналі.

При непрямих вимірюваннях значення невідомої величини q знаходять на підставі математичної залежності, яка пов'язує цю величину з однією або декількома величинами $(x, y, \dots z)$, що отримані прямими вимірюваннями [9]:

$$q = f(x, y, \dots z).$$

Похибка результату q також буде функціонально пов'язана з похибками вимірюваних величин $(x, y, \dots z)$.

Для знаходження похибки результату непрямого вимірювання можна скористатися наступними правилами [9]:

1. Якщо остаточний результат вимірювання виражається сумою або різницею двох або більше вимірюваних значень:

$$q = x + \dots + z - (u + \dots + w)$$

і похибки $\Delta x, \dots \Delta w$ незалежні і випадкові, то абсолютна похибка результату може бути знайдена по формулі:

$$\Delta q = \sqrt{(\Delta x)^2 + \dots + (\Delta z)^2 + (\Delta u)^2 + \dots + (\Delta w)^2} . \quad (1)$$

Коли похибки аргументів корельовані, значення Δq може перевищувати отримане по формулі (1), але завжди задовольняє умові:

$$\Delta q \leq \Delta x + \dots + \Delta z + \Delta u + \dots + \Delta w .$$

2. Якщо остаточний результат вимірювання виражається множенням або діленням двох або більше вимірних значень:

$$\Delta q = \frac{x \cdot \dots \cdot z}{u \cdot \dots \cdot w}$$

і похибки $\delta x \dots \delta w$ незалежні і випадкові, то відносна похибка результату може бути знайдена по формулі:

$$\delta q = \sqrt{(\delta x)^2 + \dots + (\delta z)^2 + (\delta u)^2 + \dots + (\delta w)^2} . \quad (2)$$

Коли похибки аргументів корельовані, значення δq може перевищувати отримане по формулі (2), але завжди задовольняє умові:

$$\delta q \leq \delta x + \dots + \delta z + \delta u + \dots + \delta w .$$

3. У загальному випадку похибка функції декількох величин

$$q = f(x, y, \dots, w),$$

похибки яких незалежні і випадкові, знаходиться по формулі:

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial y} \delta y\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial w} \delta w\right)^2} , \quad (3)$$

і у будь-якому випадку ніколи не перевищує значення:

$$\delta q \leq \left|\frac{\partial q}{\partial x}\right| \delta x + \left|\frac{\partial q}{\partial y}\right| \delta y + \dots + \left|\frac{\partial q}{\partial w}\right| \delta w .$$

Розрахунок похибки перетворення вимірювального каналу проводимо на основі формули (3).

При першому діапазоні функція перетворення має вигляд:

$$U = \frac{1}{K} \cdot (R_1 + R_2 + R_3) \cdot \frac{R_{y2}}{R_{y1}} .$$

Тоді похибка перетворення виходячи з формули (3) виглядає так:

$$\gamma_1 = \left[\frac{\partial U \cdot \Delta R_1}{\partial R_1} + \frac{\partial U \cdot \Delta R_2}{\partial R_2} + \frac{\partial U \cdot \Delta R_3}{\partial R_3} + \frac{\partial U \cdot \Delta R_{y1}}{\partial R_{y1}} \frac{\partial U \cdot \Delta R_{y2}}{\partial R_{y2}} + \frac{\partial U \cdot \Delta I}{\partial I} + \frac{\partial U \cdot \Delta K}{\partial K} \right] \cdot 100\% . (4)$$

ΔR_i визначається виходячи з виразу:

$$\Delta R_i = \frac{TKO \cdot R_i \cdot \Delta t}{100\%} , \quad (5)$$

де TKO – температурний коефіцієнт опору – $0.04\%/^{\circ}C$; Δt – зміна температури (на $20^{\circ}C$).

Виходячи з формули (5) і номіналів $R_{Q\#67.3}$, $R_{Q\#6.73}$, $R_{Q\#1}$, $R_{\#7.5}$, $R_{\#100}$ знайдено:

$$\Delta R_{Q\#67.3} = 0.538 \quad ; \quad \Delta R_{Q\#6.73} = 0.054 \quad ;$$

$$\Delta R_{Q\#1} = 0.008 \quad ; \quad \Delta R_{\#7.5} = 60 \quad ; \quad \Delta R_{\#100} = 800 \quad .$$

У схемі використовувався трансформатор з класом точності 0.5. Так як у вимірювальних трансформаторах переважає мультиплікативна похибка, то держстандарт у таких пристроїв нормує межу допустимої відносної похибки. Виходячи з цього, максимальна абсолютна похибка вимірювального трансформатора струму дорівнює $\Delta K = 0.005$, а абсолютна похибка вимірювання струму $\Delta I = 0.01 A$.

Тоді похибка перетворення при вимірюванні струму, виходячи з формули (4) складає $\gamma_1 = 1.012\%$.

При другому діапазоні функція перетворення вимірювального каналу має вигляд:

$$\gamma_2 = \left[\frac{\partial U \cdot \Delta R_2}{\partial R_2} + \frac{\partial U \cdot \Delta R_3}{\partial R_3} + \frac{\partial U \cdot \Delta R_{y1}}{\partial R_{y1}} \frac{\partial U \cdot \Delta R_{y2}}{\partial R_{y2}} + \frac{\partial U \cdot \Delta I}{\partial I} + \frac{\partial U \cdot \Delta K}{\partial K} \right] \cdot 100\% . (6)$$

$$U = \frac{1}{K} \cdot (R_2 + R_3) \cdot \frac{R_{y2}}{R_{y1}} .$$

Похибка перетворення при другому діапазоні визначається так:

Похибка, відповідно до (6) складає $\gamma_2 = 0.746\%$.

При третьому діапазоні вираз для коефіцієнту перетворення виглядає таким чином:

$$U = \frac{1}{K} \cdot R_3 \cdot \frac{R_{y2}}{R_{y1}} .$$

Похибка перетворення для цього випадку:

$$\gamma_3 = \left[\frac{\partial U \cdot \Delta R_3}{\partial R_3} + \frac{\partial U \cdot \Delta R_{y1}}{\partial R_{y1}} \frac{\partial U \cdot \Delta R_{y2}}{\partial R_{y2}} + \frac{\partial U \cdot \Delta I}{\partial I} + \frac{\partial U \cdot \Delta K}{\partial K} \right] \cdot 100\% . (7)$$

Похибка перетворення вимірювального каналу при третьому діапазоні (7) складає $\gamma_3 = 1.351\%$.

Виходячи із співвідношень розрахунку похибок при трьох діапазонах вимірювання струму обирається максимальна, і тоді похибка вимірювального каналу складає $\gamma = 1.351\%$.

Результати використання вимірювальних каналів вібрації.

При дослідженнях систем подачі палива в дизель-генераторні установки, вузлів виведення відпрацьованих газів дизельними двигунами, функціонуючих систем охолодження двигунів на ДП «Харківський бронетанковий завод» була розроблена і використана діагностична апаратура [10], до складу якої входили розроблені автором вимірювальні канали вібрації. З використанням цієї діагностичної апаратури були зняті і оброблені вібросигнали при виконанні вказаних досліджень на дизельному обладнанні танків Т-64 (рис. 4).

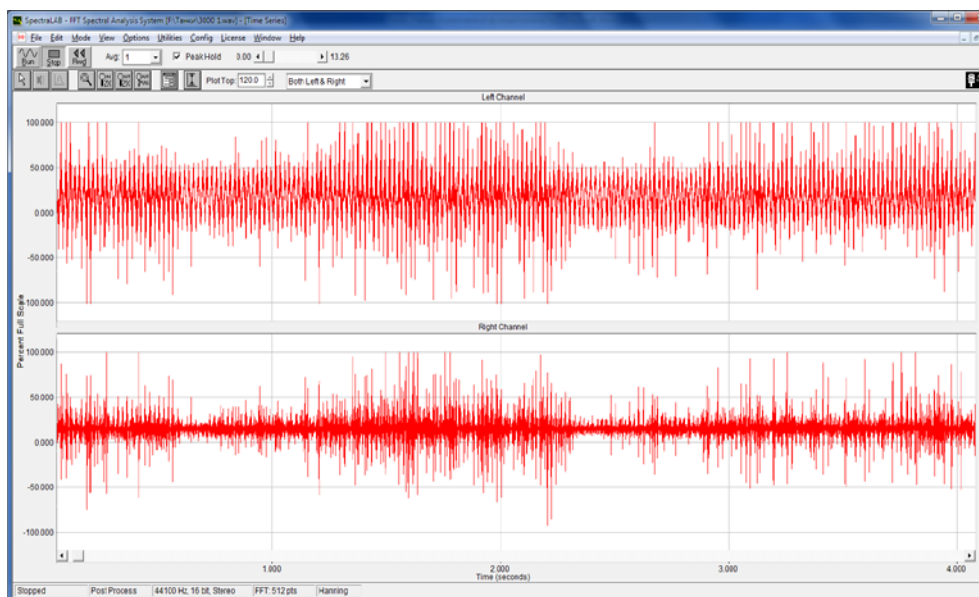


Рис. 4 – Вимірювальні вібросигнали двигунів танків Т-64 на частоті 3000 об/хв

Розроблений і досліджений вимірювальний канал механічної вібрації передавав вимірювальну інформацію на лінійний вхід комп'ютера типу «NOTEBOOK» і опрацьовувався прикладною програмою SpectraLAB 4.3.

Висновки. В результаті проведених досліджень розроблений, досліджений та впроваджений інформаційно-вимірювальний канал перетворення механічної вібрації в електричний сигнал. Виявлені його основні точнісні характеристики.

Список літератури:1. *Montgomery, D. C.* Introduction to Statistical Quality Control [Text] / *D. C. Montgomery*. – New York: John Wiley & Sons, 2001. – 796 p.2. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч. посіб. для учнів проф.-техн. навч. закл. [Текст] / *С. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк*. – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с.3. Неразрушаючий контроль: вибродіагностика. Справочник в 7 томах [Текст] / *Ф. А. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова, Р. В. Васильева и др.*; под редакцией В.В. Клюева. – М.: Машиностроение. – Т. 7. – 2005. – 829 с.4. *Клюев, В. В.* Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: справочник в 2-х книгах. Кн. 1 [Текст] / *В. В. Клюев; под ред. В. В. Клюева*. – М.: Машиностроение, 1978. – 448 с.5. *Чинков, В. М.* Цифрові вимірювальні пристрої: навч. посібн. [Текст] / *В. М. Чинков*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 508 с.6. *Виглеб, Г.* Датчики [Текст] / *Г. Виглеб; пер. с нем.* – М.: Мир, 1989. – 196 с.7. *Грэм, Дж.* Проектирование и применение операционных усилителей [Текст] / *Дж. Грэм, Дж. Тоби, Л. Хьюлман* // Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 510 с.8. *Гутников, В. С.* Интегральная электроника в измерительных устройствах [Текст] / *В. С. Гутников*. – Л.: Энергоатомиздат. Ле-

нинградское отд-ние, 1988. – 304 с.9. Проверка средств электрических измерений: справочная книга [Текст] / *Л. И. Любимов, И. Д. Форсилова, Е. З. Шапиро и др.* – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 296 с.10. *Мигущенко, Р. П.* Стенд отладки микропроцессорных приборов [Текст] / *Р. П. Мигущенко, В. І. Бакум, О. Ю. Кропачек, О. Є. Тверитникова, М. І. Опришкіна* // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Автоматика та приладобудування. – 2008. – No 31. – С. 113 – 117.

Bibliography (transliterated):1. *Montgomery, D. C.* (2001). Introduction to Statistical Quality Control. New York: John Wiley & Sons, 796.2. *Volodars'kyy, Ye. T., Kukharchuk, V. V., Podzharenko, V. O., Serdyuk, H. B.* (2001). Metrolohichne zabezpechennya vymiryuvan' i kontrolyu: navch. posib. dlya uchniv prof.-tekhn. navch. zakl. Vinnytsya: Veles, 219.3. *Balytskyy, F. A., Barkov, A. V., Barkova, N. A., Vasylyeva, R. V. y dr.; pod redaktsyey Klyueva V. V.* (2005). Nerazrushayushchy kontrol': vybrodyahnostyka. Spravochnyk v 7 tomakh. Moscow: Mashynostroenye. T. 7, 829.4. *Klyuev, V. V.* (1978). Prybory y systemy dlya yzmerenyuya vybratsyy, shuma y udara: spravochnyk v 2-kh knyakh. Kn. 1. Moscow: Mashynostroenye, 448.5. *Chynkov, V. M.* (2008). Tsyfrovі vymiryuva'l'ni prystroyi: navch. posibn. Kharkiv: NTU «KhPI», 508.6. *Vyhleb, H. Datchyky*; per. s nem. (1989). Moscow: Myr. 196.7. *Hrэм, Dzх., Тoby, Dzх., Kh'yul'sman, L.* (1974). Proektyrovanye y pryumenenye operatsyonnykh usulyteley: Per. s anhл. Moscow: Myr. 510.8. *Hutnykov, V. S.* (1988). Yntehr'al'naya elektronyka v yzmyrytel'nykh ustroystvakh. Leningrad: Enerhoatomyzdat. Leningradskoe otd-nye, 304.9. *Lyubymov, L. Y., Forsylova, Y. D., Shapyro, E. Z. y dr.* (1987). Poverka sredstv elektricheskyykh yzmerenyuy: spravochnaya knyha. Leningrad: Enerhoatomyzdat. Leninghr. otd-nye, 296.10. *Mygushchenko, R. P., Bakum, V. I., Kropachek, O. Yu., Tveritykova, O. Ye., Opryshkina, M. I.* (2008). Stend otladky mykroprotsessornykh pryborov. Visnyk NTU «KhPI». Ser. Avtomatyka ta prylobo-buduvannya, No 31, 113 – 117.

Надійшла (received) 30.11.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мигущенко Руслан Павлович – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент, професор кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології та системи»; вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002; тел.: 067-767-02-87; e-mail: mrp1@bk.ru.

Мигущенко Руслан Павлович – доктор технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент, профессор кафедры «Информационно-измерительные технологии и системы»; ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002; тел.: 067-767-02-87; e-mail: mrp1@bk.ru.

Mygushchenko Ruslan – doctor of technical sciences, associate professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; st. Frunze, 21 m. Kharkiv, Ukraine, 61002; tel.: 067-767-02-87; e-mail: mrp1@bk.ru.