

В. М. Рудницький, д.т.н., професор,
e-mail: rvn_2008@ukr.net

М. В. Хрульов, к.т.н., доцент,
e-mail: hrulev@ukr.net

Г. В. Канашиевич, д.т.н., професор,
e-mail: kgv-elbeam@rambler.ru

А. І. Числов, ст. викладач,
e-mail: a.i.chislov@gmail.com

Г. В. Кривоус, зав. лабораторіями,
e-mail: krivous_gv@gmail.com

А. Б. Скуцький, студент
e-mail: xronlol@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИПУ ІНДУКТОСИН, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА ВИМІРЮВАННІ КУТА ЗСУВУ ФАЗИ

У статті розглянуто метод вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні кута зсуву фази, виникнення та зміну в часі динамічної похибки методу вимірювання. Визначено залежність максимальної абсолютної динамічної похибки переміщення від швидкості переміщення і частоти напруги живлення.

В результаті виконаного аналізу зроблено висновок про можливість використання розглянутого методу без компенсації динамічної похибки при правильному виборі значень швидкості, частоти напруги живлення індуктосина і точності вимірювання. З другого боку, застосування методів компенсації динамічної похибки дасть можливість істотно розширити експлуатаційні характеристики методу вимірювання, а саме підвищити максимальне значення швидкості і точності вимірювання.

Ключові слова: похибка вимірювання, метод вимірювання, вимірювання переміщення, вимірювальний перетворювач, індуктосин.

Постановка проблеми. Вимірювачі переміщення широко застосовуються в різних технічних і технологічних галузях. Однією з галузей застосування є системи ЧПУ, призначені для отримання деталі заданої форми із заданою точністю в результаті автоматизованої точкової взаємодії між інструментом і предметом обробки [1].

Відомі вимірювачі переміщення таких типів: індуктосини, обертові трансформатори (ОТ), селісини, оптичні датчики [2, 3], а також вимірювачі переміщення на основі лазерів [4].

Вимірювачі переміщення типу індуктосин відзначаються надійністю, довговічністю, низькою статичною похибкою вимірювання, простотою обслуговування.

Вимірювачі переміщення типу індуктосин використовують один із видів перетворення кутового переміщення [5]:

- переміщення $\rightarrow$ амплітуда $\rightarrow$ код;
- переміщення $\rightarrow$ фаза $\rightarrow$ час $\rightarrow$ код.

Нині найбільшого поширення набули вимірювачі переміщення типу індуктосин, що базуються на перетворенні кутового переміщення в амплітуду [6].

З другого боку, в експлуатації дотепер перебуває значна кількість обладнання, в якому використовуються вимірювачі переміщення типу індуктосин, що базуються на перетворенні кутового переміщення в фазу [5, 7].

Таким чином, завдання дослідження динамічної похибки методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази, з метою корекції динамічної похибки, є актуальним і становить певний науковий і практичний інтерес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [8] розглянуто загальні положення теорії похибок.

Методи проектування фазових цифрових перетворювачів «кут–код», похибки перетворювачів і методи їх корекції розглянуто в [5].

Принципи роботи вимірювальних перетворювачів типу індуктосин досліджено в [5, 7, 9].

Похибки фазових перетворювачів кута розглянуто в [5].

Відомі методи підвищення точності перетворення кутового переміщення в амплітуду. Модель компенсації помилок, що базується на автономній ідентифікації даних, яка створена для підвищення точності системи вимірювання кута, досліджено в [10].

Метод вимірювання положення за допомогою індуктосинів, в якому використовується масштабування амплітуди, розглянуто в [11].

Виклад основного матеріалу. При вимірюванні переміщення заготовки за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин або обертового трансформатора (ОТ), що базується на вимірюванні зсуву фази, поступальний рух заготовки перетвориться в кут повороту ротора індуктосина або ОТ. Кут повороту ротора перетворюється в зсув по фазі вихідного сигналу [5].

На нерухомі ортогональні обмотки індуктосина подаються напруги живлення $U_{\sin}(t) = k A \sin 2\pi f t$ і $U_{\cos}(t) = A \cos 2\pi f t$, де f – частота 2,5 ... 10 kHz [7, 9]. Вихідний сигнал $U_{out}(t) = k A \sin(2\pi f t + \varphi)$ знімається з вимірювальної обмотки, розташованої на роторі, причому зсув фази φ визначається положенням вимірювальної обмотки відносно ортогональної обмотки живлення.

Відповідно, за виміряним значенням зсуву фази φ можна визначити величину переміщення, що привело до зміни фази

$$S = k \varphi, \quad (1)$$

де S – переміщення заготовки;

k – коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача, що зв'язує переміщення і фазу φ ;

φ – виміряне значення зсуву фази вихідного сигналу, відповідне переміщення (положення) S заготовки.

Вимірювання фази вихідного сигналу $U_{out}(t)$ виконується один раз за період T напруги живлення $U_{sin}(t)$, яка виконує роль опорного сигналу. Вимірювання фази вихідного сигналу

полягає у вимірюванні відрізка часу τ_{msr} між початком періоду опорного сигналу $U_{sin}(t)$ і початком періоду вихідного сигналу $U_{out}(t)$.

Початком періоду сигналу $U_{sin}(t)$ будемо вважати моменти $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ зміни знака опорного сигналу $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ з негативного на позитивне значення. Аналогічно для вихідного сигналу $U_{out}(t)$ початком періоду вважатимемо моменти $t_{msr\ i}\{t_{msr\ 0}, t_{msr\ 1}, t_{msr\ 2}, \dots\}$.

У моменти $t_{msr\ i}\{t_{msr\ 0}, t_{msr\ 1}, t_{msr\ 2}, \dots\}$ цикл вимірювання зупиняється. У моменти $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ виконується зчитування виміряного значення і запуск нового циклу вимірювання.

Таким чином, відрізок часу $\tau_{msr\ i}$ визначається як

$$\tau_{msr\ i} = t_{i+1} - t_{msr\ i}.$$

Вимірювання відрізка часу $\tau_{msr\ i}$ полягає в підрахунку лічильником CNT кількості імпульсів заданої частоти f_{msr} за час $\tau_{msr\ i}$. Таким чином, величину переміщення (1) можна пов'язати з часом вимірювання $\tau_{msr\ i}$ або зі станом лічильника CNT :

$$S = k \varphi = k_1 \tau_{msr} = k_2 CNT,$$

де k_1 – коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача, що зв'язує переміщення і фазу φ через час вимірювання τ_{msr} ;

k_2 – коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача, що зв'язує переміщення і фазу φ через стан лічильника CNT і частоту f_{msr} ;

CNT – стан лічильника вимірювання часу $\tau_{msr\ i}$ (кількість імпульсів частоти f_{msr}).

Часові діаграми, зображені на рис. 1, демонструють описаний вище метод вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази.

Абсолютна похибка [8] переміщення визначається як:

$$\Delta = S_{valid} - S_{msr}, \quad (2)$$

де Δ – абсолютна похибка переміщення;

S_{valid} – дійсне значення переміщення;

S_{msr} – виміряне значення переміщення.

У моменти $t_{msr\ i}\{t_{msr\ 0}, t_{msr\ 1}, t_{msr\ 2}, \dots\}$ фіксується миттєве положення заготовки. У разі відсутності руху положення заготовки не змінюється до моментів $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ зчитування виміряного значення. В цьому випадку в момент зчитування $S_{valid} = S_{msr}$ і, відповідно до (2), абсолютна похибка методу вимірювання $\Delta = 0$.

У разі наявності руху положення заготовки змінюється протягом часу від моментів $t_{msr\ i}\{t_{msr\ 0}, t_{msr\ 1}, t_{msr\ 2}, \dots\}$ кілька разів до моментів $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ зчитування вимірюваного значення протягом часу:

$$\tau_{rmn} = T - \tau_{msr}, \quad (3)$$

де τ_{rmn} – відрізок часу між моментом $t_{msr\ i}$ $\{t_{msr\ 0}, t_{msr\ 1}, t_{msr\ 2}, \dots\}$ фіксації миттєвого положення заготовки (початок періоду вихідного

сигналу U_{out}) і моментом $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ зчитування вимірюваного значення (початок наступного періоду опорного сигналу $U_{sin}(t)$);

T – період опорного сигналу $U_{sin}(t)$, протягом якого виконується вимірювання;

τ_{msr} – відрізок часу між початком періоду опорного сигналу $U_{sin}(t)$ і початком періоду вихідного сигналу $U_{out}(t)$.

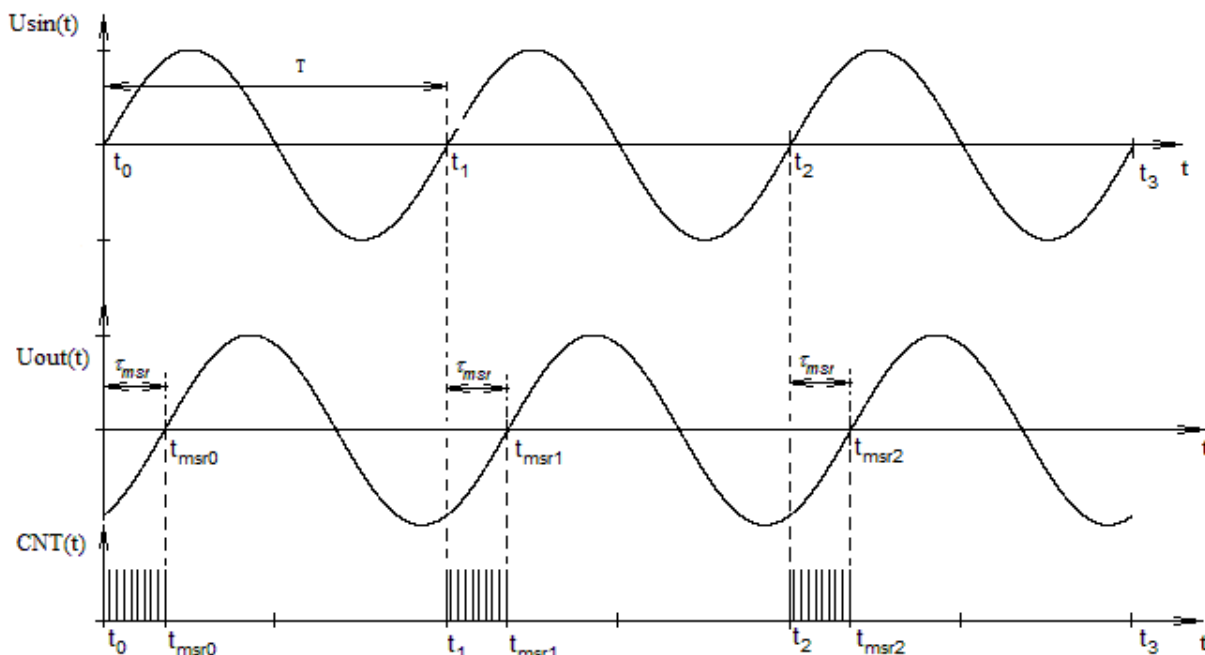


Рисунок 1 – Вимірювання переміщення, що базується на вимірюванні зсуву фази

В цьому випадку в момент зчитування $S_{valid} \neq S_{msr}$ і, відповідно до (2), абсолютна похибка методу вимірювання $\Delta \neq 0$. Оскільки протягом часу τ_{rmn} від моменту вимірювання до моменту зчитування вимірюваного значення заготовка буде переміщатися, в загальному випадку з деякими швидкістю V і прискоренням a , дійсне значення переміщення визначиться наступним чином:

$$S_{valid} = S_{msr} + V \tau_{rmn} + \frac{a \tau_{rmn}^2}{2}. \quad (4)$$

Тоді абсолютна динамічна похибка методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази, з урахуванням (2) і (4) визначиться як

$$\Delta = V \tau_{rmn} + \frac{a \tau_{rmn}^2}{2}. \quad (5)$$

Часова діаграма, зображена на рис. 2, демонструє процес виникнення і зміну в часі абсолютної динамічної похибки методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази.

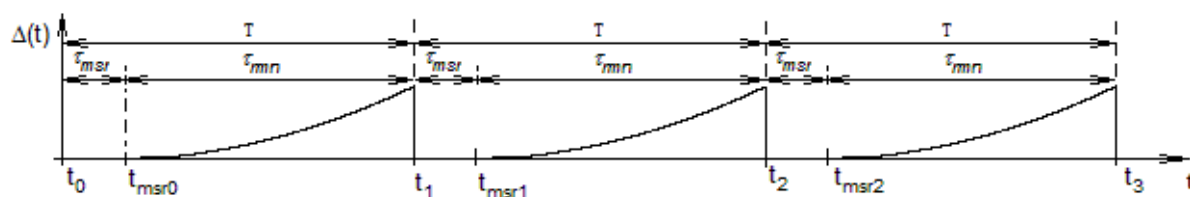


Рисунок 2 – Абсолютна динамічна похибка методу вимірювання переміщення, що базується на вимірюванні зсуву фази

З (3) випливає, що при $\tau_{msr} = 0$ τ_{rnn} набуде максимального значення, рівного T . Тоді максимальна абсолютна динамічна похибка визначиться як

$$\Delta_{MAX} = VT + \frac{a T^2}{2}, \quad (6)$$

де Δ_{MAX} – максимальна абсолютна динамічна похибка переміщення.

Виведемо максимальну абсолютну динамічну похибку (6) через частоту f опорного сигналу $Usin(t)$:

$$\Delta_{MAX} = \frac{V}{f} + \frac{a}{2f^2}. \quad (7)$$

На рис. 3 зображено графіки, отримані на основі (7), що демонструють залежність максимальної абсолютної динамічної похибки Δ_{MAX} від швидкості переміщення заготовки V при фіксованих значеннях частоти напруги живлення f і прискоренні a , рівному 0 м/с^2 .

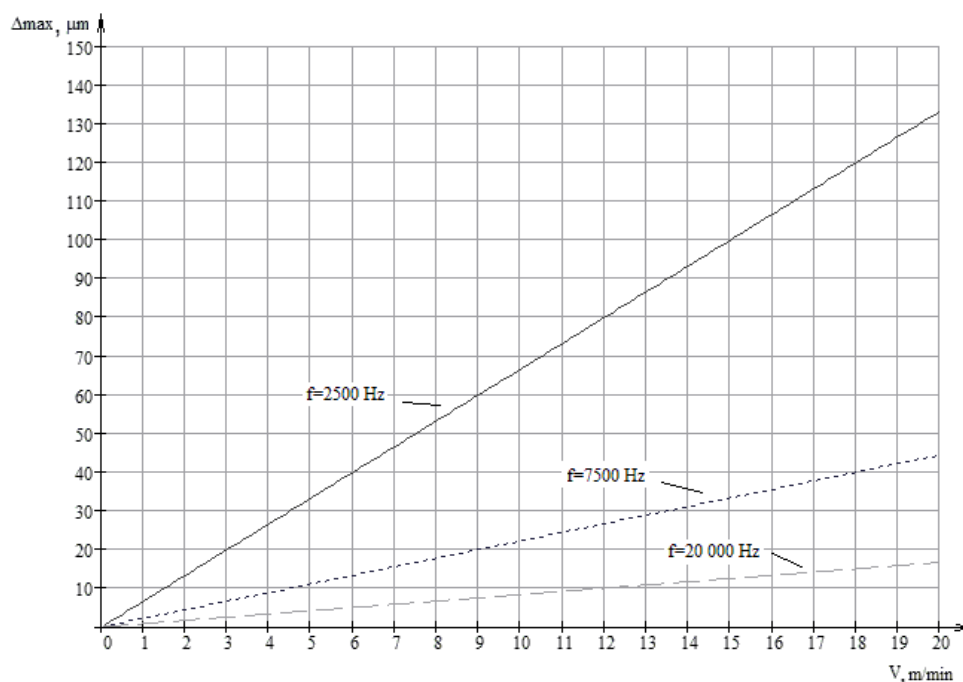


Рисунок 3 – Залежність максимальної абсолютної динамічної похибки Δ_{MAX} від швидкості переміщення V

Розрахунки, виконані з використанням (7), показують, що при швидкості $V = 15 \text{ м/хв}$ (швидкість швидкого переміщення), прискоренні $a = 5 \text{ м/с}^2$ і частоті напруги живлення $f = 2,5 \text{ кГц}$ максимальна абсолютна динамічна похибка Δ_{MAX} становить $0,1 \text{ мм}$, що є прийнятним для цього швидкісного режиму.

Вплив зміни прискорення a від 0 м/с^2 до $\pm 5 \text{ м/с}^2$ на величину максимальної абсолютної динамічної похибки Δ_{MAX} становить $0,0004 \text{ мм}$, що в більшості випадків є допустимим.

З другого боку, максимальна абсолютна динамічна похибка Δ_{MAX} не перевищує $0,001 \text{ мм}$, забезпечується при швидкості робочого переміщення V , не більшій $0,09 \text{ м/хв}$, що

менша швидкості 5 м/хв [1], прийнятої як максимальна швидкість робочого переміщення для верстатів з ЧПУ, застосовуваних у машинобудуванні.

При зміні частоти напруги живлення f від $2,5 \text{ кГц}$ до 20 кГц максимальна абсолютна динамічна похибка Δ_{MAX} зменшується у 8 разів і не перевищує $0,001 \text{ мм}$ при швидкості V , не більшій $1,2 \text{ м/хв}$.

Висновки. На максимальну абсолютну динамічну похибку методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази, впливають: швидкість, прискорення заготовки і частота напруги живлення обмоток індуктосина,

Використання розглянутого методу можливе без компенсації динамічної похибки при правильному виборі значень швидкості, точності вимірювання і частоти напруги живлення індуктосина.

Застосування компенсації динамічної похибки дасть змогу істотно розширити експлуатаційні характеристики методу вимірювання, а саме підвищити максимальне значення швидкості робочого руху і точність вимірювання.

Список літератури

1. Кошкин В. Л. Аппаратные системы числового программного управления. Москва: Машиностроение, 1989. 248 с.
2. Резольверы – преобразователи угловых перемещений на основе вращающегося трансформатора. *СКБИС*. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=10>
3. Инкрементные линейные фотоэлектрические преобразователи перемещений. *СКБИС*. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=1>
4. Лазерные датчики перемещения. *СКБИС*. URL: <http://www.mega-sensor.ru/measure/mes-displ/>
5. Петропавловский В. П., Синицын Н. В. Фазовые преобразователи угла. Москва: Машиностроение, 1984. 134 с.
6. Synchro/resolver conversion: handbook. Data Device Corporation 105 Wilbur Place, Bohemia, New York 11716-2482. URL: <https://www.ddc-web.com/documents/synhdbk.pdf>
7. Устройство 2С42–65: руководство по эксплуатации 3.035.090 РЭ. 1991. Ч. 1. 84 с.
8. Миронов Э. Г., Бессонов Н. П. Метрология и технические измерения: учеб. пособ. Москва: КНОРУС. 2015. 422 с.
9. Хрулев Н. В. Структура микроконтроллера измерителя перемещения на основе индуктосина. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. Хмельницький, 2015. № 1. С. 136–139.
10. Liu C. J., Qi M., Zou J. B. Error modeling of inductosyn angle measuring system. *Journal of Harbin Institute of Technology*. 2009. № 41.9. P. 51–55.

of Harbin Institute of Technology. 2009. № 41.9. P. 51–55.

11. Zhenghua C. J. E. L. L., Yunjie W. High speed and accuracy position measuring method based on inductosyn. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2005. № 4.

References

1. Koshkin, V. L. (1989). Hardware systems of numerical program control. Moscow: Mashinostroenie, 248 p. [in Russian].
2. Resolvers – angular displacement transducers based on a rotating transformer. *SKBIS*. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=10>
3. Incremental linear photoelectric displacement transducers. *SKBIS*. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=1>
4. Laser displacement sensors. *SKBIS*. URL: <http://www.mega-sensor.ru/measure/mes-displ/>
5. Petropavlovskiy, V. P., Sinitsyn, N. V. (1984). Phase angle converters. Moscow: Mashinostroenie, 134 p. [in Russian].
6. Synchro/resolver conversion: handbook. Data Device Corporation 105 Wilbur Place, Bohemia, New York 11716-2482. URL: <https://www.ddc-web.com/documents/synhdbk.pdf>
7. The device 2C42–65: operation manual 3.035.090 RE (1991). P. 1, 84 p. [in Russian].
8. Mironov, E. G., Bessonov, N. P. (2015). Metrology and technical measurements: study guide. Moscow: KNORUS, 422 p. [in Russian].
9. Khrulev, N. V. (2015). Structure of a microcontroller displacement meter based on inductosyn. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tehnichni nauky*. Khmelnytsky, No. 1, pp. 136–139 [in Russian].
10. Liu, C. J., Qi, M., & Zou, J. B. (2009). Error modeling of inductosyn angle measuring system. *Journal of the Harbin Institute of Technology*, No. 41.9, pp. 51–55.
11. Zhenghua, C. J. E. L. L., Yunjie, W. (2005). High speed and accuracy position measuring method based on inductosyn. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, No. 4.

V. M. Rudnitsky, *D.Tech.Sc., professor*,
e-mail: rvn_2008@ukr.net

N. V. Khrulev, *Ph.D., associate professor*,
e-mail: hrulev@ukr.net

H. V. Kanashevych, *Dr.Tech.Sc., professor*,
e-mail: kgv-elbeam@rambler.ru

A. I. Chislov, *senior lecturer*,
e-mail: a.i.chislov@gmail.com

G. V. Krivous, *head of laboratories*,
e-mail: krivous_gv@gmail.com

A. B. Skutskyi, *student*
e-mail: xronlol@gmail.com

Cherkasy State Technological University,
Shevchenko blvd., 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

ANALYSIS OF DYNAMIC ERROR OF MOVEMENT MEASUREMENT METHOD BY MEASURING CONVERTER OF INDUCTOSYN TYPE BASED ON PHASE SHIFT MEASURING

Movement meters are used in various technical and technological areas. Movement meters of the following types: inductosyns, rotary transformers, selsyns, optical grating displacement transducers and also laser based movement meters, are known. Movement meters of the inductosyn type based on conversion of angular moving to amplitude the greatest distribution was gained now. But currently a significant amount of equipment, in which inductosyn movement measuring meters are used, is in operation. Inductosyns are characterized by such features as reliability, durability, low static measurement error and ease of maintenance.

The method based on angular displacement conversion into a phase is one of the methods for movement measuring with inductosyns. The availability of dynamic error is a significant disadvantage of this method.

Thus, the task of the analysis of dynamic error of movement measurement method by measuring converter of inductosyn type based on phase shift measuring is relevant and has scientific and practical interest.

The article describes a movement measurement method by measuring converter of inductosyn type based on phase shift measuring. The occurrence and time behavior of dynamic error of the method are considered. The dependence of maximum absolute dynamic error of movement on the movement speed and supply voltage frequency is determined.

As a result of the performed analysis, it is concluded that the considered method can be used without dynamic error compensation at the correct choice of speed, frequency of inductosyn supply voltage and measurement accuracy values. However, the use of dynamic error compensation methods will give the possibility to expand the measurement method characteristics that is to increase the maximum value of movement speed and measurement accuracy.

Keywords: *measurement error, measurement method, movement measurement, measuring converter, inductosyn.*