

[0000-0001-8532-0967] **Н. В. Хрулев**, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: m.khrulov@chdtu.edu.ua

[0000-0002-5589-9020] **Г. В. Кривоус**, аспірант кафедри
інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії
e-mail: krivous_gena@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченко, 460, г. Черкаси, 18006, Україна

СПОСОБ КОМПЕНСАЦІИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТИПА ИНДУКТОСИН, ОСНОВАННОГО НА ИЗМЕРЕНИИ СДВИГА ФАЗЫ

В статье в результате выполненного анализа предложен способ компенсации динамической погрешности метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы. Применение предложенного способа компенсации динамической погрешности позволит существенно расширить эксплуатационные характеристики метода измерения, а именно повысить точность измерения и существенно увеличить максимальное значение скорости перемещения заготовки.

Ключевые слова: погрешность измерения, метод измерения, измерение перемещения, измерительный преобразователь, индуктосин.

Введение. Измерители перемещения типа индуктосин широко применяются в различных технических и технологических областях, например в системах ЧПУ [1], наряду с измерителями перемещения других типов, таких как вращающиеся трансформаторы (ВТ), сельсины, оптические датчики [2-4].

Измерители перемещения типа индуктосин отличаются надежностью, долговечностью, низкой статической погрешностью измерения, простотой обслуживания.

Принципы работы измерительных преобразователей типа индуктосин рассмотрены в [5-8].

В измерителях перемещения, выполненных на основе индуктосинов, используют преобразование перемещения в амплитуду, затем амплитуды – в код, или преобразование перемещения в фазу, затем фазы – во время, затем времени – в код [5, 8].

Наряду с получившими в настоящее время наибольшее распространение измерителями перемещения типа индуктосин, принцип работы которых основан на преобразовании перемещения в амплитуду [6], в эксплуатации находится значительное количество измерителей перемещения типа индуктосин, принцип работы которых основан на преобразовании перемещения в фазу [5, 7].

Известны методы повышения точности измерителей перемещения типа индуктосин, принцип работы которых основан на преобразовании перемещения в амплитуду. Модель компенсации ошибок, основанная на автономной идентификации данных, рассмотрена в [9]. Метод измерения положения, в котором используется масштабирование амплитуды, рассмотрен в [10].

В [11] рассмотрены общие положения теории погрешностей.

Методы проектирования фазовых цифровых преобразователей «угол-код», погрешности преобразователей и методы их коррекции рассмотрены в [5].

В [12] рассмотрен метод измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанный на измерении сдвига фазы. Рассмотрено возникновение и изменение во времени динамической погрешности метода. Определена зависимость максимальной абсолютной динамической погрешности перемещения от скорости перемещения и частоты питающих напряжений.

В результате выполненного анализа сделан вывод о возможности использования рассмотренного метода без компенсации динамической погрешности при правильном выборе значений скорости, частоты питаю-

щих напряжений индуктосина и точности измерения. Отмечено, что применение компенсации динамической погрешности позволит существенно расширить эксплуатационные характеристики метода измерения, а именно повысить максимальное значение рабочей скорости и точность измерения.

В [13] рассматривается метод компенсационного измерения перемещения линейного индуктосина, который заключается в полной компенсации механического перемещения фазовым сдвигом вектора поля индуктосина в противоположном механическому перемещению направлении на величину измеренного фазового сдвига на интервале времени перемещения вектора поля головки индуктосина на одно полюсное деление.

Для реализации метода разработана функциональная схема преобразователя на элементах цифровой схемотехники. Схема может быть использована в устройствах электромеханики и автоматики для преобразования перемещения в числовой код при помощи индуктосинов, работающих в фазовом режиме. Наряду с повышением точностных характеристик в предлагаемом преобразователе расширены функциональные возможности, так как помимо измерения перемещения он позволяет осуществлять измерение скорости и ускорения рабочего органа. Данный метод может быть реализован программным путем на основе микроконтроллеров с использованием встроенных таймеров микроконтроллера.

Отметим, что в многокоординатных системах ЧПУ, предназначенных для получения детали заданной формы с заданной точностью, необходимо измерять перемещение рабочего органа по всем координатам синхронно, что не может быть достигнуто при применении предложенного в [13] метода.

Таким образом, задача компенсации динамической погрешности метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы, актуальна и представляет определенный научный и практический интерес.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка способа компенсации динамической погрешности метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработка способа компенсации динамической погрешности метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы;
- усовершенствование структуры микроконтроллерного измерителя перемещения с использованием индуктосина в качестве датчика положения [8].

Изложение основного материала. Временные диаграммы, приведенные на рисунке 1, поясняют описанный в [7, 8] метод измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанный на измерении сдвига фазы, а также поясняют предлагаемый способ компенсации динамической погрешности рассматриваемого метода.

В многокоординатных системах ЧПУ, предназначенных для получения детали заданной формы с заданной точностью, необходимо измерять перемещение рабочего органа по всем координатам синхронно. Считывание измеренных значений перемещения по всем координатам должно выполняться (рисунок 1) в моменты времени $t_i\{t_1, t_2, \dots\}$. Фактически при использовании метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы, измерение положения заканчивается в моменты времени $t_{msr\ i}\{t_{msr\ 0}, t_{msr\ 1}, t_{msr\ 2}, \dots\}$, т. е. в моменты начала периода выходного сигнала U_{out} , причем для каждой координаты моменты времени $t_{msr\ i}$ будут иметь свои значения.

За время τ_{mn} , оставшееся от момента $t_{msr\ i}$ измерения положения до момента t_{i+1} считывания измеренных значений перемещения, заготовка по каждой координате может переместиться на некоторые расстояния Δ , определяемые скоростью V и ускорением a движения заготовки по каждой координате. Расстояние Δ определяет абсолютную динамическую погрешность рассматриваемого метода измерения перемещения по конкретной координате.

В соответствии с [12] действительное значение перемещения, измеренное при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы, определится как:

$$S_{valid} = S_{msr i} + V_i \tau_{rnn} + \frac{a \tau_{rnn}^2}{2}, \quad (1)$$

где S_{valid} – действительное значение перемещения заготовки;

$S_{msr i}$ – (measure – измерять) значение перемещения, измеренное в моменты времени $t_{msr i} \{t_{msr0}, t_{msr1}, t_{msr2}, \dots\}$;

V_i – скорость перемещения заготовки в моменты времени $t_{msr i} \{t_{msr0}, t_{msr1}, t_{msr2}, \dots\}$;

a – ускорение заготовки;

τ_{rnn} – (remains – остатки) отрезок времени, оставшийся от момента $t_{msr i} \{t_{msr0}, t_{msr1}, t_{msr2}, \dots\}$ фиксации мгновенного положения заготовки (начало периода выходного сигнала $Uout$) до момента $t_i \{t_1, t_2, \dots\}$ считывания измеренного значения (начало следующего периода опорного сигнала $Usin(t)$).

В формуле (1) значение $S_{msr i}$ определяется как функция состояния счетчика CNT [12], а оставшаяся часть правой части формулы (1) определяет абсолютную динамическую погрешность метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы:

$$\Delta = V_i \tau_{rnn} + \frac{a \tau_{rnn}^2}{2}, \quad (2)$$

где Δ – абсолютная динамическая погрешность измерения перемещения.

В соответствии с [14] ускорение перемещения заготовки a определится как:

$$a = \frac{V_{i+1} - V_i}{\tau_{msr}}, \quad (3)$$

где $\tau_{msr i}$ – отрезок времени между началом периода опорного сигнала $Usin(t)$ и началом периода выходного сигнала $Uout(t)$.

Таким образом, для определения и, соответственно, компенсации абсолютной динамической погрешности рассматриваемого метода измерения необходимо определить значения τ_{rnn} , τ_{msr} , V_i и V_{i+1} .

Отрезок времени $\tau_{msr i}$ определится как функция состояния N_i счетчика CNT в моменты времени $t_{msr i} \{t_{msr0}, t_{msr1}, t_{msr2}, \dots\}$ [12]:

$$\tau_{msr i} = k_t N_i, \quad (4)$$

где k_t – коэффициент передачи измерительного преобразователя, связывающий отрезок времени $\tau_{msr i}$ между началом периода опорно-

го сигнала $Usin(t)$ и началом периода выходного сигнала $Uout(t)$, и состояние счетчика CNT , равное N_i .

Отрезок времени τ_{rnn} (рисунок 1) между моментом $t_{msr i} \{t_{msr0}, t_{msr1}, t_{msr2}, \dots\}$ фиксации мгновенного положения заготовки (начало периода выходного сигнала $Uout(t)$) и моментом $t_i \{t_1, t_2, \dots\}$ считывания измеренного значения (начало следующего периода опорного сигнала $Usin(t)$) определится как:

$$\tau_{rnn} = T - \tau_{msr i},$$

где T – период опорного сигнала $Usin(t)$, в течение которого выполняется измерение.

С учетом формулы (4), τ_{rnn} определится как:

$$\tau_{rnn} = T - k_t N_i. \quad (5)$$

Для определения скорости V и ускорения a перемещения заготовки могут применяться приборы различных типов и разной степени сложности, реализующие тот или иной принцип работы. Например, для поддержания заданной скорости в системах управления электроприводами в качестве датчиков обратной связи применяются тахометры.

Применение дополнительных устройств для определения скорости V и ускорения a перемещения заготовки ведет к усложнению, и, следовательно, к удорожанию системы измерения перемещения.

Рассмотрим способ определения скорости V и ускорения a перемещения заготовки без применения дополнительных устройств на основании данных, полученных при применении метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы.

Отметим (рисунок 1), что в моменты времени $t_{msr i} \{t_{msr0}, t_{msr1}, t_{msr2}, \dots\}$ [12] состояние счетчика CNT , равное N_i , соответствует значениям перемещения $S_{msr i}$ или, в случае оборудования с ЧПУ, соответствует значениям положения рабочего органа по соответствующей координате:

$$S_{msr i} = k_s N_i, \quad (6)$$

где k_s – коэффициент передачи измерительного преобразователя, связывающий перемещение и состояние счетчика CNT , равное N_i .

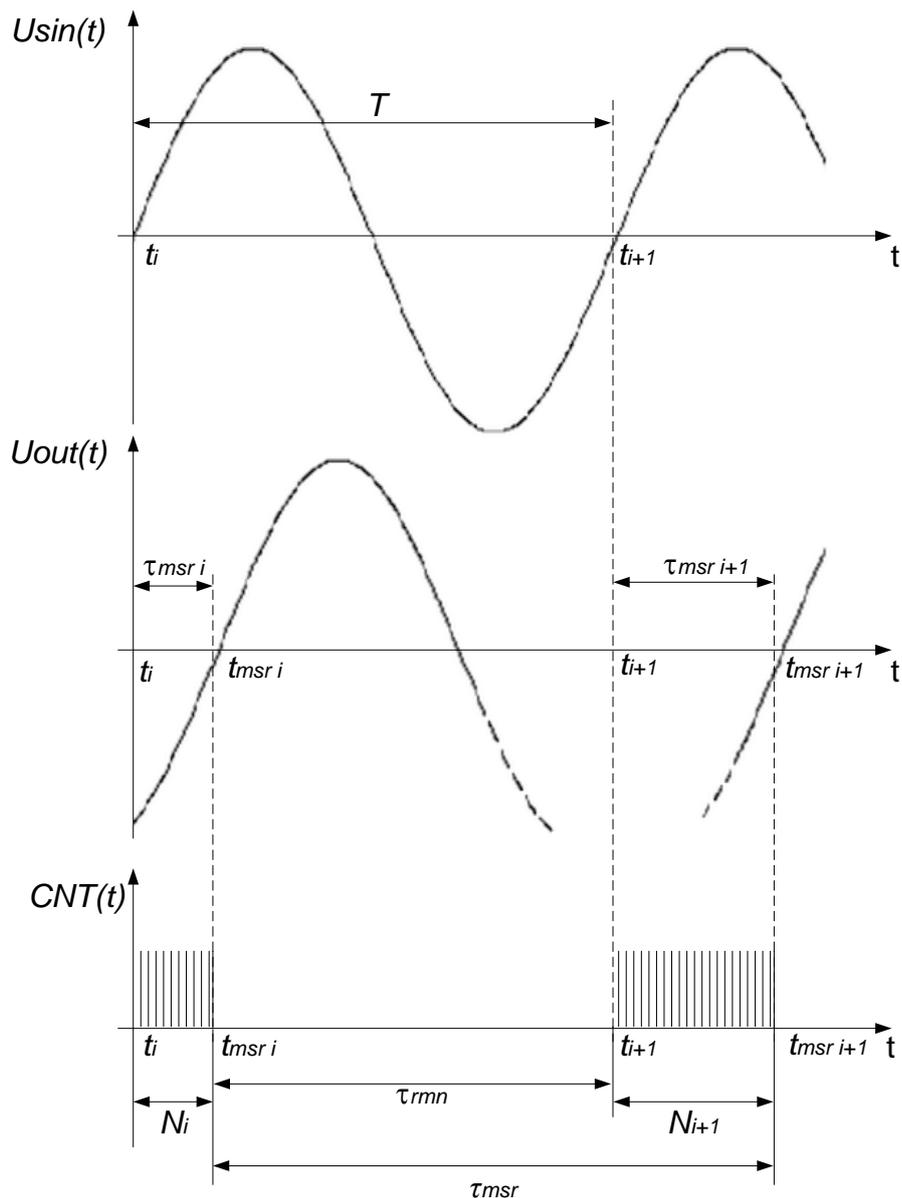


Рисунок 1 - Измерение перемещения, основанного на измерении сдвига фазы, и компенсация динамической погрешности

Тогда, в соответствии с [14] и учетом формулы (6), скорость V_{i+1} перемещения заготовки определится как:

$$V_{i+1} = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{k_S(N_{i+1} - N_i)}{T + k_t(N_{i+1} - N_i)}, \quad (7)$$

где V_{i+1} – скорость перемещения заготовки в моменты времени $t_{msr\ i+1}$ $\{t_{msr1}, t_{msr2}, \dots\}$;

ΔS – величина изменения координаты (приращение перемещения) за время Δt ;

Δt – отрезок времени между моментами времени $t_{msr\ i}$ и $t_{msr\ i+1}$;

N_i, N_{i+1} – содержимое счетчика CNT в моменты времени $t_{msr\ i}$ и $t_{msr\ i+1}$.

Аналогично, V_i для значений $i > 0$ определится как:

$$V_i = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{k_S(N_i - N_{i-1})}{T + k_t(N_i - N_{i-1})}. \quad (8)$$

В начальной точке, при $i = 0$, движение отсутствует, т. е. $V_0 = 0$ при любом значении N_0 .

Подставив значения, полученные при помощи формулы (4), формулы (5), формулы (7), формулы (8) и формулы (3), в формулу (2) и формулу (1), можно определить абсолютную динамическую погрешность Δ и действительное значение перемещения S_{valid} .

Усовершенствование структуры микроконтроллерного измерителя перемещения. В [8] рассмотрена структура микроконтроллерного измерителя перемещения с использованием индуктосина в качестве датчика положения. С учетом вышеизложенного, предлагается усовершенствовать рассмотренную в [8] структуру микроконтроллерного измерителя перемещения путем замены модуля St3.2 счета импульсов опорной частоты на модуль измерения положения и компенсации абсолютной динамической погрешности, что позволит выполнить компенсацию абсолютной динамической погрешности метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы.

Усовершенствованная структура микроконтроллерного измерителя перемещения с использованием индуктосина в качестве датчика положения приведена на рисунке 2.

Усовершенствованный микроконтроллерный измеритель перемещения включает в себя следующие подсистемы:

SS1 – подсистему сопряжения измерителя перемещения с центральным компьютером системы ЧПУ;

SS2 – подсистему формирования питающих напряжений датчика положения типа индуктосин;

SS3 – подсистему измерения.

Подсистема SS1 сопряжения измерителя перемещения с центральным компьютером системы ЧПУ включает следующие модули:

St1.1 – интерфейсный модуль;

St1.2 – модуль вывода измеренных значений координат в центральный компьютер системы ЧПУ.

Подсистема SS2 формирования питающих напряжений датчика положения типа индуктосин включает следующие модули:

St2.1 – модуль формирования напряжения синусоидальной формы $U_{sin}(t)$;

St2.2 – модуль усилителя напряжения синусоидальной формы;

St2.3 – модуль формирования напряжения косинусоидальной формы $U_{cos}(t)$;

St2.4 – модуль усилителя напряжения косинусоидальной формы;

St2.5 – модуль формирования опорной частоты питающего напряжения.

Подсистема SS3 измерения включает следующие модули:

St3.1 – модуль запуска счета импульсов опорной частоты;

St3.2 – модуль измерения положения и компенсации абсолютной динамической погрешности;

St3.3 – модуль преобразования входного сигнала $U_{out}(t)$ в сигнал прямоугольной формы;

St3.4 – модуль останова счета импульсов опорной частоты.

St3.5 – модуль формирования опорной частоты измерителя.

Результаты исследования. В статье предложен способ компенсации динамической погрешности метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы.

Предложенный способ реализуется программно и не требует применения дополнительных устройств для определения скорости V и ускорения a перемещения заготовки.

Предложенный способ коррекции абсолютной динамической погрешности справедлив при условии обеспечения равномерного или равноускоренного движения. В реальных условиях необходимо выполнить статистические исследования для определения влияния конкретного типа электропривода и технологического оборудования на точность предложенного способа компенсации динамической погрешности метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы.

Предложена структура усовершенствованного микроконтроллерного измерителя перемещения, использующего описанный выше способ компенсации динамической погрешности измерения перемещения.

Обсуждение результатов. Приведенные выше рассуждения справедливы для случаев равномерного или равноускоренного движения. В этом случае предложенное решение позволит полностью компенсировать абсолютную динамическую погрешность рассматриваемого метода измерения перемещения.

В реальности характер движения исполнительного органа определяется работой кон-

кретного типа применяемого электропривода и его составных частей, а именно, системы управления электроприводом и, собственно, электродвигателя. Большое влияние на характер движения оказывают механические характеристики технологического оборудования.

Известны [15] модули управления приводами с изменяемой скоростью вращения, обеспечивающие номинальную частоту вращения электродвигателя на уровне $\Delta n = 0,006 \%$ при использовании импульсного

датчика и цифрового заданного значения и на уровне $\Delta n = 0,1 \%$ при использовании аналогового тахометра и аналогового заданного значения.

В общем случае для определения влияния оборудования на абсолютную динамическую погрешность необходимо проводить статистические исследования для конкретного типа электропривода и технологического оборудования, например, как описано в [16].

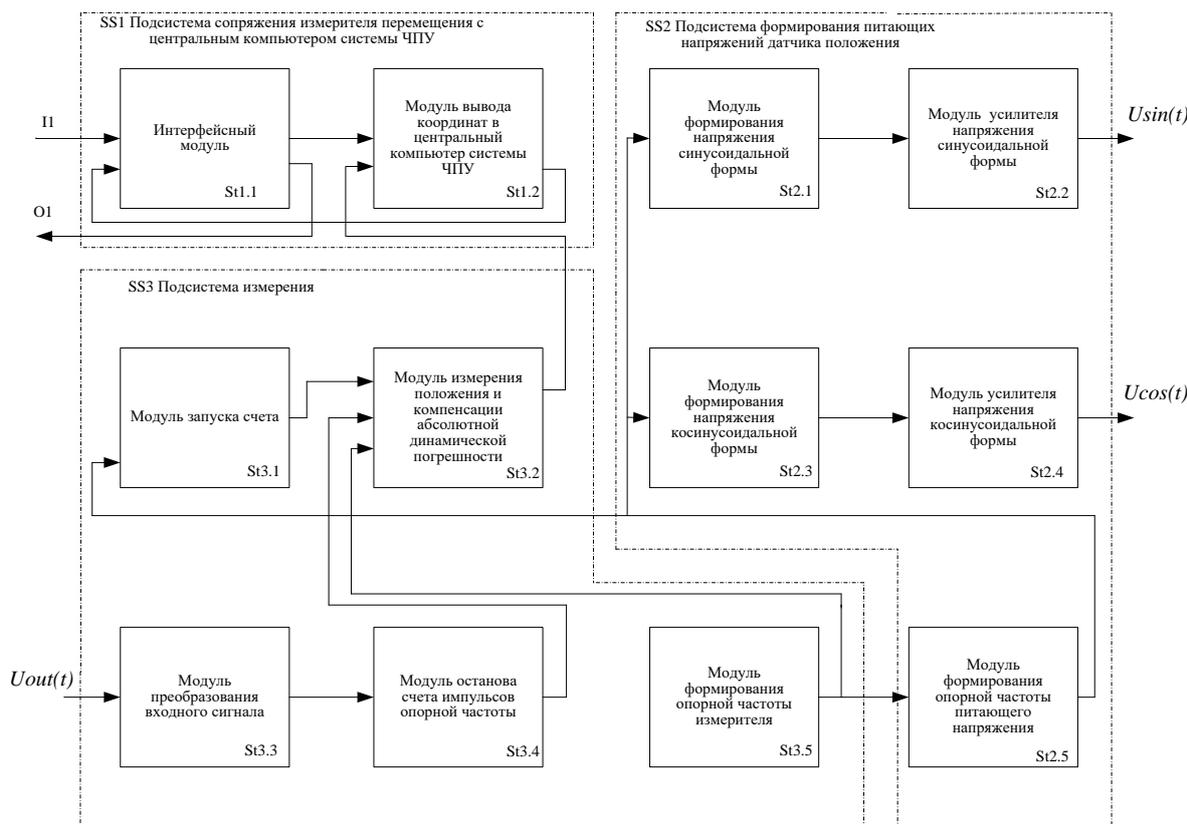


Рисунок 2 - Структура усовершенствованного микроконтроллерного измерителя перемещения

Выводы. Научная новизна полученных результатов заключается в теоретическом обосновании способа компенсации динамической погрешности метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы, реализуемого программно и не требующего применения дополнительных устройств для определения скорости V и ускорения a перемещения заготовки.

Практическая ценность работы состоит в доведении полученных результатов до конкретной структуры усовершенствованного

микроконтроллерного измерителя перемещения, использующего предложенный способ компенсации динамической погрешности измерения перемещения.

Применение предложенного способа компенсации динамической погрешности позволит выполнить разработку алгоритма и программного обеспечения, реализующего предложенный способ компенсации динамической погрешности, а также существенно расширить эксплуатационные характеристики оборудования с ЧПУ, а именно: повысить скорость рабочего движения при обеспечении

заданной точности измерения, снизит стоимость системы измерения перемещения за счет исключения дополнительных устройств для определения скорости V и ускорения a перемещения заготовки.

Для определения влияния оборудования на абсолютную динамическую погрешность необходимо провести статистические исследования для конкретных типов электропривода и технологического оборудования.

В дальнейшем целесообразно рассмотреть возможность компенсации динамической погрешности метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы другими способами.

Список использованных источников

- [1] В. Л. Кошкин, *Аппаратные системы числового программного управления*. Москва, Россия: Машиностроение, 1989.
- [2] В. Г. Домрачев, В. Р. Матвеевский, и Ю. С. Смирнов, *Схемотехника цифровых преобразователей перемещений*: справ. пособ., 2-е изд. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 1987.
- [3] "Резольверы – преобразователи угловых перемещений на основе вращающегося трансформатора", СКБИС. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://https://skbis.ru/catalog/rotary/resolver>. Дата обращения: Май 30, 2021.
- [4] "Инкрементные линейные фотоэлектрические преобразователи перемещений", СКБИС. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://skbis.ru/catalog/linear/sealed>. Дата обращения: Май 30, 2021.
- [5] В. П. Петропавловский, и Н. В. Сеницын, *Фазовые преобразователи угла*. Москва, Россия: Машиностроение, 1984.
- [6] *Synchro/resolver conversion: handbook*. Data Device Corporation 105 Wilbur Place, Bohemia, New York 11716-2482. [Online]. Available: <https://www.ddc-web.com/documents/synhd bk.pdf>.
- [7] *Устройство 2С42–65*: руководство по эксплуатации 3.035.090 РЭ, 1991, ч. 1.
- [8] Н. В. Хрулев, "Структура микроконтроллера измерителя перемещения на основе индуктосина", *Вісник Хмельницького національного університету (Технічні науки)*, № 1. с. 136-139, 2015.
- [9] С. J. Liu, M. Qi, and J. B. Zou, "Error modeling of inductosyn angle measuring system", *Journal of Harbin Institute of Technology*, vol. 41, no. 9, pp. 51-55, 2009.
- [10] С. J. E. L. L. Zhenghua, and W. Yunjie, "High speed and accuracy position measuring method based on inductosyn", *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, vol. 4, 2005.
- [11] Э. Г. Миронов, и Н. П. Бессонов, *Метрология и технические измерения*: учеб. пособ. Москва, Россия: КНОРУС. 2015.
- [12] В. М. Рудницький, М. В. Хрульов, Г. В. Канашевич, А. І. Числов, Г. В. Кривоус, та А. Б. Скуцький, "Дослідження динамічної похибки методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні кута зсуву фази", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 17-22, 2019. doi: 10.24025/2306-4412.1.2019.164805.
- [13] А. Е. Малиновский, и И. С. Саватеева, "Комплексный датчик для следящего электропривода", *Математическая морфология: электрон. мат. и медико-биол. журн.* Т. 13. Вып. 4, 2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sci.rostelecom67.ru/user/sgma/MMORPH/N-44-html/malinowsky/malinowsky.htm>. Дата обращения: Май 30, 2021.
- [14] Б. М. Яворский, и А. А. Детлаф, *Справочник по физике*. 2-е изд. перераб. Москва, Россия: Наука, 1983.
- [15] *Модули управления приводов постоянно-го тока с изменяемой скоростью вращения*: руководство по эксплуатации SINAMICS drives, Siemens, 2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://driveka.ru/upload/iblock/8ae/%20di%20wxvpvaoumrsb.pdf>. Дата обращения: Май 30, 2021.
- [16] В. В. Комбаров, Е. А. Аксенов, и Е. А. Криживец, "Определение физических величин перемещения органов станков с ЧПУ", *Авиационно-космическая техника и технология*, № 7, с. 109-114, 2011.

References

- [1] V. L. Koshkin, *Numerical control hardware systems*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1989 [in Russian].
- [2] V. G. Domrachev, V. R. Matveevskij, and Yu. S. Smirnov, *Circuitry of digital displacement transducers: reference guide*. Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1987 [in Russian].
- [3] "Resolvers – angular displacement transducers based on rotary transformer", SKBIS. [Online]. Available: <https://skbis.ru/catalog/rotary/resolver>. Accessed on: May 30, 2021 [in Russian].
- [4] "Incremental linear photovoltaic displacement transducers", SKBIS. [Online]. Available: <https://skbis.ru/catalog/linear/sealed>. Accessed on: May 30, 2021 [in Russian].
- [5] V. P. Petropavlovskij, and N. V. Siniczyn, *Phase converters of an angle*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1984 [in Russian].
- [6] *Synchro/resolver conversion: handbook*. Data Device Corporation 105 Wilbur Place, Bohemia, New York 11716-2482. [Online] Available: https://www.ddc-web.com/documents/synhd_bk.pdf.
- [7] *Device 2C42-65: operation manual 3.035.090 RE*, 1991, part 1 [in Russian].
- [8] N. V. Khrulev, "The structure of a microcontroller displacement meter based on inductosyn", *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu (Tekhnichni nauky)*, no. 1, pp. 136-139, 2015 [in Russian].
- [9] C. J. Liu, M. Qi, and J. B. Zou, "Error modeling of inductosyn angle measuring system", *Journal of Harbin Institute of Technology*, vol. 41, no. 9, pp. 51-55, 2009.
- [10] C. J. E. L. L. Zhenghua, and W. Yunjie, "High speed and accuracy position measuring method based on inductosyn", *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, vol. 4, 2005.
- [11] E. G. Mironov, and N. P. Bessonov, *Metrology and technical measurements: tutorial*. Moscow, Russia: KNORUS. 2015 [in Russian].
- [12] V. M. Rudnytskyi, M. V. Khrulov, H. V. Kanashevych, A. I. Chyslov, H. V. Kryvous, and A. B. Skutskyi, "Analysis of dynamic error of movement measurement method by measuring converter of inductosyn type based on phase shift measuring", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, vol. 1, pp. 17-22, 2019 [in Ukrainian]. doi: 10.24025/2306-4412.1.2019.164805.
- [13] A. E. Malinovskij, and I. S. Savateeva, "Complex sensor for servo drive", *Matematicheskaya morfologiya: electron. math. and medico-biol. journ.*, vol. 13, iss. 4, 2014. [Online]. Available: <http://www.sci.rostelecom67.ru/user/sgma/MMORPH/N-44-html/malinowsky/malinowsky.htm>. Accessed on: May 30, 2021 [in Russian].
- [14] B. M. Yavorskij, and A. A. Detlaf, *Physics reference*, 2nd ed. Moscow, Russia: Nauka, 1983 [in Russian].
- [15] *Control modules for variable speed DC drives: SINAMICS drives operating instructions*, Siemens, 2011. [Online]. Available: <https://driveka.ru/upload/iblock/8ae/%20di%20wxvpvaoumrsb.pdf>. Accessed on: May 30, 2021 [in Russian].
- [16] V. V. Kombarov, E. A. Aksenov, and E. A. Krizhivec, "Determination of physical quantities of displacement of organs of CNC machines". *Aviaczionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 7, pp. 109-114, 2011 [in Russian].

N. V. Khrulov, Ph. D., Associate Professor,
e-mail: m.khrulov@chdtu.edu.ua

G. V. Krivous, Postgraduate Student of the Department
of Information Security and Computer Engineering,
e-mail: krivous_gena@gmail.com
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

TECHNIQUE FOR DYNAMIC ERROR COMPENSATION OF THE DISPLACEMENT MEASUREMENT METHOD BY MEASURING TRANSDUCER OF INDUCTOSIN TYPE, BASED ON PHASE SHIFT MEASUREMENT

Transducers of inductosyn type are widely used to measure displacements in various technical and technological fields. They are differed from others by their reliability, durability, low static measurement error, and ease of maintenance. Currently, a significant amount of equipment, which uses displacement meters based on transducers of inductosyn type is in operation.

One of the methods for displacement measurement using inductosins is a method based on the conversion of angular displacement into a phase, a significant disadvantage of which is the presence of a dynamic error of the measurement method. Thus, the task of compensating dynamic error of the displacement measurement method using a measuring transducer of inductosin type, based on the measurement of phase shift, is relevant and is of some scientific and practical interest.

The article considers a technique for dynamic error compensation of the displacement measuring method using a measuring transducer of inductosin type based on phase shift measurement, which does not require the use of additional devices to determine the speed of movement of the workpiece, such as tachogenerators. To determine the speed of movement of the workpiece, it is proposed to use the data obtained when measuring the movement with a measuring transducer of inductosin type using a measurement method based on the measurement of phase shift.

It is noted that the proposed solution will fully compensate for the absolute dynamic error of the considered displacement measuring method only for cases of uniform or uniformly accelerated motion. In reality, the nature of the executive device motion is determined by the operation of a particular type of electric drive and its components, namely the control system, electric motor, as well as by the characteristics of technological equipment. In the general case, to determine the impact of equipment on the absolute dynamic error, it is necessary to conduct statistical studies for a specific type of electric drive and technological equipment.

To implement the considered technique of dynamic error compensation, an upgraded structure of a microcontroller displacement meter using inductosin as a position transducer is proposed.

The use of the technique of dynamic error compensation will significantly expand the operational characteristics of the measurement method, namely will increase the accuracy of measurement and significantly increase the maximum value of the workpiece movement speed.

Keywords: measurement error, measurement method, displacement measurement, measuring transducer, inductosyn.

М. В. Хрульов, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: m.khrulov@chdtu.edu.ua

Г. В. Кривоус, аспірант кафедри
інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії
e-mail: krivous_gena@gmail.com

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

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

Датчики типу індуктосин широко застосовуються для вимірювання переміщення в різних технічних і технологічних галузях. Вони відзначаються надійністю, довговічністю, низькою статичною похибкою вимірювання, простотою обслуговування. Нині в експлуатації знаходиться значна кількість обладнання, в якому використовуються вимірювачі переміщення на основі датчиків типу індуктосин.

Одним із методів вимірювання переміщення з використанням індуктосинів є метод, що базується на перетворенні кутового переміщення в фазу, істотним недоліком якого є наявність динамічної похибки методу вимірювання. Таким чином, завдання компенсації динамічної похибки методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази, є актуальним і становить певний науковий і практичний інтерес.

У статті розглянуто спосіб компенсації динамічної похибки методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази, який не потребує застосування додаткових приладів для визначення швидкості переміщення заготовки, наприклад тахогенераторів. Для визначення швидкості переміщення заготовки пропонується використовувати дані, отримані при вимірюванні переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин із застосуванням методу вимірювання, що базується на вимірюванні зсуву фази.

Відзначено, що запропоноване рішення дасть можливість повністю компенсувати абсолютну динамічну похибку розглянутого методу вимірювання переміщення тільки для випадків рівномірного або рівноприскореного руху. В реальності характер руху виконавчого органу визначається роботою конкретного типу електроприводу і його складових частин, а саме системи управління, електродвигуна, а також характеристиками технологічного обладнання. У загальному випадку для визначення впливу обладнання на абсолютну динамічну похибку необхідно проводити статистичні дослідження для конкретного типу електроприводу і технологічного обладнання.

Для реалізації розглянутого способу компенсації динамічної похибки запропоновано модернізовану структуру мікроконтролерного вимірювача переміщення з використанням індуктосину як датчика положення.

Застосування методу компенсації динамічної похибки дасть змогу істотно розширити експлуатаційні характеристики методу вимірювання, а саме – підвищити точність вимірювання, й істотно збільшити максимальне значення швидкості переміщення заготовки.

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

Стаття надійшла 01.06.2021

Прийнято 21.06.2021