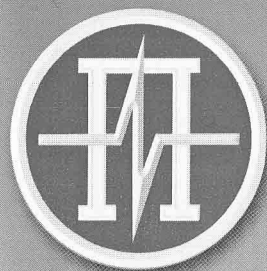


ISSN 2071-7865

ПРИБОРЫ



10/2014

А.И. Юрин, А.Ю. Неборский, Е.А. Карцев, Н.Н. Кокин

МИНИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИНДУКТИВНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Аннотация

Рассмотрены особенности влияния температуры на погрешность индуктивных измерительных преобразователей. Предложены метод и алгоритм минимизации дополнительной температурной погрешности индуктивных измерительных преобразователей. Проведено экспериментальное подтверждение эффективности разработанного алгоритма применительно к дифференциальному индуктивному измерительному преобразователю линейных перемещений.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, датчик, дополнительная погрешность.

Индуктивными называют измерительные преобразователи (ИП), преобразующие измеряемое перемещение в изменение индуктивности. Подобные ИП получили широкое распространение в составе информационно-измерительных систем (ИИС) благодаря простоте конструкции, высокой надежности и стабильности метрологических характеристик. Кроме того, значительный уровень мощности выходного сигнала индуктивных ИП обеспечивает высокую чувствительность и позволяет использовать измерительные цепи без дополнительных усилителей.

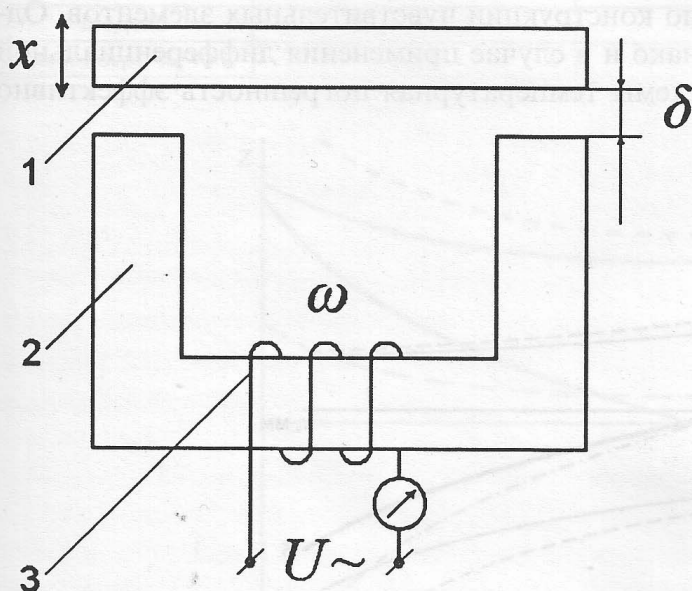


Рис. 1. Схема индуктивного ИП линейных перемещений: 1 – подвижный якорь; 2 – магнитопровод; 3 – обмотка; x – измеряемое перемещение

Индуктивные ИП применяют при дистанционном контроле положения подвижных элементов машин и механизмов, а при необходимости контроля неэлектрических величин, таких как давление, усилия, скорость, ускорение, уровень и т. д., эти величины можно предварительно преобразовать в перемещение, а перемещение – в изменение индуктивности [1].

Индуктивные ИП работают в цепях синусоидального тока, обычно частотой не более нескольких килогерц, для уменьшения потерь от токов Фуко и потерь в магнитной цепи преобразователей. Вопросы выбора частоты и уровня питающего напряжения индуктивных ИП были рассмотрены в работе [2].

В данной статье описано влияние температуры на характеристики индуктивных ИП. Рассмотрим работу простейшего индуктивного ИП линейных перемещений, схема которого представлена на рис. 1.

Индуктивность обмотки L индуктивного ИП определяется как

$$L = \frac{\omega \Phi}{I},$$

где Φ – магнитный поток; ω – число витков; I – величина силы тока.

В свою очередь, величину магнитного потока можно записать в виде

$$\Phi = \frac{I\omega}{Z_M} = \frac{I\omega}{R_M + R_\delta + jX_M} = \frac{I\omega}{R_M + \frac{2\delta}{\mu_0 S} + jX_M},$$

где Z_M – магнитное сопротивление магнитопровода; R_M – магнитное сопротивление стальных участков магнитопровода; R_δ – сопротивление воздушного зазора; X_M – реактивное сопротивление магнитопровода; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; S – площадь воздушного зазора; δ – величина воздушного зазора.

Если пренебречь величиной X_M , обусловленной потерями на вихревые токи и гистерезис, получим

$$L = \frac{\omega^2}{R_M + \frac{2\delta}{\mu_0 S}} \quad (1)$$

Тогда полное комплексное сопротивление преобразователя Z можно найти как

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (2)$$

где R – активное сопротивление обмотки преобразователя; X_L – реактивное сопротивление.

Изменение температуры окружающей среды является источником дополнительной погрешности преобразователя. При измерении температуры происходит изменение как электрических, так и магнитных параметров, таких как активное сопротивление обмотки R , магнитное сопротивление стали магнитопровода R_M и т. д. Температурное расширение магнитопровода и подвижного сердечника приводит к изменению величины воздушного зазора и также влияет на величину индуктивности преобразователя. Зависимость этих параметров от температуры t можно представить как

$$R = R_0(1 + \alpha_R \Delta t); \quad (3)$$

$$R_M = R_{M0}(1 + \alpha_M \Delta t); \quad (4)$$

$$\delta = \delta_0(1 + \alpha_\delta \Delta t), \quad (5)$$

где R_0, R_{M0}, δ_0 – начальные значения параметров; $\alpha_R, \alpha_M, \alpha_\delta$ – соответствующие температурные коэффициенты; Δt – изменение температуры.

Из выражений (3)-(5) следует, что дополнительная температурная погрешность зависит от материалов и конструкции индуктивных ИП.

Подставляя выражения (3)-(5) и (1) в выражение (2), можно получить математическую модель воздействия температуры на полное комплексное сопротивление Z индуктивного преобразователя:

$$Z = \sqrt{R_0^2(1 + \alpha_R \Delta t)^2 + \left(\frac{\omega^3}{R_{M0}(1 + \alpha_M \Delta t) + \frac{2\delta_0(1 + \alpha_\delta \Delta t)}{\mu_0 S}} \right)^2}$$

Как правило, для повышения чувствительности, линеаризации функции преобразования и уменьшения температурной погрешности используют дифференциальные преобразователи, информативным сигналом в которых служит разность сопротивлений Z_1 и Z_2 двух идентичных по конструкции чувствительных элементов. Однако и в случае применения дифференциальной схемы температурная погрешность эффективно

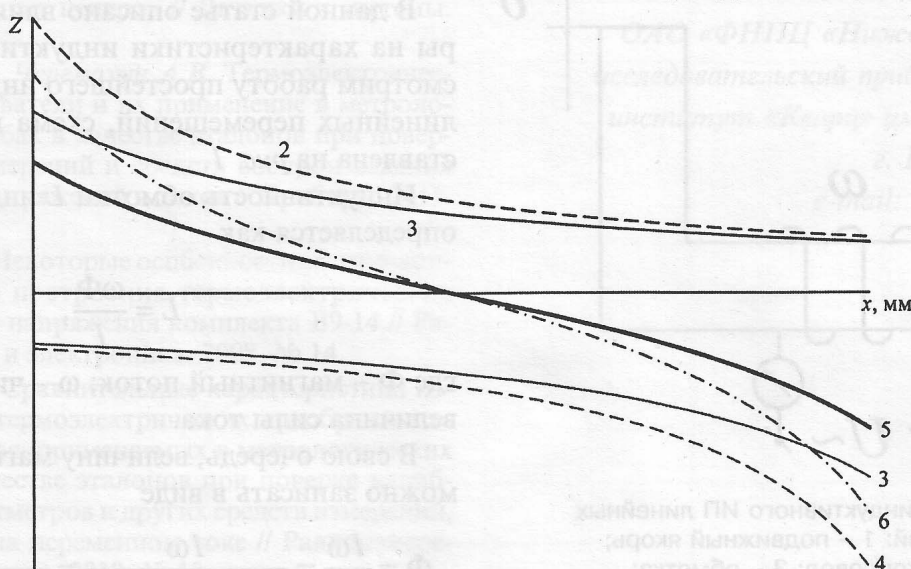


Рис. 2. Смещение функции преобразования дифференциального индуктивного ИП из-за изменения температуры ($t_1 < t_2$): 1 – $Z_1(t_1)$; 2 – $Z_1(t_2)$; 3 – $Z_2(t_1)$; 4 – $Z_2(t_2)$; 5 – $[Z_1(t_1) - Z_2(t_1)]$; 6 – $[Z_1(t_2) - Z_2(t_2)]$

уменьшается только в середине линейного участка характеристики $Z_1 - Z_2$ (рис. 2).

Таким образом, в настоящее время температурную чувствительность индуктивных ИП невозможно сделать пренебрежимо малой с помощью конструктивных и технологических методов, и в условиях больших изменений уровня температуры дополнительная погрешность от воздействия температуры может быть весьма существенной по сравнению с основной погрешностью, которая, как правило, не превышает 1 % от диапазона измерений. В табл. 1 приведены значения температурной погрешности для индуктивных ИП различных производителей.

Однако при работе преобразователя в составе ИИС возможно произвести коррекцию дополнительной погрешности с помощью алгоритмов обработки измерительной информации [3]. При этом для осуществления коррекции необходимо наличие корректирующего сигнала, величина которого зависит от изменения температуры окружающей среды.

Для выработки корректирующего сигнала можно использовать сумму сопротивлений Z_1 и Z_2 . Как видно на рис. 3, величина $(Z_1 + Z_2)$ увели-

чивается с ростом температуры, а в пределах линейного участка функции преобразования разность $[Z_1(t_2) + Z_2(t_2)] - [Z_1(t_1) + Z_2(t_1)]$ практически не зависит от x и может быть использована для расчета температуры.

Тогда можно записать:

$$\Delta t = [Z_1(t_2) + Z_2(t_2)] - [Z_1(t_1) + Z_2(t_1)] / K_t \quad (6)$$

где K_t – коэффициент влияния температуры, определенный эмпирическим путем.

Рассчитанное значение Δt можно использовать для введения поправки в результаты измерений, учитывая величину температурной чувствительности индуктивного ИП.

Таким образом, алгоритм для коррекции дополнительной температурной погрешности дифференциальных индуктивных ИП можно представить в следующем виде:

1. Измерить $Z_1(t)$ и $Z_2(t)$.
2. Рассчитать Δt с помощью выражения (6).
3. Рассчитать значение поправки $g(\Delta t, x)$.
4. Прибавить значение $g(\Delta t, x)$ к результатам измерений.

Эффективность предложенного метода коррекции погрешности была экспериментально

Таблица 1

Значения температурной погрешности индуктивных преобразователей

Производитель	«Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH», Германия	«Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH», Германия	«RDP Electronics Ltd», Великобритания	«RDP Electronics Ltd», Великобритания
Модель	W1/10mm-T	W1EL/0	ACT LVDT	DCTH Series
Темп. погр., %/10 К	±0,2	±0,2	±0,1	±0,3

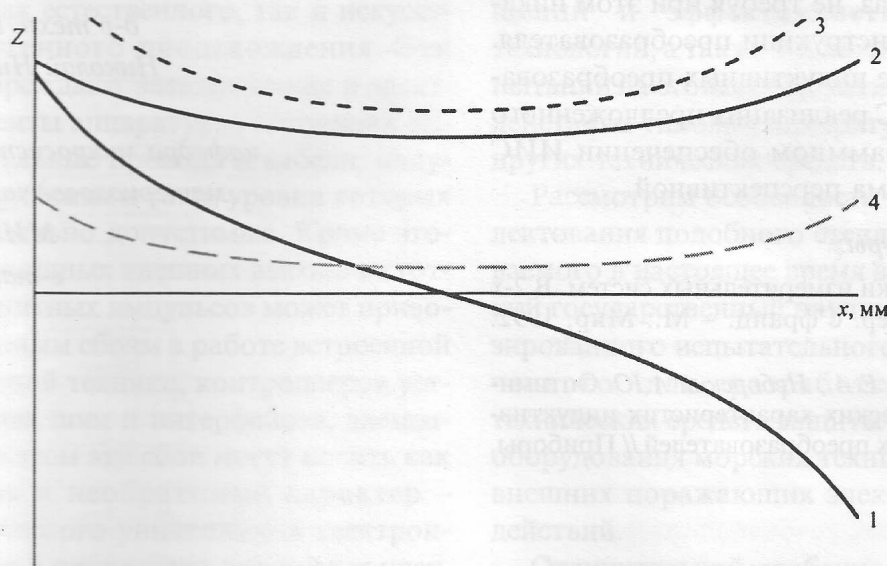


Рис. 3. Увеличение суммарного сопротивления обмоток дифференциального индуктивного ИП при росте температуры ($t_1 < t_2$): 1 – $Z_1(t_1) - Z_2(t_1)$; 2 – $Z_1(t_1) + Z_2(t_1)$; 3 – $Z_1(t_2) + Z_2(t_2)$; 4 – $[Z_1(t_2) + Z_2(t_2)] - [Z_1(t_1) + Z_2(t_1)]$

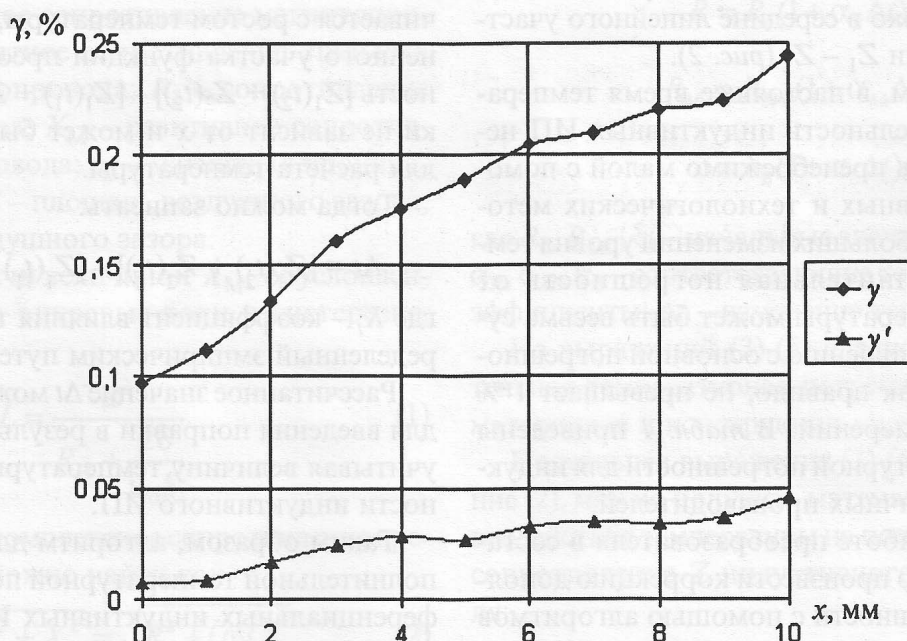


Рис. 4. Температурная приведенная погрешность дифференциального индуктивного преобразователя линейных перемещений без коррекции γ и с коррекцией γ'

подтверждена в ходе исследования функции преобразования дифференциального индуктивного преобразователя линейных перемещений при температурах $t_1 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ и $t_2 = 55\text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 4 представлен график зависимости дополнительной температурной приведенной погрешности преобразователя без коррекции γ и с коррекцией γ' .

Как видно на рис. 4, предложенный метод коррекции позволяет снизить температурную погрешность в 5...10 раз, не требуя при этом никаких изменений в конструкции преобразователя. Поэтому при работе индуктивных преобразователей в составе ИИС реализация предложенного алгоритма в программном обеспечении ИИС представляется весьма перспективной.

Список литературы:

1. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем. В 2-х книгах. Кн. 1 / Пер. с франц. – М.: Мир, 1992. 480 с.
2. Юрин А.И., Карцев Е.А., Неборский А.Ю. Оптимизация метрологических характеристик индуктивных измерительных преобразователей // Приборы. 2013. № 10. С. 5-8.

3. Юрин А.И., Карцев Е.А., Дмитриев А.В. Методы коррекции дополнительной температурной погрешности резонансных датчиков // Метрология. Ежемесячное приложение к научно-техническому журналу «Измерительная техника». 2013. № 11. С. 15-20.

Александр Игоревич Юрин,
канд. техн. наук, доцент,
Алексей Юрьевич Неборский,
аспирант,
Евгений Александрович Карцев,
д-р техн. наук, профессор,
Николай Николаевич Кокин,
аспирант,
кафедра микросистемной техники,
материаловедения и технологий,
МИЭМ НИУ ВШЭ,
e-mail: ayurin@hse.ru

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА:

Союз общественных объединений
«Международное научно-техническое
общество приборостроителей и метрологов»

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

Министерства промышленности
и торговли РФ,
Федерального агентства по техническому
регулированию и метрологии,
Московского государственного
университета приборостроения
и информатики

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Кавалеров Г.И., д.т.н., проф.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Алексеев В.В., д.т.н., проф.;
Богомолов Ю.А., к.т.н. (зам. гл. редактора);
Кондратенко В.С., д.т.н., проф. (зам. гл.
редактора);
Софиев А.Э., д.т.н., проф.;
Еремин Е.В., к.т.н.; Ивченко В.Д., д.т.н., проф.;
Клюев В.В., академик РАН; Кононогов С.А., д.т.н.;
Кривов А.С., д.т.н., проф.; Лахов В.М., к.ф.-м.н.;
Масановец В.В., д.т.н., проф.;
Назаров В.Н., к.т.н.;
Прохоров Н.Л., д.т.н., проф.;
Сенянский М.В.; к.т.н.;
Слепцов В.В., д.т.н., проф.;
Соколов В.В., д.ф.-м.н., проф.;
Суминов В.М., д.т.н., проф.;
Шкабардия М.С., д.т.н., проф.;
Щепетов А.Г., к.т.н., проф.;
Яшин Я.И., д.хим.н., проф.

РЕДАКЦИЯ

Кавалерова Г.А. (зам. гл. редактора)
Воронкова А.С. (отв. секретарь)
Никулин А.А. (выпускающий редактор)

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ
по делам печати, телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1459

Журнал «Прибор» зарегистрирован
в ВАК РФ как научное издание

Сдано в набор 20.09.2014. Подписано в печать 20.10.2014.

Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 7. Зак. 657

Цена журнала – договорная

Подписной индекс

в каталоге Агентства «Роспечать» – 79727

Адрес редакции:

119034, г. Москва, Остоженка ул., д. 1/9, оф. 12

Телефон: (495) 695-10-70, 695-10-71 (факс)

E-mail: kavalerov@mail.ru http://www.pribory-smi.ru

Отпечатано в ООО «Подольская Периодика»

142110, г. Подольск, ул. Кирова, д. 25

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИБОРЫ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

- Вельт И.Д. Кондуктометрический уровнемер жидкого
металла 1
- Захаренко В.А., Кликушин Ю.Н. Термометр со
встроенными виртуальными шкалами 6
- Лавров В.А. Прибор для измерения электродвижущей
силы самоиндукции слаботочных электромагнитных реле ... 10

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

- Архангельская М.А., Вермель В.Д., Забалуев В.Ф.,
Николаев П.М. Аппаратно-программный комплекс оценки
точности изготовления аэродинамических моделей 14
- Роженцев В.С., Прокопенко Д.Ю., Булеков В.И.
Автоматизированные установки для контроля технических
характеристик гидроамортизаторов атомных электростанций ... 20

ТЕХНОЛОГИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ И НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Перечесова А.Д., Калапышина И.И. Выбор метода
испытания на растяжение арамидных нитей 28
- Белоконова Н.А., Антропова О.А. Оперативный контроль
процесса растопки котлов среднего давления 34

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

- Гуревич М.Л., Горшков А.В., Кудрявцев О.А., Куракин А.В.,
Русейкин П.Н., Черемохин А.В. Новый комплект особо
точных эталонов сравнения переменного и постоянного
напряжений ПНТЭ-36 38
- Юрин А.И., Неборский А.Ю., Карцев Е.А., Кокин Н.Н.
Минимизация температурной погрешности индуктивных
измерительных преобразователей 47
- Вишневецкий А.М., Городецкий Б.Н., Петров С.В.
Построение специализированного испытательного стенда
для разработки средств защиты радиоэлектронного
оборудования и приборов от мощного внешнего
электромагнитного излучения 51

© Предупреждаем о правовой защите наименования, товарного знака и авторских
прав на публикуемые материалы.

За достоверность сведений в рекламных материалах ответственность несут
рекламодатели.

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются.

Перепечатка материалов допускается только с разрешения редакции и с
обязательной ссылкой на журнал «ПРИБОРЫ».