

УДК 621.317

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ ОТ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ЗАВИСИМОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

К.В. Епифанцев

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия,
epifancew@gmail.com*

Аннотация. В настоящее время промышленные датчики перемещений необходимы для увеличения продуктивности и точности работы металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением. В течение двух десятилетий во всех отраслях производства успешно применяются датчики и измерители пути: датчик положения, датчик перемещения. Являясь связующим звеном между электронной и механической частями станка, датчик перемещения и датчик положения стали неотъемлемыми элементами оборудования для автоматизации различных процессов. В специализированной аудитории ГУАП «ФГУП Тест-С.-Петербург» проводятся исследования индуктивных датчиков перемещения на установке ИД-3. Исследования позволяют совершенствовать главные метрологические характеристики оборудования, применяемого для измерений в металлообработке.

Ключевые слова: датчик, промышленность, перемещение, точность, ЧПУ-станок, продуктивность.

STUDY OF THE INDUCTION COILS SENSITIVITY ON THE OUTPUT VOLTAGE WHEN MEASURING THE DEPENDENCE OF THE AIR CLEARANCE

K.V. Epifantsev

*St. Petersburg state university of aerospace instrumentation, St. Petersburg, Russia,
epifancew@gmail.com*

Annotation. Currently, industrial displacement sensors are needed to increase the productivity and accuracy of CNC machine tools. For two decades, sensors and path meters have been successfully used in all industries: position sensor, displacement sensor. As a link between the electronic and mechanical parts of the devices, the displacement sensor and the position sensor has become an integral part of the equipment for the automation of various processes. In the specialized audience of the SUAI, research is being conducted on inductive displacement sensors at the ID-3 installation. Research allows to improve the main metrological characteristics of the equipment used for measurements in Metalworking.

Key words: sensor, industry, moving, precision, CNC- machine, productivity.

В измерительных преобразователях, используемых для контроля перемещений в металлообрабатывающих станках (рис. 1), используются датчики двух типов — индуктивные и индукционные.

Альманах современной метрологии, 2021, № 1 (25)

Индуктивным называется такой преобразователь, который преобразует значение измеряемой (механической) величины в значение индуктивности. Он представляет собой катушку индуктивности, полное сопротивление которой изменяется при взаимном перемещении элементов магнитопровода.

Индукционным называют такой преобразователь, в котором скорость изменения измеряемой величины преобразуется в индуцируемую электродвижущую силу. В данных преобразователях естественной входной величиной является скорость механического перемещения (и поэтому непосредственно они могут применяться только для измерения скорости линейных и угловых перемещений), а выходной величиной — индуцированная ЭДС.



Рис. 1. Пример установки индуктивного датчика перемещения на станке с управляющей платформой Fanuc

У преобразователей с малым воздушным зазором x , величина которого изменяется при перемещении элемента магнитопровода, изменяется магнитное сопротивление магнитной цепи, и поэтому изменяются индуктивность и добротность катушки. Во многом это зависит от «стерильности» при монтаже оборудования (рис. 2), правильности стыковки основных узлов, минимизации статического электричества, запылённости поверхности, влажности вблизи оборудования.

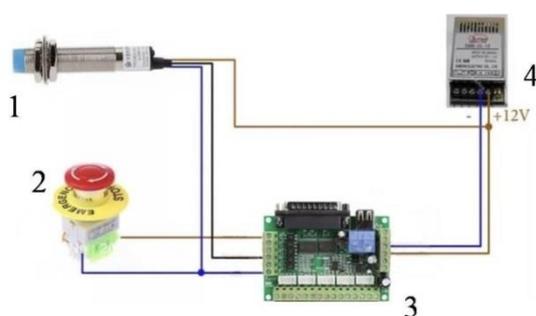


Рис. 2. Схема подключения индуктивного датчика перемещения:
1 — датчик перемещения; 2 — кнопка экстренной остановки;
3 — устройство записи и вывода данных; 4 — блок питания

Рассмотрим принципиальную схему разработанной установки для исследования работы датчиков перемещения (рис. 3) и конструкцию чувствительного элемента индуктивного датчика (рис. 4).

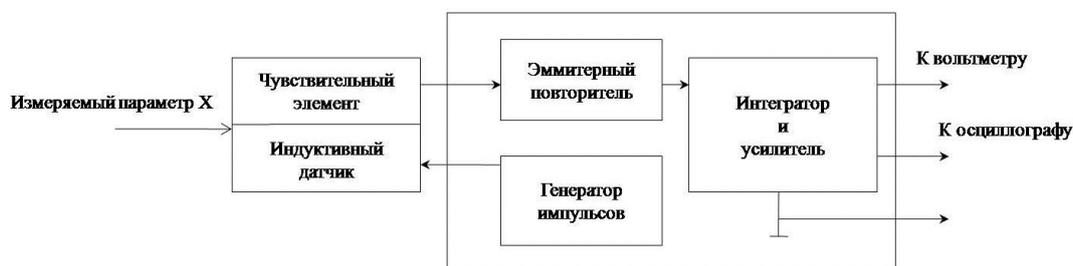


Рис. 3. Структурная схема индуктивного датчика перемещений

Индуктивный датчик перемещений представляет собой устройство, осуществляющее преобразование информации об изменении физических величин (линейное расстояние до объекта) в соответствующее изменение выходного напряжения. Он состоит из чувствительного элемента — катушки индуктивности с установленным в ней ферромагнитным сердечником, который может иметь различную форму (рис. 4) (половина ферритового кольца, броневой ферритовый сердечник), и преобразователя, осуществляющего приём, преобразование и выдачу измерительной информации с катушки индуктивности.

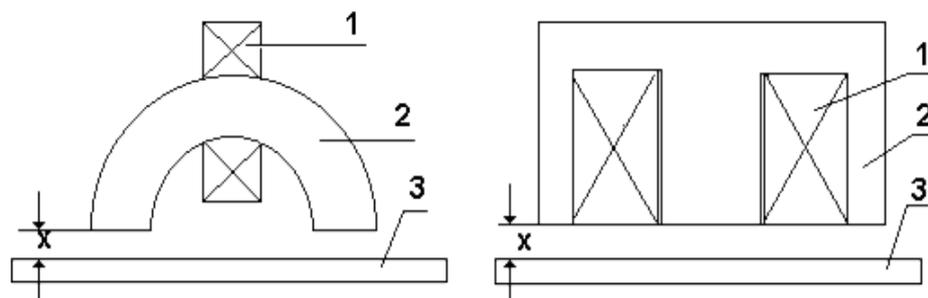


Рис. 4. Конструкция чувствительного элемента индуктивного датчика:
1 — обмотка; 2 — ферритовый сердечник; 3 — основание (движущийся объект)

Чувствительный элемент (датчик) (рис. 4) представляет собой катушку индуктивности, параллельно соединённую с конденсатором, и образует вместе с ним колебательный контур.

Преобразователь выполняет генерацию импульсного напряжения, обработку сигнала, полученного с колебательного контура, его усиление и индикацию.

Лабораторной установкой является измерительный штатив (рис. 5), в который устанавливаются различные индуктивные датчики. Он состоит из преобразователя, индуктивных датчиков, металлической пластины (подвижный элемент магнитопровода), зажимающего винта, ручки бокового перемещения, клемм для подключения, мультиметра Voltcraft MXD 4660 и осциллографа С1-55 и в целом представляет собой установку ИД-3 (рис. 5).

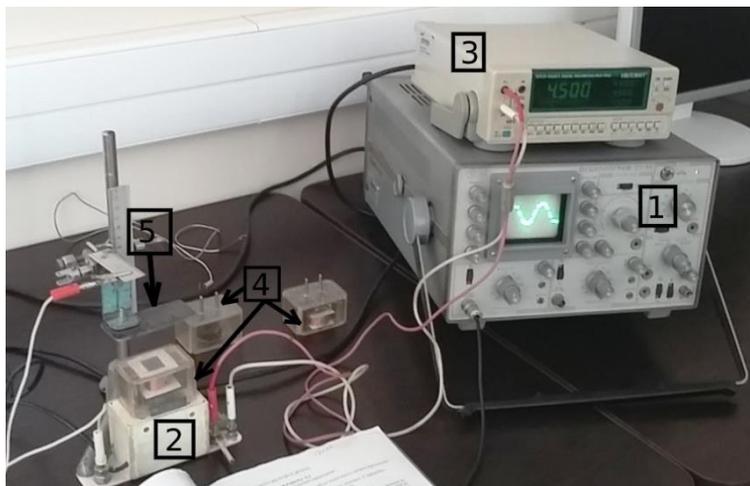


Рис. 5. Используемая установка ИД-3:

1 — осциллограф С1-55; 2 — измерительный штатив с подвижным элементом магнитопровода; 3 — мультиметр Voltcraft MXD 4660; 4 — набор катушек индуктивности в пластиковом корпусе с вилкой; 5 — перемещаемый объект (металлическая пластина)

Исследуемые индуктивности и активные сопротивления катушек датчиков:

$$\begin{aligned} N1 - L &= 107 \text{ мГн}, R_1 = 35,5 \text{ Ом}; \\ N2 - L &= 17,8 \text{ мГн}, R_2 = 12,5 \text{ Ом}; \\ N3 - L &= 18,0 \text{ мГн}, R_3 = 12,6 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Рассмотрим природу индуктивности L катушки (рис. 6).



Рис. 6. Катушка индуктивности в пластиковом корпусе и с вилкой

$$L = \frac{\omega_1^2}{Z_M},$$

где ω_1 — число витков катушки; Z_M — полное сопротивление магнитной цепи. Изменение индуктивного сопротивления катушки ведёт к изменению её полного сопротивления Z (рис. 7).

Полное сопротивление Z катушки определяется выражением

$$Z = R + j\omega \frac{\omega^2}{Z_M},$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота колебаний; R — активное сопротивление катушки постоянному току; Z_M можно представить как

$$Z_M = R_{\text{МСТ}} + R_X,$$

где $R_{\text{МСТ}}$ — магнитное сопротивление участков из стали;

$$R_X = \frac{x}{\mu_0 S},$$

где R_X — магнитное сопротивление воздушного зазора x ; x — воздушный зазор; $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ — магнитная проницаемость воздушного зазора, Гн/м; S — площадь воздушного зазора.

$$Z = R + j\omega \frac{\omega^2}{R_{\text{МСТ}} + \frac{2x}{\mu_0 S}}.$$

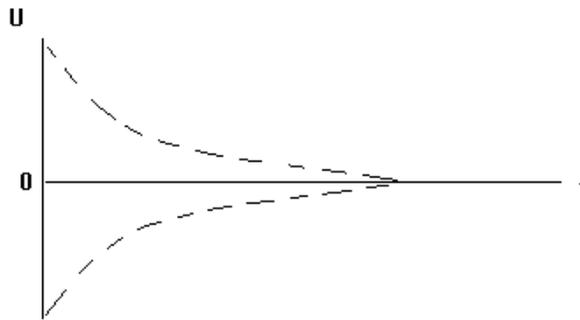


Рис. 7. Сигнал на выходе с катушки индуктивности

Тогда полное сопротивление Z катушки связано с изменением величины воздушного зазора x гиперболической зависимостью.

Если на контур, в который включена катушка, подать импульс напряжения амплитудой U_0 , то в контуре возникают затухающие свободные колебания, которые описываются уравнением

$$U_C = U_0 \exp \frac{-\omega_p t}{2Q} \cos(\omega_c t - \varphi),$$

где $\omega_C = \omega_P \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$; $\varphi = \arctg \frac{1}{2Q}$; Q — добротность контура; ω_C — круговая частота затухающих свободных колебаний; ω_P — круговая частота свободных незатухающих колебаний того же контура. ω_C и ω_P различаются на доли %.

Величина перемещения объекта относительно датчика определяется зазором x между сердечником и перемещающимся объектом. С уменьшением указанного зазора изменяется добротность колебательного контура с возрастанием потерь в нём.

Потери энергии в контуре вызывают затухание колебаний в контуре. Однако и в этом случае колеблющаяся величина (напряжение) проходит через равновесные (нулевые) значения спустя равные промежутки времени $T/2$, где T — так называемый условный период затухающих колебаний.

Эти импульсы существуют в течение интервала времени T_x , зависящего от U_0 и параметров контура.

Если $Q > 10$, то для линейной системы с одной степенью свободы зависимость U_C от времени имеет вид:

$$U_C = U_0 e^{-\delta t} \cos \omega_C t,$$

где δ — коэффициент затухания, связанный с декрементом затухания λ соотношением $\delta = \lambda T$; $U_t = U_0 e^{-\delta t}$ — амплитуда затухающих колебаний. λ — равен натуральному логарифму отношения двух последовательных максимальных отклонений (амплитуд) колеблющейся величины в одну и ту же сторону. U_0 и φ определяются значениями параметров схемы, начальными условиями и ЭДС источника, ω_C и δ зависят только от параметров контура. Чем больше значение коэффициента затухания δ , тем быстрее заканчивается колебательный процесс.

Коэффициент затухания также можно определить по формуле

$$\delta = \frac{R}{2L},$$

где R — активное сопротивление катушки.

Реальную передаточную функцию исследуемого индуктивного преобразователя необходимо определить экспериментально.

В общем виде её можно записать как

$$U(x) = K \cdot f(x),$$

где K — коэффициент, зависящий от параметров генератора импульсов, интегратора и индуктивного датчика.

В процессе исследования зависимости воздушного зазора катушки индуктивности от напряжения важно было исследовать и то, как изменение в вертикальном положении подкреплённой на штативе объекта прямоугольной формы марки «Сталь 45» с параметрами (Ш×Д×В) 30×60×1,5 мм (рис. 5) будет влиять на изменение напряжения. Для этих целей был использован лабораторный стенд (рис. 8).

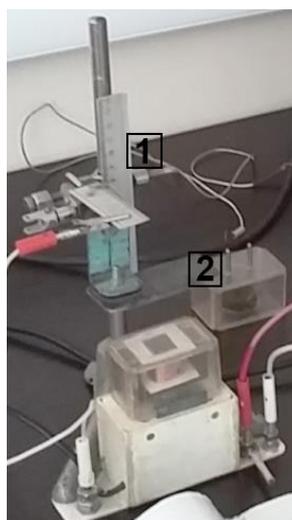


Рис. 8. Штатив с катушками индуктивности: 1 — система движения по осям X и Y ; 2 — металлическая пластина — имитатор обрабатываемой заготовки на станке ЧПУ

Метрологические характеристики основы установки — измерительного штатива — имеют погрешность в соответствии с ГОСТ 427-75 «Линейки измерительные металлические», что не превышает 0,5 мм. Именно данная основа бралась за результат измерений, что при суммарной длине линейки по вертикали в 50 мм не превысило 0,1 %.

Результаты проведённых измерений были помещены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты измерений напряжения на выходе интегратора

Катушка № 1		Катушка № 2		Катушка № 3	
X , мм	U , мВ	X , мм	U , мВ	X , мм	U , мВ
0	1631	0	1725	0	1920
2	2098	2	1953	2	2403
4	2737	4	2428	4	3065
6	3460	6	2877	6	3615
8	4152	8	3115	8	3940
10	4863	10	3378	10	4151
15	6079	15	3907	15	4443
20	6824	20	4177	20	4542
25	7222	25	4319	25	4585
30	7435	30	4396	30	4602
35	7550	35	4433	35	4610
40	7616	40	4460	40	4613
45	7655	45	4471	45	4613
50	7677	50	4478	50	4613

По данным таблицы 1 были построены графики функции преобразования по результатам измерений напряжений на выходе интегратора (рис. 9–11).



Рис. 9. График функции преобразования для датчика с катушкой № 1



Рис. 10. График функции преобразования для датчика с катушкой № 2

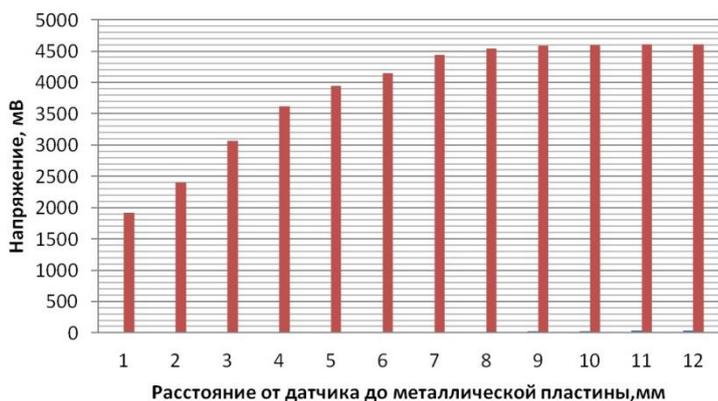


Рис. 11. График функции преобразования для датчика с катушкой № 3

Построим линии тренда на каждом из графиков (рис. 12–14).

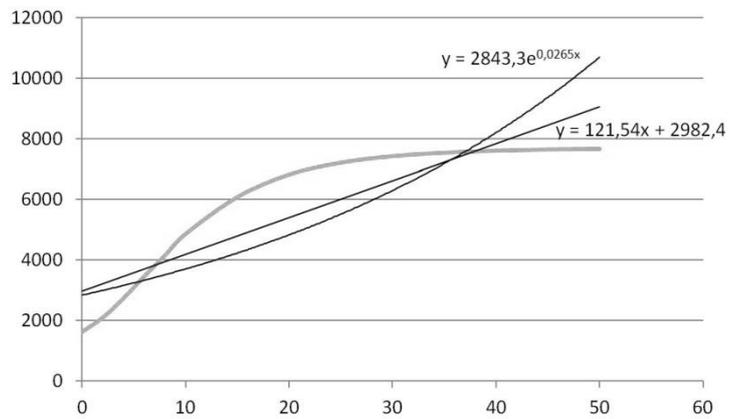


Рис. 12. Линейные и экспоненциальные линии тренда по данным с катушки № 1

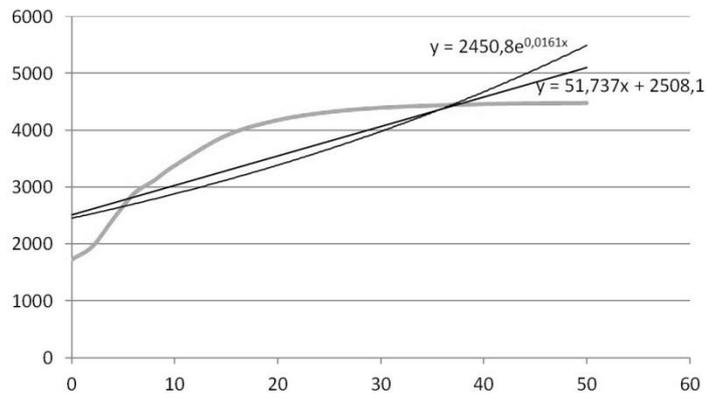


Рис. 13. Линейные и экспоненциальные линии тренда по данным с катушки № 2

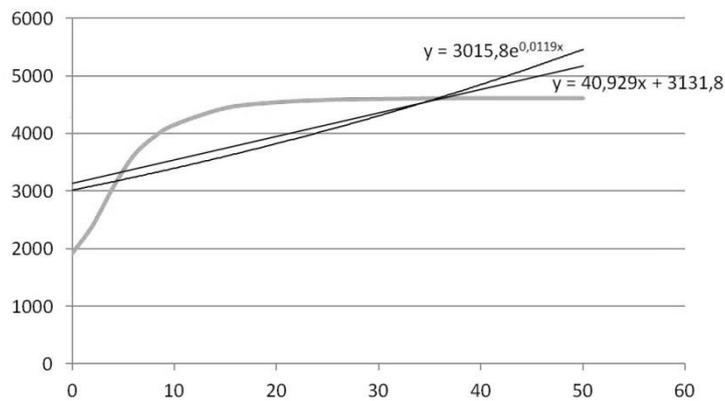


Рис. 14. Линейные и экспоненциальные линии тренда по данным с катушки № 3

Сравним полученные линии тренда различных катушек индуктивности. Результаты сравнения представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение линий тренда зависимости показаний мультиметра от измеряемой величины

№ катушки	Линия тренда	
	Экспоненциальные	Линейные
1	$y = 2843,3 \cdot e^{0,0265x}$	$y = 121,54x + 2982,4$
2	$y = 2450,8 \cdot e^{0,0161x}$	$y = 51,737x + 2508,1$
3	$y = 3015,8 \cdot e^{0,0119x}$	$y = 40,929x + 3131,8$

Проведём расчёт погрешности при измерениях на основе анализа данных в таблице 1 (таблица 3).

Таблица 3

Результат расчёта по наличию погрешностей выборки

Номер катушки	Среднее значение	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность, %	Коэффициент Стьюдента
1	5499,93	1314,91	23,908	2,160
2	3579,79	576,14	16,094	2,160
3	3979,64	521,71	13,109	2,160

Данные исследования позволяют сделать вывод о том, что катушка № 1 с параметрами $M1 - L = 107$ мГн, $R_1 = 35,5$ Ом является наиболее чувствительной на очень узком интервале — от 1 до 5 мм, однако катушки № 2 и 3 могут обеспечивать более широкий диапазон измерений — до 50 мм, что также является ценным свойством для системы измерительных преобразователей. В процессе изготовления катушки индуктивности были приняты разные методы намотки медной проволоки на сердечник, что, безусловно, могло привести к изменению диапазона измерений.

Таким образом, важным и наиболее применимым к измерению является воздушный зазор R_x , который необходимо исследовать на установке. В результате исследования три катушки поочередно были вставлены в штатив (рис. 7), который, в свою очередь, соединялся с мультиметром и осциллографом. Движения проводились через каждые 2 мм (см. таблицу 1). При рассмотрении зависимости индуктивности чувствительного элемента от величины измеряемого воздушного зазора необходимо подчеркнуть зависимость показаний мультиметра от измеряемой величины, которая может быть прослежена при анализе уравнения путём вывода линии тренда графиков,

описанных на рис. 9–11. В процессе проведения эксперимента стало возможным планирование дальнейших исследований, связанных с различными марками сталей, изменением параметров пластины (см. рис. 5) и увеличением количества витков на катушках индуктивности.

Список литературы

1. Раннев Г.Г., Тарасенко А.П. Методы и средства измерений. М.: Academia, 2003. 331 с
2. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. М.: Госэнергоиздат, 1954. 292 с.
3. Карцев Е.А. Измерительные преобразователи. М.: МИЭМ, 1986. 160 с.
4. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
5. Бриндли К. Измерительные преобразователи: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.
6. Брайко В.В. и др. Гальваномагнитные преобразователи в измерительной технике. М.: Энергоатомиздат, 1984. 360 с.
7. Дубовой Н.Д. Автоматические многофункциональные измерительные преобразователи. М.: Радио и связь, 1989. 256 с.
8. Нуберт Г.П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. М.: Энергия, 2009. 360 с.
9. Топильский В.Б. Микроэлектронные измерительные преобразователи. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. 496 с.
10. Электронный калькулятор статистических выборок [Электронный ресурс]. URL: <https://planetcalc.ru/4466/>. Дата обращения: 12.09.2020.

Статья поступила в редакцию: 11.11.2020 г.

Статья прошла рецензирование: 18.11.2020 г.

Статья принята в работу: 30.11.2020 г.