

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.01

УДК 661.41: 681.128.237

Б.К. Амирасланов¹, А.С. Муталлимова², В.С. Адыгезалов¹¹Сумгаитский государственный университет, Сумгаит,
Азербайджанская Республика²Азербайджанский государственный университет нефти
и промышленности, Баку, Азербайджанская Республика

АНАЛИЗ СТЕПЕНИ РАЗРАБОТКИ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИНДУКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СОЛЕНОИДНОГО ТИПА В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Описаны датчики, используемые в области автоматизированных систем управления, рассмотрены их преимущества и недостатки. Также рассмотрена индуктивная модификация соленоидного преобразователя больших перемещений. На основе экспериментальных исследований в области индуктивных датчиков соленоидного типа даны принципиальная электрическая схема и расчет одной из выполненных конструкций преобразователя, изготовленных специалистами Сумгаитского государственного университета. Задача в области автоматизированных систем управления технологическими процессами производств – систематизированные измерения технологических величин. На основе принципиальных схем и расчетных формул даны практические рекомендации по выбору параметров датчиков, а также проведенными экспериментальными исследованиями разрабатываются датчики перемещения, уровня, давления, а также параметры вибраций, прилагаются разработанные лучшие образцы датчиков. Применяемые индуктивные датчики перемещения в нефтехимической, а также в химической промышленности широко используются при создании различных информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) и выполняют в них наиболее важные функции в узлах ИИС. Главное отличие этих датчиков от других средств линейно-угловых измерений заключается в наличии основного индуктивного измерительного преобразователя, с помощью которого измеряемое перемещение преобразуется в изменение полного электрического сопротивления катушки индуктивности, что является актуальным. **Цель:** анализ степени разработки датчиков перемещения индуктивного преобразователя больших перемещений соленоидного типа в химической промышленности. **Результаты:** представлен преобразователь перемещения соленоидного типа, в котором подвижный элемент выполнен в виде трубчатого ферромагнитного сердечника, управляет индуктивностью длинной равномерной намотанной с резисторами секционированной катушки, чем обеспечена возможность отделить подвижный элемент от катушки индуктивности металлической перегородкой. **Практическая значимость:** получено уравнение выходной характеристики преобразователя, которое может быть использовано при расчете и проектировании индуктивных датчиков. Приведены принципиальные конструктивная и электрическая схемы преобразователя и его основные технические данные. На основе описанного преобразователя разработана индуктивная модификация уровнемера жидкого хлора, который в настоящее время успешно эксплуатируется в одной из цистерн (танков) цеха хлора Сумгаитского завода «Оргсинтез», находящегося в составе Технологического парка Сумгаита.

Ключевые слова: индуктивный преобразователь, большие перемещения, секционный соленоид, подвижный сердечник, шунтирующие резисторы, измерительный мост, уравнение характеристики, металлическая перегородка, уровнемер.

B.K. Amiraslanov¹, A.S. Mutallimova², V.S. Adygezalov¹

¹Sumgayit State University, Sumgayit, Republic of Azerbaijan

²Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Republic of Azerbaijan

ANALYSIS OF THE DEGREE OF DEVELOPMENT OF DISPLACEMENT SENSORS FOR INDUCTIVE LARGE DISPLACEMENT CONVERTER OF SOLENOID TYPE IN THE CHEMICAL INDUSTRY

The article describes the sensors used in the field of automated control systems, and discusses their advantages and disadvantages. An inductive modification of a large displacement solenoid converter is also considered. Based on experimental studies in the field of solenoid-type inductive sensors, a basic electrical circuit is given and a calculation is given of one of the completed converter designs manufactured by specialists from Sumgayit State University. The task in the field of automated control systems for technological processes of production is to carry out systematic measurements of technological quantities. Based on schematic diagrams and calculation formulas, practical recommendations on the selection of sensor parameters are specialized, and also through experimental studies, displacement, level, pressure sensors, as well as vibration parameters are developed, and the best developed samples of sensors are attached. The inductive displacement sensors used in the petrochemical and chemical industries are widely used in the creation of various information, measuring and control systems (IMS) and perform the most important functions in the IMS nodes. The main difference between these sensors and other means of linear-angular measurements is the presence of a main inductive measuring transducer, with the help of which the measured displacement is converted into a change in the total electrical resistance of the inductor, which is relevant. **Purpose:** Analysis of the state of development of displacement sensors for large displacement inductive transducers of the solenoid type in the chemical industry. **Results:** a solenoid-type displacement transducer, in which a movable element, made in the form of a tubular ferromagnetic core, controls the inductance of a long, uniform sectioned coil wound with resistors, which makes it possible to separate the movable element from the inductor by a metal partition. **Practical significance:** The output characteristic of the converter was obtained, which can be used in the calculation and design of inductive sensors. The basic design and electrical diagrams of the converter and its basic technical data are presented. Based on the described converter, an inductive modification of a liquid chlorine level meter has been developed, which is currently being successfully operated in one of the tanks (tanks) of the chlorine shop of the Sumgayit «Orgsintez» plant, located as part of the Sumgayit Technological Park.

Keywords: inductive converter, large displacements, sectional solenoid, moving core, shunt resistors, measuring bridge, characteristic equation, metal partition, level gauge.

Актуальность проблемы

Во всех отраслях промышленности, в том числе в нефтяной, химической, нефтехимической и других отраслях народного хозяйства, одним из путей решения повышения эффективности является создание современных датчиков перемещений для автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Внедрение датчиков, преобразователей, исполнительных механизмов и других

устройств и средств автоматизации с унифицированными входными и выходными параметрами позволило получить информацию о состоянии объектов управления, регулирования и контроля [1]. Первичный преобразователь, непосредственно воспринимающий параметр состояния, т.е. естественную входную величину, называется чувствительным элементом датчика [2]. Учитывая существенное расширение применения датчиков в зависимости от условий эксплуатации, контроль и обработка информации, а также методов и технических средств в информационно-измерительных системах (ИИС) намного усложняются. Поэтому анализ степени разработки усовершенствования датчиков перемещений является актуальным [3].

Постановка задачи

Первичные преобразователи физических величин воспринимают и преобразовывают параметр, характеризующий протекание регулируемого процесса, поэтому являются важными элементами систем контроля и управления технологическими процессами [2]. Специфические условия работы преобразователей, часто находящихся в непосредственном контакте с объектом регулирования, заставляют выбирать из всех возможных принципиальных решений и конструкций только те, которые достаточно полно удовлетворяют растущим требованиям производства. Это обуславливает усовершенствование имеющихся и создание новых конструкций преобразователей.

На этапе первичных преобразований многие технологические параметры легко преобразуются в перемещения, поэтому преобразователи перемещения являются наиболее универсальными, поскольку они используются и как самостоятельные преобразователи, и как составные элементы многих других более сложных измерительных устройств. Большинство датчиков давления, резонансные датчики плотности [14–17], измерители уровня, расхода, температуры и другие содержат чувствительные элементы, преобразующие перемещение в выходной сигнал [2, 4, 5].

Бесконтактное измерение перемещений осуществляется радиационными, акустическими, термическими, электромагнитными и другими преобразователями. В основу работы радиационных преобразователей положено воздействие входного перемещения на интенсивность потока. В зависимости от конкретных условий используют различные

виды лучистой энергии и разные способы изменения ее интенсивности [14, 15]. Наиболее широкое применение получили устройства, работающие в видимом участке спектра электромагнитных волн (оптические преобразователи, фотодатчики, фотореле). В тех случаях, когда на пути излучения находятся непрозрачные стенки, используют γ -лучи, лучи Рентгена или β -излучение. Значительно реже применяют потоки α -частиц [18–20].

В оптических преобразователях информация передается световыми волнами, которые могут меняться по интенсивности, фазе, цвету или геометрическому распределению в пространстве. Преобразование оптического сигнала в электрический осуществляется детекторами излучения, использующими различные физические эффекты. В оптических датчиках наиболее часто применяются детекторы излучения, фотодиоды, фоторезисторы и приемники теплового излучения [21–23]. Например, в волоконно-оптическом датчике превышения или занижения уровня относительно заданного значения свет от светодиода по световоду направляется к коническому окончанию датчика и, отразившись от него, попадает на детектор [24]. При погружении конического конца датчика в жидкость разность показателей преломления изменяется, и отклонившийся ранее из-за полного отражения свет выходит из конического конца датчика и уже не попадает на детектор [25, 26]. В результате полученное изменение интенсивности света служит сигналом о достижении заданного уровня. Таким образом, соединив нескольких таких концевых датчиков в единую систему, можно контролировать соответствующее число точек, что обеспечивает дискретный контроль уровня.

При выборе источников и приемников излучения следует согласовать их спектральные характеристики между собой и со спектральными характеристиками среды, через которую должен проходить световой поток. Инфракрасная область используется для оптических систем, работающих в атмосфере дыма или тумана. Применение оптических преобразователей в объектах, характеризующихся интенсивным загрязнением, затруднено [27, 28].

Методы решения

Известны различные схемы радиоизотопных датчиков перемещения. Метод, основанный на поглощении или значительном ослаблении контролируемым материалом потока гамма-лучей, которым просвечи-

вается контролируемый объект, получил практическое развитие. Радиоизотопный метод в большинстве случаев является единственно возможным, когда контроль перемещения должен осуществляться без непосредственного соприкосновения с контролируемой средой или без проникновения внутрь объекта контроля [29]. Однако при монтаже, эксплуатации и ремонте радиоизотопных приборов необходимо соблюдать специальные меры безопасности, выполнение которых в условиях некоторых производств представляет определенные затруднения: эксплуатация приборов должна производиться лицами, прошедшими специальный инструктаж и обеспеченных необходимой дозиметрической аппаратурой [30] и др.

Действие акустических преобразователей перемещения основано на измерении величины затухания упругих колебаний или времени прохождения ими определенного участка пути в измеряемой среде [27]. Практическое применение находят акустические колебания повышенной частоты (ультразвуковые), которые допускают фокусировку и обеспечивают большую точность работы преобразователей [30]. Электрические схемы излучателей и приемников акустических преобразователей (магнитострикционных вибраторов, электростатических вибраторов, пьезоэлектрических вибраторов) сравнительно сложны [31].

В основу построения термических преобразователей положено воздействие входного перемещения на условия теплоотдачи нагретого тела. Результатом этого воздействия является изменение температуры тела, которое может быть легко преобразовано в изменение электрической величины. Погрешности термических датчиков сводятся к погрешностям от влияния состава окружающей среды и температуры.

В промышленной измерительной технике требуются точные методы определения уровня, расхода, скорости потока и т.д. При этом допустимые погрешности не должны превышать одного процента, а иногда и одной десятой процента. При таких требованиях к точности применяют чаще всего электромеханические преобразователи, содержащие подвижные элементы (ПЭ), взаимодействующие с объектом контроля. Магнитомодуляционные преобразователи содержат магнитную систему и элемент, чувствительный к изменению магнитного поля [32]. При взаимном перемещении этих элементов меняется напряженность магнитного поля, пронизывающего чувствительный элемент, и соответственно величина выходного сигнала. Преимуществами данных устройств являются

отсутствие трения, простота конструкции и возможность в некоторых случаях отделить подвижный элемент от чувствительного элемента герметической (металлической, стеклянной) перегородкой. Для построения реле перемещения, уровня и прочего широко используются магнитоуправляемые герметизированные контакты, реагирующие на приближение магнита. Существуют исполнения, которые обладают повышенной стойкостью к вибрациям. Точность магнитомодуляционных датчиков определяется стабильностью постоянного магнита и точностью чувствительного элемента. Чувствительные элементы, как правило, обладают сравнительно большими погрешностями и в основном определяют точность работы преобразователей.

В трансформаторных преобразователях входное перемещение [6] изменяет величину индуктивной связи между двумя системами обмоток, одна из которых (первичная) питается переменным током, с другой (вторичной) снимается выходной сигнал. Простота конструкции, отсутствие необходимости в использовании сложных измерительных схем и отсутствие гальванической связи между цепями питания и выхода относятся к преимуществам этих преобразователей. Область применения трансформаторных преобразователей определяется возможным диапазоном измеряемых перемещений. Нелинейность статической характеристики трансформаторных преобразователей составляет не более $\pm (1 \div 2) \%$ для максимального диапазона перемещений [7].

Индуктивные преобразователи перемещения (ИПП) применяются в тех же областях, что и трансформаторные [8]. Принцип их действия основан на изменении индуктивности под воздействием входной величины. Широкое распространение получили ИПП с переменным числом витков, ИПП с переменным сопротивлением воздушного зазора, ИПП, реактивное магнитное сопротивление которых изменяется с помощью перемещаемого экрана или короткозамкнутого витка и др. ИПП не содержат отдельно первичную обмотку, в них измерительная обмотка одновременно выполняет роль обмотки возбуждения, в связи с чем эти преобразователи отличаются простотой устройства и связанной с этим надежностью. При соответствующем исполнении ИПП обладают удовлетворительной линейностью выходной характеристики. Однако большинство распространенных ИПП имеют сравнительно узкий диапазон измерения из-за соизмеримости размеров катушки индуктивности и ПЭ. Именно это и не удовлетворяет требованиям отдельных

объектов измерения, например, объектов, допускающих применение простых поплавковых уровнемеров [9].

Известны отдельные конструкции ИПП, в которых размеры уменьшены, например, за счет выполнения катушки индуктивности ступенчатой [6] и др. Однако одни из них имеют всегда достаточную линейную характеристику, например, из-за возрастания влияния межсложной взаимной индуктивности при чрезмерном увеличении числа ступеней в условиях измерения больших перемещений, другие – необходимость намотки витков с изменяющимся шагом, что затрудняет изготовление в условиях несерийного производства [9] и т.д.

Соленоидный преобразователь, положенный в основу индуктивного уровнемера по [10], конструктивно прост. Его катушка индуктивности питается высокочастотным током, имеет постоянную плотность намотки и секционирована резисторами с неодинаковыми значениями сопротивления. На катушку индуктивности свободно надет электромагнитный экран, выполняющий роль ПЭ. Последний вносит импеданс в цепь катушки. К недостатку такого принципа преобразования относится то, что такое устройство не способно работать в объектах, требующих герметизацию катушки индуктивности металлической оболочкой, так как такая оболочка экранирует высокочастотное поле и тем самым исключает возможность восприятия воздействия ПЭ преобразователя.

Экспериментальное исследования

Исследования, проведенные нами, показали, что можно выполнить ПЭ ИПП в виде легкого трубчатого ферромагнитного сердечника и свободно разместить его внутри катушки индуктивности преобразователя [11]. При этом отпадает необходимость питать преобразователь высокочастотным током, и тем самым экранирующее влияние металлической оболочки исключается. В результате обеспечивается возможность разместить катушку преобразователя, например, в межтрубном пространстве коаксиальных металлических немагнитных [12, 13] (например, из нержавеющей стали) труб и тем самым расширить область применения. При этом некоторое увеличение сечения (и соответственно веса) преобразователя, как показала практика, приемлемо для отдельных объектов контроля, например, для многих емкостей нефтяной и химической промышленности. Принципиальная конструктивная и электрическая схемы предлагаемого индуктивного соленоидного

преобразователя с коротким трубчатым сердечником приведены на рис. 1, а и б, где 1 и 2 – трубы, защищающие катушку индуктивности 3 преобразователя от механической и химической воздействий измеряемой среды; 4 – короткий трубчатый ферромагнитный сердечник; 5 – резисторы, шунтирующие секции катушки.

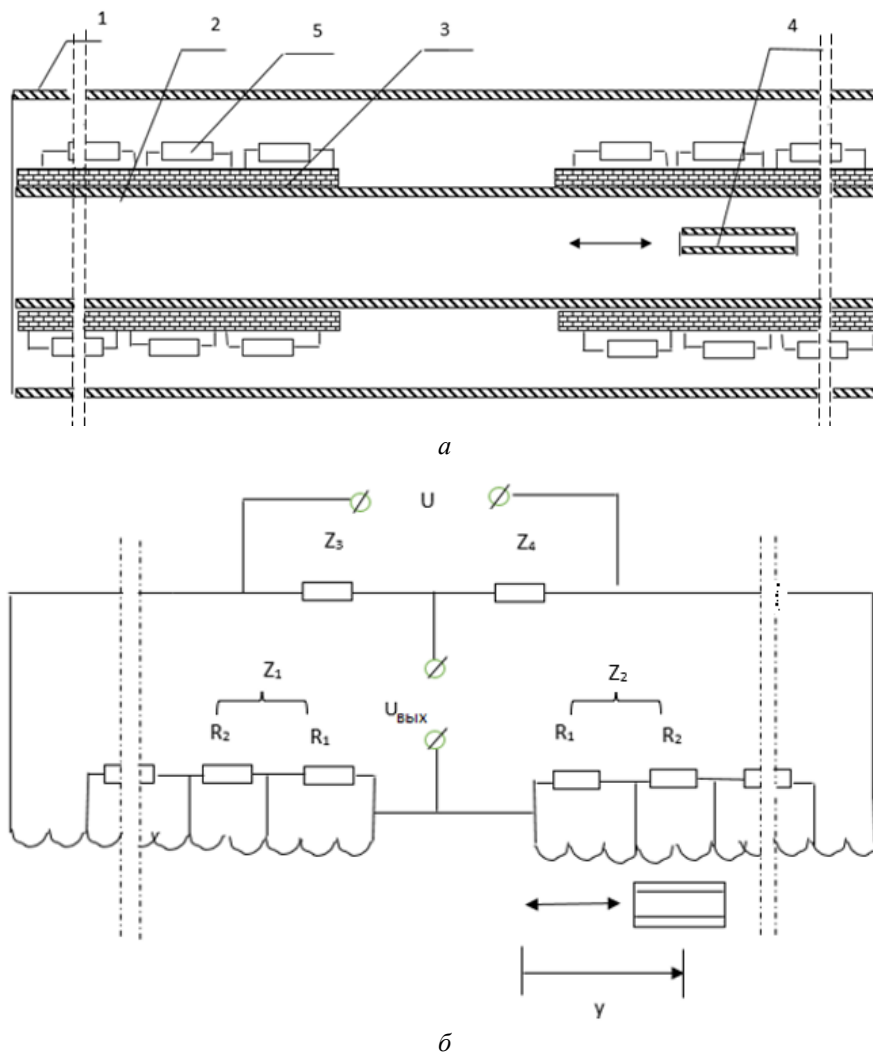


Рис. 1. Принципиальная конструктивная схема преобразователя (а);
принципиальная электрическая схема преобразователя (б)

Катушка состоит из двух частей, секционированных через интервалы, равные длине сердечника 4, и отодвинутых друг относительно друга на расстояние, равное длине сердечника. Каждая из этих частей

(назовем их секционными обмотками) охватывает одну половину общего диапазона измерения. Сердечник 4 тем или иным образом связывается с объектом контроля, перемещения в котором необходимо измерять. Плотности намотки секций одинаковы. Секционные обмотки включены в два соседних плеча измерительного моста.

На рис. 1, б обозначено: U – напряжение, питающее мост; Z_1 и Z_2 – сопротивления первых двух плеч, воспринимающих входную величину (сопротивления схем секционных обмоток); Z_3 и Z_4 – постоянные активные сопротивления плеч моста; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение преобразователя.

Полное сопротивление плеч моста измеряется в зависимости от перемещений в них сердечника. В исходном положении сердечник находится посередине катушки преобразователя, при этом значения сопротивлений Z_1 и Z_2 одинаковы, схема моста сбалансирована, и напряжение на ее выходе $U_{\text{вых}}$ равно нулю (в реальной конструкции преобразователь включен в мостик с выпрямителем, собранным по кольцевой схеме, который не показан на рисунке в целях упрощения). При перемещении сердечника влево или вправо (см. рис. 1) сопротивление одного плеча моста увеличивается на ΔZ , а другого остается неизменным, балансировка схемы нарушается, и на ее выходе появляется напряжение, пропорциональное перемещению сердечника.

Определим уравнение выходной характеристики преобразователя. Предположим, что каждая из обмоток преобразователя разделена на n участков, образующих ее секции (см. рис. 1, б). Пусть сердечник находится в положении, соответствующем $y = 0$. Обозначим частоту тока через ω , номер участка секционной обмотки через $m = 1, 2, 3, \dots, n$, сопротивление резисторов, соединенных параллельно к участкам секционных обмоток, через R_1, R_2, \dots, R_m , полные сопротивления участков вместе с шунтирующими резисторами через $Z_{01}^*, Z_{02}^*, \dots, Z_{0m}^*$, общее сопротивление секционной обмотки вместе с шунтирующими резисторами через Z_0^* . Имеем [5]:

$$Z_{0m}^* = \frac{R_m Z_0}{R_m + Z_0}; \quad Z_0^* = \sum_{m=1}^n Z_{0m}^*; \quad Z_0 = r + j\omega L_0, \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= \mu_0 \frac{w^2 S}{\lambda} + M_0; & M_0 &= K L_0, \\ L_\mu &= \mu_0 \mu_{i\lambda} \frac{w^2 S}{\lambda} + M'_0; & M'_0 &= K \sqrt{L_0 L_\mu}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$; w – число витков участка секционной обмотки; S – площадь поперечного сечения секционной обмотки; l – длина сердечника, равная длине участка секционной обмотки; L_0, M_0 , и Z_0 – индуктивность, взаимная индуктивность, активное сопротивление и полное сопротивление не содержащих сердечник участков секционной обмотки соответственно; K – коэффициент индуктивной связи между участками секционной обмотки; L_μ, M'_0 – соответственно индуктивность, взаимная индуктивность участка секционной обмотки при присутствии сердечника; μ_{il} – кажущаяся относительная магнитная проницаемость.

Теперь предположим, что сердечник сначала вводится в первый участок правой по рисунку (например) секционной обмотки на расстояние, затем полностью и далее переходит в последующие участки (см. рис. 1, б). При этом сопротивление первого участка обмотки увеличится и станет следующим:

$$Z_{0(y=y')} = Z_0 + \frac{\Delta Z}{\lambda} y'. \quad (3)$$

При полном введении сердечника в первой участок обмотки будем иметь $y' = \lambda$, и

$$Z_{0(y'=\lambda)} = Z_0 + \Delta Z = r + j\omega\mu_{i\lambda}L_0, \quad (4)$$

где $Z_{0(y'=\lambda)}$ – полное сопротивление первого участка обмотки при наличии в нем сердечника.

Приращение ΔZ при пренебрежении рассеянием магнитного потока через боковую стенку сердечника и взаимными индуктивностями смежных секций можно выразить так (значение коэффициента индуктивной связи между участками секционной обмотки принимаем равным нулю, так как в большинстве конструкций рассматриваемых преобразователей $\frac{\lambda}{D_{cp}} > 1$, где D_{cp} – средний диаметр участка; $M_0 \approx M'_0 = 0$):

$$\Delta Z = Z_{0(y'=\lambda)} - Z_0 = j(\mu_{i\lambda} - 1)\omega L_0. \quad (5)$$

При переходе сердечника во второй участок секционной обмотки сопротивление первого участка начнет уменьшаться до своего первоначального значения, а сопротивление второго участка при этом будет максимальным. Дальнейшие перемещения сердечника вызовут приращения сопротивлений последующих участков. С учетом, что сопротивления Z_0 участков секционной обмотки шунтированы резисторами

R_m , линейное изменение общего сопротивления секционной обмотки в функции перемещений сердечника возможно при условии:

$$\frac{R_m(Z_0+\Delta Z)}{R_m+Z_0+\Delta Z} - \frac{R_m Z_0}{R_m+Z_0} = \frac{\Delta Z}{n} m. \quad (6)$$

Для большинства конструкций рассматриваемых преобразователей можно принять

$$+Z_0 \gg \Delta Z. \quad (7)$$

Тогда из (6) с учетом (7) получаем:

$$R_m = \frac{m}{n-m} Z_0. \quad (8)$$

Полное сопротивление секционной обмотки в зависимости от положений сердечника определяется формулой:

$$Z_y = Z_0^* + \frac{\Delta Z}{n\lambda} Y, \quad (9)$$

где $Y = 0 \div n\lambda$; Z_0^* имеет выражение (1).

Уравнение характеристики сопротивления второй секционной обмотки преобразователя аналогично выражению (9).

Рассчитав схему моста, два плеча которого образованы из рассмотренных обмоток, для случая равенства значений сопротивлений Z_3 , Z_4 и Z_0^* находим (см. рис. 1, б):

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U} \left(\frac{Z_0^* + \frac{\Delta Z}{nh} Y}{2Z_0^* + \frac{\Delta Z}{nh} Y} - \frac{1}{2} \right).$$

Это выражение с учетом, что $2Z_0^* \gg \Delta Z$, запишется так:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U} \frac{\Delta Z}{4nhZ_0^*} Y. \quad (10)$$

Формула (10) является уравнением выходной характеристики рассматриваемого преобразователя при приятных допущениях. На рис. 2 представлены графики выходных характеристик опытной конструкции преобразователя, изготовленного по приведенному расчету, из которых видно, что отклонение от нелинейности экспериментальной характеристики меньше 3 % в пределах рабочего хода сердечника; отклонение экспериментальной характеристики от расчетной (построенной по формуле (10)) не превышает 12 %. Опытной образец преобразователя имел следующие данные: диаметр внутренней и внешней труб (1 и 2, см. рис. 1, а) 38 и 76 мм соответственно; толщина стенок труб 3 и 3,5 мм соответственно; материал труб – нержавеющая немагнитная сталь (любой марки); число участков в секционной обмотки $n = 7$; длина сердечника

равна длинам участков обмоток, $\lambda = 130$ мм; сердечник преобразователя имел цилиндрическую форму и был выполнен из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм; диаметр сердечника 20 мм; напряжение питания 36 В; частота питающего напряжения 50 Гц; магнитная проницаемость сердечника была определена экспериментально на самом же преобразователе в том же режиме, в котором он работает, и составила $\mu_{i\lambda} = 4,8$; $L_0 = 42 \cdot 10^{-4}$ Гн; $|Z_0| = 46$ Ом; $|\Delta Z| = 5$ Ом; $R_1 = 8$ Ом; $R_2 = 18$ Ом; $R_3 = 35$ Ом; $R_4 = 61$ Ом; $R_5 = 115$ Ом; $R_6 = 276$ Ом; $R_7 = \infty$; $|Z_0^*| = 184$ Ом обмотки намотаны проводом ПЭЛ-0,23.

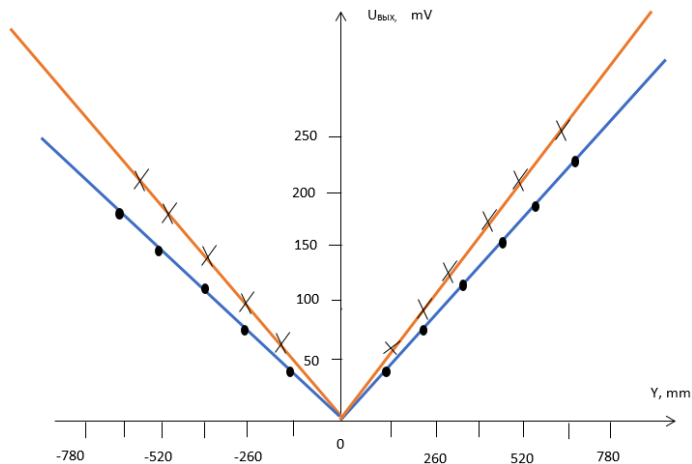


Рис. 2. Характеристики преобразователя: • – расчет, x – эксперимент

Определение значения магнитной проницаемости сердечника выполнено экспериментально на самом преобразователе в условиях, близких к его номинальному режиму работы. При этом руководствовались следующими соображениями.

Индуктивность многослойной цилиндрической катушки (что то же участка (секции) секционной обмотки рассматриваемого нами преобразователя) без сердечника и с сердечником определяем следующими формулами соответственно [5]:

$$L_0 = \mu_0 \frac{w^2 S}{\lambda}; L_{\exists} = \mu_{i\lambda} L_0.$$

Полное сопротивление (модуль) секции определяем методом амперметра, вольтметра и ваттметра при частоте 50 Гц и наличии в ней сердечника и без него соответственно:

$$|Z_{\exists}| = \frac{U}{I} = 46,41 \text{ Ом}; |Z_0| = \frac{U}{I'} = 46 \text{ Ом}.$$

Далее, находим φ_{Δ} и $\sin\varphi_{\Delta}$ из $\cos\varphi_{\Delta} = \frac{P_{\Delta}}{UI}$. Потом вычисляем:

$$r = |Z_{\Delta}| \cdot \cos\varphi_{\Delta} = 45,98 \text{ Ом}; X_{\Delta} = |Z_{\Delta}| \sin\varphi_{\Delta} = 6,32 \text{ Ом}.$$

Из $X_{\Delta} = 3,14L_{\Delta}$, определяем $L_{\Delta} = 201 \cdot 10^{-4}$ Гн. Аналогично определяем $L_0 = 42 \cdot 10^{-4}$ Гн. Далее из $\frac{L_{\Delta}}{L_0} = \mu_{i\lambda}$ находим $\mu_{i\lambda} = 4,8$.

На основе описанного преобразователя разработана индуктивная модификация уровнемера жидкого хлора, который в настоящее время эксплуатируется в одном из танков (сосуд с жидким хлором) цеха хлора Сумгаитского завода «Оргсинтез», находящегося в составе Технологического парка Сумгаита. В настоящее время проводятся испытания над разработанными индуктивными датчиками перемещения для информационно-измерительных систем в химической промышленности.

Заключение

1. Прилагаются принципиальная конструктивная и электрическая схемы предлагаемого индуктивного соленоидного преобразователя с коротким трубчатым сердечником.

2. Построены графики выходных характеристик опытной конструкции преобразователя, изготовленного по приведенному расчету, из которых видно, что отклонение от нелинейности экспериментальной характеристики меньше 3 % в пределах рабочего хода сердечника.

3. На основе описанного преобразователя разработана индуктивная модификация уровнемера жидкого хлора, который в настоящее время эксплуатируется в одном из танков (сосуд с жидким хлором) цеха хлора Сумгаитского завода «Оргсинтез», находящегося в составе Технологического парка Сумгаита.

Библиографический список

1. Агейкин, Д.И. Датчики контроля и регулирования / Д.И. Агейкин, Е.Н. Костина, Н.Н. Кузнецова. – М.: Машиностроение, 1965. – 628 с.

2. А.с. 488074 СССР. Индуктивный уровнемер / Ю.А. Гаркуша, И.И. Романенко // Открытия. Изобретения. – 1975. – № 38.

3. Виглеб, Г. Датчики (пер. с нем.) / Г. Виглеб. – М.: Мир, 1989. – 196 с.

4. Гахраманов, Н.Ф. К определению характеристики преобразователей со ступенчатой катушкой / Н.Ф. Гахраманов, В.С. Адыгезалов // Электротехника. – 2002. – № 8. – С. 36–38.

5. Модернизация уровнемера хлора УХ-1 / Н.Ф. Гахраманов, В.С. Адыгезалов, Р.С. Джамилев, Т.Т. Алиев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 6. – С. 38–39.

6. Adygezalov, S.V. Meter of level of liquid chlorine of UKh-2M2 type / S.V. Adygezalov, I.R. Kerimov, V.S. Adygezalov // Khimicheskaya Promyshlennost. – 2001. – № 9. – P. 55–57. – URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

7. Inductive modification of UH-1 chlorine level-meter / N.F. Gakhramanov, V.S. Adygezalov, R.S. Dzhamilov, T.T. Aliev // Pribory i Sistemy Upravleniya. – 2004. – № 6. – P. 42–44. – URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

8. Adygezalov, V.S. A transformer-type short-core transducer of large displacements / V.S. Adygezalov // Elektrichestvo. – 2004. – № 5. – P. 50–55. – URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

9. Gakhramanov, N.F. Solenoid differential – transformer sensor of movement / N.F. Gakhramanov, V.S. Adygezalov // Elektrotehnika. – 2004. – № 1. – P. 56–59. – URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

10. Adygezalov, V.S. The inductive the converter of the big moving with the short core / V.S. Adygezalov // Elektrotehnika. – 2004. – № 11. – P. 56–59. – URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

11. Adygezalov, V.S. Inductive solenoidal motion converter / V.S. Adygezalov // Russian Electrical Engineering. – 2005. – 76(7). – P. 43–46. – URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

12. Adygezalov, V.S. The use of a floating electromagnetic level gauge in surface oil tanks / V.S. Adygezalov // Measurement Techniques. – 2005. – 48 (5). – P. 482–486. – URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

13. Adygezalov, V.S. Inductive large-displacement converter with a short core / V.S. Adygezalov // Russian Electrical Engineering. – 2004. – № 75 (11). – P. 72–76. – URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

14. Гусейнов, Т.К. Трубчатые резонаторы современных вибрационно-частотных плотномеров жидкости / Т.К. Гусейнов, Б.К. Ами-

расланов // *İnformasiya sistemləri və texnologiyalar: nailiyyətlər və perspektivlər*. III Beynəlxalq elmi konfransın materialları, Sumqayıt, 2022. – P. 50–51.

15. Пат. İ 2008 0025 от 28.01.2008 (Азербайджан). Резонансный датчик плотности / Т.К. Гусейнов, И.М. Абдуллаев, Б.К. Амирасланов.

16. Theoretical and experimental study of vibration-amplitude liquid densimeter on the basis of a high-quality tubular resonator / Т.К. Huseynov, В.К. Amiraslanov, Т.Т. Gadirova, N.A. Abdulova, K.R. Hacıyeva // *International Scientific and Technical Conference: SES-2019, Scopus preview. E3S Web of Conferences 124, 03004 (2019)*. – Kazan, Russia, 2019. – P. 18–20. – URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019E3SWC.12403004H/abstract>

17. Influence of the pressure of the measured liquid on the readings of vibration-frequency density sensors in the chemical industry / В.К. Amiraslanov, N.A. Abdulova, S.C. Abdullayeva, A.S. Huseynov, A.İ. Kravets // *III International conference mip: engineering-2021: Advanced technologies in material science, mechanical and automation engineering, Scopus preview. E3S Web of Conferences*. – Krasnoyarsk, Russia, 2021. – P. 129–135. – URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021AIPC.2402c0001A/abstract>

18. Шарапов, В.И. Датчики / В.И. Шарапов. – М.: Техносфера, 2012. – 54 с.

19. Фрайден, Дж. Современные датчики: справочник (пер. с англ.) / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 567 с.

20. Гоцеридзе, Р. Анализ работы датчиков сил и линейных перемещений с последовательными LC-контурами / Р. Гоцеридзе, Ю. Нигусов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 117 с.

21. Бражников, Н.И. Ультразвуковые методы измерения плотности вещества / Н.И. Бражников // *Приборы и системы управления*. – 1976. – № 10. – С. 17–21.

22. Бесконтактный ультразвуковой измеритель плотности жидкости. – URL: <http://rips.city.tomsk.net/plotnost.htm>

23. Плотномер радиоизотопный общепромышленного назначения типа ПР.1027. – URL: www.measurement.ru/gk/sostav/061059.htm

24. Вибрационный плотномер жидких сред ПРК-02 / Ю.Г. Абросимов, Ю.Б. Баранов, В.И. Зверев, С.А. Корнеев // *Датчики и системы*. – 2005. – № 1. – С. 46–49.

25. Liquid density meters. – URL: www.yokogawa.com/an/dm8c/an-dm8-001.en.htm

26. Индуктивный преобразователь перемещения ISAN EC41A-43P-8-PS4. – URL: <https://teko-com.ru/product/isan-ec41a-43p-8-ps4.html>

27. Строганов, Д.А. Исследование и разработка индуктивных датчиков перемещения для информационно-измерительных и управляющих систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.А. Строганов; Моск. гос. ун-т приборостроения и информатики. – М., 2012.

28. Федотов, А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля: монография / А.В. Федотов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 176 с.

29. Терещенко, Е.М. Сенсоры и датчики физических величин: методические рекомендации для проведения практических работ по дисциплине «Сенсоры и датчики физических величин» / Е.М. Терещенко; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2018. – 34 с.

30. Сергеев, С.А. Индуктивные датчики линейных перемещений / Е.М. Терещенко // Теория и проектирования датчиков, приборов и систем. – 2001. – № 11.

31. Строганов, Д.А. Система автоматизированного проектирования индуктивных измерительных приборов / Д.А. Строганов // Приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – М.: МГУТТИ, 2007. – С. 137–141.

32. Строганов, Д.А. Структурно-математические модели индуктивных измерительных устройств / Д.А. Строганов, А.Г. Щепетов // Приборы. – 2011. – № 5 (131). – С. 4–12.

References

1. Ageikin D.I., Kostina E.N., Kuznetsova N.N. Datchiki kontrolia i regulirovaniia [Sensors for control and regulation]. Moscow: Mashinostroenie, 1965, 628 p.

2. Garkusha Iu.A., Romanenko I.I. Induktivnyi urovnemer [Inductive level gauge], Avtorskoe svidetel'stvo 488074 USSR, 1975, no. 38.

3. Vigleb G. Datchiki [Sensors]. Moscow: Mir, 1989, 196 p.

4. Gakhramanov N.F., Adygezalov V.S. K opredeleniiu kharakteristiki preobrazovatelei so stupenchatoi katushkoi [To determine the characteristics of converters with a stepped coil]. *Elektrotekhnik*, 2002, no. 8, pp. 36-38.

5. Gakhramanov N.F., Adygezalov V.S., Dzhamilov R.S., Aliev T.T. Modernizatsiia urovnemera khloro UKh-1 [Modernization of chlorine level meter UX-1]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2002, no. 6, pp. 38-39.

6. Adygezalov S.V., Kerimov I.R., Adygezalov V.S. Meter of level of liquid chlorine of UKh-2M2 type. *Khimicheskaya Promyshlennost*, 2001, no. 9, pp. 55-57, available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

7. Gakhramanov N.F., Adygezalov V.S., Dzhamilov R.S., Aliev T.T. Inductive modification of UH-1 chlorine level-meter. *Pribory i Sistemy Upravleniya*, 2004, no. 6, pp. 42-44, available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

8. Adygezalov V.S. A transformer-type short-core transducer of large displacements. *Elektrichestvo*, 2004, no. 5, pp. 50-55, available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

9. Gakhramanov N.F., Adygezalov V.S. Solenoid differential - transformer sensor of movement. *Elektrotehnika*, 2004, no. 1, pp. 56-59, available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

10. Adygezalov V.S. The inductive the converter of the big moving with the short core. *Elektrotehnika*, 2004, no. 11, pp. 56-59, available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

11. Adygezalov V.S. Inductive solenoidal motion converter. *Russian Electrical Engineering*, 2005, 76 (7), pp. 43-46, available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

12. Adygezalov V.S. The use of a floating electromagnetic level gauge in surface oil tanks. *Measurement Techniques*, 2005, 48 (5), pp. 482-486, available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

13. Adygezalov V.S. Inductive large-displacement converter with a short core. *Russian Electrical Engineering*, 2004, 75 (11), pp. 72-76, available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603525023&origin=AuthorEval>

14. Guseinov T.K., Amiraslanov B.K. Trubchatye rezonatory sovremennykh vibra-tсионno-chastotnykh plotnomerov zhidkosti [Tubular resonators of modern vibration-frequency density meters of liquid]. *Informasiya sistemlari və texnologiyalar: nailiyyətlər və perspektivlər. III Beynəlxalq elmi konfransın materialları, Sumqayıt*, 2022, pp. 50-51.

15. Guseinov T.K., Abdullaev I.M., Amiraslanov B.K. Rezonansnyi datchik plotnosti [Resonant density sensor]. Patent İ 2008 0025 ot 28.01.2008 (Azerbaijhan).

16. Huseynov T.K., Amiraslanov B.K., Gadirova T.T., Abdulova N.A., Hacıyeva K.R. Theoretical and experimental study of vibration-amplitude liquid densimeter on the basis of a high-quality tubular resonator. *International Scientific and Technical Conference: SES-2019, Scopus preview. E3S Web of Conferences 124, 03004 (2019)*. Kazan, Russia, 2019, pp. 18-20, available at: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019E3SWC.12403004H/abstract>

17. Amiraslanov B.K., Abdulova N.A., Abdullayeva S.C., Huseynov A.S., Kravets A.İ. Influence of the pressure of the measured liquid on the readings of vibration-frequency density sensors in the chemical industry. *III International conference mip: engineering-2021: Advanced technologies in material science, mechanical and automation engineering, Scopus preview. E3S Web of Conferences*. Krasnoyarsk, Russia, 2021, pp. 129-135, available at: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021AIPC.2402c0001A/abstract>

18. Sharapov V.I. Datchiki [Sensors]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 54 p.

19. Fraiden Dzh. Sovremennye datchiki [Modern sensors]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 567 p.

20. Gotseridze R., Nigusov Iu. Analiz raboty datchikov sil i lineinykh peremeshchenii s posledovatel'nymi LC-konturami [Analysis of the operation of force and linear displacement sensors with sequential LC circuits.]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Bauman, 117 p.

21. Brazhnikov N.I. Ul'trazvukovye metody izmereniia plotnosti veshchestva [Ultrasonic methods for measuring the density of matter]. *Pribory i sistemy upravleniia*, 1976, no. 10, pp. 17-21.

22. Beskontaktnyi ul'trazvukovoi izmeritel' plotnosti zhidkosti [Non-contact ultrasonic liquid density meter], available at: <http://rips.city.tomsk.net/plotnost.htm>

23. Plotnomer radioizotopnyi obshchepromyshlennogo naznacheniiia tipa PR.1027 [Radioisotope density meter for general industrial use type PR.1027], available at: www.measurement.ru/gk/sostav/061059.htm

24. Abrosimov Iu.G., Baranov Iu.B., Zverev V.I., Korneev S.A. Vibratsionnyi plotnomer zhidkikh sred PRK-02 [Vibrating density meter of liquid media PRK-02]. *Datchiki i sistemy*, 2005, no. 1, pp. 46-49.

25. Liquid density meters, available at: www.yokogawa.com/an/dm8c/an-dm-8-001-en.htm

26. Induktivnyi preobrazovatel' peremeshcheniia ISAN EC41A-43P-8-PS4 [Inductive displacement transducer ISAN EC41A-43P-8-PS4], available at: <https://teko-com.ru/product/isan-ec41a-43p-8-ps4.html>

27. Stroganov D.A. Issledovanie i razrabotka induktivnykh datchikov peremeshcheniia dlia informatsionno-izmeritel'nykh i upravliaiushchikh sistem [Research and development of inductive displacement sensors for information-measuring and control systems]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi universitet priborostroeniia i informatiki, 2012.

28. Fedotov A.V. Teoriia i raschet induktivnykh datchikov peremeshchenii dlia sistem avtomaticheskogo kontroliia [Theory and calculation of inductive displacement sensors for automatic control systems]. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011, 176 p.

29. Tereshchenko E.M. Sensory i datchiki fizicheskikh velichin: metodicheskie rekomendatsii dlia provedeniia prakticheskikh rabot po distsipline "Sensory i datchiki fizicheskikh velichin" [Sensors and sensors of physical quantities: methodological recommendations for conducting practical work in the discipline "Sensors and sensors of physical quantities"]. Kursk: Iugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2018, 34 p.

30. Sergeev S.A. Induktivnye datchiki lineinykh peremeshchenii [Inductive linear displacement sensors]. *Teoriia i proektirovaniia datchikov, priborov i sistem*, 2001, no. 11.

31. Stroganov D.A. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniia induktivnykh izmeritel'nykh priborov [Computer-aided design system for inductive measuring instruments]. *Priborostroenie. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov*. Moscow: MGUTTI, 2007, pp. 137-141.

32. Stroganov D.A., Shchepetov A.G. Strukturno-matematicheskie modeli induktivnykh izmeritel'nykh ustroistv [Structural and mathematical models of inductive measuring devices]. *Pribory*, 2011, no. 5 (131), pp. 4-12.

Сведения об авторах

Амирасланов Бахруз Курбан оглы (Сумгаит, Азербайджанская Республика) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и программирование» Сумгаитского государственного университета (AZ5008, Сумгаит, ул. Баку, 230, e-mail: amiraslanov_bk@mail.ru).

Муталимова Анаханум Сахиб кызы (Баку, Азербайджанская Республика) – кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Приборная инженерия» Азербайджанского государственного университета

нефти и промышленности (AZ1009, Баку, пр. Азадлыг, 34, e-mail: a_mutallimova69@inbox.ru).

Адыгезалов Вугар Сахиб оглы (Сумгаит, Азербайджанская Республика) – старший лаборант кафедры «Электротехники и энергетики» Сумгаитского государственного университета (AZ 5008, Сумгаит, ул. Баку, 230, e-mail: adigezalzade.vuqar@mail.ru).

About the authors

Amiraslanov Bahruz Kurban ogly (Sumgait, Republic of Azerbaijan) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior Lecturer at the department of “Information technologies and programming” of Sumgait State University (AZ5008, Sumgait, 230, Baku str., e-mail: amiraslanov_bk@mail.ru).

Mutallimova Anahanum Sahib kyzy (Baku, Republic of Azerbaijan) – Ph. D. in Technical Sciences, teacher of the department of “Instrumental Engineering” of the Azerbaijan State University of Oil and Industry (AZ1009, Baku, pr. Azadlig, 34, e-mail: a_mutallimova69@inbox.ru).

Adigezalov Vugar Sahib ogly (Sumgait, Republic of Azerbaijan) – senior laboratory assistant at the Department of Electrical Engineering and Power Engineering Sumgait State University (AZ5008, Sumgait, 230, Baku str., e-mail: adigezalzade.vuqar@mail.ru).

Поступила: 13.12.2023. Одобрена: 25.01.2024. Принята к публикации: 20.04.2024.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Амирасланов, Б.К. Анализ степени разработки датчиков перемещения индуктивного преобразователя больших перемещений соленоидного типа в химической промышленности / Б.К. Амирасланов, А.С. Муталлимова, В.С. Адыгезалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 49. – С. 5–24. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.01

Please cite this article in English as:

Amiraslanov B.K., Mutallimova A.S., Adygezalov V.S. Analysis of the degree of development of displacement sensors for inductive large displacement converter of solenoid type in the chemical industry. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 49, pp. 5-24. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.01