

УДК 620.1.08

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-11-18

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ОГНЕСТРЕЛЬНОГО СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

В. А. Сясько, доктор технических наук, ООО «КОНСТАНТА», Санкт-Петербург, Россия

С. С. Голубев, кандидат технических наук, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, Росстандарт, Москва, Россия

А. Е. Ивкин, кандидат технических наук, ООО «КОНСТАНТА», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена задача измерения толщины различных функциональных неферромагнитных покрытий, применяемых при производстве огнестрельного стрелкового оружия. Для решения поставленной задачи предложен магнитоиндукционный метод измерения толщины покрытий. Обозначены основные источники погрешности, связанные с влиянием на получаемые результаты измерений внешних факторов и особенностей объекта измерения. В частности выявлено, что на результаты измерений существенное влияние оказывает геометрия объекта контроля, отнесенная к диаметру зоны измерения преобразователя, что позволило сформулировать критерии оптимизации его геометрических параметров.

Представлены результаты оптимизации соотношений геометрических параметров первичных измерительных преобразователей и зависимость, позволяющая определить диаметр зоны измерения преобразователя при заданном диапазоне толщины.

Возбуждение преобразователя негармоническим электромагнитным полем и использование в качестве первичного информативного параметра площадей наведенных ЭДС, тактирование цикла преобразования с привязкой к частоте сетевого напряжения позволило исключить влияние электропроводности покрытия и основания объекта контроля на результаты измерений, повысить помехозащищенность, временную и температурную стабильность, а также использовать износостойкие легированные стали в качестве материала сердечника преобразователя.

Совокупность предлагаемых решений позволила разработать толщиномер с малогабаритными измерительными преобразователями для использования в условиях серийного производства предприятий концерна «Калашников» при неразрушающем контроле толщины разнообразных функциональных покрытий малогабаритных и сложнопрофильных деталей современных и перспективных видов стрелкового оружия.

Ключевые слова: магнитоиндукционный толщиномер, первичный измерительный преобразователь, алгоритм, оптимальная геометрия.

Введение

Огнестрельное стрелковое оружие получило массовое распространение как в военном, так и в гражданском сегментах. В соответствии с общепринятой классификацией огнестрельное стрелковое оружие – это ствольное оружие калибром менее 20 мм, в котором для метания поражающего элемента (пули, дроби или картечи) используется энергия газов, образующихся при горении метательного заряда в стволе. К огнестрельному стрелковому оружию относятся пистолеты, револьверы, винтовки, автоматы, карабины и ружья, а также пулеметы.

В большинстве случаев требуемые функциональные свойства поверхностей элементов огнестрельного оружия обеспечиваются покрытиями. В частности, хромовые покрытия обладают высокой твердостью и обеспечивают

износостойкость поверхностей таких элементов, как оружейные стволы и патронники. Цинковые и кадмиевые покрытия обеспечивают защиту стальных деталей от коррозии. Также широко распространены покрытия, получаемые химическими способами нанесения, например, химическим оксидированием с промасливанием (воронением или чернением) покрываются большинство наружных элементов стрелковых орудий [1, 2].

Толщина покрытия является одним из основных параметров качества покрытия, обеспечивающих его функциональное назначение. Недостаточная толщина покрытия не может обеспечить требуемую от элемента или детали стрелкового оружия антикоррозионную защиту или износостойкость. С другой стороны, повышенная толщина покрытия помимо необоснованного увеличения затрат на его получение

также может приводить к нарушению корректного функционирования отдельного узла или всей единицы оружия в целом, в частности, может быть нарушена взаимозаменяемость элементов, заклинивание при перезаряде или стрельбе и др.

Большое разнообразие применяемых покрытий со сложной геометрической формой покрываемых элементов, необходимость стопроцентного контроля в условиях массового производства обуславливают высокие требования к средствам контроля качества покрытий, в том числе к приборам для измерения их толщины. Отсутствие влияния электропроводности покрытия на результаты измерений, возможность проведения измерений толщины металлических и неметаллических покрытий, минимальное время обработки и вывода результатов измерения, износостойкость контактных поверхностей, высокая локальность измерений, круглосуточный режим работы в цеховых условиях при высоком уровне сетевых и импульсных наводок – вот лишь небольшая часть требований из технического задания на средство измерения толщины покрытий.

Цели настоящего исследования – получение оптимального соотношения геометрических параметров первичного измерительного преобразователя, обеспечивающего требуемый диапазон измерений при минимальной зоне измерения, а также разработка нового принципа возбуждения негармонического квазистатического магнитного поля и алгоритма обработки измерительной информации при выборе информативного параметра, отличного от амплитудного.

Алгоритмы возбуждения и преобразований

Для обеспечения указанных требований предприятий оборонно-промышленного комплекса России была проведена большая научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа по совершенствованию методов и средств неразрушающего контроля толщины покрытий с отстройкой от влияния мешающих параметров, созданию и исследованию соответствующих алгоритмов возбуждения низко- и высокочастотных магнитных полей и принципов обработки первичной измерительной информации. С применением современных средств компьютерного моделирования была выполнена оптимизация параметров геометрически подобных чувствительных элементов первичных измерительных преобразователей (ПИП) и разработана модель оптимального измерительного преобразователя, позволяющая в минимальные сроки проектировать преобразователи с требуемыми характеристиками.

Для измерения толщины широкой номенклатуры покрытий, в том числе обладающих электропроводящими свойствами, нанесенных на ферромагнитные электропроводящие основания, представляет интерес применение магнитоиндукционного метода измерения [3, 4].

Магнитоиндукционный метод измерения толщины покрытий h основан на определении изменения магнитного сопротивления участка цепи: первичный измерительный преобразователь – неферромагнитное покрытие – ферромагнитное основание.

Обобщенная структурная схема магнитоиндукционного толщиномера представлена на рис. 1.

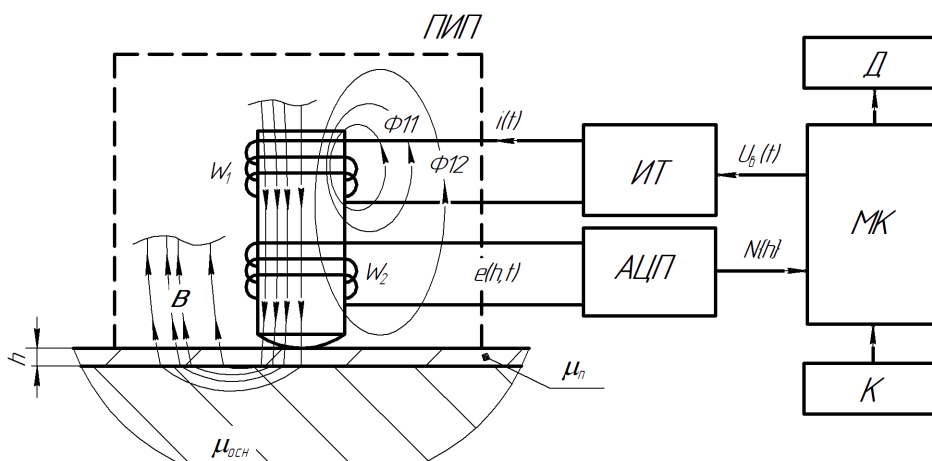


Рис. 1. Обобщенная структурная схема магнитоиндукционного толщиномера: ИТ – источник тока; ПИП – первичный измерительный преобразователь; АЦЦП – аналого-цифровой преобразователь с предварительным усилителем; МК – микроконтроллер; Д – дисплей; К – клавиатура

Fig. 1. Generalized structural configuration of magnetic induction thickness gauge: ИТ - Current Supply; ПИП - Primary Measuring Transducer; АЦЦП - Analog-Digital Converter with preamplifier; МК - Microcontroller; Д - Indicator; К - Keyboard

ПИП состоит из возбуждающей (первичной) W_1 и измерительной (вторичной) W_2 обмоток, намотанных на единый ферромагнитный сердечник, один из торцов которого является точкой контакта преобразователя с поверхностью объекта контроля.

В случае отсутствия взаимодействия ПИП с объектом контроля ЭДС, наводимая на измерительной обмотке, определяется выражением

$$e(t) = -\frac{d}{dt}\psi_{12}(t) = -\frac{di}{dt}(M_{12}),$$

где $\psi_{12}(t) = W_{21} = M_{12}i(t)$ – потокосцепление измерительной обмотки; M_{12} – коэффициент взаимной индукции.

Коэффициент M_{12} зависит от геометрических размеров, количества витков и взаимного расположения обмоток, а также от геометрических размеров и магнитной проницаемости μ_c контура магнитной цепи.

В случае приближения ПИП к ферромагнитному объекту контроля появляется вносимый коэффициент взаимной индукции $M_{вн}(h)$, при этом ЭДС, наводимая на измерительной обмотке, определяется выражением

$$e(t, h) = -\frac{di}{dt}(M_{12} + M_{вн}(h)).$$

Коэффициент взаимной индукции $M_{вн}$ в общем случае зависит от толщины покрытия h , геометрических характеристик ПИП, геометрических параметров основания (толщины основания, линейных размеров, радиуса кривизны), электромагнитных свойств материала покрытия и основания (электропроводности, магнитной проницаемости), электромагнитных свойств материалов ПИП [5, 6].

Традиционно в качестве сердечников применялись магнитомягкие стали, обладающие низкой твердостью, что превращало первичные преобразователи в расходные материалы при интенсивной эксплуатации в производственных условиях.

Для обеспечения износостойкости преобразователя твердость его контактной поверхности должна быть не менее 60 единиц твердости по шкале HRCэ. Данное требование существенно снижает круг материалов, которые могут быть применены при изготовлении сердечника. Так, например, ни одна из электротехнических сталей, использование которых предпочтительнее при изготовлении сердечника ПИП, не удовле-

творяет этим требованиям. Также не представлялось возможным достичь требуемой твердости контактной поверхности сердечника с применением покрытий, так как даже достаточно твердое покрытие, нанесенное на электротехническую сталь, не обеспечивает требуемой износостойкости, а само покрытие будет склонно к трещинообразованию и сколам. Для достижения требуемой твердости контактной поверхности ПИП сердечник изготавливается из конструкционной подшипниковой стали с последующей термической обработкой, обеспечивающей твердость порядка 61-63 HRCэ. Однако конструкционные стали в отличие от электротехнических имеют меньшую магнитную проницаемость и большую коэрцитивную силу, а также более высокую электропроводность.

Эти обстоятельства, а также необходимость исключить влияние электропроводности покрытия и обеспечить возможность проведения измерений в условиях сильных электромагнитных помех гальванических цехов потребовали разработки принципиально новых алгоритмов возбуждения и принципов обработки первичной измерительной информации ПИП с формированием новых первичных информативных параметров.

Традиционно в магнитоиндукционных толщиномерах применяется гармонический ток возбуждения $i(t) = I_0 \sin(2\pi ft)$, где I_0 – амплитуда тока возбуждения, f – частота тока возбуждения, в большинстве случаев находящаяся в диапазоне 50...400 Гц. В качестве первичного информативного параметра при этом используется амплитуда ЭДС $e(t, h)$.

Использование гармонического тока возбуждения и амплитуды ЭДС $e(t, h)$ в качестве первичного информативного параметра не позволяет исключить влияние возникающих в покрытии и основании вихревых токов на результаты измерений, поэтому, как следствие, на показания толщиномера оказывает влияние тип гальванического покрытия. Также ухудшается помехозащищенность, температурная и временная стабильность [7, 8].

Рассмотрим разработанный алгоритм возбуждения и обработки первичной измерительной информации ПИП, лишенный данных недостатков, временная диаграмма и алгоритм преобразования которого представлены на рис. 2.

Обмотка W_1 запитывается от управляемого МК цифрового ИТ переменным негармоническим током $i(t)$ амплитудой от $+I_0$ до $-I_0$ и от $-I_0$ до $+I_0$ без изломов.

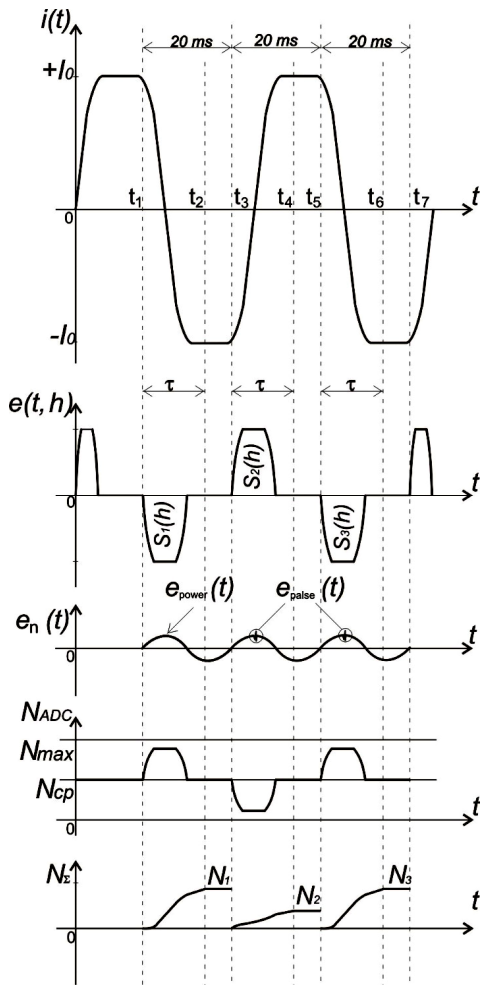


Рис. 2. Временная диаграмма и алгоритм преобразования

Fig. 2. Time base diagram and conversion algorithm

Применение симметричного тока возбуждения обеспечивает полный цикл перемагничивания объекта контроля, экрана и сердечника преобразователя по частной петле гистерезиса, что уменьшает влияние магнитных свойств материала основания объекта контроля на результаты измерений, повышает температурную стабильность, исключает временной дрейф, вызванный намагничиванием ПИП.

В качестве первичного информативного параметра используется площадь наведенной ЭДС $S(\tau, h)$.

В момент $t = 0$ ЦАП МК начинает формировать управляющее напряжение $U_n(t)$, преобразуемое в ток $i(t)$ источником тока ИТ. На измерительной обмотке наводится ЭДС $e(t, h)$, поступающая на вход АЦП с предварительным усилителем.

Оцифровывание $e(t, h)$ производится относительно средней точки напряжения питания

U_{Ref} (опорного напряжения, формируемого источником опорного напряжения микроконтроллера, соответствующего N_{cp} АЦП). Оцифровывание ЭДС $e(t, h)$ относительно U_{Ref} и суммирование отсчетов $n_j(t_j, h)$ производится на временном интервале $t_2 - t_1 = \tau$ (код $N_1(h)$):

$$N_1(t, h) = j = 1 n_j(t_j, h).$$

Аналогично производятся преобразования на временных интервалах $t_4 - t_3 = \tau$ (код $N_2(h)$) и $t_5 - t_4 = \tau$ (код $N_3(h)$). Все три цикла преобразования выполняются с интервалом 20 мс.

После этого микроконтроллер вычисляет код:

$$\begin{aligned} \Delta N(h) &= [N_1(h) - N_2(h)] + \\ &+ [N_3(h) - N_2(h)] = \\ &= N_1(h) + 2N_2(h) + N_3(h) = \\ &= K [S_1(h) + 2S_2(h) + S_3(h)]. \end{aligned}$$

Использование циклов преобразования, кратных 20 мс, исключает влияние наводок от промышленной сети частотой 50 Гц. Использование площади ЭДС в качестве первичного информативного параметра ПИП позволяет существенно уменьшить влияние импульсных и высокочастотных помех от промышленного оборудования. Полный цикл преобразования по данному алгоритму составляет 80 мс, что с учетом временных задержек на обработку позволяет вывести на дисплей толщиномера первый достоверный результат измерения толщины покрытия менее чем за 600 мс.

Оптимизация геометрических параметров первичных измерительных преобразователей

Для повышения чувствительности, уменьшения зоны измерения преобразователя и снижения влияния краевого эффекта на результаты измерений толщины покрытий на малогабаритных и сложнопрофильных элементах стрелкового оружия была выполнена оптимизация геометрических параметров чувствительного элемента и магнитной цепи ПИП.

На рис. 3 представлена геометрическая модель абсолютного экранированного магнитоиндукционного ПИП.

Симметрия магнитного поля, обеспечиваемая аксиальной конструкцией ПИП, создает зону измерения в виде окружности. Диаметр зоны

измерения в первом приближении равен внутреннему диаметру экрана \varnothing_3 . Сферическая форма контактной поверхности сердечника позволяет допускать отклонение преобразователя от нормали в момент измерения без появления дополнительной погрешности [9, 10].

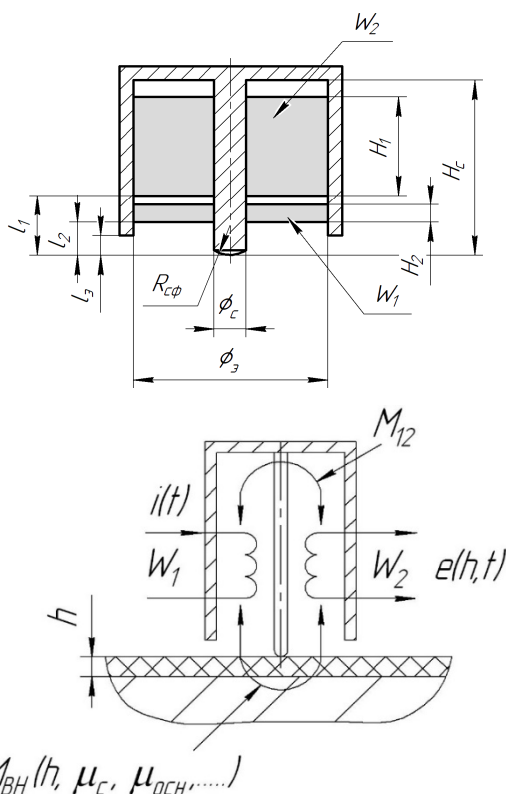


Рис. 3. Геометрическая модель абсолютного экранированного магнитоиндукционного ПИП

Fig. 3. Geometric model of absolute screened magnetic induction primary measuring transducer

Под оптимальными геометрическими параметрами ПИП подразумеваются такие параметры и их соотношения, при которых достигается максимальная чувствительность s в диапазоне измеряемой толщины при минимально возможном диаметре зоны контроля \varnothing_3 :

$$\left(s(h') = \frac{\partial}{\partial h} \left(\frac{M_{\text{вн}}(h')}{M_{\text{вн}}(h' = \infty)} \right) @ \right. \\ \left. @ h' = \frac{h}{\varnothing_3} @ s(0 \dots h_{\text{max}}) \rightarrow \max @ \varnothing_3 \rightarrow \min \right). \quad (1)$$

Аналитическое выражение, описывающее поле экранированного магнитоиндукционного преобразователя с ферромагнитным сердечником, представляет собой систему дифференциальных уравнений первого и второго порядка, вывод и анализ которых не представляется воз-

можным в связи с большой математической сложностью [11].

Для оптимизации параметров ПИП был применен метод конечно-элементного моделирования магнитного поля. Данный метод позволяет определить необходимую для расчета чувствительности s магнитную индукцию и напряженность магнитного поля для ПИП со сложной геометрией внешних и внутренних границ, имеющих подобласти с различными электромагнитными свойствами.

Так, по результатам моделирования можно выделить следующие основные оптимальные соотношения геометрических параметров ПИП, удовлетворяющие условию (1): $\varnothing_c / \varnothing_3 = 0,5 - 0,6$; $H_2 / \varnothing_c \rightarrow 0$.

В физически реализуемых конструкциях ПИП с применением доступных на данный момент технологий достичь обозначенных геометрических соотношений возможно только для относительно больших преобразователей с диаметром экрана $\varnothing_3 \geq 6$ мм.

Для малогабаритных ПИП с диаметром экрана \varnothing_3 менее 4 мм в силу увеличения относительных размеров стенок каркаса и обмоток чувствительного элемента достигаются следующие соотношения: $\varnothing_c / \varnothing_3 \leq 0,4$; $H_2 / \varnothing_c \geq 1,3$.

На рис. 4 представлена зависимость $\frac{M_{\text{вн}}(h)}{M_{\text{вн}}(h = \infty)}$ от $h' = h / \varnothing_3$ для ПИП с диаметром экрана $\varnothing_3 = 3,5$ мм в случае оптимальных геометрических соотношений (кривая II) и для случая соотношения $\varnothing_c / \varnothing_3 = 0,45$; $H_2 / \varnothing_c \geq 1,5$ (кривая I).

Из представленных зависимостей видно, что чувствительность ПИП с оптимальными параметрами в среднем в два раза больше, чем у ПИП с аналогичным диаметром экрана, но иным соотношением геометрических параметров практически во всем диапазоне измерения h' . Расхождение результатов экспериментальных исследований с расчетными не превышает 5-7 %, что подтверждает состоятельность разработанной модели для расчетов.

На рис. 5 представлен выполненный по результатам моделирования и расчетов эскиз чувствительного элемента магнитоиндукционных преобразователей ИДОК, ИД1 производства компании «КОНСТАНТА».

Данные преобразователи обладают следующими основными соотношениями геометрических параметров: $\varnothing_c / \varnothing_3 = 0,46$; $H_2 / \varnothing_c \geq 1,25$.

Оптимизация геометрии данного ПИП позволила при уменьшении диаметра зоны измерения с 4 до 3,5 мм увеличить его диапазон измерения до 0,3...2,0 мм. Дальнейшее развитие

технологий позволит уменьшить размеры обмоток преобразователя и приблизить соотношение его геометрических параметров к оптимальным.

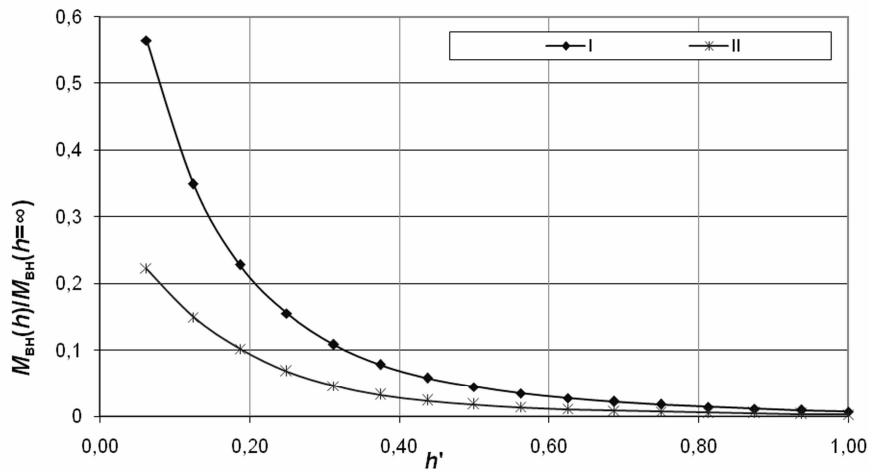


Рис. 4. Зависимости $\frac{M_{BH}(h)}{M_{BH}(h=\infty)}$: I – ПИП с $\varnothing_c/\varnothing_3 = 0,45$; $H_2/\varnothing_c \geq 1,5$;

II – ПИП с оптимальными геометрическими соотношениями $\varnothing_c/\varnothing_3 = 0,5$; $H_2/\varnothing_c = 0$

Fig. 4. $\frac{M_{BH}(h)}{M_{BH}(h=\infty)}$ Relation curves

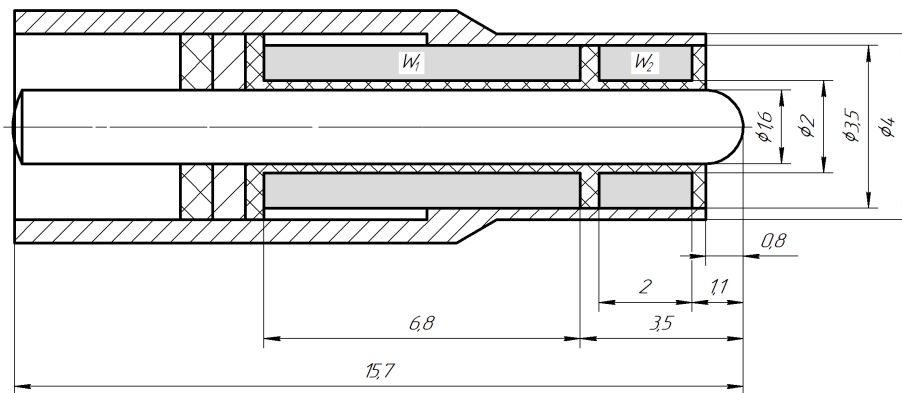


Рис. 5. Эскиз чувствительного элемента магнитоиндукционных преобразователей ИД0К, ИД1 производства компании «КОНСТАНТА»

Fig. 5. Preliminary drawing of the sensor of magnetic induction transducers ИД0К, ИД1 manufactured by Constanta Ltd

В процессе оптимизации геометрических параметров ПИП была получена эмпирическая зависимость связи диапазона измерения с диаметром экрана преобразователя:

$$\varnothing_3 \approx 1,4h_{\max} + 0,2.$$

Использование данной зависимости, а также соблюдение оптимальных соотношений геометрических параметров позволяет в сжатые сроки спроектировать абсолютный экранированный

магнитоиндукционный преобразователь на необходимый диапазон измерения с минимально возможными габаритами.

Выводы

Таким образом, предложенная модель чувствительного элемента магнитоиндукционных первичных измерительных преобразователей и методика расчета их геометрических характеристик для выбранных износостойких конструкционных материалов магнитной системы

в совокупности с новыми негармоническими принципами возбуждения магнитных полей при использовании в качестве первичного информативного параметра площадей наведенных ЭДС и тактировании цикла преобразования с привязкой к частоте сетевого напряжения позволили разработать малогабаритные измерительные преобразователи для использования в поточных производствах при неразрушающем контроле толщины разнообразных функциональных покрытий малогабаритных и сложнопрофильных деталей современного и перспективного стрелкового оружия, проектируемого и производимого концерном «Калашников».

Библиографические ссылки

1. Галаган Л. А., Сахратов Р. Ю. Обоснование назначенных технических параметров автомата «АК-47» // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 3. С. 51–58. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-51-58.
2. Галаган Л. А., Сахратов Р. Ю., Чирков Д. В. Эволюция дульных газовых устройств автоматов серии «АК» // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 3. С. 44–50. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-44-50.
3. Сясько В. А. Теория и методы создания электромагнитных приборов контроля толщины покрытий и стенок изделий. СПб.: Константа, 2015. 372 с.
4. Методы и средства электромагнитной толщинометрии покрытий металлических изделий / В. А. Сясько [и др.] // Контроль. Диагностика. 2017. № 12. С. 10–17. DOI: 10.14489/td.2017.12.
5. Никольский В. В. Теория электромагнитного поля. М.: Высш. шк., 1961. 372 с.
6. Индукционная толщинометрия / А. Л. Дорофеев [и др.]. М.: Энергия, 1969. 152 с.
7. Обеспечение единства измерений толщины металлических покрытий вихретоковыми фазовыми толщиномерами при их градуировке и поверке / С. С. Голубев [и др.] // Измерительная техника. 2017. № 6. С. 25–28. DOI: 10.1007/s11018-017-1233-0.
8. Отстройка от электропроводности основания при измерении толщины токопроводящих покрытий методом вихревых токов / В. Г. Атавин [и др.] // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 58–64. DOI: 10.1134/S1061830918010023.
9. Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий. М.: Изд-во стандартов, 2004. 264 с.
10. Обеспечение единства измерений геометрических параметров поверхностных дефектов / Л. С. Бабаджанов [и др.] // В мире НК. 2018. № 3. С. 64–66. DOI: 10.12737/article_5b8cf87a0523a7.70603079
11. К вопросу корректности прямой и обратной задач магнитостатики / В. В. Дякин [и др.] // Дефек-

тоскопия. 2017. № 7. С. 35–45. DOI: 10.1134/S1061830917070051.

References

1. Galagan L.A., Sakhratov R.Yu. [Justification of Assigned Technical Parameters of AK-47]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 51-58 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-51-58.
2. Galagan L.A., Sakhratov R.Yu., Chirkov D.V. [Evolution of Gas Muzzle Devices on AK Series]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 44-50 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-44-50.
3. Syasko V.A. *Teoriya i metody sozdaniya elektromagnitnykh priborov kontrolya tolshchiny pokryti i istenok izdelii* [Theory and Methods of Developing Electromagnetic Instruments for Testing the Thickness of Coatings and Walls of Products]. St. Petersburg, Konstanta Publ., 2015, 372 p. (in Russ.)
4. Syasko V.A., Golubev S.S., Potapov A.I., Smirnova N.I. [Methods and means of electromagnetic thickness gauging of coatings on metallic products]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2017, no. 12, pp. 10-17 (in Russ.). DOI: 10.14489/td.2017.12.
5. Nikol'skii V.V. *Teoriya elektromagnitnogo polya* [Electromagnetic Field Theory]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1964, 372 p. (in Russ.)
6. Dorofeev A.L., Nikitin A.I., Rubin A.L. *Indukcionnaya tolshhinometriya* [Induction thickness measurement]. Moscow, Energiya Publ., 1969, 152 p. (in Russ.)
7. Golubev S.S., Smirnova N.I., Skladanovskaya M.I. [Providing the uniformity of measurements of the thickness of metallic coatings by eddy-current phase thickness gages during their calibration and verification]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2017, no. 6, pp. 25-28 (in Russ.). DOI: 10.1007/s11018-017-1233-0.
8. Atavin V.G., Uzkiikh A.A., Iskhuzhin R.R. [Tuning Out from Base Electric Conductivity in Conductive-Coating Thickness Gauging]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, no. 1, pp. 58-64 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1061830918010023.
9. Babadzhanov L.S., Babadzhanova M.L. *Metrologicheskoe obespechenie izmerenii tolshchiny pokrytii* [Metrological Assurance of Coatings Thickness Measurement]. Moscow, IPC Publishing House of Standards, 2004, 264 p. (in Russ.)
10. Babadzhanov L.S., Babadzhanova M.L. [Ensuring the Uniformity of Measurements of Geometrical Parameters of Surface Defects]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 64-66 (in Russ.). DOI: 10.12737/article_5b8cf87a0523a7.70603079
11. Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevskii V.Y. [On the well-posedness of direct and inverse problems of magnetostatics. Part I]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, no. 7, pp. 35-45 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1061830917070051.

Experience of Developing Instruments for Measuring Firearm Functional Coating Thickness

V.A. Syas'ko, DSc in Engineering, Constanta Ltd., St. Petersburg, Russia

S.S. Golubev, PhD in Engineering, Federal Agency on Technical Regulating and Metrology, Rosstandart, Moscow, Russia

A.E. Ivkin, PhD in Engineering, Constanta Ltd., St. Petersburg, Russia

The paper deals with the task of measuring the thickness of various functional non-ferromagnetic coatings, used in firearm manufacturing. In order to achieve the goal, the magnetic induction method for measuring the coating thickness is proposed. The paper identifies the main sources of errors, related to external factors and measurement object unique features affecting the measurement results. Specifically, it was revealed that the measurement results are significantly impacted by the geometry of the test object related to the diameter of the transducer measuring zone, allowing to formulate the criteria of optimizing its geometric parameters.

The paper gives the results of optimizing the primary measuring transducer geometric parameters ratio and the dependence, allowing to determine the transducer measuring zone diameter for the predefined thickness range.

Transducer excitation with nonharmonic electromagnetic field and using the induced electromotive force area as the primary informative signal and clocking of the conversion cycle with reference to mains voltage frequency gives the opportunity to exclude coating and base electric conductivity effect on measurement results, to increase the measuring instrument immunity to interference, time and temperature stability as well as to use the wear-resisting alloy steel as a transducer core material.

The totality of the proposed solutions allowed to develop a thickness gauge with the miniature measuring transducer to use in Kalashnikov enterprises serial production with non-destructive thickness testing of various functional coatings of small-sized and geometrically-complex parts for modern and advanced firearm types.

Keywords: magnetic induction thickness gauge, primary measuring transducer, algorithm, optimal geometry.

Получено 01.08.2019

Образец цитирования

Сясько В. А., Голубев С. С., Ивкин А. Е. Опыт разработки средств измерения толщины функциональных покрытий огнестрельного стрелкового оружия // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 11–18. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-11-18.

For Citation

Syas'ko V.A., Golubev S.S., Ivkin A.E. [Experience of developing instruments measuring firearm functional coatings thickness]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 11-18 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-11-18.