

## КАЛИБРОВКА МАГНИТОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДАТЧИКА ВНУТРИТРУБНОГО МАГНИТНОГО ДЕФЕКТОСКОПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Р. Е. Вавилов<sup>1</sup>, В. А. Гольдберг<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>1,2</sup> АО «Газпром диагностика», Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> revavilov@gmail.com, <sup>2</sup> v.goldberg@diagnostika.gazprom.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена необходимостью разработки процедуры калибровки магнитоизмерительных датчиков внутритрубных магнитных дефектоскопов с учетом возможности автоматизации процесса калибровки программно-аппаратными средствами, поскольку отсутствует подходящее комплексное решение ввиду специфики сферы применения данных датчиков. Целью работы является разработка процедуры калибровки магнитоизмерительных датчиков, а также математического обеспечения для возможности численного моделирования отдельных компонентов калибратора. *Материалы и методы.* Описание измерительных процедур проводится с помощью математического аппарата метрологического анализа и синтеза. Для моделирования калибровочного магнитного поля меры магнитной величины калибратора методом конечных элементов рассмотрен способ задания математической модели, описывающей электромагнитные свойства катушки на постоянном токе и на переменном токе низкой частоты. Приведены критерии оценки результатов моделирования калибровочного магнитного поля. *Результаты.* Предложен способ калибровки магнитоизмерительных датчиков, основанный на использовании калибровочного электромагнитного поля гармонической формы, формируемого мерой магнитной величины. Предложен подход к определению необходимых габаритных размеров меры магнитной величины на основе конечно-элементного моделирования магнитного поля меры. *Выводы.* Предложенный способ калибровки отличается удобством в его автоматизации. По каждому магнитоизмерительному преобразователю в результате калибровочных измерений формируется набор значений во всем диапазоне измерений преобразователя. Выбор именно гармонической функции для формирования калибровочного магнитного поля обусловлен также удобством аппаратной реализации процедуры формирования входного сигнала меры магнитной величины. Предлагаемая в данной работе модель катушки меры адекватна для определения необходимых габаритов и нужного диапазона изменения выходной величины меры при постоянном токе. В случае же переменного и импульсного тока модель является неадекватной, так как не учитывается влияние индуктивности и сопротивления катушки. Однако низкая частота калибровочного поля (не более десятков–сотен герц) позволяет пренебречь дополнительным анализом переходных процессов в цепи.

**Ключевые слова:** калибровка датчиков внутритрубного дефектоскопа, калибратор магнитоизмерительных датчиков, моделирование магнитного поля методом конечных элементов, катушки Гельмгольца, магнитные измерения

**Для цитирования:** Вавилов Р. Е., Гольдберг В. А. Калибровка магнитоизмерительного датчика внутритрубного магнитного дефектоскопа с применением электромагнитного поля гармонической формы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 32–42. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-4

## PIPELINE INSPECTION GAUGE MAGNETIC SENSOR CALIBRATION USING TIME-HARMONIC ELECTROMAGNETIC FIELD

R.E. Vavilov<sup>1</sup>, V.A. Goldberg<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia

<sup>1,2</sup> JSC "Gazprom diagnostika", Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> revavilov@gmail.com, <sup>2</sup> v.goldberg@diagnostika.gazprom.ru

**Abstract.** *Background.* The relevance of the topic is due to the necessity to develop a calibration procedure for pipeline inspection gauge magnetic sensor taking into account the possibility of automating the calibration process with software

and hardware, since there is no suitable integrated solution due to the specifics of the sensors application. The aim of the work is to develop the magnetic sensor calibration procedure, as well as to provide the mathematical support for individual calibrator components numerical modeling. *Materials and methods.* The measurement procedures are described using the mathematical apparatus of metrological analysis and synthesis. To simulate a calibration field of a measure of magnetic quantity using the finite element method, we consider a method for creating a mathematical model describing the electromagnetic properties of a coil with direct current and low-frequency alternating current. The criteria for evaluating the results of the calibration magnetic field simulation are given. *Results.* A method for magnetic sensors calibration based on the use of a time-harmonic electromagnetic field generated by a measure of magnetic quantity is proposed. An approach to determine the required overall dimensions of a measure of magnetic quantity based on the finite element simulation of the measure magnetic field is proposed. *Conclusions.* The proposed calibration method is convenient due to its focus on automation. As a result of calibration measurements, a set of values is measured for each magnetic measuring transducer in the entire transducer measuring interval. The choice of a harmonic function for the calibration magnetic field generation is also due to the convenience of the hardware implementation of the procedure for generating the input signal of a measure of magnetic quantity. The measure coil model proposed in this paper is adequate to determine the required dimensions and the desired range of the output value variation of the measure at direct current. In the case of alternating and pulsed current, the model is inadequate, since the influence of inductance and winding resistance is not taken into account. However, the low frequency of the calibration field (no more than tens to hundreds of Hz) makes it possible to neglect additional analysis of transients in the circuit.

**Keywords:** pipeline inspection gauge sensor calibration, magnetic sensor calibrator, finite element modeling of magnetic field, Helmholtz coils, magnetic field measurements

**For citation:** Vavilov R.E., Goldberg V.A. Pipeline inspection gauge magnetic sensor calibration using time-harmonic electromagnetic field. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):32–42. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-4

### Введение

Одной из важнейших задач, решаемых в целях обеспечения исправной работы газотранспортной системы, является проведение периодической диагностики технического состояния линейной части эксплуатирующихся трубопроводов. Для обнаружения дефектов стальных трубопроводов широко применяются магнитные методы диагностики, основанные на магнитных измерениях (МИ), при проведении которых регистрируются аномальные магнитные поля, возникающие вследствие наличия дефектов в стенках ферромагнитных труб. Широко применяемой в газовой промышленности разновидностью магнитной диагностики трубопроводов является внутритрубная магнитная диагностика (ВМД).

Получение достоверных результатов ВМД неразрывно связано с необходимостью обеспечения требуемой точности МИ, проводимых в процессе ВМД. Присутствующие в результатах МИ погрешности могут являться причиной увеличения количества ошибок первого и второго рода при анализе и интерпретации диагностических данных. Вследствие этого снижается степень доверия к полученным результатам ВМД. В применяемых в процессе ВМД магнитных дефектоскопах (МД) для проведения МИ зачастую используются аналоговые магнитоизмерительные датчики внутритрубных магнитных дефектоскопов (МДВМД).

Конструктивно МДВМД представляет собой устройство, содержащее следующие компоненты:

- совокупность магнитоизмерительных преобразователей – первичных измерительных преобразователей Холла (МИП);
- мультиплексор, коммутирующий выход конкретного МИП с выходом МДВМД;
- схему питания МДВМД.

Как видно, особенностью МДВМД является то, что его выходной сигнал зависит не только от входной величины (воздействующего магнитного поля), но и от выставленного дефектоскопом адреса МИП.

Необходимо отметить, что МДВМД является сменным элементом МД, нередко выходит из строя в процессе эксплуатации и часто подлежит замене. Использование в МД конкретного МДВМД должно быть обусловлено не только установленной принципиальной работоспособностью МДВМД, но и фактом того, что метрологические характеристики (МХ) МДВМД удовлетворяют установленным требованиям к точности МИ. В противном случае применять рассматриваемый МДВМД в МД недопустимо.

В связи с этим важной задачей при подготовке МД к проведению ВМД является обеспечение метрологической исправности каждого используемого в дефектоскопе МДВМД.

Как известно, одним из способов обеспечения метрологической исправности средств измерений является коррекция характеристики преобразования по результатам калибровочных измерений [1]. Для обеспечения метрологической исправности МДВМД можно предложить различные варианты реализации процедуры калибровки, полагаясь на хорошо известные основные методы поверки и калибровки средств измерений [2, 3].

В наиболее очевидном случае МДВМД может быть оснащен прецизионным МИП, выходной сигнал которого является эталонным по отношению к остальным рабочим МИП. Калибровочные измерения выполняются в высокооднородном калибровочном магнитном поле (КМП), формируемым мерой магнитной величины (ММВ). При этом ММВ является внешним вспомогательным по отношению к МДВМД устройством (оснащение МДВМД встроенной ММВ в данной работе не рассматривается, так как предположительно этому препятствует множество факторов: габаритные размеры ММВ, способной формировать КМП необходимой напряженности, энергопотребление ММВ и др.). Результаты измерений по каждому рабочему МИП сравниваются с результатом измерений с помощью эталонного МИП. По результатам сравнения определяются необходимые величины поправок по каждому МИП и проводится коррекция их характеристики преобразования. Недостатком такого подхода является необходимость изменения конструкции МДВМД, что приводит к дополнительным материальным затратам и трудозатратам на разработку и изготовление МДВМД. Выход из строя эталонного МИП приводит к невозможности проведения процедуры калибровки до проведения соответствующего ремонта МДВМД, а следовательно, МДВМД по результатам предпусковой подготовки МД может быть автоматически признан неисправным, при этом же остальные его рабочие МИП могут быть исправны в принципе. Также при таком подходе требуется программно реализовать особый режим калибровки МД, значительно отличающийся от обычного режима работы МД, поскольку в рамках такой калибровки предполагается синхронизировать процесс калибровочных измерений с процессом последовательного ступенчатого изменения напряженности КМП с заданным шагом во всем диапазоне измерений МИП. Необходимость синхронизации процессов формирования ступенчатого КМП и калибровочных измерений создает дополнительные затруднения в автоматизации процесса калибровки МДВМД.

Целесообразным является иной подход: оснащение ММВ контрольным эталонным МИП и сравнение показаний контрольного МИП с показаниями МИП МДВМД в заданном КМП во всем диапазоне измерений. Однако в данном случае также присутствуют затруднения в автоматизации процесса, так как необходимо обеспечить сравнение показаний с контрольным МИП ММВ в автоматическом режиме средствами самого МД, что, в частности, требует изменения электронных блоков МД.

В связи с описанными трудностями, а также учитывая представленную конструктивную особенность МДВМД, актуальной является задача разработки процедуры калибровки МДВМД, а также устройства, способствующего реализации такой процедуры – калибратора МДВМД. При этом важно отметить, что процедура калибровки должна обеспечивать снижение систематической погрешности, а сам процесс калибровки должен выполняться надлежащим образом, поскольку неудовлетворительная калибровка приводит к противоположному ожидаемому эффекту – увеличению систематической погрешности [4].

В данной работе предлагается использовать калибровку МДВМД с помощью гармонического КМП, формируемого внешней ММВ. При этом предлагается использовать сравнение показаний не с эталонным МИП, а с известной моделью сигнала КМП исходя из допущения, что формируемое с помощью ММВ КМП достаточно близко к своей математической модели. Далее подробно рассматривается именно процедура калибровки, вопросы разработки калибратора, а именно его ММВ, затрагиваются частично.

### *Процедура калибровки магнитоизмерительных датчиков*

Для описания предлагаемой процедуры калибровки МДВМД рассмотрим следующую измерительную ситуацию. Пусть на вход ММВ поступает гармонический сигнал в виде переменного напряжения  $u_{\text{ММВ}}(t)$ :

$$u_{\text{ММВ}}(t) = u_{\text{max}} \sin(\omega_{\text{КМП}} t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $\omega_{\text{КМП}}$  – угловая частота;  $\varphi_0$  – начальная фаза.

На практике в лабораторных условиях сигнал  $u_{\text{ММВ}}(t)$  формируется с помощью функционального генератора (например, аналоговым способом или на основе прямого цифрового синтеза). Частота сигнала  $f_{\text{КМП}} = \omega_{\text{КМП}}/2\pi$  предполагается не более десятков-сотен герц (так,

например, при формировании сигнала удобно использовать промышленную частоту 50 Гц), что значительно меньше частоты опроса МДВМД (порядка 1 кГц) и позволяет уверенно провести дискретизацию входного сигнала. Далее считается, что сигнал  $u_{\text{ММВ}}(t)$  сформирован достаточно точно и практически полностью описывается выражением (1), т.е. погрешность формирования сигнала несущественна и ею допустимо пренебречь.

В свою очередь ММВ преобразует входной электрический сигнал  $u_{\text{ММВ}}(t)$  в переменное калибровочное электромагнитное поле (КМП), напряженность  $H_{\text{КМП}}(t)$  которого определяется следующим образом:

$$H_{\text{КМП}}(t) = L_{\text{ММВ}}[u_{\text{ММВ}}(t)] = H_{\text{max}} \sin(\omega_{\text{КМП}}t + \varphi_{0\text{КМП}}), \quad (2)$$

где  $L_{\text{ММВ}}$  – оператор, представляющий выполняемое ММВ преобразование,  $H_{\text{max}} = f(u_{\text{max}})$  и  $\varphi_{0\text{КМП}} = \varphi_0 + \varphi_{\Delta\text{КМП}}$  – амплитуда и начальная фаза КМП гармонической формы соответственно;  $\varphi_{\Delta\text{КМП}} = f(\omega_{\text{КМП}})$  – частотно-зависимый фазовый сдвиг КМП, обусловленный запаздыванием протекающего в цепи ММВ электрического тока относительно напряжения вследствие индуктивности катушек ММВ. При этом считается, что процедура  $L_{\text{ММВ}}[u_{\text{ММВ}}(t)]$  обеспечивает формирование высокооднородного КМП, т.е. направление распространения КМП в рабочей области ММВ перпендикулярно плоскости МДВМД. Таким образом, входным воздействием для МДВМД является сигнал  $H_{\text{КМП}}(t)$ .

Описание измерительных процедур удобно проводить с помощью математического аппарата метрологического анализа и синтеза [5]. Так, циклический опрос МИП МДВМД в операторной форме описывается следующей системой уравнений:

$$\{u_{\text{МИП}_l}(t) = K_l R_{\text{МИП}_l} H_{\text{КМП}_l}(t)\}_{l=1}^n,$$

где  $u_{\text{МИП}_l}(t)$  – выходное напряжение  $l$ -го МИП;  $K_l$  – оператор подключения  $l$ -го МИП к выходу МДВМД;  $R_{\text{МИП}_l}$  – оператор  $l$ -го магнитоизмерительного преобразования (преобразование магнитной величины в электрическую);  $n$  – количество МИП в МДВМД.

Процедура калибровки подразумевает не только формирование КМП калибратором, но и подключение МДВМД к калибратору с целью измерения напряженности КМП. Тогда процесс измерения напряженности КМП имеет вид системы уравнений:

$$\{H_{\text{КМП}_l}^* = L_{\text{КМП}_l}[H_{\text{КМП}}(t)] = R_m R_{\text{а-ц}} R_{\text{нп}} K_l R_{\text{МИП}_l} H_{\text{КМП}_l}(t)\}_{l=1}^n,$$

где  $H_{\text{КМП}_l}^*$  – результат измерения напряженности КМП по  $l$ -му МИП;  $L_{\text{КМП}_l}(\cdot)$  – реализуемая по  $l$ -му МИП процедура измерений КМП;  $R_{\text{нп}}$  – оператор нормализации (нормирующее преобразование);  $R_{\text{а-ц}}$  – оператор аналого-цифрового преобразования;  $R_m$  – оператор масштабирования (выражение результата в единицах напряженности магнитного поля).

Пусть  $H_{\text{МИП}_l}^* = \{H_{\text{КМП}_l}^*(t_{ij})\}$  – множество результатов измерений величины  $H_{\text{КМП}_l}^*$   $l$ -м МИП для дискретных моментов времени  $t_{ij} \in T = \{t_{ij}\}_{j=1}^m$ . В случае равномерной дискретизации каждый момент времени  $t_{ij}$  определяется следующим образом:

$$t_{ij} = t_{i1} + j \cdot \Delta t_d,$$

где  $t_{i1}$  – начальный момент времени (момент времени начала измерений для  $l$ -го МИП);  $\Delta t_d = t_{i2} - t_{i1} = \frac{1}{f_d}$  – период дискретизации сигнала;  $f_d$  – частота дискретизации сигнала.

Продолжительность дискретизации сигнала по каждому  $l$ -му МИП по дискретным отсчетам времени составляет  $\Delta t_{\text{прод}} = t_{im} - t_{i1}$ , при этом объем выборки  $m$  определяется выбранной  $f_d$ :

$$m = f_d \Delta t_{\text{прод}}.$$

Множество  $H_{\text{МИП}_l}^*$  рассматривается как выборка значений, по которым проводится интерполяция данных с целью определения функции  $H_{\text{КМП}_l}^*(t)$  – аналитического выражения

для напряженности КМП на интервале времени  $\Delta t_{\text{прод}}$ . С учетом выражения (2) для каждого  $l$ -го МИП результат интерполяции  $H_{\text{мп}_l}^*$  в наилучшем случае должен представлять собой гармоническую функцию:

$$H_{\text{мп}_l}^*(t) = L_{\text{инт}}^n[H_{\text{мп}_l}^*] = H_{\text{макс}_l}^* \sin(\omega_{\text{мп}_l}^*(t_{l1} + t) + \varphi_0 + \varphi_{\Delta\text{кмп}_l}^*), t \in [t_{l1}, t_{lm}],$$

где  $L_{\text{инт}}^n(\cdot)$  – процедура интерполяции дискретного сигнала с наилучшим результатом в виде гармонической функции;  $H_{\text{макс}_l}^* = \max(H_{\text{мп}_l}^*(t))$  – результат измерения амплитуды КМП;  $\omega_{\text{мп}_l}^* = L_{\text{чм}}[H_{\text{мп}_l}^*(t)]$  – результат измерения частоты КМП;  $L_{\text{чм}}(\cdot)$  – процедура измерения частоты КМП;  $\varphi_{\Delta\text{кмп}_l}^* = L_{\text{фм}}[H_{\text{мп}_l}^*(t)]$  – результат измерения фазового сдвига КМП;  $L_{\text{фм}}(\cdot)$  – процедура измерения фазового сдвига КМП. При этом нахождение  $\omega_{\text{мп}_l}^*$  и  $\varphi_{\Delta\text{кмп}_l}^*$  в контексте решаемой задачи не представляет интереса и далее не рассматривается.

Поскольку реализуемая процедура интерполяции  $L_{\text{инт}}(\cdot)$ , вообще говоря, может существенно отличаться по результатам от желаемой процедуры  $L_{\text{инт}}^n(\cdot)$ , для практических целей предпочтительно рассматривать такие методы интерполяции, которые позволяют достаточно точно восстанавливать именно гармонические функции, например интерполяция кубическими сплайнами, тригонометрическая интерполяция, *sinc*-интерполяция [6, 7] и др.

Если считать, что формируемое с помощью ММВ КМП в действительности достаточно близко к своей математической модели (2), а именно отклонение значений амплитуды и частоты незначительно по отношению к расчетным значениям, то для каждого  $l$ -го МИП возможно определить модель эталонного сигнала следующим образом. Пусть  $\varphi_{0\text{кмп}_l}^*$  – результат измерения начальной фазы КМП. Для каждого  $l$ -го МИП величина  $\varphi_{0\text{кмп}_l}^*$  оценивается следующим образом:

$$\varphi_{0\text{кмп}_l}^* = \arcsin\left(\frac{(H_{\text{мп}_l}^* - \overline{H_{\text{мп}_l}^*})}{(\max(H_{\text{мп}_l}^*) - \overline{H_{\text{мп}_l}^*})}\right),$$

где  $H_{\text{мп}_l}^*$ ,  $\overline{H_{\text{мп}_l}^*} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_{\text{мп}_l^j}^*$  и  $\max(H_{\text{мп}_l}^*)$  – первый элемент, выборочное среднее и наибольший элемент выборки  $H_{\text{мп}_l}^*$  соответственно. Наличие в аргументе обратной тригонометрической функции  $\arcsin(\cdot)$ , величин  $\overline{H_{\text{мп}_l}^*}$  и  $\max(H_{\text{мп}_l}^*)$  необходимо для учета влияния погрешности смещения нуля и нормализации аргумента соответственно.

Величина  $\varphi_{0\text{кмп}_l}^*$  используется при формировании  $H_{\text{кмп}_l}(t)$  – модели эталонного сигнала для  $l$ -го МИП:

$$H_{\text{кмп}_l}(t) = H_{\text{макс}_l} \sin(\omega_{\text{кмп}_l} t + \varphi_{0\text{кмп}_l}^*).$$

Полученное в результате интерполяции аналитическое выражение для  $H_{\text{кмп}_l}^*(t)$  и сформированная модель эталонного сигнала  $H_{\text{кмп}_l}(t)$  позволяют сформировать две выборки значений и с помощью нелинейного метода наименьших квадратов (НМК) построить зависимость  $H_{\text{кмп}_l}^*(H_{\text{кмп}_l})$ , которая рассматривается как результат определения характеристики преобразования  $l$ -го МИП. Полученная таким образом зависимость используется для определения необходимых величин поправок и проведения коррекции характеристики преобразования  $l$ -го МИП известными стандартными алгоритмическими способами. Представленная процедура калибровки выполняется для каждого МИП МДВМД.

Удобством предложенного способа калибровки является то, что задание входного воздействия в виде гармонического КМП позволяет охватить весь диапазон измерений без необходимости пошагового алгоритмического изменения величины входного воздействия, что, в свою очередь, способствует возможности реализации процесса автоматической калибровки. Предполагается, что режим калибровки МДВМД встроенного программного обеспечения МД алгоритмически незначительно отличается от режима измерений: дефектоскопом осуществляется последовательность измерений напряженности КМП в течение заданного интервала времени, по истечении времени осуществляется вычисление необходимых поправок по каждому МИП.

Данное обстоятельство позволяет исключить необходимость пошагового изменения величины КМП оператором, контролирующим выполнение процедуры калибровки извне.

### Модель для вычисления распределения магнитного поля меры

Важной частной задачей является определение необходимых габаритных размеров ММВ, поскольку необходимо обеспечить такой рабочий объем однородного КМП, в котором возможно беспрепятственно разместить МДВМД с определенными линейными размерами. Так как ММВ представляет собой пару катушек Гельмгольца, то фактически необходимо определить форму и размеры катушек, при этом желательно минимизировать количество слоев намотки с целью облегчения их изготовления. В связи с этим предлагается следующий подход к определению необходимых габаритных размеров ММВ.

Для описания подхода рассмотрим два случая намотки катушки проводом: первый случай – намотка в высоту («наращивание слоев»), второй – намотка в длину. Для упрощения задачи рассмотрим плоский прямоугольный обмоточный провод, а точнее, его частный случай – провод с квадратным сечением. На рис. 1 проиллюстрированы два рассматриваемых случая намотки.

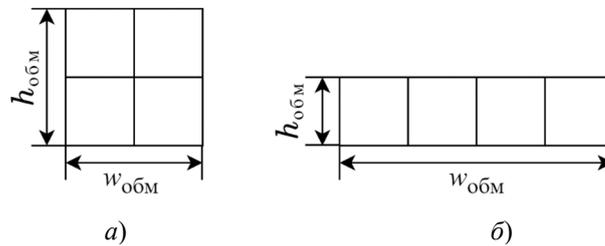


Рис. 1. Два случая намотки катушки индуктивности:  
а – намотка в высоту; б – намотка в длину

Пусть  $j_{\max}$  – максимально допустимая плотность тока,  $d$  – диаметр провода по меди,  $N_{\text{вит}}$  – количество витков в катушке. Площадь поперечного сечения провода определяется как  $S_{\text{пр}} = d^2$ , а площадь поперечного сечения обмотки  $S_{\text{обм}} = h_{\text{обм}} \times w_{\text{обм}}$ . Максимально допустимый ток через обмоточный провод определяется как  $I_{\max} = j_{\max} S_{\text{пр}}$ . В случае если ток переменный, для оценки превышения  $I_{\max}$  вычисляется среднеквадратическое значение силы тока, протекающего в цепи катушек.

Без учета коэффициента заполнения катушки (в рассматриваемом случае принимается равным 1) величины  $S_{\text{обм}}$  и  $S_{\text{пр}}$  связаны между собой следующим образом:

$$S_{\text{обм}} = N_{\text{вит}} S_{\text{пр}}. \quad (3)$$

Как известно, в общем случае напряженность магнитного поля  $H$ , формируемого проводником с электрическим током, в некоторой точке представляет собой некоторую функцию от силы тока в проводнике:

$$H = cf(I, \dots) = cI, \quad (4)$$

где  $c$  – коэффициент пропорциональности между  $H$  и  $I$ , зависящий от формы проводника и расстояния до рассматриваемой точки. По принципу суперпозиции в рабочем пространстве суммарное магнитное поле, описываемое вектором  $\vec{H}_{\Sigma}$ , представляет собой сумму магнитных полей от каждого  $i$ -го элементарного витка с током:

$$\vec{H}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{\text{вит}}} \vec{H}_i,$$

где  $\vec{H}_i$  – магнитное поле от  $i$ -го витка с током. Тогда в соответствии с формулой (4) модуль вектора  $\vec{H}_{\Sigma}$  можно выразить следующим образом:

$$|\vec{H}_{\Sigma}| = \sum_{i=1}^{N_{\text{вит}}} c_i I_i. \quad (5)$$

Обмотку катушки можно рассматривать как последовательное соединение элементарных витков с током количеством  $N_{\text{вит}}$ . При этом в каждом витке сила тока одинакова:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_{N_{\text{вит}}} = I_{\text{общ}}.$$

Тогда формулу (5) можно переписать следующим образом:

$$\left| \vec{H}_{\Sigma} \right| = I_{\text{общ}} \sum_{i=1}^{N_{\text{вит}}} c_i.$$

Обозначим сумму коэффициентов пропорциональности как  $c_{\Sigma}$ , тогда данное выражение возможно привести в следующем виде:

$$\left| \vec{H}_{\Sigma} \right| = I_{\text{общ}} c_{\Sigma}. \quad (6)$$

В том случае, если рассматривается поле внутри длинной однослойной катушки (соленоида), то магнитное поле внутри катушки однородно вдоль всей ее длины, и в уравнении (6) сумма коэффициентов пропорциональности сводится к величине  $n_{\text{вит}}$  – суммарному количеству витков слоя на метр.

В случае, если рассматривается магнитное поле на некотором расстоянии от катушки, задача фактически сводится к нахождению величины  $c_{\Sigma}$ , что достаточно нетривиально, поскольку необходимо учесть вклад каждого элементарного витка.

Методы синтеза катушек для создания мер магнитных величин достаточно подробно рассмотрены в работе [8]. В контексте же текущей работы подробнее рассмотрим принципы создания геометрической модели, необходимой для конечно-элементного моделирования магнитного поля [9] в современных пакетах прикладных программ с целью нахождения оптимальных габаритных размеров и параметров катушек. Важным аспектом является создание модели, адекватно отражающей электромагнитные свойства пары катушек определенной формы и размеров. При этом такая модель должна быть достаточно простой для удобства ее параметризации и возможности проведения итерационных вычислений в ограниченном промежутке времени, поскольку любой процесс численного (в частности, и конечно-элементного) решения дифференциальных уравнений требует существенных временных затрат в случае сложной геометрической модели. Поэтому важным при моделировании является наличие возможности получить решение системы уравнений за приемлемое время с учетом имеющихся вычислительных возможностей [10, 11].

В целях определения необходимой геометрической модели рассмотрим плоскость поперечного сечения многовитковой катушки. Данная плоскость может быть представлена в виде дискретного множества элементарных участков в соответствии с количеством витков. Размер каждого участка определяется исходя из диаметра обмоточного провода, и в данном случае в плоскости присутствуют участки одинаковых размеров. Каждому такому участку соответствует сила тока  $I_{\text{общ}}$ . На рис. 2 приведена иллюстрация данной плоскости.

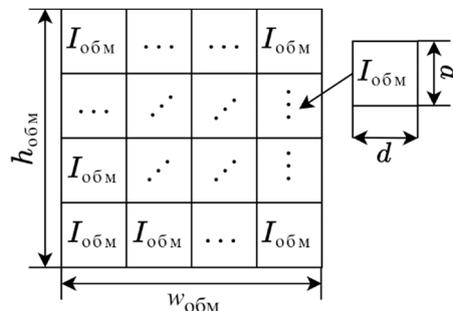


Рис. 2. Плоскость поперечного сечения катушки и распределение постоянного тока в ней

Алгебраическая сумма токов всех витков, охватываемых поверхностью поперечного сечения намотки, представляет собой величину  $I_{\Sigma}$  и фактически является так называемой магнитодвижущей силой. Таким образом, сумма токов  $I_{\Sigma}$  определяется следующим образом:

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{\text{вит}}} I_i = N_{\text{вит}} I_{\text{общ}}.$$

При этом с учетом (3)  $I_\Sigma$  можно выразить следующим образом:

$$I_\Sigma = N_{\text{вит}} I_{\text{max}} = \frac{S_{\text{обм}}}{S_{\text{пр}}} j_{\text{max}} S_{\text{пр}} = S_{\text{обм}} j_{\text{max}}. \quad (7)$$

Таким образом, приведенные соотношения и взаимосвязь между ними позволяют рассматривать модель многовитковой катушки в виде цельного проводника для задачи численного моделирования распределения магнитного поля в рабочей области меры магнитной величины (т.е. поле вектора  $\vec{H}_\Sigma$ ). При этом площадь поперечного сечения цельного проводника составляет  $S_{\text{обм}}$  и определяется по формуле (3). В качестве входного воздействия модели задается величина  $I_\Sigma$ , максимально возможное значение которой определяется исходя из заданной допустимой  $j_{\text{max}}$  в соответствии с уравнением (7).

Важно отметить, что задаваемая в рамках моделирования сила тока не является той силой тока, которая действительно протекает в реальной катушке. Подразумевается именно эквивалентный ток, т.е. именно величина  $I_\Sigma$ .

В связи с тем, что в уравнении (6) каждый  $i$ -й коэффициент пропорциональности зависит от расстояния между  $i$ -м витком и точкой наблюдений (точкой измерений напряженности магнитного поля), поведение вектора  $\vec{H}_\Sigma$  в рассматриваемой точке зависит от пространственного расположения витков друг относительно друга. В свою очередь взаиморасположение витков катушки определяется выбранным способом намотки. Поэтому интерес представляет задача сопоставления магнитных полей катушки, намотанной «в длину», и катушки, намотанной «в высоту», при прочих равных параметрах с целью определения возможности минимизации количества слоев намотки. Необходимость минимизации количества слоев катушки обусловлена технологической сложностью изготовления многослойной катушки с проводом крупного сечения.

Из общих соображений очевидно, что по мере удаления каждого витка от геометрического центра системы напряженность поля в центре снижается. При этом изменяется и пространственная конфигурация формируемого катушкой поля (поле «вытягивается» вдоль магнитной оси). Другими словами, попытка создания пары «длинных» катушек с малым количеством слоев намотки при заданной максимально допустимой степени неоднородности сопряжена с проблемой изменения линейных размеров области однородного поля. Изменение размеров приводит к невозможности применения такой пары катушек в качестве меры магнитной величины, так как размеры формируемой рабочей области недостаточны для полноценного размещения внутри нее МДВМД.

### **Критерии оценки результатов моделирования калибровочного магнитного поля**

Для системы катушек нормируется величина  $\eta$  – относительная неоднородность формируемого магнитного поля в рабочей области, которая оценивается по следующей формуле:

$$\eta = \max(\Delta B / B_0),$$

где  $\Delta B = B(x_1, y_1, z_1) - B_0$  – отклонение величины индукции МП в точке с координатами  $(x_1, y_1, z_1)$  от  $B_0 = B(x_0, y_0, z_0)$  – величины индукции МП в геометрическом центре системы катушек.

В случае напряженности  $H$  степень неоднородности  $\eta$  рассчитывается аналогичным образом, и формула приобретает следующий вид:

$$\eta = \max(\Delta H / H_0).$$

Так как рассматриваемые системы катушек меры устроены таким образом, что формируемое МП направлено вдоль магнитной оси, то практический интерес представляет только тангенциальная составляющая МП. При этом нормальной и поперечной составляющими можно пренебречь (практически равны нулю). Поэтому если использовать прямоугольную декартову систему координат и принять, что тангенциальная составляющая МП сонаправлена с осью  $OY$ , то для оценки  $\eta$  интерес представляет  $H_y$  – тангенциальная составляющая формируемого МП:

$$\eta = \max(\Delta H_y / H_0).$$

С учетом неоднородности КМП формулируются следующие требования к силе тока в цепи катушек: 1) сила тока в цепи не должна превышать величины  $I_{\max}$  (чтобы не допустить перегрев катушек); 2) заданная сила тока в цепи обеспечивает на границах рабочей области напряженность КМП не менее  $|H_{\min}|$  – границы диапазона измерений МИП, применяемых в МДВМД.

Для определения оптимальных размеров катушки интерес представляет анализ зависимости  $w_{\eta_{\max}, h_0} \left( \frac{w_{\text{обм}}}{h_{\text{обм}}} \right)$  – ширины зоны однородного поля  $w_{\eta}$  при заданной максимально допустимой степени неоднородности  $\eta_{\max}$  на высоте геометрического центра системы  $h_0$  от отношения толщины обмотки к ее высоте  $\frac{w_{\text{обм}}}{h_{\text{обм}}}$ . Обозначим соотношение сторон  $\frac{w_{\text{обм}}}{h_{\text{обм}}}$  в виде параметра  $p_{wh}$ :

$$p_{wh} = \frac{w_{\text{обм}}}{h_{\text{обм}}}.$$

Тогда в целях минимизации количества слоев намотки оптимальными являются такие значения  $w_{\text{обм}}$  и  $h_{\text{обм}}$ , при которых  $p_{wh}$  достигает максимума, при этом в случае продольно вытянутой катушки индуктивности интерес представляет область определения  $p_{wh} > 1$ , т.е. при соблюдении условия  $h_{\text{обм}} < w_{\text{обм}}$ .

С другой стороны, с точки зрения возможности получения наибольшей ширины однородного поля, оптимальными будут являться такие значения  $w_{\text{обм}}$  и  $h_{\text{обм}}$ , при которых зависимость  $w_{\eta_{\max}, h_0}(p_{wh})$  принимает наибольшее значение. Тогда оптимальное значение  $p_{wh_{\text{opt}}}$  определяется следующим образом:

$$p_{wh_{\text{opt}}} = \arg \max_{p_{wh} > 1} w_{\eta_{\max}, h_0}(p_{wh}).$$

Для практических целей необходимо и достаточно такое значение величины  $w_{\eta_{\max}, h_0}$ , при котором ширина получившейся зоны однородного магнитного поля позволяет разместить в рабочей области МДВМД, имеющий ширину  $w_{\text{МДВМД}}$ , т.е. интерес представляет область значений  $w_{\eta_{\max}, h_0} \geq w_{\text{МДВМД}}$ .

Таким образом, по результатам проводимого конечно-элементного моделирования проводится анализ дискретной функции  $w_{\eta_{\max}, h_0}(p_{wh})$  в области определения  $p_{wh} > 1$  и области значений  $w_{\eta_{\max}, h_0} \geq w_{\text{МДВМД}}$  на предмет выявления наименьшей допустимой величины  $h_{\text{обм}}$ . При этом множество значений  $p_{wh}$  формируется путем последовательного одновременного увеличения  $w_{\text{обм}}$  и уменьшения  $h_{\text{обм}}$  на один и тот же заданный шаг дискретизации размера. На рис. 3 качественно графически изображена зависимость ширины зоны однородного КМП от соотношения сторон обмотки, при этом красным цветом выделена интересующая область значений в рамках решаемой задачи.

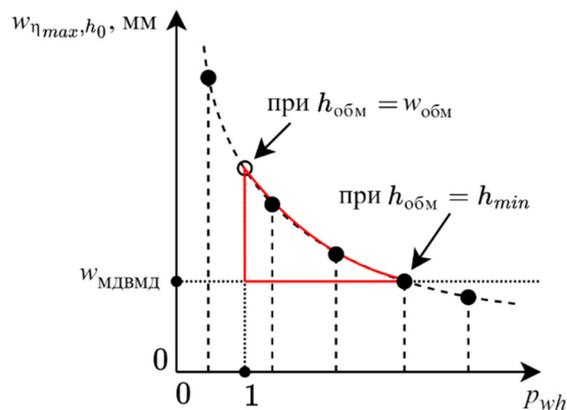


Рис. 3. Область значений  $w_{\eta_{\max}, h_0}(p_{wh})$ , представляющих интерес в контексте решаемой задачи

### Заключение

Как уже отмечалось ранее, предложенный способ калибровки отличается удобством в его автоматизации. По каждому МИП в результате калибровочных измерений формируется набор значений во всем диапазоне измерений МИП «естественным образом»: в результате измерений каждому МИП соответствует свой отрезок гармонической функции. При этом выбор именно гармонической функции обусловлен также удобством аппаратной реализации процедуры формирования сигнала: сигнал любой иной формы неизбежно искажается электронными компонентами схемы усилителя сигнала калибратора. Проблема подавления гармоник, относящихся к помехам, препятствует формированию малощумящего КМП, форма которого отлична от гармонической.

Предлагаемая в данной работе модель катушки ММВ адекватна для определения необходимых габаритов и нужного диапазона изменения выходной величины ММВ при постоянном токе. В случае же переменного и импульсного тока модель является неадекватной, так как не учитывается влияние индуктивности и сопротивления катушки. Однако то обстоятельство, что КМП представляет собой гармоническое воздействие частотой не более десятков-сотен герц, позволяет пренебречь дополнительным анализом переходных процессов в цепи.

### Список литературы

1. Королев П. Г. Организация работы средств измерений с метрологическим самоконтролем // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 4. С. 51–57. doi: 10.21685/2307-5538-2019-4-6
2. Магницкий Д. К., Захарова А. Г. Обзор существующих методов и автоматизированных комплексов поверки средств измерений // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : сб. материалов V Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Р. В. Беляевского, И. А. Лобур. Кемерово : Изд-во КузГТУ, 2021. С. 328–333.
3. Методы поверки (калибровки) и поверочные схемы. URL: <https://sonel.ru/ru/biblio/knowledge-centre/reference-book/metrology-reference/method-of-calibration/> (дата обращения: 17.01.2025).
4. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. М. : Техносфера, 2007. 384 с.
5. Цветков Э. И. Основы математической метрологии. СПб. : Политехника, 2005. 510 с.
6. Schanze T. Sinc interpolation of discrete periodic signals // IEEE Transactions on Signal Processing. 1995. № 43 (6). P. 1502–1503. doi: 10.1109/78.388863
7. Porshnev S. V., Kusaykin D. V., Klevakin M. A. On features of reconstruction of finite-length discrete-time signal with nonzero constant component using sinc interpolation // SIBIRCON 2019 – International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. Novosibirsk : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 167–171. doi: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958291
8. Афанасьев Ю. В. [и др.]. Средства измерений параметров магнитного поля. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. 320 с.
9. Kuczmanski M., Iványi A. The Finite Element Method in Magnetics. Budapest : Akadémiai Kiadó, 2008. 319 p.
10. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы : учеб. пособие для вузов. М. : Наука, 1989. 432 с.
11. Калиткин Н. Н., Альшина Е. А. Численные методы : в 2 кн. М. : ИЦ «Академия», 2013. Кн. 1. Численный анализ. 304 с.

### References

1. Korolev P.G. Organization of the work of measuring instruments with metrological self-control. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2019;(4):51–57. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2019-4-6
2. Magnitskiy D.K., Zakharova A.G. Review of existing methods and automated systems for verification of measuring instruments. *Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika: sb. materialov V Vseros. nauch.-prakt. konf. = Energy and energy conservation: theory and practice : collection of materials of the V All-Russian scientific and practical conference.* Kemerovo: Izd-vo KuzGTU, 2021:328–333. (In Russ.)
3. *Metody poverki (kalibrovki) i poverochnye skhemy = Methods of verification (calibration) and verification schemes.* (In Russ.). Available at: <https://sonel.ru/ru/biblio/knowledge-centre/reference-book/metrology-reference/method-of-calibration/> (accessed 17.01.2025).
4. Dzhekson R.G. *Noveyshie datchiki = The latest sensors.* Moscow: Tekhnosfera, 2007:384. (In Russ.)
5. Tsvetkov E.I. *Osnovy matematicheskoy metrologii = Fundamentals of mathematical metrology.* Saint Petersburg: Politekhnik, 2005:510. (In Russ.)
6. Schanze T. Sinc interpolation of discrete periodic signals. *IEEE Transactions on Signal Processing.* 1995;(43):1502–1503. doi: 10.1109/78.388863

7. Porshnev S.V., Kusaykin D.V., Klevakin M.A. On features of reconstruction of finite-length discrete-time signal with nonzero constant component using sinc interpolation. *SIBIRCON 2019 – International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences*. Novosibirsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019:167–171. doi: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958291
8. Afanas'ev Yu.V. et al. *Sredstva izmereniy parametrov magnitnogo polya = Measuring instruments for magnetic field parameters*. Leningrad: Energiya. Leningr. otd-nie, 1979:320. (In Russ.)
9. Kuczmann M., Iványi A. *The Finite Element Method in Magnetics*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2008:319.
10. Samarskiy A.A., Gulín A.V. *Chislennyye metody: ucheb. posobie dlya vuzov = Numerical methods : a textbook for universities*. Moscow: Nauka, 1989:432. (In Russ.)
11. Kalitkin N.N., Al'shina E.A. *Chislennyye metody: v 2 kn. Kn. 1. Chislennyy analiz = Numerical methods: in 2 books. Book 1. Numerical analysis*. Moscow: ITs «Akademiya», 2013:304. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

##### **Роман Евгеньевич Вавилов**

аспирант,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
имени В. И. Ульянова (Ленина)  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Профессора Попова, 5);  
ведущий инженер отдела разработки  
схемотехнических решений службы разработки  
средств внутритрубной дефектоскопии,  
АО «Газпром диагностика»  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
Пулковское шоссе, 40, корп. 4)  
E-mail: revavilov@gmail.com

##### **Roman E. Vavilov**

Postgraduate student,  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"  
(5 prof. Popov street, Saint Petersburg, Russia);  
leading engineer of the department of development  
of circuit engineering solutions for in-pipe flaw  
detection equipment,  
JSC "Gazprom diagnostika"  
(build. 4, 40 Pulkovskoye Shosse,  
Saint Petersburg, Russia)

##### **Валерия Александровна Гольдберг**

ведущий инженер отдела разработки механических  
конструкций и систем службы разработки средств  
внутритрубной дефектоскопии,  
АО «Газпром диагностика»  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
Пулковское шоссе, 40, корп. 4)  
E-mail: v.goldberg@diagnostika.gazprom.ru

##### **Valeriia A. Goldberg**

Leading engineer of the department of development  
of mechanical structures and monitoring systems  
for in-pipe flaw detection equipment  
JSC "Gazprom diagnostika"  
(build. 4, 40 Pulkovskoye Shosse,  
Saint Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 22.01.2025**

**Поступила после рецензирования / Revised 20.02.2025**

**Принята к публикации / Accepted 17.03.2025**