

установки и не воздействовать на затворную жидкость эталонного колокола установки. В этом случае, определение объемного расхода газа сопла Вентури критического истечения можно выполнить методом прямых измерений. Суть метода заключается в определении значения номинального объемного расхода сопла путем пропускания через него контрольного объема воздуха, воспроизводимого установкой объема и расхода газа колокольного типа, и измерения времени протекания этого объема через сопло. При этом сопло устанавливается входным конфузором к выходному патрубку установки, а выходным диффузором к системе создания вакуума, которое обеспечивает создание и поддержание критического режима истечения через сопло. Перед соплом не должно быть источников завихрения потока. Геометрические размеры сопел Вентури критического истечения регламентируются в [3] и [4]. Внешний вид разреза сопла Вентури критического истечения представлен на рисунке 1.

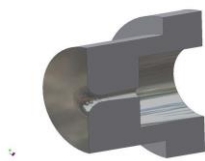


Рисунок 1 – Сопло Вентури критического истечения

Значения номинального объемного расхода сопел Вентури критического истечения определяют с учетом влажности, температуры и давления воздуха под колоколом и перед соплом, и приводят к температуре 20 °С и относительной влажности 0 % или 60 %. В общем виде определение объемного расхода сопла Вентури критического истечения путем пропускания через него контрольного объема воздуха, воспроизводимого установкой объема и расхода газа колокольного типа, и измерения времени протекания этого объема через сопло можно выразить уравнением:

$$Q_v = Q_{эт} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_c} \cdot k_v \cdot \sqrt{\frac{293,15}{T_c}}, \quad (3)$$

УДК 681.586

ГЛУБИНА ЗОНЫ КОНТРОЛЯ СЕНСОРА ОТКРЫТОГО ТИПА Джежора А.А.¹, Рубаник В.В.², Жизневский В.А.¹, Завацкий Ю.А.¹

¹Витебский государственный технологический университет
Витебск, Республика Беларусь

²Государственное научное учреждение «Институт технической акустики НАН Беларуси»
Витебск, Республика Беларусь

Разработка электроемкостного метода неразрушающего контроля связана с созданием электроемкостных сенсоров, позволяющих локализовать электрические поля на желаемом участке контролируемого изделия. Решение данной задачи сопровождается рядом трудностей,

где $Q_{эт}$ – эталонный объем, воспроизводимый установкой, м³; ρ_a и ρ_c – значения плотностей измеряемого воздуха на эталоне и перед соплом соответственно, кг/ м³; T_c – температура воздуха на входе сопла, К.

Модернизированные установки колокольного типа РЕОВГ-02 и РЕОВГ-004, принадлежащие БелГИМ, воспроизводят контрольные объемы воздуха методом вытеснения при погружении колокола в жидкость (масло трансформаторное). Основные технические и метрологические характеристики модернизированных установок колокольного типа, принадлежащих БелГИМ, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические и метрологические характеристики установок колокольного типа, принадлежащих БелГИМ

Установки колокольного типа	Воспроизводимые объемы воздуха, м ³			Диапазон воспроизводимых расходов воздуха, м ³ /ч	Максимальная относительная расширенная неопределенность (k=2), %
	0,08	0,12	0,20		
РЕОВГ-02	0,08	0,12	0,20	от 0,06 до 16	0,11
РЕОВГ-004	0,01	0,02	0,04	от 0,016 до 2,5	0,23

Заключение. Модернизированные установки объема и расхода газа колокольного типа РЕОВГ-02 и РЕОВГ-004, принадлежащие БелГИМ, позволяют обеспечить метрологический контроль сопел Вентури критического истечения, применяемых в качестве рабочих эталонов при проверке бытовых счетчиков газа, в диапазоне объемного расхода воздуха от 0,016 до 10 м³/ч.

Литература

1. R. Paton Calibration and Standards in Flow Measurement / Handbook of Measuring System Design- John Wiley & Sons, 2005 – 191p.
2. Final report on intercomparison measurements in the field of gas flow and volume, which are realized at two levels: the first level (A*) – Metrologia 45 (2008), P. 7–17.
3. ISO 9300:2005 / Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.
4. СТБ ISO 9300-2018 /Измерение расхода газа с помощью сопел Вентури критического истечения.

значительно ограничивающих использование всех возможностей электроемкостного способа по точности и информативности.

В ряде сенсоров, а к ним относятся плоский конденсатор Maxwell, цилиндрический конденсатор, зеркально-симметричный конденса-

тор, объекты контроля расположены между электродами и поле пронизывает объект контроля с двух сторон. В накладных же сенсорах электроды расположены только с одной стороны к поверхности объекта контроля, чаще всего в одной плоскости либо по криволинейной поверхности, повторяющей форму поверхности объекта контроля. Эти конструктивные особенности в значительной степени обуславливают функциональные возможности сенсора, характер источников погрешностей и меры их устранения.

Одним из наиболее ответственных этапов при создании электроемкостных средств неразрушающего контроля является выбор размеров электродов. Если при контроле с помощью проходных сенсоров область контроля определена, то при контроле с помощью накладных измерительных конденсаторов (НИК), англоязычное название *fringing electric field (FEF) sensors*, она ограничена глубиной и шириной зоны контроля [1]. Глубина зоны контроля определяется быстротой уменьшения интенсивности электрического поля с увеличением расстояния от плоскости электродов сенсора в направлении оси z . В литературе нет строгого определения, но одним из возможных способов оценки глубины зоны контроля является изучение того, насколько глубоко электрическое поле проникает в контролируемую среду [1, 2]. Координата, в которой достигается 97 % асимптотической емкости сенсора, определяется как глубина зоны контроля. Изменяя геометрические размеры электродов, можно повлиять на глубину зоны контроля сенсора, его чувствительность, динамический диапазон и уровень сигнала. Таким образом, конструкция может быть адаптирована к требованиям, предъявляемым к сенсору.

Проектирование сенсоров характеризуются значительным объемом и трудоемкостью, что с учетом сложности структуры объектов контроля делает физическое моделирование не только трудноосуществимым, но и длительным. В силу этого основная нагрузка ложится на математическое моделирование, осуществляемое аналитическими либо численными методами. Аналитические модели для емкостных сенсоров обычно базируются на упрощенных конфигурациях и идеализированных предположениях, которые ограничивают их точность расчета для реальных конструкций и могут приводить к существенным расхождениям между теоретическими и экспериментальными данными. Среди численных методов следует выделить метод конечных элементов *finite element method (FEM)* и метод граничных интегральных уравнений [3]. Метод граничных интегральных уравнений является классическим математическим аппаратом и основан на сведении краевых задач к граничным интегральным уравнениям Фредгольма I и II рода. Последующая

дискретизация граничных интегральных уравнений дает возможность получать и численные решения краевых задач. Преимуществом данного метода по сравнению с методом конечных элементов является отсутствие необходимости дискретизации всей области и, как следствие, незначительное время расчета.

Цель работы заключалась в создании математической модели многосекционного сенсора открытого типа рисунок 1, предназначенного для оценки качества жидких нефтепродуктов и оптимизации конструктивных параметров, таких как глубина зоны контроля, сила сигнала и так далее.

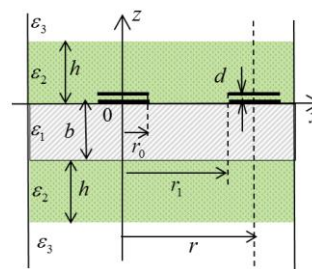


Рисунок 1 – Сенсор открытого типа

Математическая модель сенсора была построена с учетом реальной толщины электродов. Для этого поверхность каждого из электродов рассматривалась в виде двух зеркально-симметричных бесконечно тонких ламелей, разнесенных в пространстве на расстояние равное толщине реальных электродов d . Были созданы программы для проведения численных расчетов электрических полей рассматриваемых сенсоров. Проведено компьютерное моделирование, подтверждающее адекватность и работоспособность программного обеспечения, проведены расчеты, и анализ электрических полей сенсора.

Конструкция сенсора имеет ряд особенностей, связанных с открытым пространством. Во-первых, она позволяет осуществлять мониторинг жидкой среды с двух сторон с помощью плоского сенсора. Во-вторых, его ёмкость больше ёмкости накладного измерительного конденсатора. В-третьих, удобство протирки электродов без разборки сенсора.

Проверка адекватности модели реальным конструкциям проводилась на сенсоре с металлизацией $W = 0,5$ (отношение площади электродов к полной площади поверхности сенсора). Электроды вытравливали на одностороннем фольгированном тефлоне (PTFE) толщиной $b = 1$ мм. Толщина медного покрытия d составляла $35 \mu\text{м}$. Ширина потенциальных электродов $r_0 = 1$ мм и число секций $n = 6$. Погрешность расчета емкости не превосходила 2 %.

Расчетная картина поля сенсора открытого типа представлена на рисунке 2.

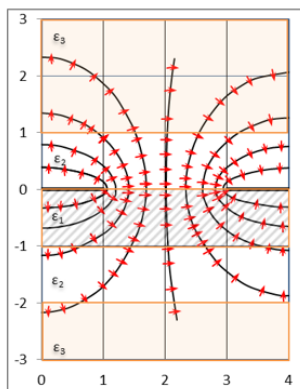


Рисунок 2 – Стрелки напряженности и эквипотенциальные линии электрического поля для сенсора с $b=1$ мм и $r = 4$ мм

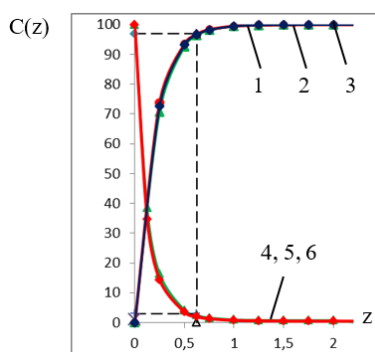


Рисунок 3 – Зависимость нормированной емкости от относительного расстояния z

Точное значение глубины проникновения электрического поля определить невозможно [1, 2]. Для FEF sensors эмпирически связь между глубиной проникновения h и пространственным периодом электродов 2τ примерно принимается [2]:

$h=2\tau/4 - 2\tau/3$, где h – эффективная глубина проникновения электрического поля, τ – размер секции.

Контролировалась двуслойная среда: масло ($\epsilon_2=3$) – воздух ($\epsilon_3=1$). Глубина зоны контроля для сенсора открытого типа оценивалась из зависимости нормированной емкости $C(z)$ от относительного расстояния $z = h/\tau$ до плоскости, в которой лежат электроды рисунок.3.

Глубина зоны контроля соответствует положению z_0 , когда различие между емкостью в положении z_0 и максимальной емкостью $C_{\max}(z = \infty)$ равно 3 % от различия между самой максимальной и минимальной емкостями:

$$C(z_0) = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} 100\% = 3\%$$

Кривые 1, 2, 3 построены для сенсоров с металлизацией поверхности 0,25, 0,5 и 0,75 соответственно и относятся к случаю увеличения слоя жидкого диэлектрика, кривые 4,5, 6 к его уменьшению. Анализ кривых говорит о совпадении глубин зоны контроля независимо от металлизации поверхности сенсоров. Глубина зоны контроля для сенсора открытого типа лежит в том же диапазоне, что и глубина зоны контроля для (FEF) sensors.

Литература

1. Xiaobei B. Li, Sam D. Larson, Alexei S. Zyuzin, and Alexander V. Mamishev “Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors,” IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 6. № 2 , 2006. pp. 434–440.
2. Kim C. et al. Numerical analysis on effective electric field penetration depth for interdigital impedance sensor // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2013. – Т. 418. – №. 1. – С. 012020.
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: 7-е изд.М.: Изд-во МГУ, 2004.

УДК 621.317.4; 621.317

ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСКАНИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО СИГНАЛА, СИНУСОИЗИРУЮЩЕГО МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Ерошенко А.С., Скурту И.Т., Брановицкий И.И.

Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов проводятся при синусоидальной форме магнитного потока в испытуемом образце [1]. Однако при значительной величине магнитного поля он претерпевает искажения, вызванные нелинейностью основной кривой намагничивания, а также активно-реактивным характером нагрузки намагничивающей системы. Величина этих искажений непосредственно влияет на измеренное значение такой важной характеристики, как удельные магнитные потери.

Задача синусоизации магнитного потока решается разными методами (аналоговыми, цифровыми или комбинированными), формирующими такой намагничивающий сигнал, при котором магнитный поток синусоидален. Наиболее эффективными являются цифровые и комбинированные методы. Однако такие методы производят коррекцию сигнала итерационно в процессе задания режима перемагничивания, что приводит к немонотонности движения в магнитных координатах, что сказывается на магнитном состоянии образца