

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ГЛУБИНУ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО СЕНСОРА

Джежора А.А., Науменко А.М., Царенко Ю.В.\*, Рубаник В.В.\*

УО «Витебский государственный технологический университет», [jezhora@mail.ru](mailto:jezhora@mail.ru)  
\*ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», [labpt@vitebsk.by](mailto:labpt@vitebsk.by)

Разнообразие конструктивных и схемотехнических решений, применяемых в электроемкостном методе контроля, вызвано многообразием объектов контроля, функционально техническим назначением средств измерения и требованиями, предъявляемыми к метрологическим, эксплуатационно-техническим характеристикам. Непрерывное повышение этих требований: точности, разрешающей способности, воспроизводимости, стабильности обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования конструкций емкостных сенсоров, схем их подключения и технологий изготовления с учетом успехов в области микроэлектроники, компьютерных технологий.

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

Процесс проектирования 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 датчиков обычно базируются на упрощенных конфигурациях и идеализированных предположениях, которые ограничивают их точность расчета для реальных конструкций [2] и могут приводить к существенным расхождениям между теоретическими и экспериментальными данными. Для моделирования электроемкостных сенсоров, их оптимизации, оценки производительности используют численные методы расчета [3,4]. Среди численных методов следует выделить метод конечных элементов (*finite element method (FEM)*) [5] и метод граничных интегральных уравнений (см. например [6]). В настоящее время разработан и используется целый ряд коммерческих программ анализа и оптимизации электродинамических систем (*Ansoft FEM, ELCUT, CST Microwave Studio, SPEAG SEMCAD* и др.) позволяющий рассчитывать электромагнитные поля и параметры сложных электродинамических систем [7]. Метод граничных интегральных уравнений является классическим математическим аппаратом и основан на сведении краевых задач к граничным интегральным уравнениям Фрегольма I и II рода [8]. 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 повышении точности расчета параметров многосекционного сенсора, предназначенного для оценки качества нефтепродуктов, оптимизации его конструкции рис. 1.

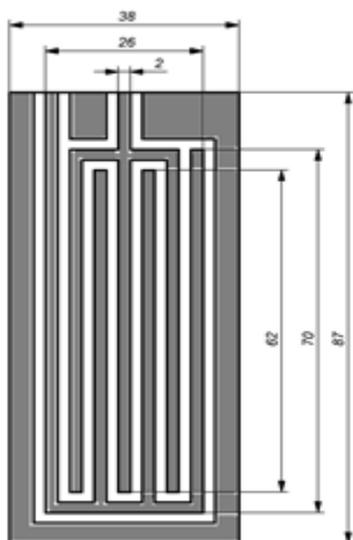


Рисунок 1 - Чертеж двустороннего сенсора

Для проведения оптимизации конструкции были решены следующие задачи:

- построена математическая модель сенсора. Модель была построена с учетом реальной толщины электродов, что крайне важно при проектировании датчиков на тонких подложках. Для этого поверхность каждого из электродов рассматривалась в виде двух зеркально-симметричных бесконечно тонких ламелей, разнесенных в пространстве на расстояние, равное толщине реальных электродов  $d$ . При создании модели сенсора применялся метод, основанный на использовании системы интегральных уравнений Фредгольма первого рода, метод зеркальных отображений. Были созданы программы для проведения численных расчетов электрических полей рассматриваемых сенсоров. Программы написаны на основе системы компьютерной математики MAPLE XV. Проведено компьютерное моделирование, подтверждающее адекватность и

работоспособность программного обеспечения, проведены расчеты и анализ электрических полей сенсора.

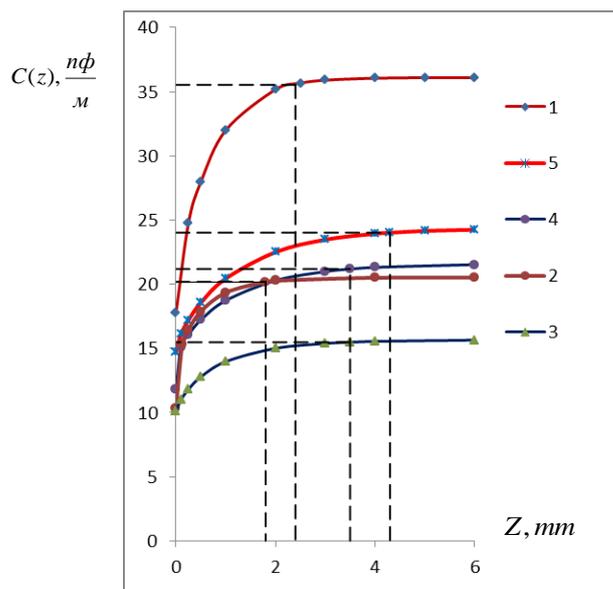
Проверка адекватности модели реальным конструкциям проводилась на датчиках с металлизацией 0,5 (отношение площади электродов к полной площади датчика). Электроды вытравливали на двустороннем фольгированном тefлоне (PTFE) толщиной 1мм. Толщина медного покрытия составляла 35  $\mu\text{m}$ . Ширина потенциальных электродов  $2r_0 = 2$  мм и число секций  $n = 6$ . Погрешность расчета  $\delta C = 2,5\%$ .

Рассмотренная конструкция имеет ряд особенностей, связанных с открытым пространством. Во-первых, она позволяет осуществлять мониторинг среды с двух сторон с помощью плоского сенсора. Во-вторых, её ёмкость больше ёмкости накладного измерительного конденсатора в два раза. При контроле жидкостей удобство протирки электродов без разборки сенсора.

В работе [2] рассмотрен диапазон толщин подложек, где обнаружено хорошее совпадение расчетов емкостей по аналитическим выражениям с экспериментальными данными, описывающими результаты в определении диэлектрической проницаемости контролируемого материала. Однако, отсутствие у аналитических моделей реальной толщины электродов не позволяет проследить картину трансформации полей сенсора, оценить глубину контроля.

Смоделированные зависимости емкости от толщины слоя масла (диэлектрическая проницаемость которого бралась  $\epsilon=3$ ) показаны на рис.2. Уменьшение межэлектродного зазора (конструкции 1 и 2) приводит к увеличению динамического диапазона, а также к повышению чувствительности измерений, особенно в ближнем диапазоне. Для конструкций 5 и 4, наблюдается увеличение глубины зоны контроля, тогда как для конструкций 1 и 2 она меньше вдвое, но для этих конструкций вдвое меньше межэлектродный зазор. Самый малый динамический диапазон соответствует конструкции 3. Межэлектродный зазор этого проекта такой же, как у проектов 2, 4 и 5, но толщина подложки на порядок меньше. Следовательно, отношение межэлектродного зазора к толщине подложки оказывает большее влияние как на динамический диапазон, так и на глубину контроля.

Полученные результаты показывают компромисс между глубиной контроля и динамическим диапазоном или чувствительностью измерения. Поскольку емкостный сенсор располагается в сосуде, глубина проникновения около 2,5 мм является достаточной и даже выгодной по сравнению с глубиной проникновения 4,5 мм, учитывая, что электрическое поле сосредоточено на соответствующей глубине.



Конструкция 1 дополнительно имеет самый высокий динамический диапазон и чувствительность измерения и является наиболее подходящей из смоделированных конструкций.

Рисунок 2 - Смоделированная емкость сенсора в зависимости от толщины слоя масла Z для различных конструкций электродов

### ВЫВОДЫ

Установлено, что глубина зоны контроля электроемкостного сенсора с открытой областью определяется межэлектродным зазором компланарных электродов и составляет половину секции для металлизации 0,5, при этом толщина подложки влияет на глубину контроля, в меньшей степени.

### Литература

1. Da Silva, M. Impedance sensors for fast multiphase flow measurement and imaging, Ph.D. dissertation, Technical University of Dresden, 2008.
2. Джежора А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета / А.А. Джежора. – Минск: РУП «Издательский дом «Белорусская наука», 2008. – 305с.
3. Li X B 2006 Instrumentation and Inverse Problem Solving for Impedance Imaging (Washington : University of Washington Graduate School) p 342
4. Mamishev A. V. et al. Interdigital sensors and transducers //Proceedings of the IEEE. – 2004. – Т. 92. – №. 5. – С. 808-845.
5. S. II. Khan and F. Abdullah, "Finite-Element Modeling of Multielectrode Capacitive Systems for Flow Imaging," /*IEE Proceedings-G Circuits Devices and Systems*, vol. 140, no. 3, pp. 216-222, 1993.
6. Методы граничных элементов: Пер. с англ. / Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. М.: Мир, 1987
7. X. B. Li, S. D. Larson, A. S. Zyuzin, and A. V. Mamishev. Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors //*Sensors Journal, IEEE*, vol. 6, no. 2, pp.434-440, 2006.
8. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: 7-е изд.М.: Изд-во МГУ; Изд-во. Наука, 2004.