

## ЕМКОСТНОЙ ДАТЧИК ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОГО ТИПА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИЗБЫТОЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ КОЖИ ЧЕЛОВЕКА

Воробей А.М.<sup>1</sup>, Рымарев Д.В.<sup>1</sup>, Потапов А.Л.<sup>1</sup>, Давыдов М.В.<sup>1</sup>, Стебунов С.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> ООО «Клиника современной медицины «Вектор», г. Минск, Республика Беларусь

Разработан емкостной датчик встречно-штыревого типа для диагностики избыточной влажности кожи человека. (E-mail: vorobeianna@tut.by)

**Ключевые слова:** емкостной датчик встречно-штыревого типа, электрическая емкость, избыточная влажность кожи человека.

### Введение

Заболеваемость локальными формами первичного гипергидроза (повышенное потоотделение) составляет по статистике в среднем 1–2 % населения [1]. Он характеризуется избыточным в ответ на психические стимулы потоотделением в областях, где сконцентрированы эккринные потовые железы [2].

Среди количественных методов диагностики интенсивного потоотделения можно выделить электрические методы измерения влажности кожи человека – импедансный, основанный на измерении электрической активности кожи (электросопротивления или электропроводности), и емкостной, основанный на измерении емкости датчика, зависящей от диэлектрической постоянной рогового слоя, которая изменяется в зависимости от содержания воды в эпидермисе.

Емкостные датчики влажности в последнее время становятся всё более распространенными. Одним из самых известных в косметологии емкостных измерителей влажности кожи человека является стационарный прибор *Corneometer CM 820* (Германия) и портативный емкостной измеритель влажности кожи *Aramo MC* (Корея), отличающийся компактными размерами и небольшим весом. Однако общим недостатком как стационарного, так и портативного измерителя влажности кожи человека является невозможность измерения влажности на поверхности кожи с излишками влаги и пота. Соответственно, диагностировать людей, страда-

ющих гипергидрозом проблемных зон, используя *Corneometer CM 820* и *Aramo MC*, не представляется возможным.

На основе анализа существующих методов и технических средств измерения влажности кожи человека для диагностики избыточной влажности выбран емкостной метод, так как он не требует прямого контакта электродов с кожей (отсутствуют гальванический ток и поляризационные эффекты), что является безопасным и более объективным методом по сравнению с импедансометрией.

Целью настоящей работы являлось моделирование, разработка и экспериментальная верификация емкостного датчика встречно-штыревого типа для диагностики избыточной влажности кожи человека.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести сравнительное моделирование емкостных датчиков влажности кожи человека различного конструктивного исполнения, используя программный пакет COMSOL Multiphysics.

2. Разработать и провести экспериментальную верификацию прототипа емкостного датчика встречно-штыревого типа.

3. Изготовить емкостной датчик встречно-штыревого типа в промышленных условиях.

4. Разработать методику оценки и провести исследование электрической емкости изготовленного емкостного датчика встречно-штыревого типа в зависимости от относительной влажности (раствор «дистиллированная вода +

хлорид натрия») помещенного на него хлопчатобумажного образца.

5. Проанализировать полученные данные и дать заключение о возможности использования изготовленного емкостного датчика встречно-штыревого типа для диагностики избыточной влажности кожи человека.

### Моделирование и экспериментальная верификация емкостного датчика влажности кожи человека

На рисунке 1 представлены конструкции трех емкостных датчиков влажности кожи человека – встречно-штыревой, цилиндрический и прямоугольный, построенные в программной среде COMSOL Multiphysics [3].

С помощью программного пакета *COMSOL Multiphysics* проведено двухэтапное моделирование электрических параметров каждой конструкции емкостного датчика влажности кожи человека. В результате моделирования установлено, что:

- наиболее равномерным распределением электрического поля обладает датчик встречно-штыревого типа, что соответствует эпидермальному слою кожи человека;

- наименьшей глубиной проникновения электрического поля (расстояние, на котором напряженность электрического поля уменьшается в  $e$  раз) обладает датчик встречно-штыревого типа (114 мкм) по сравнению с цилиндрическим (240 мкм) и прямоугольным типом

(212 мкм), что соответствует толщине эпидермиса, которая изменяется в пределах 100–2000 мкм в зависимости от участка тела человека, и позволяет исключить влияние более глубоких слоев кожи человека;

- емкостной датчик встречно-штыревого типа обладает наибольшей динамической чувствительностью, т.к. отношение приращения его емкости к приращению относительной влажности ( $\Delta C / \Delta RH$ ) в среднем составляет  $0,14 \text{ нФ}/\%$  (для цилиндрического и прямоугольного типа емкостного датчика величина  $\Delta C / \Delta RH$  составила в среднем  $0,05 \text{ нФ}/\%$  и  $0,04 \text{ нФ}/\%$  соответственно) [3, 4].

По результатам моделирования изготовлены три прототипа емкостного датчика встречно-штыревой структуры (рисунок 1а) с различными геометрическими параметрами, представленными в таблице. Датчики состоят из нанесенных на стеклотекстолитовую подложку марки FR4 (толщина 1,5 мм) медных электродов (толщина 120 мкм) с диэлектрическим покрытием – цапоналаком (толщина 125 мкм).

Моделирование в программной среде *COMSOL Multiphysics* показало, что наибольшей глубиной проникновения электрического поля обладает прототип № 1 (115 мкм) по сравнению с прототипом № 2 (98 мкм) и № 3 (102 мкм). Следовательно, электрическое поле, проникая в более глубокие слои кожи (дерму), снижает диагностическую ценность измеряемого параметра (электрическая емкость).

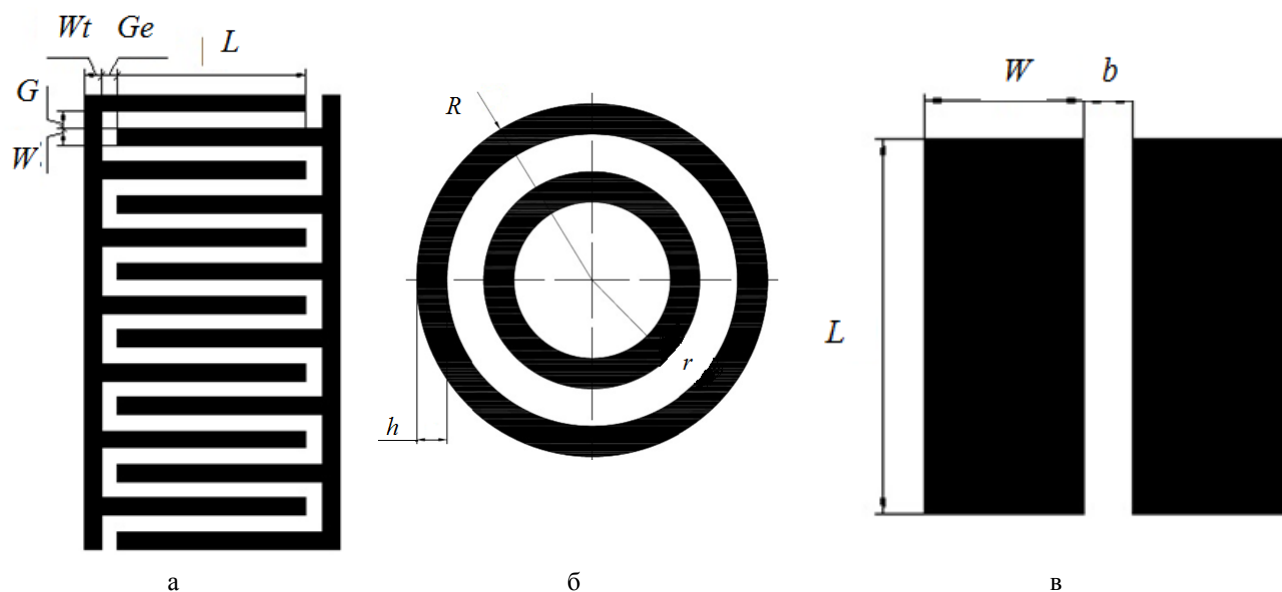


Рисунок 1 – Конструкции емкостных датчиков влажности кожи человека: а – встречно-штыревой; б – цилиндрический; в – прямоугольный

Геометрические параметры емкостных датчиков встречно-штыревого типа

Параметр, мкм	Прототип № 1	Прототип № 2	Прототип № 3
Ширина плеча, $W$	100	100	100
Промежуток между плечами, $G$	1000	640	640
Ширина электрода, $Wt$	100	100	100
Промежуток между плечом и электродом, $Ge$	1000	640	640
Длина перекрывающейся области, $L$	11700	7000	2000

Оценка чувствительности изготовленных прототипов емкостного датчика встречно-штыревого типа показала, что, если сравнивать прототипы № 2 и № 3, при изменении относительной влажности кожи на 1 % большее значение электрической емкости имеет прототип № 2 (при относительной влажности 50 % электрическая емкость прототипа № 1 равна 3,84 пФ, прототипа № 2 – 2,61 пФ, прототипа № 3 – 1,05 пФ).

С целью верификации изготовленного прототипа емкостного датчика встречно-штыревой структуры проведено исследование зависимости электрической емкости встречно-штыревого преобразователя от изменения относительной влажности (дистиллированной воды) помещенного на него хлопчатобумажного образца прямоугольной формы 10 × 20 мм и толщиной 0,1 мм. Количество проведенных экспериментов равнялось пяти.

Полученные в результате моделирования и проведенных экспериментов графики зависимости электрической емкости датчика встречно-штыревого типа от относительной влажности (дистиллированной воды) помещенного на него хлопчатобумажного образца представлены на рисунке 2. Экспериментальные данные обработаны в программном пакете для статистического анализа Statistica 10.0. Построение графиков осуществлялось в программе для создания двух- и трёхмерных графиков Gnuplot 4.6.

Отклонение экспериментальных данных от результатов моделирования, приведенных на рисунке 2, в среднем не превышает 14 %. Полученная в результате проведенных экспериментальных исследований зависимость доказывает, что модель соответствует действительности. На основании данных результатов проведено исследование соледержащих растворов.

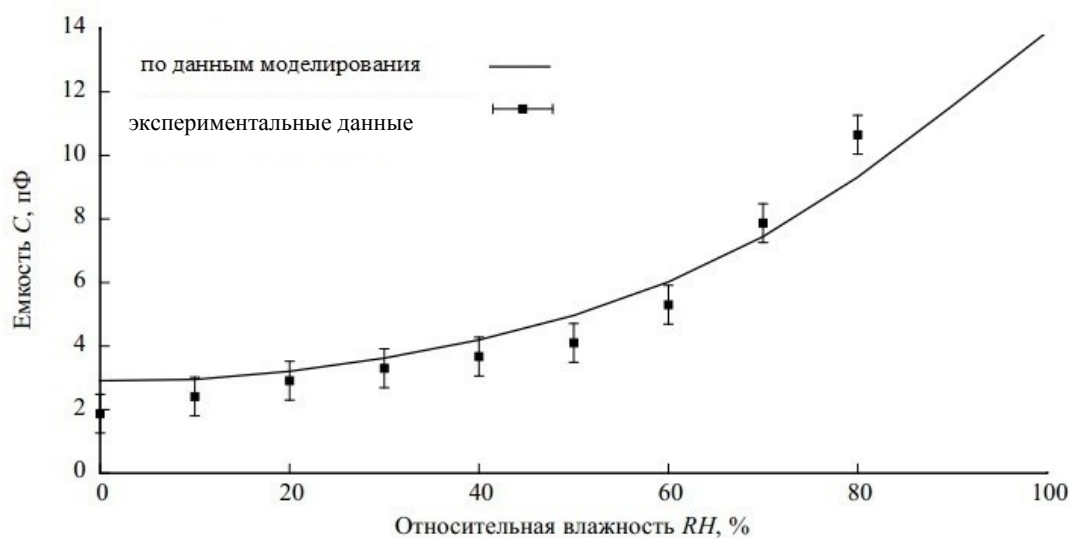


Рисунок 2 – Зависимости электрической емкости датчика встречно-штыревого типа от относительной влажности (дистиллированной воды) помещенного на него хлопчатобумажного образца

Известно, что все потовые железы в зависимости от механизма секреции подразделяются на эккриновые, или малые потовые железы, и апокриновые, или большие железы [5]. Функцией эккриновых желез, расположенных преимущественно на ладонях, подошвах и в подмышечных впадинах, является секреция содержащего электролиты пота. Пот, секретлируемый эккриновыми потовыми железами, на 98–99 % состоит из воды. В нем содержится также органические (0,15–0,5 %) и неорганические (0,65–1,5 %) вещества [6]. Содержание хлорида натрия (NaCl) в поте составляет около 0,3 %, содержание же других хлоридов щелочных металлов меньше [5], т.е. эккриновые потовые железы выделяют преимущественно NaCl [7]. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что пот представляет собой раствор, состоящий в большей степени из воды и хлорида натрия.

С целью объективизации диагностики избыточной влажности кожи человека с помощью разработанного прототипа емкостного датчика встречно-штыревой структуры проведено исследование зависимости электрической емкости встречно-штыревого преобразователя от относительной влажности (раствор «дистиллированная вода + хлорид натрия») помещенного на него хлопчатобумажного образца прямоугольной формы 10 × 20 мм и толщиной 0,1 мм. В данном исследовании использован емкостной датчик встречно-штыревого типа, изготовленный в промышленных условиях. Датчик состоит из нанесенных на стеклотекстолитовую подложку марки FR4 (толщина 1,5 мм) медных электродов (толщина 120 мкм) с диэлектрическим покрытием – маской H9100 (толщина 25 мкм).

### Методика проведения экспериментальных исследований

Методика оценки электрической емкости датчика встречно-штыревого типа в зависимости от относительной влажности помещенного на него хлопчатобумажного образца предусматривает следующие этапы:

1. Измерение массы (мг) сухого хлопчатобумажного образца.
2. Измерение электрической емкости (пФ) датчика в зависимости от помещенного на него сухого хлопчатобумажного образца (электрическая емкость системы «электроды датчика + диэлектрическое покрытие + хлопчатобумажный образец»).

3. Постепенное смачивание раствором «дистиллированная вода + хлорид натрия» хлопчатобумажного образца посредством пульверизатора.

4. Измерение массы хлопчатобумажного образца при  $i$ -м смачивании.

5. Расчет количества раствора, содержащегося в хлопчатобумажном образце при  $i$ -м смачивании.

Количество раствора (относительная влажность), содержащегося в хлопчатобумажном образце при  $i$ -м смачивании, вычисляется по формуле:

$$RH_i, \% = \frac{m_{moisture,i} - m_{dry}}{m_{moisture,i}} \cdot 100\%,$$

где  $m_{moisture,i}$  – масса хлопчатобумажного образца при  $i$ -м смачивании, мг;  $m_{dry}$  – масса сухого хлопчатобумажного образца, мг.

6. Измерение электрической емкости датчика в зависимости от помещенного на него хлопчатобумажного образца при  $i$ -м смачивании (электрическая емкость системы «электроды датчика + диэлектрическое покрытие + хлопчатобумажный образец + раствор»).

В проведенном исследовании для измерения массы хлопчатобумажного образца использованы торсионные весы ВТ–500, а также измеритель иммитанса Е7–20 для определения электрической емкости образца. Определение количества содержащегося раствора в исследуемом образце осуществлялось гравиметрическим методом, в остальном методика эксперимента является оригинальной. При измерении электрической емкости хлопчатобумажный образец располагался непосредственно на датчике под постоянным давлением (около 1,5 Н) специального пружинного механизма. После каждого измерения электрической емкости датчик промывался 70-процентным раствором этанола и просушивался в течение 1 мин. Продолжительность одного эксперимента составила в среднем 10 мин, время выдержки между экспериментами 3–5 мин. Частота сигнала датчика влажности кожи задавалась на уровне 1 МГц. Состав исследуемого солевого раствора: молярная концентрация NaCl – 40 ммоль/л, или 234 мг NaCl на 100 мл дистиллированной воды. Количество проведенных экспериментов равнялось пяти.

Исследование электрической емкости датчика встречно-штыревого типа от относительной влажности помещенного на него хлопчатобумажного образца. В результате проведенных экспериментальных исследований получены зависимости электрической емкости датчика встречно-штыревого типа от относительной влажности (раствор «дистиллированная вода + хлорид натрия») помещенного на него хлопчатобумажного образца (рисунок 3).

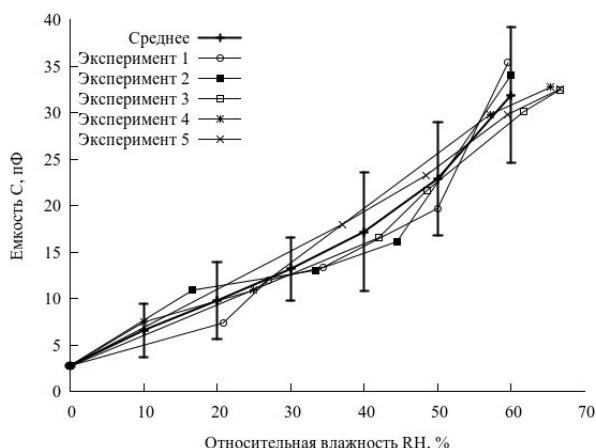


Рисунок 3 – Зависимости электрической емкости датчика встречно-штыревого типа от относительной влажности (раствор «дистиллированная вода + хлорид натрия») помещенного на него хлопчатобумажного образца

Анализируя вышепредставленные графики, можно сделать вывод, что при изменении относительной влажности от 10 до 60 % динамическая чувствительность датчика ( $\frac{\Delta C}{\Delta RH}$ ) изменяется от 0,39 до 0,91  $\frac{пФ}{\%}$ . Относительное приращение электрической емкости ( $\frac{\Delta C}{C}$ ) в среднем составило 54 %. Среднеквадратические отклонения ( $\sigma$ ) электрической емкости (эксперименты 1–5) для значений относительной влажности 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 % имеют значения 0,02; 1,02; 1,47; 1,80; 2,13; 2,06; 2,36 пФ соответственно. При этом все результаты эксперимента с вероятностью 99,7 % попадают в пределы доверительного интервала [ $m \pm 3\sigma$ ].

### Заключение

Проведено сравнительное моделирование емкостных датчиков влажности кожи человека различного конструктивного исполнения.

Разработан прототип емкостного датчика встречно-штыревой структуры, а также проведена его экспериментальная верификация, которая показала, что полученные в результате моделирования данные соответствуют экспериментальным данным. Это послужило основанием для изготовления емкостного датчика встречно-штыревого типа в промышленных условиях.

Разработана методика оценки электрической емкости датчика встречно-штыревого типа в зависимости от относительной влажности помещенного на него хлопчатобумажного образца (раствор «дистиллированная вода + хлорид натрия»).

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при изменении относительной влажности от 0 до 60 % относительное приращение электрической емкости ( $\frac{\Delta C}{C}$ ) в среднем составило 54 %; все результаты эксперимента с вероятностью 99,7 % попадают в пределы доверительного интервала [ $m \pm 3\sigma$ ].

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования изготовленного в промышленных условиях емкостного датчика встречно-штыревого типа для диагностики избыточной влажности кожи человека.

### Список использованных источников

1. Стебунов, С.С. Первичный гипергидроз: диагностика и лечение / С. С. Стебунов. – Минск, 2007. – 209 с.
2. Гордиенко, А.Ф. Расстройства потоотделения (клиника, диагностика, лечение) : метод. рекомендации / А.Ф. Гордиенко. – М., 1982. – 17 с.
3. Воробей, А.М. Моделирование емкостного датчика влажности кожи / А.М. Воробей [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 11. – С. 50–55.
4. Воробей, А.М. Моделирование емкостного встречно-штыревого датчика влажности кожи человека для диагностики гипергидроза / А.М. Воробей [и др.] // Доклады БГУИР. – 2013. – № 6 (76). – С. 24–30.
5. Мяделец, О.Д. Морфофункциональная дерматология / О.Д. Мяделец, В.П. Адашкевич. – М. : Медлит, 2006. – 752 с.
6. Стуканова, Н.П. Дерматовенерология : учебник / Н.П. Стуканова. – М. : КНОРУС, 2010. – 256 с.
7. Солоха, О.А. Фокальный гипергидроз: проблема, нашедшая свое решение / О.А. Солоха // Неврологический журнал. – 2004. – Т. 6. – № 9. – С. 43–48.

Vorobei A.M., Rymarev D.V., Potapov A.L., Davydov M.V., Stebunov S.S.

**Interdigital-type capacitive sensor for excessive skin moisture content diagnostics**

Interdigital capacitive sensor for excessive skin moisture content was developed.  
(E-mail: vorobeianna@tut.by)

**Key words:** interdigital-type capacitive sensor, capacitance, excessive human skin moisture content.

*Поступила в редакцию 14.02.2013.*

*h*