

УДК 612.792.8; 616.56–008.811.1; 681.2; 004.942

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕМКОСТНОГО ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОГО ДАТЧИКА ВЛАЖНОСТИ КОЖИ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГИПЕРГИДРОЗА

А.М. ВОРОБЕЙ<sup>1</sup>, Д.В. РЫМАРЕВ<sup>1</sup>, А.Л. ПОТАПОВ<sup>1</sup>, М.В. ДАВЫДОВ<sup>1</sup>, С.С. СТЕБУНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

<sup>2</sup>ООО «Клиника современной медицины Вектор»,  
Социалистическая, 10, Минск, 220021, Беларусь

Поступила в редакцию 26 апреля 2013

Исследована электрическая емкость и соответствующая ей влажность хлопчатобумажного образца, используемого в качестве объекта накопления количества выделенного человеком пота. Построены зависимости электрической емкости встречно-штыревого датчика от относительной влажности помещенного на него исследуемого образца ткани в результате моделирования с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics и экспериментально проведенного исследования. Полученная зависимость проведенного исследования позволяет применять изготовленный образец датчика влажности кожи человека для диагностики гипергидроза.

*Ключевые слова:* моделирование, электрическая емкость, встречно-штыревой датчик, гипергидроз.

### Введение

Влажность кожи человека поддерживается функцией потовых желез [1]. Пот, секретлируемый эккринными потовыми железами, на 98–99 % состоит из воды. В нем содержатся также органические (0,15–0,5 %) и неорганические (0,65–1,5 %) вещества [2]. Уменьшение влажности кожи приводит к появлению сухости. И, напротив, в результате обильного потоотделения наблюдается значительное повышение влажности кожи. Повышенное или избыточное потоотделение врачи называют гипергидрозом [3].

Однако проблема заключается в том, что на сегодняшний день нет четких количественных показателей, которые объективно говорили о наличии гипергидроза и его степени. Таким образом, в настоящее время актуальным является поиск простого и вместе с тем объективного метода диагностики повышенного потоотделения проблемных зон человека.

Альтернативным вариантом решения данной проблемы является использование метода, основанного на измерении емкости датчика, зависящей от диэлектрической постоянной рогового слоя, которая изменяется в зависимости от содержания воды в эпидермисе. Следовательно, емкостной метод измерения влажности кожи человека является безопасным и более объективным методом по сравнению с импедансометрией, т.к. не требует прямого контакта электродов с кожей (отсутствует гальванический ток и поляризационные эффекты).

Целью настоящей работы является моделирование и разработка емкостного датчика влажности кожи человека для диагностики гипергидроза.

## Создание методом конечных элементов программных моделей для конструирования емкостных датчиков влажности кожи человека

В работе [4] с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics построены конфигурации трех емкостных датчиков влажности кожи человека (ДВ): встречно–штыревой, цилиндрический и прямоугольный (рис. 1).

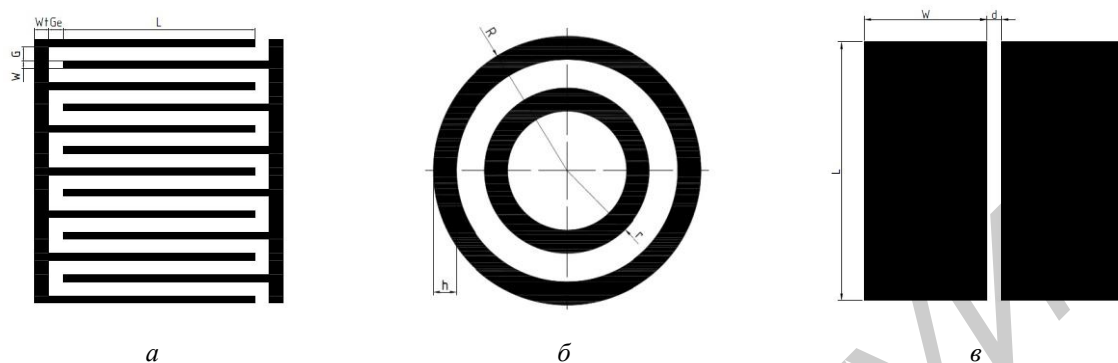


Рис. 1. Конфигурации емкостных ДВ: встречно–штыревой датчик (а), цилиндрический датчик (б) и прямоугольный датчик (в)

Геометрические параметры встречно–штыревого, цилиндрического и прямоугольного ДВ представлены в табл. 1–3. Параметры встречно–штыревого датчика выбраны исходя из данных литературного источника [5]. Размеры цилиндрического и прямоугольного датчиков рассчитаны таким образом, чтобы у всех трех датчиков влажности кожи площадь покрытия платы электродами была приблизительно одинаковой.

Таблица 1. Геометрические параметры встречно–штыревого ДВ

Параметр	Значение, мкм
Ширина плеча, $W$	125
Промежуток между плечами, $G$	250
Промежуток между плечом и электродом, $Ge$	250
Длина перекрывающейся области, $L$	3625
Ширина электрода, $Wt$	250

Таблица 2. Геометрические параметры цилиндрического ДВ

Параметр	Значение, мкм
Внутренний радиус, $r$	1600
Внешний радиус, $R$	2600
Ширина электрода, $h$	550

Таблица 3. Геометрические параметры прямоугольного ДВ

Параметры	Значение, мкм
Ширина, $W$	2200
Длина, $L$	4650
Расстояние между электродами, $d$	250

Первый этап моделирования заключался в расчете для каждой конфигурации емкостного ДВ следующих электрических параметров:

– напряженность электрического поля, формируемого в результате прохождения электрического тока между электродами датчика;

– глубина проникновения электрического поля в эпидермальный слой кожи человека.

Значение напряженности электрического поля, а также глубина проникновения электрического поля в эпидермисе человека для встречно–штыревого, цилиндрического и прямоугольного датчиков представлены на рисунке.

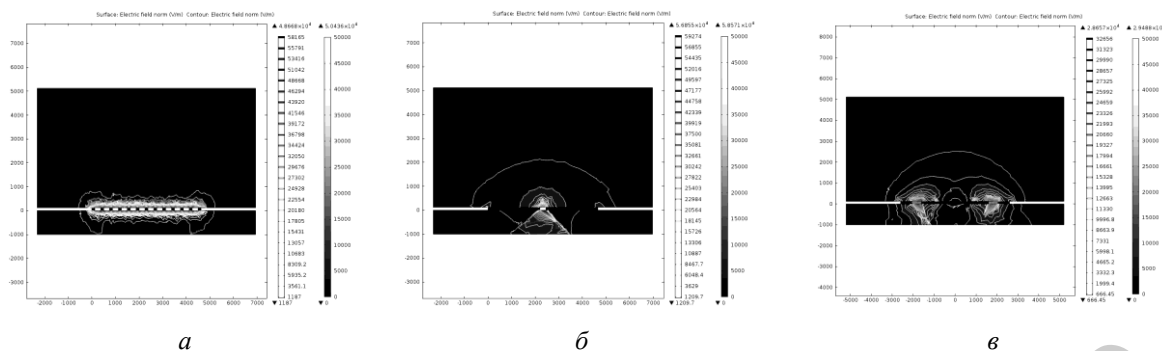


Рис. 2. Значение напряженности электрического поля, глубина проникновения электрического поля в эпидермисе человека для встречно–штыревого датчика (а), цилиндрического датчика (б) и прямоугольного датчика (в)

Анализ полученных графиков (рис. 2, а–в) позволяет заключить, что встречно–штыревой датчик характеризуется наиболее равномерным распределением электрического поля, что соответствует эпидермальному слою кожи человека.

Емкость рассматриваемых видов датчиков влажности кожи человека, расстояние от поверхности электродов, на котором напряженность электрического поля падает до нуля, а также глубина проникновения электрического поля представлены в табл. 4.

Таблица 4. Значение емкости встречно–штыревого, цилиндрического, прямоугольного ДВ; расстояние от поверхности электродов, на котором напряженность электрического поля падает до нуля; глубина проникновения электрического поля

Вид датчика	Емкость датчика (при влажности 50%), пФ	Расстояние от поверхности электродов, на котором напряженность электрического поля падает до нуля, мкм	Глубина проникновения электрического поля (расстояние, на котором напряженность электрического поля уменьшается в $\epsilon$ раз), мкм
Встречно-штыревой	6,44	516	114
Цилиндрический	2,41	2355	240
Прямоугольный	2,03	2859	212

В результате моделирования (табл. 4) установлено, что наименьшей глубиной проникновения электрического поля (114 мкм) обладает встречно–штыревой ДВ, что позволяет исключить влияние более глубоких слоев кожи человека.

На втором этапе моделирования выполнялся расчет зависимости электрической емкости ДВ с различными геометрическими параметрами от изменения относительной влажности эпидермиса.

В основе емкостного метода измерения влажности кожи человека лежит изменение диэлектрической проницаемости эпидермиса при изменении ее относительной влажности. Согласно формуле Лихтенеккера–Ротера [6], диэлектрическая проницаемость среды, состоящей из двух компонентов, зависит от их объемного соотношения и описывается формулой:  $\lg \epsilon_3 = y_1 \lg \epsilon_1 + y_2 \lg \epsilon_2$ , где  $y_1, y_2$  – объемные доли первого и второго компонентов соответственно.

В данных исследованиях диэлектрическая проницаемость сухой кожи ( $\epsilon_1$ ) принималась равной 6,04 [7], а диэлектрическая проницаемость воды ( $\epsilon_2$ ) – 77,3 (при  $t = 22^\circ\text{C}$ ) [8].

Построение модели встречно-штыревого ДВ с различными геометрическими параметрами для измерения электрической емкости в зависимости от изменения относительной влажности эпидермиса осуществлялось при помощи программной среды COMSOL Multiphysics.

Модель встречно-штыревого ДВ для измерения электрической емкости в зависимости от изменения относительной влажности эпидермиса представлен на рис. 3 (1 – плата печатная (FR4), 2 – электроды датчика влажности (медь), 3 – воздух, 4 – измеряемая среда (кожа)).

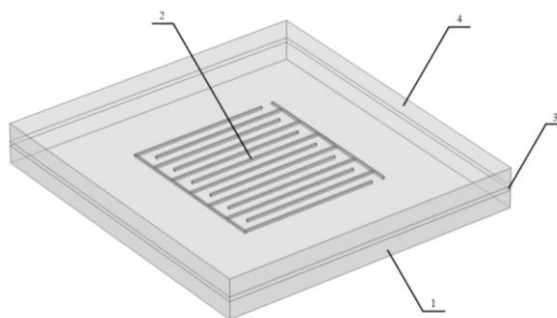


Рис. 3. Модель встречно-штыревого ДВ для измерения электрической емкости в зависимости от изменения относительной влажности эпидермиса

Значения относительной диэлектрической проницаемости для каждой подобласти модели приведены в табл. 5.

Таблица 5. Значения относительной диэлектрической проницаемости под областей модели

Подобласть	Материал	Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$
1	FR4	4,5
2	Медь	1
3	Воздух	1
4	Гомогенная модель кожи человека	6,04 – 77,3

Графики зависимости электрической емкости датчиков от относительной влажности измеряемой среды (кожи человека) представлены на рис. 4 (ВС – встречно-штыревой датчик, Ц – цилиндрический датчик, П – прямоугольный датчик).

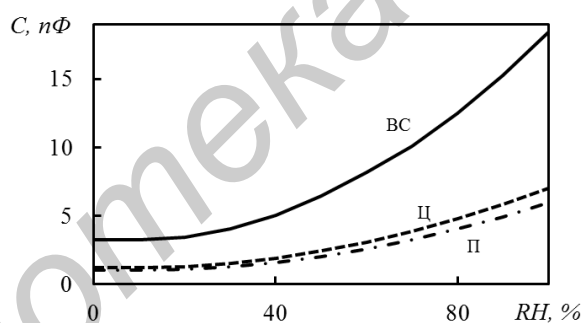


Рис. 4. Графики зависимости электрической емкости датчиков от относительной влажности эпидермиса

Анализируя вышепредставленные графики, можно сделать вывод, что встречно-штыревой ДВ обладает наибольшей чувствительностью. Т.е. при одном и том же значении относительной влажности измеряемой среды (эпидермиса) встречно-штыревой ДВ покажет большее значение электрической емкости, например, при влажности 50 % – 6,44 пФ (табл. 4). Это позволяет повысить точность определения влажности кожи человека по сравнению с цилиндрическим и прямоугольным датчиками.

По результатам моделирования изготовлены три встречно-штыревых ДВ с различными геометрическими параметрами (табл. 6). Основными изменяемыми параметрами встречно-штыревых ДВ являются промежуток между плечами  $G$  и длина перекрывающейся области  $L$  (рис. 1, а). Исходя из этого, изготовленные встречно-штыревые ДВ обозначены как датчик  $G \times L$ .

Таблица 6. Геометрические параметры встречно-штыревых ДВ

Датчик 1000x11700	Датчик 640x7000	Датчик 640x2000
$W = 100$ мкм	$W = 100$ мкм	$W = 100$ мкм
$G = 1000$ мкм	$G = 640$ мкм	$G = 640$ мкм
$Wt = 100$ мкм	$Wt = 100$ мкм	$Wt = 100$ мкм
$Ge = 1000$ мкм	$Ge = 640$ мкм	$Ge = 640$ мкм
$L = 11700$ мкм	$L = 7000$ мкм	$L = 2000$ мкм

Моделирование в программной среде COMSOL Multiphysics показало, что наибольшей глубиной проникновения электрического поля (табл. 7) обладает датчик 1000×11700 (115 мкм). Следовательно, электрическое поле, проникая в более глубокие слои кожи человека (дерма), снижает диагностическую ценность измеряемого параметра (электрическая емкость). Модель встречно-штыревого ДВ (рис. 3) в данном исследовании изменена: подобласть 3 – диэлектрическое покрытие (лак) толщиной  $h = 125$  мкм и относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 4$ .

Таблица 7. Значение электрической емкости и глубины проникновения электрического поля в коже человека рассматриваемых встречно-штыревых ДВ

Встречно-штыревой ДВ	Электрическая емкость (при влажности 50%), пФ	Глубина проникновения электрического поля (расстояние, на котором напряженность электрического поля уменьшается в $\varepsilon$ раз), мкм
датчик 1000x11700	3,84	115
датчик 640x7000	2,65	98
датчик 640x2000	1,05	102

Графики зависимости электрической емкости рассматриваемых встречно–штыревых ДВ от относительной влажности измеряемой среды (кожи человека) представлены на рис. 5.

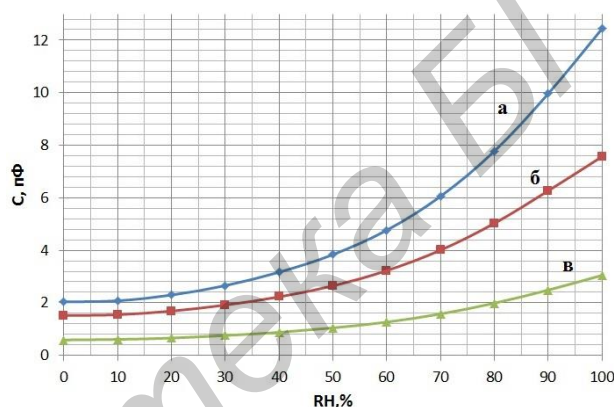


Рис. 5. Графики зависимости электрической емкости встречно–штыревых ДВ от относительной влажности измеряемой среды (кожи человека): датчик 1000×11700 (а), датчик 640×7000 (б), датчик 640×2000 (в)

Следовательно, экспериментально установлено, что датчик 640×7000 имеет меньшую глубину проникновения электрического поля, чем датчик 1000×11700, и является более чувствительным по сравнению с датчиком 640×2000 (табл. 7).

### Экспериментальная часть

С целью объективизации диагностики интенсивного потоотделения проблемных зон человека с помощью изготовленного датчика влажности кожи человека проведено исследование зависимости электрической емкости встречно-штыревого преобразователя от изменения относительной влажности помещенного на него хлопчатобумажного образца прямоугольной формы (10x20 мм).

Методика оценки электрической емкости встречно–штыревого датчика в зависимости от относительной влажности помещенного на него исследуемого образца ткани предусматривает следующие этапы.

1. Измерение относительной влажности, содержащейся в хлопчатобумажном образце, гравиметрическим методом в соответствии со следующим алгоритмом.

- измерение массы (единица измерения – мг) сухого хлопчатобумажного образца;
- измерение электрической емкости (единица измерения – пФ) датчика в зависимости от помещенного на него сухого хлопчатобумажного образца (электрическая емкость системы «электроды датчика + диэлектрическое покрытие + хлопчатобумажный образец»);

- постепенное смачивание водой хлопчатобумажного образца посредством пульверизатора;
- измерение массы хлопчатобумажного образца при  $i$ -м смачивании;
- расчет количества влаги (воды), содержащейся в хлопчатобумажном образце при  $i$ -м смачивании.

Количество влаги (относительная влажность), содержащейся в хлопчатобумажном образце при  $i$ -м смачивании, вычисляется по формуле [9]

$$RH_i, \% = \frac{m_{moisture, i}}{m_{dry} + m_{moisture, i}} \cdot 100\%, \text{ где } m_{dry} - \text{масса сухого хлопчатобумажного образца, мг; } m_{moisture, i} - \text{масса влаги в хлопчатобумажном образце при } i\text{-м смачивании, мг.}$$

2. 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 + вода»).

3. Построение полученной в результате проведенного эксперимента зависимости электрической емкости встречно-штыревого преобразователя от относительной влажности помещенного на него хлопчатобумажного образца с помощью табличного процессора Microsoft Excel.

В проведенном исследовании для измерения массы исследуемого образца ткани использованы весы торсионные ВТ-500, а также измеритель иммитанса Е7-20 для определения электрической емкости образца. Частота сигнала датчика влажности кожи человека задавалась на уровне 1 МГц. Количество проведенных экспериментов равнялось 5.

### Результаты и их обсуждение

Полученные в результате моделирования и проведенных экспериментальных исследований зависимости электрической емкости встречно-штыревого датчика от относительной влажности помещенного на него хлопчатобумажного образца представлены на рис. 6 ( $a$  – по данным моделирования,  $b$  – по экспериментальным данным (усредненный график)).

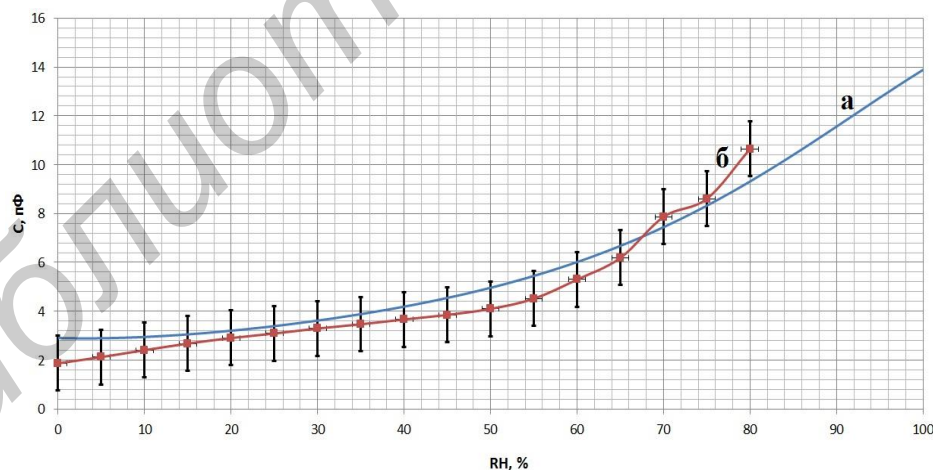


Рис. 6. Зависимости электрической емкости встречно-штыревого датчика от относительной влажности помещенного на него хлопчатобумажного образца

Отклонение экспериментальных данных (рис. 6,  $b$ ) от результатов моделирования (рис. 6,  $a$ ) в среднем составило не более 0,61 пФ.

Полученная в результате проведенных исследований зависимость позволяет применять изготовленный образец датчика влажности кожи человека для диагностики гипергидроза.

## Заклучение

Результатом настоящей работы явилось изготовление емкостного встречно–штыревого датчика влажности кожи человека, отличающегося глубиной проникновения электрического поля (98 мкм) и чувствительностью ( $C = 2,65$  пФ при  $RH = 50 \%$ ).

Проведено исследование, заключающееся в измерении электрической емкости и соответствующей ей влажности хлопчатобумажного образца. Построены зависимости емкости встречно–штыревого датчика от изменения относительной влажности помещенного на него исследуемого образца ткани в результате моделирования с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics и экспериментально проведенного исследования. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о возможности применения изготовленного емкостного встречно-штыревого датчика влажности кожи человека для диагностики гипергидроза.

## SIMULATION OF INTERDIGITAL CAPACITIVE SKIN MOISTURE CONTENT SENSOR FOR HYPERHIDROSIS DIAGNOSTICS

A.M. VOROBEL, D.V. RYMAREV, A.L. POTAPOV, M.V. DAVYDOV, S.S. STEBUNOV

### Abstract

The electrical capacitance and corresponding moisture content of cotton sample used as a sweat absorption container were investigated. Dependencies of interdigital sensor electrical capacitance from relative moisture content of fabric sample under investigation placed upon the sensor were plotted as the result of simulation in COMSOL Multiphysics software suite and experiments. The resulting dependence of the study allows the implementation of the human skin moisture content sensor for hyperhidrosis diagnostics.

### Список литературы

1. Мяделец О.Д., Адашкевич В.П. Морфофункциональная дерматология. М., 2006.
2. Laden, K. Antiperspirants and Deodorants. CRC, 1999.
3. Стебунов С.С. Первичный гипергидроз: диагностика и лечение. Минск, 2007.
4. Воробей А.М., Рымарев Д.В., Давыдов М.В. др. // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2012. № 11. С. 50–55.
5. Mohd Syaifudin A.R., Mukhopadhy S.C., Yu P.L. Modelling and fabrication of optimum structure of novel interdigital sensors for food inspection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.massey.ac.nz/~pyu/IntJNumModelling.pdf>. – Дата доступа: 10.01.2013.
6. Lichtenecker K., Rother K. // Phys. 1931. Z. 32. P. 255–260.
7. Najihah M., Deepak K., Wong T. Dielectric Properties of Human Skin In Vivo in the Frequency Range 20 – 38 GHz for 42 Healthy Volunteers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/KP.45%280850%29.pdf>. – Дата доступа: 27.12.2012.
8. Некрасов Б. В. Основы общей химии. Т. 1. М., 1973.
9. Lambe T., Whitman R. // Soil Mechanics (First ed.). New Jersey, 1969.