

УДК 519.85; 004.42; 616.5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА ВЛАЖНОСТИ КОЖИ**

**А.М. ВОРОБЕЙ, Д.В. РЫМАРЕВ, канд. техн. наук, доц. М.В. ДАВЫДОВ**  
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск);  
**д-р мед. наук, проф. С.С. СТЕБУНОВ**  
(Республиканский клинический медицинский центр, Минск)

*Демонстрируется программно-математическая модель емкостного датчика влажности кожи с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. В результате моделирования построены конфигурации трех емкостных датчиков влажности кожи: «встречно-штыревой», «цилиндрический» и «прямоугольный». Для каждой конфигурации емкостного датчика рассчитаны напряженность электрического поля, глубина проникновения электрического поля, зависимость емкости датчика от изменения относительной влажности эпидермиса. В процессе исследований установлено, что встречно-штыревой датчик влажности кожи обладает наименьшей глубиной проникновения электрического поля (114 мкм), что позволяет исключить влияние более глубоких слоев кожи человека. Также показано, что встречно-штыревой датчик имеет наибольшую чувствительность измерения влажности эпидермиса по сравнению с цилиндрическим и прямоугольным датчиками.*

**Введение.** В последние десятилетия в Республике Беларусь и за рубежом интенсивно исследуется влияние содержания влаги в различных материалах на их свойства. В медицине и косметологии влажность кожи является важным диагностическим показателем, который позволяет как установить состояние эпидермиса, так и выявить состояние организма в целом. Многочисленные лабораторные и клинические исследования показали взаимосвязь изменения влажности кожи и интенсивности потоотделения при сильных болях (стенокардия, инфаркт миокарда), сильной одышке и других патологических состояниях. Измерение влажности кожи и последующая диагностика пациента позволяют судить о наличии тиреотоксикоза и гипогликемии. На основании показаний влажности кожи судят о различных заболеваниях эпидермиса.

Человеческое тело представляет собой крайне сложную систему, и для разработки эффективных датчиков влажности необходимо решить ряд задач: изучение характера распределения и распространения электрического поля в нелинейных неоднородных структурах; исследование влияния технических и технологических аспектов на точность проведенных измерений.

Различным методам измерения влажности в материалах и средах уделено в литературе достаточно много внимания. В то же время практически все методы направлены на измерение влажности в различных отраслях промышленности: в строительстве измерители влажности используются для определения свойств бетона, кирпича, древесины и прочих твердых тел; в пищевой промышленности важным показателем является влажность зерна и бобовых культур [1; 2].

Как показал обзор литературных источников патентных исследований, к настоящему времени известны различные способы измерения влажности кожи [3], имеющие определенные достоинства и недостатки. К примеру, определение относительной влажности кожи с применением ядерного магнитного резонанса дает высокую точность измерения, но сама измерительная система является громоздкой и дорогостоящей, что делает её неприменимой в косметологической практике. Наиболее перспективными являются электрические методы определения влажности кожи: импедансный и емкостной [4].

Емкостные датчики влажности в последнее время становятся всё более распространенными. Они недорогие, просты в эксплуатации, обеспечивают в высокой степени точные показания. Одним из самых известных измерителей влажности кожи емкостным методом является прибор Corneometer CM 825. Это современный высокочувствительный прибор для измерения гидратации кожи [5].

В корнеометрии воплощены последние научные разработки в области диагностики кожи. Метод основан на измерении емкости. Дело в том, что диэлектрическая константа воды равна 81, остальные вещества в большинстве случаев имеют диэлектрическую проницаемость менее 7. Измерение емкости показывает различие данного параметра в разных образцах, в зависимости от содержания воды в этих образцах. Стеклопластиковая пластинка (диэлектрик) изолирует золотую пластинку измерительного электрода от контакта с кожей, что предотвращает прохождение электрического тока. Рассеянное электрическое поле проникает через кожу, что позволяет определять ее диэлектрические свойства. На одном электроде образуется избыток электронов (отрицательный полюс), на другом – остаток электронов (положительный полюс). Создается электрическое поле между электродами, несущими разный заряд. Во время измерения волны проникают в поверхностный эпидермальный слой кожи и определяются его диэлектрические свойства.

Возможности и преимущества корнеометрии заключаются в следующем:

- измерение емкости не влияет на химический состав кожи и электролитный состав веществ, нанесенных на кожу; отсутствует гальванический ток и поляризационные эффекты;
- глубина проникновения электрических волн достоверно мала, что означает оценку влажности именно на поверхности кожи;
- обеспечивается температурная стабильность зонда;
- время измерения очень мало – около 1 с, это предотвращает окклюзию, которая влияет на точность измерений;
- исключается влияние емкости глубоко лежащих тканей;
- изменения параметров питания прибора не влияют на результаты измерений;
- постоянное и малое давление измерительной головки зонда (около 1,6 Н) дает возможность достоверных повторов результатов измерений, без влияния на физиологические функции кожи;
- малый размер измерительной головки дает возможность проводить измерения на всех участках тела (даже на губах, носу, ушах).

Основные методы, описывающие поведение электрического поля в различных системах, базируются на уравнениях в частных производных. Поэтому применение аналитических методов решения (метод конформных преобразований, метод изображений, метод разделения переменных) сопряжено с определенными трудностями или вообще невозможно в силу сложной геометрической конструкции объектов, нелинейности характеристик материалов и других факторов. В этом случае единственными методами решения являются численные методы, в основе которых лежит дискретизация. Уравнение поля в частных производных преобразуется в систему алгебраических уравнений, решение которой дает аппроксимацию поля в дискретных точках пространства.

Метод конечных элементов (МКЭ) [6] – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Выбор МКЭ для решения дифференциальных уравнений в частных производных обусловлен преимуществами данного метода: произвольная форма обрабатываемой области; сетку можно сделать более редкой в тех местах, где особая точность не нужна. В настоящей работе для моделирования емкостного датчика влажности использован программный пакет COMSOL Multiphysics. Это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных методом конечных элементов.

Целью данной работы является разработка программно-математической модели емкостного датчика влажности кожи, позволяющей определять напряженность электрического поля, глубину проникновения электрического поля, а также емкость датчика в зависимости от относительной влажности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: *создать* геометрию моделей емкостных датчиков влажности кожи, используя программный пакет COMSOL Multiphysics; *определить* для каждой модели емкостного датчика электрические параметры: напряженность электрического поля, глубину проникновения электрического поля, емкость датчика в зависимости от относительной влажности; *проанализировать* полученные данные и обосновать выбор конфигурации датчика для измерения влажности кожи.

**Емкостной метод измерения влажности.** Основой емкостного метода измерения влажности является изменение диэлектрической проницаемости исследуемого материала (кожи человека) при изменении его относительной влажности. Для среды, состоящей из двух компонентов, диэлектрическая проницаемость зависит от их объемного соотношения и описывается формулой Лихтенеккера – Ротера:

$$\lg \varepsilon_3 = y_1 \lg \varepsilon_1 + y_2 \lg \varepsilon_2, \quad (1)$$

где  $y_1, y_2$  – объемные доли первого и второго компонентов соответственно.

В данных исследованиях диэлектрическая проницаемость сухой кожи ( $\varepsilon_1$ ) принималась равной 7, а диэлектрическая проницаемость воды ( $\varepsilon_2$ ) – 81.

На основании уравнения (1) получена зависимость диэлектрической проницаемости от относительной влажности кожи, представленная на рисунке 1 (сплошная линия). С помощью табличного процессора Microsoft Excel 2010 получена аппроксимированная кривая, обозначенная на рисунке 1 пунктирной линией.

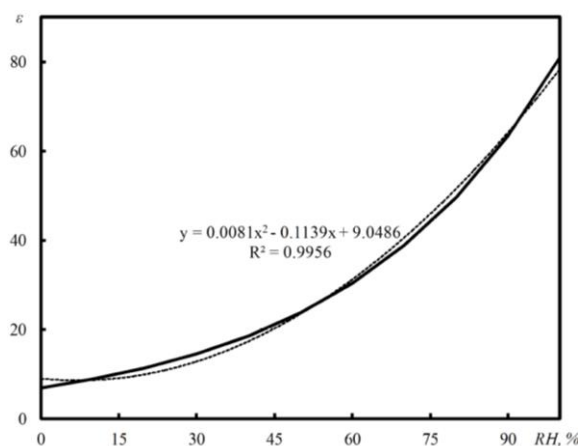


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости от относительной влажности кожи

**Моделирование электрического поля.** Энергия, требуемая для зарядки конденсатора, должна равняться энергии электростатического поля, которая находится по следующей формуле:

$$W_e = \frac{q^2}{2C}, \quad (2)$$

где  $W_e$  – энергия заряженного конденсатора, Дж;  $q$  – заряд конденсатора, Кл;  $C$  – емкость конденсатора, Ф.

Величина  $W_e$  доступна в режиме Electrostatics пакета COMSOL Multiphysics: приложение рассчитывает данное значение путем интегрирования:

$$W_e = \int (D, E) d\Omega, \quad (3)$$

где  $D$  – электрическое смещение;  $E$  – напряженность электрического поля.

Емкость  $C$  является функцией заряда  $q$  на двух проводящих обкладках и разности потенциалов  $\Delta V$  между этими обкладками и определяется по формуле:

$$C = \frac{q}{\Delta V}. \quad (4)$$

Таким образом, расчет емкости  $C$  производится из найденной при моделировании энергии заряженного конденсатора  $W_e$  и разности потенциалов  $\Delta V$  на обкладках конденсатора по формуле [7]:

$$C = \frac{2W_e}{\Delta V^2}. \quad (5)$$

**Построение геометрии емкостных датчиков.** Построение объемных моделей в COMSOL Multiphysics можно осуществить несколькими способами: импорт готовой геометрии из других CAD-пакетов, таких как AutoCAD и SolidWorks; создание геометрии в пакете MATLAB; импорт готовой геометрии, созданной заранее в COMSOL Multiphysics; пошаговое создание геометрии в COMSOL Multiphysics. В данной работе использовано создание модели с помощью встроенных в пакет инструментов [8].

В результате моделирования построены конфигурации трех емкостных датчиков влажности: «встречно-штыревой», «цилиндрический» и «прямоугольный» (рис. 2). Частота сигналов датчиков задана на уровне 10 кГц.

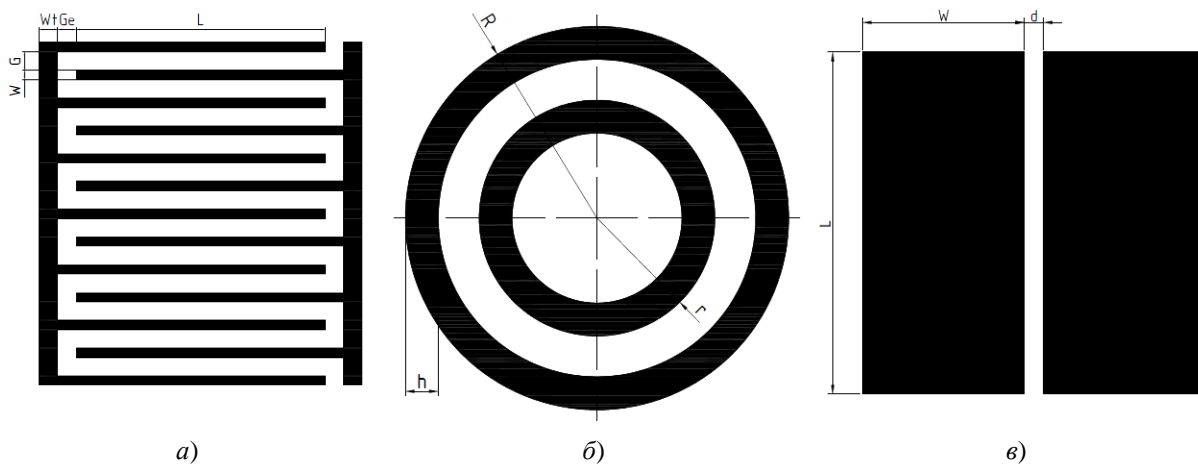


Рис. 2. Модели емкостных датчиков:

- a* – встречно-штыревой датчик ( $W$  – ширина плеча в мкм;  $G$  – промежуток между плечами;  $G_e$  – промежуток между плечом и электродом;  $L$  – длина перекрывающейся области;  $W_e$  – ширина электрода);  
*б* – цилиндрический датчик ( $r$  – внутренний радиус в мкм;  $R$  – внешний радиус;  $h$  – ширина электрода);  
*в* – прямоугольный датчик ( $d$  – расстояние между электродами;  $W$  – ширина;  $L$  – длина)

**Моделирование электрических параметров емкостных датчиков и анализ результатов.** В пакете COMSOL Multiphysics рассчитаны следующие параметры: напряженность электрического поля, глубина проникновения электрического поля, зависимость емкости датчика от изменения относительной влажности эпидермиса.

На рисунке 3 представлено распределение электрического поля для встречно-штыревого, цилиндрического и прямоугольного датчиков.

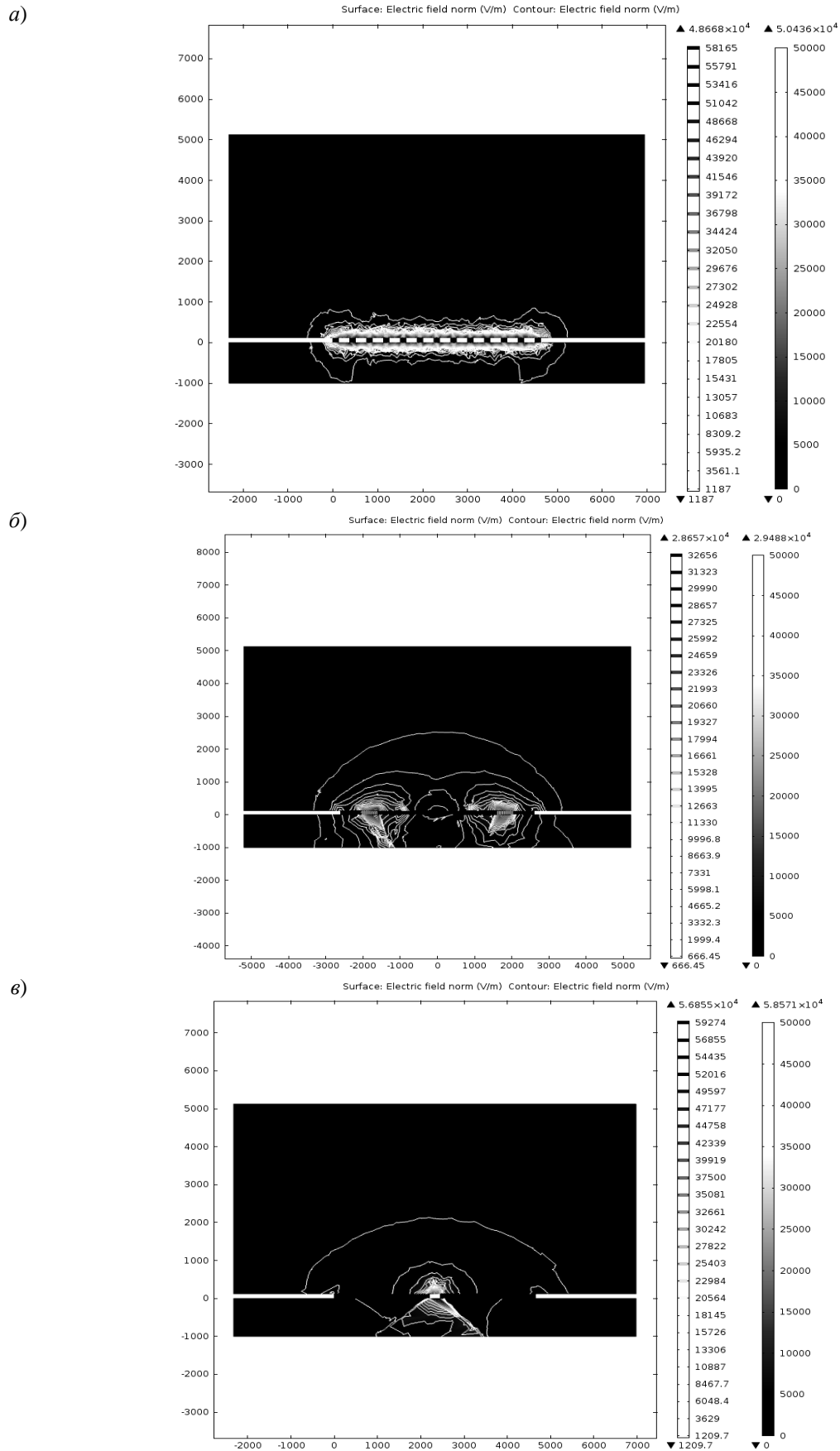


Рис. 3. Распределение электрического поля встречно-штыревого датчика (а), цилиндрического датчика (б) и прямоугольного датчика (в)

Анализируя полученные графики (см. рис. 3, а – в), можно заключить, что встречно-штыревой датчик обладает наиболее равномерным распределением электрического поля в эпидермисе человека.

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

Емкость рассматриваемых видов датчиков; 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 $e$ раз), мкм
Встречно-штыревой	6,44	516	114
Цилиндрический	2,41	2355	240
Прямоугольный	2,03	2859	212

Из таблицы видно, что глубина проникновения электрического поля в случае встречно-штыревого датчика является наименьшей (114 мкм), что позволяет избежать влияния глуболежащих тканей на измерение влажности эпидермиса.

График зависимости емкости датчиков от относительной влажности измеряемой среды (кожи) представлен на рисунке 4.

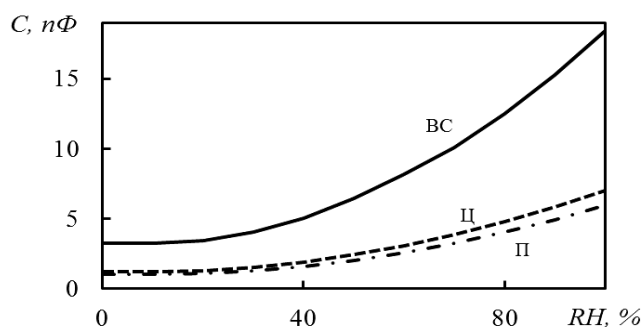


Рис. 4. Зависимость емкости датчиков от относительной влажности:  
BC – встречно-штыревой датчик; Ц – цилиндрический датчик; П – прямоугольный датчик

Анализ данных, представленных на графике (см. рис. 4), показал следующее:  
- встречно-штыревой датчик обладает наибольшей чувствительностью измерения влажности эпидермиса;

- цилиндрический и прямоугольный – наименьшей, что связано с большей площадью электродов встречно-штыревого датчика.

При одинаковом изменении относительной влажности кожи встречно-штыревой датчик будет показывать большее изменение емкости. Это позволяет повысить точность определения влажности кожи по сравнению с цилиндрическим и прямоугольным датчиками.

**Заключение.** С помощью программного пакета COMSOL Multiphysics построены модели трех емкостных датчиков влажности кожи: «встречно-штыревой», «цилиндрический» и «прямоугольный».

Для каждой конфигурации емкостного датчика рассчитаны:

- напряженность электрического поля;
- глубина проникновения электрического поля;
- зависимость емкости датчика от изменения относительной влажности эпидермиса.

В результате моделирования установлено:

- наименьшей глубиной проникновения электрического поля (114 мкм) обладает встречно-штыревой датчик влажности кожи, что позволяет исключить влияние более глубоких слоев кожи человека;

- встречно-штыревой датчик обладает наибольшей емкостью при влажности 50 % – 6,44 пФ, что позволяет повысить точность определения влажности кожи по сравнению с цилиндрическим и прямоугольным датчиками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Способ и устройство для непрерывного измерения влажности сыпучего продукта: пат. 2154816 RU G01N22/04 / Ханс Тоблер (CH), Рогер Леманн (CH), Роман Мюллер (CH); заявитель и патентообладатель БЮЛЕР АГ, Патентабтайлунг (CH). – № 97121906/09; заявл. 28.03.1996; опубл. 20.08.2000.
2. Емкостной датчик влажности: пат. 2167414 RU G01N27/22 / С.М. Башилов, Е.К. Залядеев, В.Г. Крицкий, В.А. Шапошников, М.Т. Вивсяный, С.В. Волков. – № 99124901/28; заявл. 24.11.99; опубл. 20.05.2001.
3. Воробей, А.М. Методы определения интенсивности потоотделения / А.М. Воробей // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2011»: материалы 7-й междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Севастополь, 2011 г.; науч. ред. Ю.Б. Гимпилевич. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – С. 191.
4. Vorobei, A.M. Electrical methods of measuring skin humidity / A.M. Vorobei, D.V. Rymarev // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2012»: материалы 8-й междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Севастополь, 2012 г.; науч. ред. Ю.Б. Гимпилевич. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – С. 181.
5. Schulz, S. Messung der Hydratation der Mundschleimhaut mit dem Corneometer CM 820 / S. Schulz, C. Lautenschlager, I. Beyer // Deutsche Zahnärztliche Zeitung. – 2003. – № 58.
6. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз; пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
7. Modeling and fabrication of optimum structure of novel interdigital sensors for food inspection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: jnm813.pdf.
8. Designing a Capacitive Sensor using COMSOL. Application Note [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ap\_AQ.pdf.

Поступила 29.06.2012

#### MODELLING OF SKIN MOISTURE CAPACITIVE SENSOR

**A. VOROBEL, D. RYMAREV, M. DAVYDOV, S. STEBUNOV**

*A mathematical model of skin moisture capacitive sensor using software environment COMSOL Multiphysics has been developed. As the result of modeling three configurations of skin moisture capacitive sensor (interdigital, cylindrical and rectangular) have been proposed. For each skin moisture capacitive sensor the following parameters were calculated: the electric field, the electric field penetration depth and relative skin humidity dependence of capacitance. The interdigital skin moisture capacitive sensor has the smallest penetration depth of the electric field (114  $\mu\text{m}$ ), which eliminates the influence of the deeper layers of human skin. The interdigital sensor has the highest sensibility in measuring humidity of epidermis in comparison with cylindrical and rectangular sensors.*