

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ

*Скрипниченко Владимир Александрович, Вавилова Галина Васильевна*  
*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск*  
E-mail: vas85@tpu.ru

## APPLICATION OF THE ELECTRIC CAPACITIVE METHOD FOR TEST MEASUREMENT OF POLYPROPYLENE MEMBRANE THICKNESS

*Skripnichenko Vladimir Aleksandrovich, Vavilova Galina Vasilievna*  
*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk*

**Аннотация:** в работе рассмотрены этапы моделирования электроемкостного преобразователя для контроля толщины полимерной пленки в среде Comsol Multiphysics. Приведено сравнение результатов моделирования и теоретических расчетов значения емкости преобразователя, оценено влияние краевых эффектов на значение емкости преобразователя.

**Abstract:** The paper discusses the modeling stages an electric capacitive transducer to test the thickness of a polymer membrane in the Comsol Multiphysics. Comparison of the modeling results and theoretical calculations of the transducer capacitance value is given, the influence of edge effects on the transducer capacitance value is estimated.

**Ключевые слова:** толщина, полимерная пленка, электроемкостной метод, конденсатор, моделирование.

**Keywords:** thickness, polymer membrane, electro-capacitive method, capacitor, modeling.

Полимерная пленка получила широкое распространение в современном мире в пищевой промышленности, в строительстве для обеспечения звукоизоляции и т.д. Одним из важных параметров при изготовлении полимерной пленки является ее толщина. На сегодняшний день выпускаются пленки толщиной от 0.015 до 0.2 мм. Толщина пленки должна быть постоянной по всей поверхности материала. Отклонение толщины пленки во время эксплуатации приводит к быстрому износу, нарушению целостности и потери многих свойств, а также в процессе изготовления происходит перерасход материала.

От параметра толщины зависит прочность пленки и ее расход, время ее службы, а также сэкономить материал при изготовлении. Неравномерности (пузыри, расслоение) приводят к уменьшению прочности, потери механических свойств [1].

Для контроля толщины можно использовать такие методы как:

- Радиационный метод;
- Радиоволновый метод;
- Акустический метод;
- Оптический метод;
- Электроемкостной метод.

Ранее произведен подробный обзор методов, применимых для контроля толщины тонких полимерных пленок [2]. На основе анализа методов был выбран электроемкостной метод, потому что он удобен, прост в реализации, безопасен и обладает малой погрешностью и позволяет производить контроль с высокой скоростью [3].

Для изучения влияющих факторов на измерение толщины полимерных пленок электроемкостных методом применяется моделирование в среде Comsol Multiphysics. Моделирование позволяет снизить материальные затраты при проведении исследования.

Модель электроемкостного преобразователя представляет собой плоскопараллельный конденсатор, в качестве диэлектрика которого рассматривается контролируемая пленка. Емкость этого конденсатора зависит от толщины контролируемой пленки [4]:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \quad (1)$$

где  $S$  – площадь обкладок конденсатора;  
 $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  
 $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  
 $d$  – расстояние между обкладками.

Построение модели электроемкостного преобразователя включает в себя следующие этапы как:

1. создание геометрии преобразователя и объекта контроля;
2. задание материалов для элементов модели;
3. задание электрических параметров модели;
4. разбиение модели на области расчета.
5. Расчет модели и представление результатов.

В работе используется модель конденсатора с круглой формой обкладок, так как в этом случае влиянию краевых эффектов оказывает меньшее влияние [5]. На рисунке 1 показана геометрия модели. Радиус обкладка конденсатора принят равным  $r = 0,1$  м, т.е. площадь обкладки  $S = \pi \cdot r^2$ .

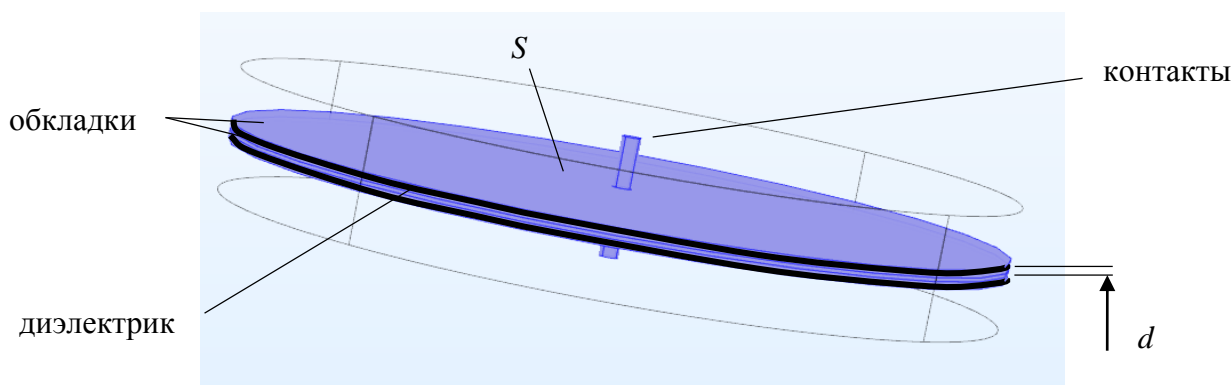


Рисунок 1 – Геометрия модели

К обкладкам конденсатора в модели привязывается материал «медь» с соответствующими свойствами, в качестве диэлектрика (область между обкладками конденсатора) используется «полиэтилен». Диэлектрическая проницаемость полиэтилена принимается равной  $\varepsilon = 4,2$ . Рассматривается вариант контактного измерения толщины пленки (отсутствие зазоров между обкладками и контролируемой пленкой). Толщина диэлектрика  $d = 0,001$  м. Область вокруг конденсатора заполнена воздухом.

Задание электрических параметров заключается в «подведении» потенциала к верхней обкладке конденсатора. К ней приложено напряжение в 5 В. Нижняя обкладка «заземляется», к ней привязываем потенциал равный 0.

Расчет в среде Comsol Multiphysics производится внутри малых областей, на которые разбивается модель (см. рисунок 2). Точность расчета зависит от размера областей. Но слишком мелкое разбиение приводит к увеличению времени расчета.

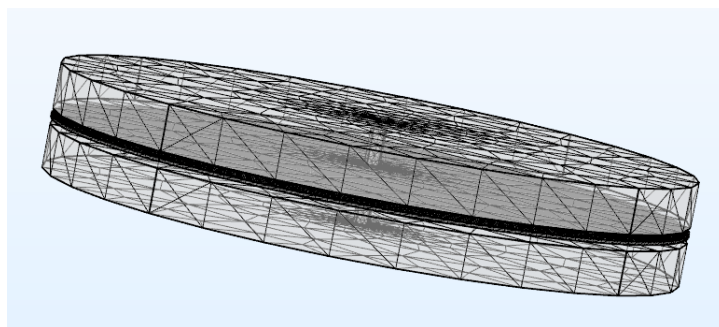


Рисунок 2 – Разделение модели на области расчета

После создания модель производится расчет, результаты которого могут быть представлены в различных вариантах: картина распределения электрического поля в 3D-пространстве или в 2D пространстве, графики зависимости изменения различных параметров, а также отдельные числовые значения различных параметров. На рисунке 3 показано распространение электрического поля в разрезе. Различные цвета показывают разные значения потенциала (от красного – 5 В до синего – 0).

Из рисунка 3 видно, что на краях конденсатора наблюдается растекание электрического поля, которое приводит к проявлению «краевых эффектов».

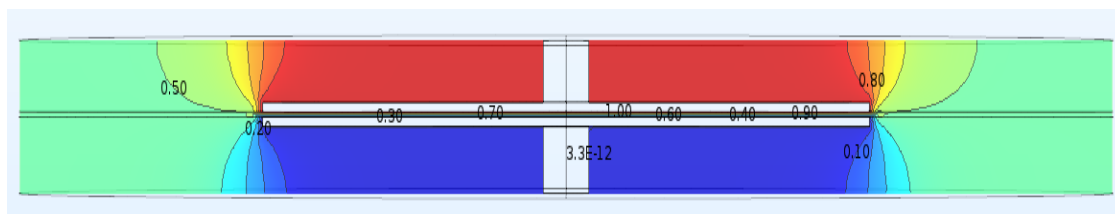


Рисунок 3 – Варианты предоставления итогов моделирования с учетом распространения электрического поля

При расчете электрической емкости плоскопараллельных конденсаторов по классической формуле (1) влияние краевых эффектов на значение емкости не учитывается, что приводит к наличию методической погрешности.

Емкость конденсатора определяется энергией  $W$  электрического поля, запасенной между двумя обкладками [7].

$$W = \int CUdU = \frac{CU^2}{2} \quad (2)$$

где  $C$  – емкость конденсатора;

$U$  – приложенное напряжение.

Энергия, запасенная в конечном объеме  $V$  (в данном случае между обкладками конденсатора) определяется

$$W = \int_V \frac{DE}{2} dV \quad (3)$$

где  $D$  – индукция электрического поля;

$E$  – напряженность электрического поля.

Из формул (2) и (3) можно вывести формулу для расчета емкости конденсатора, используемой в Comsol Multiphysics:

$$C = \frac{1}{U^2} \int_V \frac{DE}{2} dV \quad (4)$$

Так как энергия распределена по всему объему, занимаемому полем, то данная формула (4) позволяет учесть влияние краевых эффектов.

Для проверки работоспособности принятой модели сравним емкость конденсатора по теоретической формуле (1) и результаты расчета, полученные в Comsol Multiphysics.

$$C_{\tau} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} = \frac{4,2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,01}{0,001} = 1,1671 \text{ пФ}$$

При уменьшении зоны расчета до объема исследуемого конденсатора, рассчитанное в Comsol Multiphysics значение емкости практически не отличается от теоретическое. Погрешность не превышает 0,01%. Значение емкости, полученное в Comsol Multiphysics с учетом влияния краевых эффектов, равно  $C_3=1,1983$  пФ.

Погрешность от влияния краевого эффекта составляет:

$$\delta = \frac{C_{\tau} - C_3}{C_{\tau}} \cdot 100\% = \frac{1,1671 - 1,1983}{1,1671} \cdot 100 = 2,67\%$$

Не учитывать данную погрешность нельзя. Дальнейшие исследования будут направлены на исследование возможности уменьшения данной методической погрешности.

**Вывод.** Контроль толщины полимерной пленки в процессе ее производства позволяет получить качественный продукт и минимизировать затраты в случае своевременного обнаружения и устранения дефектов.

Для изучения возможных влияющих факторов при измерении толщины тонких полимерных пленок емкостным методом применяется моделирование в среде Comsol Multiphysics.

В работе показано, что наличие краевых эффектов приводит к появлению погрешности в 2,7%. Дальнейшие исследования будут направлены на поиски способов, позволяющих минимизировать влияние погрешности. А также будут рассмотрены прочие влияющие на значение емкости факторы.

#### Список литературы

1. Толщина полимерной пленки: какая бывает, как рассчитать ее вес и площадь [Электронный ресурс]/ Опленке.ру – URL: <https://oplenke.ru/tolshhina-polietilenoj-plenki-kakaya-byvaet-kak-rasschitat-ves-i-ploshhad/#i> (дата обращения 20.11.2021).
2. Власов В.А., Зольникова Л.М., Мойзес Б.Б., Степанов А.А. Организация и развитие молодежной науки в политехническом университете: монография. – Томск: издательство Томского политехнического университета, 2009. – Том 1. – 220 с.
3. Скрипниченко В.А., Вавилова Г.В., Юрченко В.В. Применение емкостного метода для контроля измерения толщины полипропиленовой пленки // Сборник научных трудов IX Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности» - ТПУ, Томск, 2021. – С. 197–200.
4. Иоссель Ю.Я. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергия, 1960. – 240 с.
5. Исаченко Е.А., Вавилова Г.В., Скрипниченко В.А. Влияние краевых эффектов на значение емкости конденсаторов // Сборник материалов II Всероссийской научно-методической конференции «Современные технологии, экономика и образование» - Томск, 2020. – С. 17–19.
6. Рюмкин А.В., Вавилова Г.В. Моделирование влияния дефектов провода на его ёмкость // Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической

конференции молодых ученых с международным участием "Россия молодая". – Кемерово, 2017. – С. 41052.

7. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля/ В. А. Говорков. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1968. – 487 с.: ил.

УДК 620.179.162

## ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ НА ОСНОВЕ РУКАВОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

*Смышляев Александр Сергеевич, Мойзес Борис Борисович,  
Кувшинов Кирилл Александрович*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск  
E-mail: mbb@tpu.ru*

*Сун Шичень*

*Цзилиньский университет, Цзилинь, КНР  
E-mail: 83917701122qq.com*

## TEST BENCHES BASED ON HIGH-PRESSURE HOSES

*Smyshlyaev Aleksandr Sergeevich, Moyzes Boris Borisovich, Kuvshinov Kirill Aleksandrovich  
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk*

*Sun Shichehn*

*Jilin University, Jilin, China*

**Аннотация:** статья посвящена обзору испытательных стендов для исследования параметров вибрации, созданных на основе рукавов высокого давления. Рассмотрены достоинства и недостатки стендов, использующих различную энергию для генерации вибрации, демонстрируется перспективность применения стендов на основе рукавов высокого давления.

**Abstract:** the article is devoted to the review of test benches for the study of vibration parameters created on the basis of high-pressure hoses. The advantages and disadvantages of stands using different energy to generate vibration are considered, the prospects of using stands based on high-pressure hoses are demonstrated.

**Ключевые слова:** вибрация, измерение, физическое моделирование, испытательные стенды, рукава высокого давления

**Keywords:** vibration, measurement, physical modeling, test benches, high pressure hoses

При анализе технических систем различного назначения отмечается как положительная роль вибрации [1–3], так и отрицательная [4–8]. При этом в обоих случаях актуально исследование зависимости параметров вибрации от технологических режимов работы технологического оборудования (см. рисунок 1).

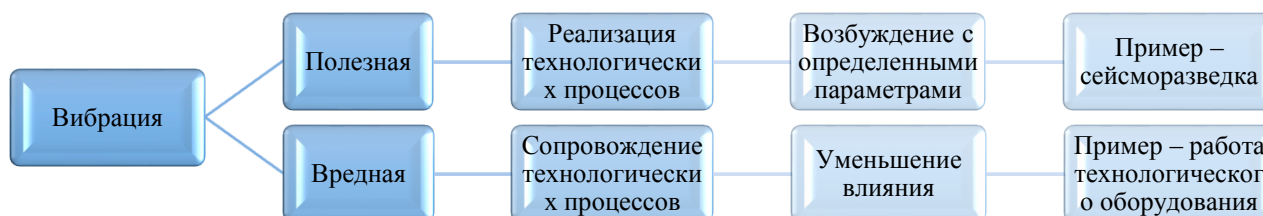


Рисунок 1 – Актуальность изучения вибрационных процессов

Одно из направлений исследования вибрации – физическое моделирование, как создание испытательных стендов, имитирующих работу реального или проектируемого технологического оборудования.