

---

## Анализ емкостного преобразователя устройства для автоматического контроля степени смешивания натуральных и химических волокон

*С.Н. Виниченко, Д. В. Масанов*

*Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва*

**Аннотация:** В статье представлены результаты проведенного расчета и анализа распределения напряженности полей в области измерительного кольца емкостного преобразователя при различных геометрических размерах электродов. Также определено целесообразное расстояние между электродами и их размер в системе первичного преобразователя для оценки качества смешивания натуральных и химических волокон на выходе ленточного оборудования.

**Ключевые слова:** качество смешивания волокон, электромагнитное поле, емкостной метод оценки, конформные преобразования.

Высокая значимость непосредственной оценки степени смешивания разнородных волокон обусловила многочисленные исследования и разработки в направлении создания методов и средств контроля указанного параметра [1-3]. Одним из предложенных способов оценки [4, 5] качества смешивания натуральных и химических волокон является емкостной метод измерения. Данный метод имеет широкое применение при оценке технологических параметров в различных областях и сферах деятельности [6-8]. При этом в текстильной промышленности, в числе прочих измеряемых параметров, емкостной метод используется для определения неровноты волокнистых продуктов по линейной плотности. Однако, в оценке качественного перемешивания компонентов, применение данных средств измерения не представляется возможным, так как они не позволяют оценить неровноту смешивания при неизменной линейной плотности.

Для решения данной проблемы предлагается метод измерений, основанный на различии физико-химических свойств натуральных и химических волокон и, прежде всего, на различии их диэлектрических свойств.

С учетом того, что диэлектрическая проницаемость разнородных типов волокон варьируется в широких пределах, сканирование условных сечений исследуемых продуктов полем емкостного преобразователя, как представлено в авторском свидетельстве SU 898311, МПК G01N 27/22, позволит определить изменение ёмкости между электродами, а, следовательно, и провести и оценку качество их смешивания.

Так, на основе данного метода, было разработано устройство, представленное в патенте на полезную модель RU 159205 U1 МПК G01N 27/22 (2006.01), для автоматического контроля параметров смешивания натуральных и химических волокон. Первичный преобразователь устройства представляет собой цилиндр 1, внутри которого находится система электродов a, b, c, d, e и f (Рис. 1), где каждая пара электродов расположена на определенном одинаковом расстоянии друг от друга:

$$h = \frac{2r}{\sqrt{2}},$$

$r$  – расстояние от оси цилиндра до одного из электродов.

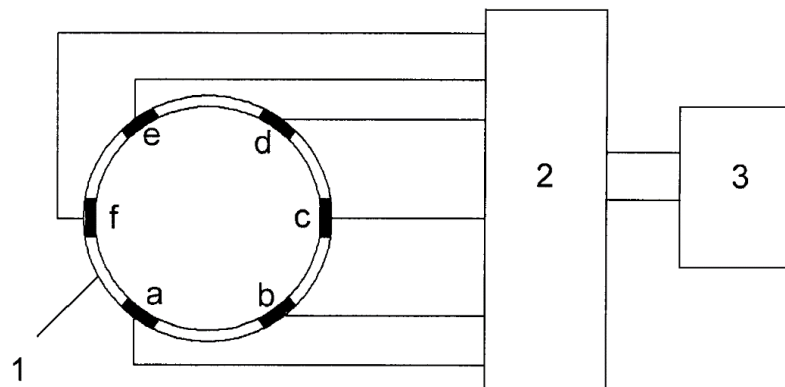


Рис.1. – Устройство для автоматического контроля параметров смешивания натуральных и химических волокон

При этом электроды первичного преобразователя с помощью блока коммутации 2 последовательно подключаются к измерительному блоку 3, в результате сечение прядильной ленты полностью подвергается сканированию вращающимся электромагнитным полем.

Ранние проводимые исследования показали [9], что при любой величине электродов и расстояния между ними характер изменения напряженности в локальной области функции радиуса измерительного кольца является нелинейным, что может привести к снижению точности измерений. Следовательно, для применения емкостного преобразователя, состоящего из шести электродов, в системах автоматического контроля качества смешивания разнородных волокон, необходимо провести анализ эмпирического поля в измерительном кольце, что позволит осуществить правильный выбор геометрических размеров электродов и расстояния между ними, обеспечив тем самым максимальное приближение зависимости  $E=f(r)$  к линейному закону.

Расчет электрических полей в кольцевом преобразователе основан на методе конформных преобразований [10], который учитывает влияние проводящих границ сложных конфигураций, т.е. осуществляется переход от известного поля в плоскопараллельном конденсаторе на плоскости  $\omega$  к плоскости  $z$ .

При этом дробно-линейная функция, позволяющая осуществить переход от круговой границы измерительного кольца к бесконечной прямолинейной границе, отображает область, заключенную внутри единичного круга на плоскости  $z$ , в бесконечную полуплоскость  $t$

$$t = j \frac{1 - z}{1 + z}. \quad (1)$$

При этом соответствие между точками окружности, характеризующие координаты угла  $\theta$ , и вещественной осью плоскости  $t$  устанавливает отображающая функция вида:

$$u = -ctg \frac{\theta}{2}. \quad (2)$$

Связь же плоскостей осуществляется через уравнение Шварца-Кристоффеля

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{S}{\sqrt{1-t^2} \cdot \sqrt{1-k^2t^2}}$$

или

$$\omega = \int_0^t \frac{S \cdot dt}{\sqrt{1-t^2} \cdot \sqrt{1-k^2t^2}}. \quad (3)$$

Данное уравнение представляет собой эллиптический интеграл первого рода, реализующийся через функцию Якоби:

$$\text{Sn}(K + jK') = \frac{1}{k}, \quad (4)$$

простое соотношение между постоянными в плоскостях  $\omega$  и  $t$ , т.е:

$$t = \text{Sn}\left(\frac{\omega}{S}\right), \quad (5)$$

где  $K = K(k)$  и  $K' = K(k')$  – полные эллиптические интегралы первого рода;  $k$  и  $k'$  – модули эллиптических интегралов;  $S$  – комплексна константа.

При этом если соотношение размеров границ в прямолинейной области определить как  $t = \frac{1}{k}$ , то, согласно уравнениям (4) и (5):

$$\frac{\omega}{S} = K + jK'. \quad (6)$$

С учетом, что, при определении электростатического поля двух электродов, расположенных на одной прямой в плоскости  $\omega$ , прямоугольные границы двух противоположных сторон соответствуют проводящим пластинам (Рис. 2), а две другие стороны представляют линии потока, где равномерное поле  $\omega = \psi + j\phi$  внутри прямоугольника преобразуется в поле в верхней половине плоскости  $t$ , то:

$$\omega = \frac{1}{2} + j\phi_0. \quad (7)$$

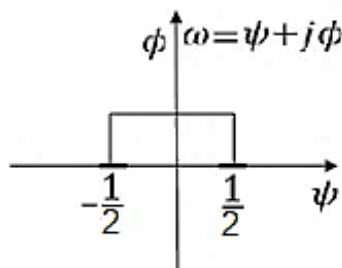


Рис.2. – Отображение функции в плоскости  $\omega$

Следовательно, уравнение (6) примет вид:

$$K + jK' = \frac{1}{2S} + j \frac{\phi_0}{S}. \quad (8)$$

Приравняв вещественные части данного уравнения, получим значение:

$$S = \frac{1}{2K}.$$

Таким образом, уравнение (5) может быть записано в виде:

$$t = Sn(2K\omega),$$

или в области  $z$ :

$$j \frac{1-z}{1+z} = Sn(2K\omega).$$

Данное решение используется как для нахождения емкости ( $C$ ) между пластинами, так и для определения параметров электростатического поля, т.е. картины линий потока и эквипотенциалей.

При расчете распределения напряженности в области измерительного кольца применяется формула:

$$E = \frac{U(a'_0 + a_0)}{2K(k') \cdot \sqrt{|(t^2 - a'^0_0) \cdot (t^2 - a_0^2)|}}, \quad (9)$$

где  $U$  – напряжение между электродами:

$$a_0 = \frac{\sin\theta_0}{1 + \cos\theta_0};$$
$$a'_0 = \frac{\sin\theta'_0}{1 + \cos\theta'_0}.$$

Таким образом, представив область  $z$  в виде полярной системы координат  $z = r \cdot e^{j\theta}$  с соответствующей зависимостью:

$$Sn(2K\omega) = \frac{2r \cdot \sin\theta}{1 + 2r \cdot \cos\theta + r^2} + j \frac{1 - r^2}{1 + 2r \cdot \cos\theta + r^2}, \quad (10)$$

получим уравнение напряженности следующего вида:

$$E = \frac{U}{2K(k')} \cdot \frac{\frac{\sin\theta'_0}{1 + \cos\theta'_0} + \frac{\sin\theta_0}{1 + \cos\theta_0}}{\sqrt{\left| \left[ \left( \frac{2r\sin\theta_0}{1 + 2r \cdot \cos\theta_0 + r^2} + j \frac{1 - r^2}{1 + 2r \cdot \cos\theta_0 + r^2} \right)^2 - \left( \frac{\sin\theta'_0}{1 + \cos\theta'_0} \right)^2 \right] \right|}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left| \left[ \left( \frac{2r\sin\theta_0}{1 + 2r \cdot \cos\theta_0 + r^2} + j \frac{1 - r^2}{1 + 2r \cdot \cos\theta_0 + r^2} \right)^2 - \left( \frac{\sin\theta_0}{1 + \cos\theta_0} \right)^2 \right] \right|}}$$

Необходимый для расчета модуль эллиптического интеграла определяется, в соответствии с отображающей функцией (2) и схемой расположения электродов (Рис. 3), по формуле:

$$k = \sqrt{\frac{\operatorname{ctg} \frac{\theta_4}{2} - \operatorname{ctg} \frac{\theta_3}{2}}{\operatorname{ctg} \frac{\theta_4}{2} - \operatorname{ctg} \frac{\theta_1}{2}}}$$

Соответственно, дополнительный модуль  $k' = \sqrt{1 - k^2}$ .

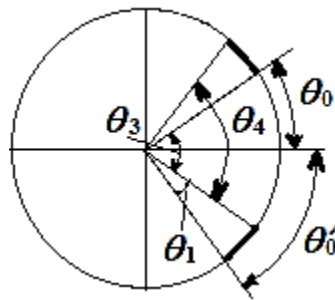


Рис. 3. – Схема расположения электродов

Согласно проведенному анализу, чем меньше размеры электродов и расстояние между ними, тем больше нелинейность  $E=f(r)$ , что показывает отношение напряженностей у края электродов и области измерительного кольца (Рис. 4).

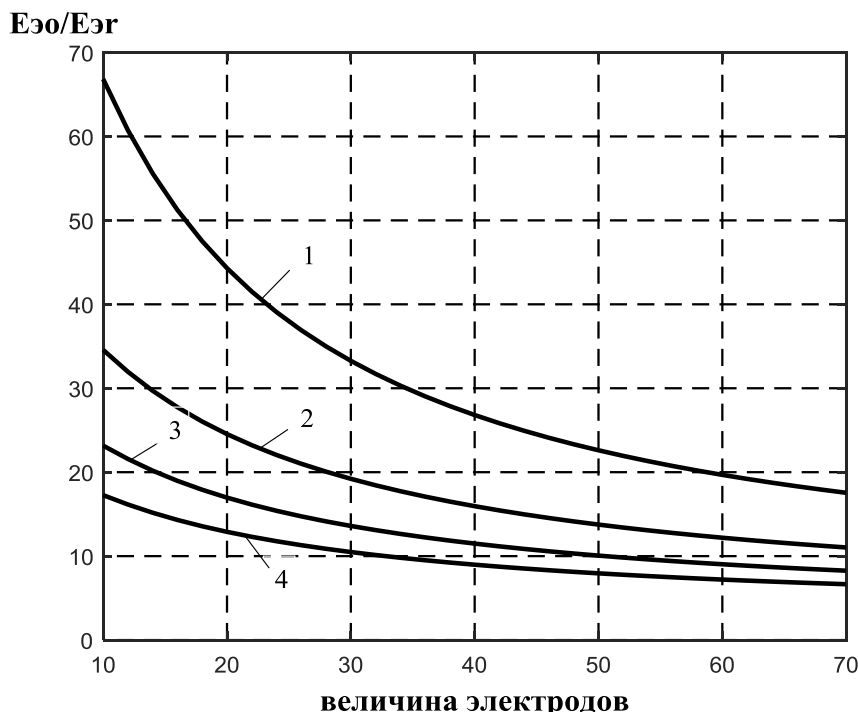


Рис.4 – Отношение напряженностей

$\theta_0$ : 1 – 10°; 2 – 20°; 3 – 30°; 4 – 40°

Однако, наиболее существенное снижение градиенты напряженности в области измерительного кольца наблюдается при увеличении расстояния между электродами до 60°.

С учетом того, что в рассматриваемом устройстве электроды (a, b, c, d, e и f) внутри измерительного цилиндра емкостного преобразователя располагаются равномерно по окружности, то размеры двух электродов и расстояние между ними должны соответствовать 60°.

Полученные результаты расчета распределения напряженности в области измерительного кольца устройства для автоматического контроля параметров смешивания натуральных и химических волокон показывают (рис.5), что расстояние шести электродов и расстояние между ними должны соответствовать:  $\theta_1 = 10^\circ$  и  $\theta_0 = 20^\circ$ .

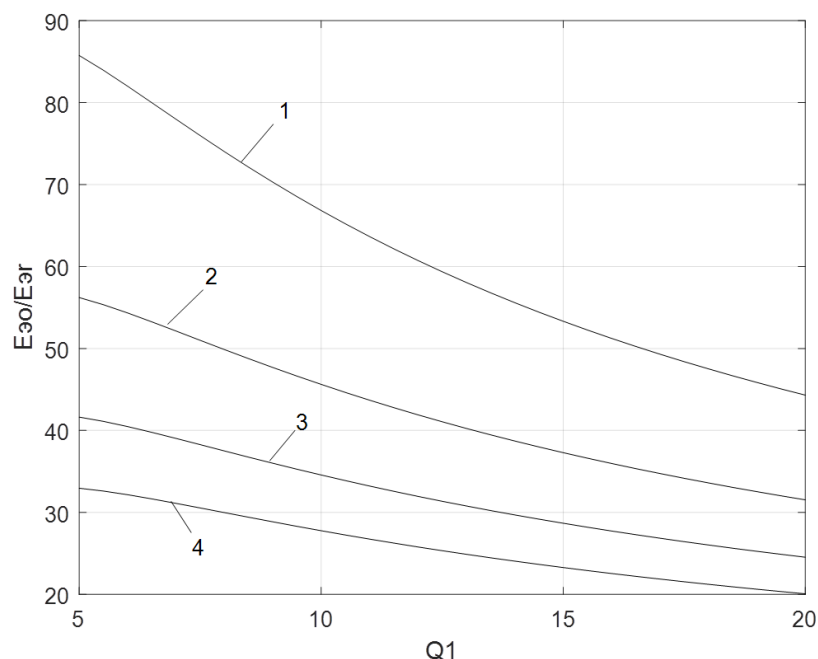


Рис. 5. – Отношение напряженностей у края электродов и области измерительного кольца в емкостном преобразователе при  $\theta_0$ : 1 –  $10^\circ$ ; 2 –  $15^\circ$ ; 3 –  $20^\circ$ ; 4 –  $25^\circ$

Однако, при реализации емкостного первичного преобразователя для равномерного сканирования сечения продукта вращающимся электромагнитным полем, также будет целесообразно учитывать оценку силовых линий потока и эквипотенциалей в области измерительного кольца для данных систем, тем самым повысив точность измерений.

### Литература

1. Рашкован И.Г. Методы оценки распределения волокон по поперечным сечениям пряжи. М.: Легкая индустрия, 1970. 200 с.
2. Rumyantsev Y.D., Vinichenko S.N., Ryzhkova E.A. Analysis of the main methods of monitoring the blending of natural and chemical fibers // Fibre Chemistry. 2016, 47(5), pp. 413–415.
3. Виниченко С.Н., Масанов Д. В., Рыжкова Е.А. Анализ результатов эксперимента оценки качества смешивания разнородных волокон //



Инженерный вестник Дона, 2022, № 10. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7930

4. Науменко А.М., Рыклин Д.Б., Джежора А.А. Разработка диэлькометрического метода оценки эффективности смешивания компонентов при производстве хлопкольнай пряжи // Вестник Витебского государственного технологического университета. Витебск, 2010. С. 69-74.

5. Звёздочкина О.В., Рыклин Д.Б., Ринейский К.Н. Исследование процесса смешивания волокон при производстве многокомпонентной льносодержащей пряжи // Вестник Витебского государственного технологического университета. Выпуск 18/ УО «ВГТУ». Витебск, 2010. С. 25-29.

6. Балковой А.П., Тяпкин М.Г. Емкостный датчик положения планарного электропривода // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 5 (81). С. 65-70.

7. Zuk, S., Pietrikova, A., Vehes, I. Capacitive touch sensor. *Microelectronics International*, 35(3), 2018, pp. 153–157.

8. Коваленко Д.А., Петров В.В. Разработка сенсоров на основе сегнетоэлектрических пленок для гибридных сенсорных систем // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 2). URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1357

9. Румянцев Ю.Д., Бунаков В.Л. Расчет емкостного преобразователя степени смешивания натуральных и химических волокон в продуктах прядения // Технология текстильной промышленности. 1981. №3 (141). С. 74-78.

10. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей.: М., «Энергия», 1970. 376 с.

## References

1. Rashkovan I.G. Metody` ocenki raspredeleniya volokon po poperechny`m secheniyam pryazhi [Methods for estimating the distribution of fibers across yarn cross-sections]. M.: Legkaya industriya, 1970, 200 p.
2. Rummyantsev Y.D., Vinichenko S.N., Ryzhkova E.A. Fibre Chemistry. 47(5), 2016, pp. 413–415.
3. Vinichenko S.N., Masanov D. V., Ryzhkova E.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022. № 10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7930](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7930)
4. Naumenko A.M., Ryklin D.B., Dzhezhora A.A. Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Vitebsk, 2010. pp. 69-74.
5. Zvjozdochkina O.V., Ryklin D.B., Rinejskij K.N. Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Vypusk 18/ UO «VGTU». Vitebsk, 2010. pp. 25-29.
6. Balkovoj A.P., Tjapkin M.G. Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. 2012. № 5 (81). pp. 65-70.
7. Zuk, S., Pietrikova, A., Vehec, I. Microelectronics International, 2018, 35(3), pp. 153–157.
8. Kovalenko D.A., Petrov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, №4 (chast' 2), 2012. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1357](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1357)
9. Rumjancev Ju.D., Bunakov V.L. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. 1981. №3 (141). P. 74-78.
10. Binns K. J., Lawrenson P. J. Analiz i raschet jelektricheskikh i magnitnyh polej [Analysis and computation of electric and magnetic field problems]. M., «Jenergija», 1970. 376 p.