

Оценка чувствительности емкостного метода измерения линейной плотности одномерного волокнистого потока

П.А. Севостьянов, Л.М. Городенцева, Т.А. Самойлова, Е.А. Рыжкова

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Москва

Аннотация: Рассмотрены два емкостных метода измерения линейной плотности одномерных волокнистых продуктов. Выполнена оценка чувствительности результатов измерений к вариациям геометрических и физических параметров измерительного устройства для дифференциального и резонансного способов измерения. Установлена слабая, практически линейная зависимость погрешности измерения от вариаций параметров в широком диапазоне варьирования. Обоснована хорошая приспособленность обоих способов измерения линейной плотности одномерных продуктов емкостным методом и высокая корреляция между измеряемой величиной и результатами измерений.

Ключевые слова: волокнистые материалы, одномерные продукты, линейная плотность, емкостной метод измерения, емкостной метод, дифференциальная схема, резонансная схема измерения, вариации параметров.

К категории одномерных относятся изделия или полуфабрикаты, у которых один геометрический размер – длина – на много порядков превосходят два других размера, которые, как правило, величины одного порядка. Можно привести множество примеров одномерных объектов – от труб и тросов до текстильной пряжи и нитей [1]. Затрагиваемые здесь вопросы, в основном, имеют в виду именно волокнистые продукты текстильного прядильного производства: кардочесальная и гребенная лента, ленты после ленточных и лентосоединительных машин, крученая и сученая ровницы, пряжа и крученая пряжа, нити из пряжи, комплексные и монопилиты и др. Следует отметить, что описываемые результаты могут быть распространены и на другие одномерные изделия и продукты [2,3].

Важнейшим показателем качества рассматриваемых одномерных продуктов является равномерность их массы по длине, т.е. равномерность линейной плотности. Если обозначить координату вдоль длины переменной x , то линейная плотность будет функцией $g(x)$ с размерностью кг/м. Для оценки этого показателя производятся измерения линейной плотности непосред-

ственно в производственном процессе для всего производимого продукта или выборочно в лабораторных условиях по отобраным пробам. Во всех случаях измеряемый продукт проходит через измерительное устройство с датчиком линейной плотности.

Датчик преобразует результат измерения в электрический сигнал, величина которого – ток или потенциал – должны быть пропорциональны значениям линейной плотности и отображать ее вариабельность. Изменения электрического сигнала происходят во времени t . Связь времени с координатой вдоль продукта выражается очевидным соотношением $x = V t$, где V – скорость движения одномерного продукта через датчик. В условиях текстильного производства наиболее распространенными являются механические и емкостные датчики линейной плотности [4,5].

При емкостном методе измерения линейной плотности одномерного волокнистого материала (ленты, ровницы, пряжи, нити, монопилы) исследуемый продукт или его пробный образец проходит с постоянной скоростью между пластинами измеряющего плоского конденсатора. При этом относительная усредненная диэлектрическая проницаемость среды ε между пластинами изменяется в зависимости от соотношения количества масс вещества волокон и воздуха, находящихся в данный момент в конденсаторе. Емкость конденсатора изменяется обратно пропорционально вариациям ε . Чаще всего используют два способа измерения вариаций емкости: мостиковый и резонансный [6].

Мостиковая схема измерения основана на дифференциальном способе измерения, при котором измеряемая величина – линейная плотность ленты – влияет на разность между емкостями измеряющего и «эталонного» конденсаторов [7,8]. При мостиковом способе измерительный конденсатор C_1 включается в плечо мостиковой схемы. В другие плечи включают второй конденсатор C_2 и два резистора r_1 и r_2 (рис. 1а).

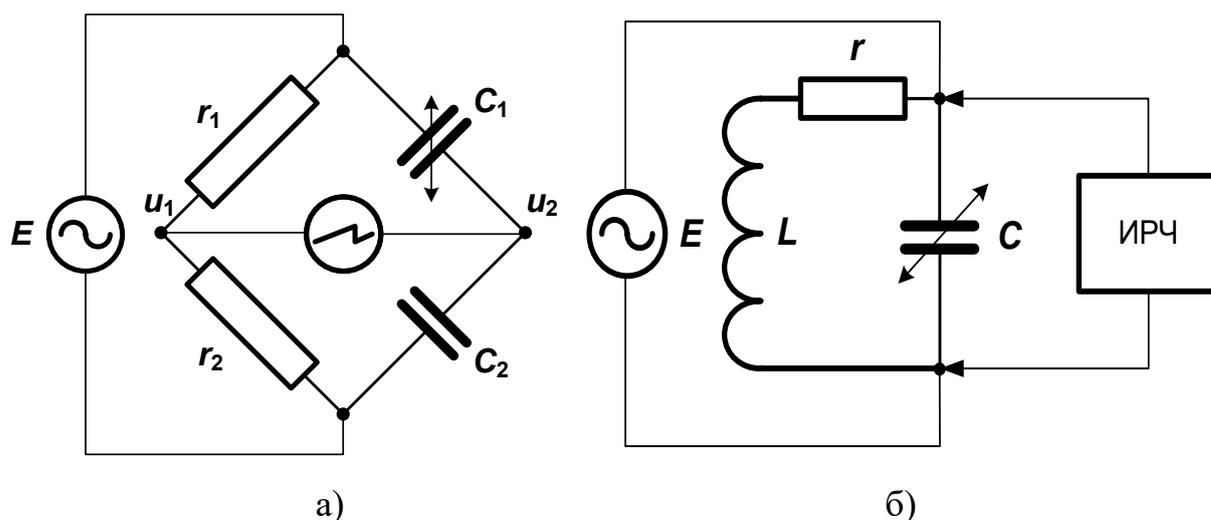


Рис. 1. - Схемы измерения вариаций емкости конденсатора

Конденсаторы C_1 и C_2 полностью идентичны. Их изготавливают в виде двух пластин с площадью S от 8 до 50 см² и зазором между пластинами d от 0,5 до 2 см одинакового конструктивного исполнения и с защитой от внешних электромагнитных полей и пыли. Конденсаторы и резисторы имеют равные номинальные значения емкости и сопротивления: $C_1 = C_2$ и $r_1 = r_2$. При помещении в зазор между пластинами одного из конденсаторов, например, C_1 измеряемой ленты диэлектрическая проницаемость пространства между пластинами, а следовательно, и емкость конденсатора изменяются. Это ведет к нарушению баланса мостиковой схемы, что и регистрируется вторичным прибором.

Резонансный способ измерения основан на регистрации изменений резонансной частоты колебательного контура, образованного катушкой с фиксированной и известной индуктивностью L и измерительным конденсатором C (рис. 1б). В контуре всегда присутствует и активное сопротивление r элементов контура. Вариации линейной плотности продукта, проходящего между пластинами конденсатора, изменяют его емкость и, как следствие, резонансную частоту контура. Измеритель резонансной частоты (ИРЧ) регистрирует эти изменения, которые затем вторичным прибором преобразуются в цифровые показания неравномерности продукта. При пассивном способе из-

мерения ИРЧ подает на контур питание переменной частоты и «ловит» резонансную частоту. При активном способе на контур подается питание от широкополосного по частоте источника переменного напряжения E , а ИРЧ выделяет резонансную частоту [9,10].

При измерениях в лабораторных и производственных условиях номинальные значения элементов схем подвержены вариациям из-за изменений температурно-влажностного режима, внешних электромагнитных полей, содержания пыли и других внешних возмущающих факторов. Поэтому важно иметь оценку влияния этих вариаций на измеряемую величину разности потенциалов $U = u_1 - u_2$ в мостиковой схеме и на фактическую частоту и амплитуду резонанса в резонансной схеме.

Рассмотрим мостиковую схему. Очевидно, что разность потенциалов U равна

$$U = E \cdot \left(\frac{r_1}{r_1 + r_2} - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right), \quad Z_{1,2} = \frac{1}{i\omega C_{1,2}}, \quad C_{1,2} = \frac{S_{1,2}}{\varepsilon_{1,2} \cdot \varepsilon_0 \cdot d_{1,2}} \quad (1)$$

В этих формулах индексы 1 и 2 относятся, соответственно, к 1-му и 2-му конденсаторам, Z – комплексные сопротивления конденсаторов, ω – круговая частота тока, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Различия в значениях параметров у элементов схемы выразим через их отношения: $a = r_2 / r_1$; $b = S_2 / S_1$; $h = d_2 / d_1$; $g = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$. При вариациях величин эти отношения изменяются от 0 до ∞ . После простых преобразований получаем выражение для напряжения U вследствие неравенства параметров у элементов мостиковой схемы при отсутствии измеряемого продукта

$$U = E \cdot \frac{ab - hg}{(1 + a)(b + hg)} \quad (2)$$

Из (2) следует, что значение U равно нулю при совпадении фактических сопротивлений резисторов и геометрических размеров конденсаторов.

Важно, что U не зависит от частоты питающего схему напряжения, что является существенным преимуществом этого способа измерения.

На рис. 2 показаны зависимости величины вариаций δU от вариаций отношений каждого из параметров. Из графиков следует, что зависимость монотонная в широком диапазоне вариаций параметров и близка к линейной пропорциональной зависимости, причем для некоторых параметров, например, площади пластин конденсаторов и зазора между пластинами, - противоположных знаков. Источник питания может не быть стабилизирован по частоте, но должен быть стабилизирован по величине питающего напряжения.

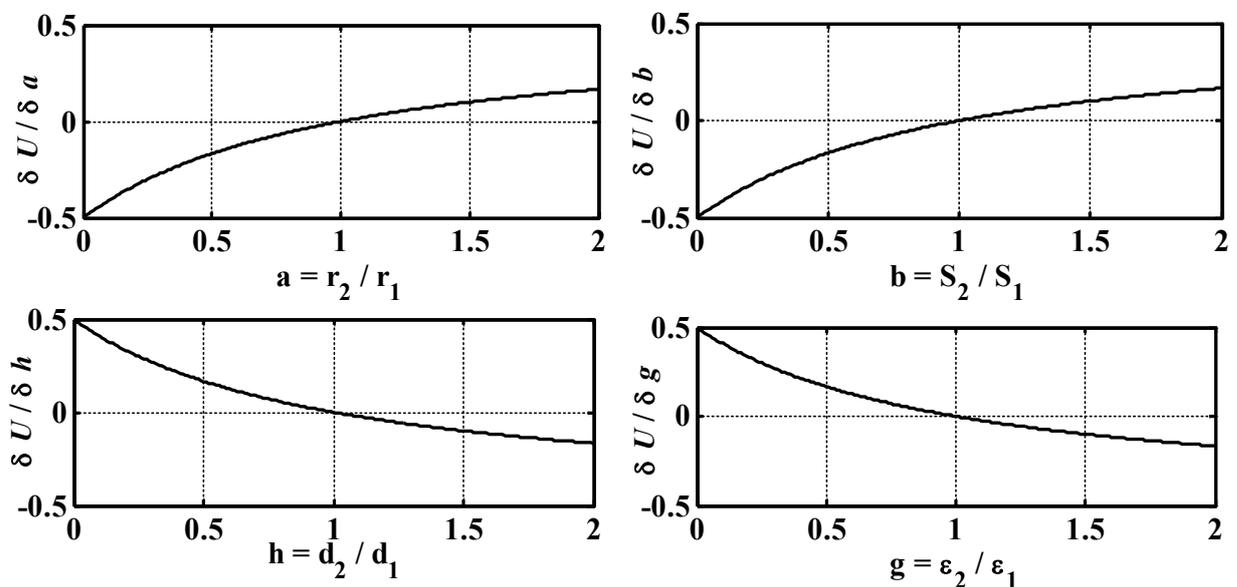


Рис. 2. - Чувствительность мостиковой схемы измерения емкости к вариациям параметров элементов схемы

При использовании резонансной схемы измерения конденсатор включен в колебательный контур, резонансная частота которого зависит от емкости. Электронная схема вторичного прибора измеряет вариации резонансной частоты, которые и являются отображением вариаций линейной плотности в электрическом сигнале.

В связи с этим способом измерения линейной плотности представляет интерес определение чувствительности вариаций резонансной частоты при

действующих уровнях вариации линейной плотности к вариациям параметров контура. Рассматривается параллельная схема включения измеряющего конденсатора, индуктивности строго фиксированной величины L и эквивалентного активного сопротивления R (рис. 1б), при которой эквивалентное комплексное сопротивление контура равно

$$Z = \frac{(Z_L + R) \cdot Z_C}{Z_L + R + Z_C} = \frac{R + i \cdot \omega \cdot L}{1 - \omega^2 \cdot L \cdot C + i \cdot \omega \cdot R \cdot C} \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, соответствующая циклической частоте f электрического тока через контур. Резонансная частота контура отвечает максимуму модуля комплексного сопротивления (3), который равен

$$AZ = |Z| = \sqrt{\frac{(\omega \cdot L)^2 + R^2}{(\omega^2 \cdot L \cdot C)^2 - 2 \cdot \omega^2 \cdot L \cdot C + (\omega \cdot R \cdot C)^2 + 1}} \quad (4)$$

Приравнивая нулю производную от (3) по частоте ω и решая полученное уравнение, получим выражение для резонансной частоты. Все преобразования выполнялись методом символьных вычислений в системе Matlab и не приводятся из-за громоздкости получаемых выражений. Построенный таким образом программный продукт был использован для анализа чувствительности данного способа измерения, т.е. вариаций резонансной частоты контура к вариациям ϵ .

Для упрощения вычислений и получения зависимостей в более общей форме в качестве единиц измерения индуктивности и емкости были приняты за единицу базовые значения этих параметров, а для сопротивления - значение 0,1, относительно которых и производились вариации параметров.

Зависимость чувствительности резонансной частоты к вариациям относительной диэлектрической проницаемости показана на рис. 3. График показывает практически линейную зависимость резонансной частоты от ϵ при заметном диапазоне вариаций резонансной частоты. Поэтому данный метод

измерения следует признать чувствительным к вариациям исследуемой величины.

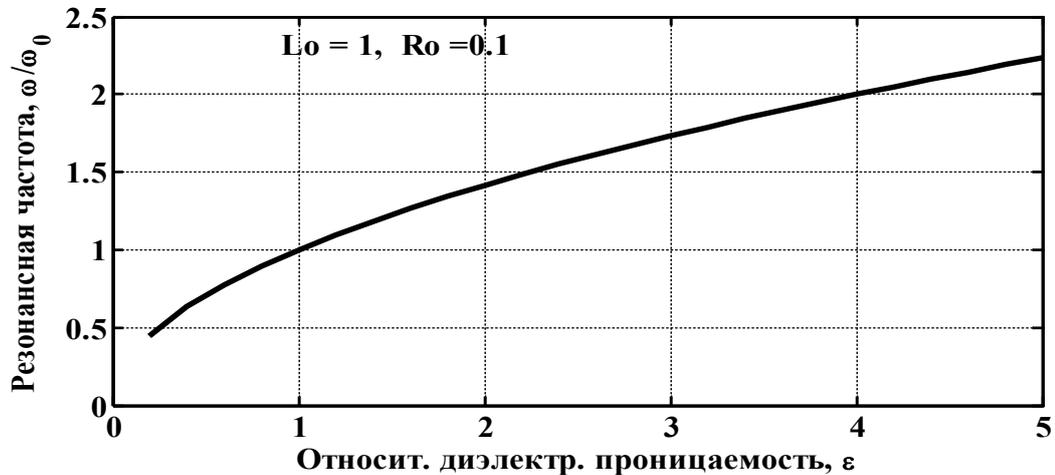


Рис. 3. - Чувствительность резонансной частоты к вариациям относительной диэлектрической проницаемости

На рис. 4 показана чувствительность резонансной частоты к вариациям индуктивности. Поскольку эти вариации под действием различных факторов, как правило, незначительны, диапазон варьирования выбран в пределах 20% от базового значения. В этих пределах чувствительность резонансной частоты практически линейно зависит от вариаций индуктивности.

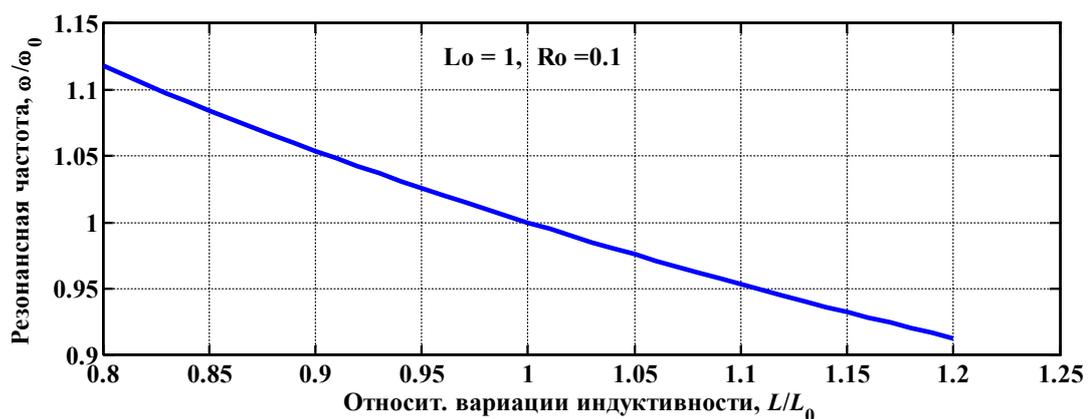


Рис.4. - Чувствительность резонансной частоты к вариациям индуктивности относительно базового значения L_0 .

Таким образом, установлены уровни чувствительности к вариациям параметров схем измерения.

Оба метода, применяемые для измерения неравномерности одномерных волокнистых продуктов по их линейной плотности с использованием емкостных датчиков, имеют практически линейную, пропорциональную чувствительность к параметрам измерительной схемы. Более простая и дешевая мостиковая схема нечувствительна к вариациям частоты источника питания, но имеет заметную чувствительность к вариациям амплитуды напряжения питания.

Полученные результаты могут служить основанием как для анализа уже используемых систем измерения линейной плотности одномерных продуктов, так и для проектирования новых автоматизированных измерительных комплексов и датчиков в контурах систем автоматического регулирования и стабилизации линейной плотности одномерных продуктов.

Литература

1. Севостьянов П.А. Методы исследования и моделирования неровноты продуктов прядения ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)». - Москва : РГУ им. А. Н. Косыгина, 2019. - 240 с. ISBN 978-5-87055-809-7

2. Городенцева Л.М., Севостьянов П.А., Самойлова Т.А. Обнаружение дефектов в протяженных изделиях по результатам двумерного сканирования. Инженерный вестник Дона, 2024, №1, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8975.

3. Севостьянов П.А., Самойлова Т.А., Белевитин А.А., Бурдин И.М. Обнаружение локальных областей дефектов при неразрушающем контроле протяженных изделий. Инженерный вестник Дона, 2024, №1, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8924.

4. Севостьянов А.Г. Методы исследования неровноты продуктов прядения: (Характеристики случайных функций и их применение). - Москва : Ростехиздат, 1962. - 386 с.

5. Измерение неровноты продуктов прядения приборами с емкостными датчиками [Обзор] / М-во легкой пром-сти СССР. Центр. науч.-исслед. ин-т информации и техн.-экон. исследований легкой пром-сти. - Москва : [б. и.], 1972, 17 с.

6. Молчанов А.С., Ребарбар Я.М., Хавкин В.П. Технологические измерения и КИП в текстильной промышленности - Москва : Легкая индустрия, 1969. - 316 с.

7. Martindale V.J. A New Method of Measuring the Irregularities of Yarns with Some Observations on the Origin of Irregularities in Worsted Slivers and Yarns. Journal of the Textile Institute, 1945, pp. 35-47.

8. Grosberg P., Palmer. R.C. The Use of Zellweger Irregularity tester in Finding the Variance-length Curve of Worsted Yarn. Journal of the Textile Institute, 4, 1954, pp. 275-290.

9. Kamal Raj D., Subramaniam V., Shubham J., Sindhuja S., Sneha S.. Influence of different gauge length and strain rate parameters on tensile properties of Kevlar. Indian Journal of Fibre & Textile Research Vol. 48, December 2023, pp. 419-424

10. Subhasis Das, Anindya Ghosh. Selection of raw material parameters for multi-response optimization of cotton yarn qualities. Indian Journal of Fibre & Textile Research Vol. 49, September 2024, pp. 311-317.

References

1. Sevost'janov P.A. Metody issledovaniya i modelirovaniya nerovnoty produktov prjadenija [Methods of studying and modeling the unevenness of spinning products] ; Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii, Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego



obrazovaniya «Rossijskij gosudarstvennyj universitet im. A. N. Kosygina (Tehnologii. Dizajn. Iskusstvo)». Moskva : RGU im. A. N. Kosygina, 2019. 240 p. ISBN 978-5-87055-809-7p.

2. Gorodenceva L.M., Sevost'janov P.A., Samojlova T.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8975.

3. Sevost'janov P.A., Samojlova T.A., Belevitin A.A., Burdin I.M.. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8924

4. Sevost'janov A.G. Metody issledovanija nerovnoty produktov prjadenija: (Harakteristiki sluchajnyh funkcij i ih primenenie) [Methods of Investigating the Unevenness of Spinning Products: (Characteristics of Random Functions and Their Application)]. Moskva: Rostehizdat, 1962, 386 p.

5. Izmerenie nerovnoty produktov prjadenija priborami s emkostnymi datchikami [Measuring the unevenness of spinning products using devices with capacitive sensors]. M-vo legkoj prom-sti SSSR. Centr. nauch.-issled. in-t informacii i tehn.-jekon. issledovanij legkoj prom-sti. Moskva : [b. i.], 1972, 17 p.

6. Molchanov A.S., Rebarbar Ja.M., Havkin V.P. Tehnologicheskie izmerenija i KIP v tekstil'noj promyshlennosti [Process Measurement and Instrumentation in the Textile Industry]. Moskva : Legkaja industrija, 1969, 316 p.

7. Martindale V.J. Journal of the Textile Institute, 1945, pp. 35-47.

8. Grosberg P., Palmer. R.C. Journal of the Textile Institute, 4, 1954, pp. 275-290.

9. Kamal Raj D/, Subramaniam V., Shubham J., S Sindhuja S., Sneha S. Indian Journal of Fibre & Textile Research Vol. 48, December 2023, pp. 419-424.

10. Subhasis Das, Anindya Ghosh. Indian Journal of Fibre & Textile Research Vol. 49, September 2024, pp. 311-317.

Дата поступления: 21.04.2025

Дата публикации: 25.06.2025