

¹ Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург

² Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ МАЛЫХ ЕМКОСТЕЙ С ЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

В статье рассмотрен измеритель малых емкостей с его техническими и метрологическими характеристиками. Приведены схема функционального генератора измерителя и временные диаграммы напряжений для изучения режимов его работы. Рассмотрены вопросы использования измерителя емкости при измерении параметров объектов железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: емкостной датчик, диэлектрическая проницаемость, измеритель емкости, линейная измерительная характеристика.

Введение. Емкостной измерительный преобразователь является основой измерителя малых емкостей, принцип действия которого основан на реализации известного соотношения, связывающего величину емкости (C) конденсатора с его параметрами (геометрическими размерами и электрическими характеристиками диэлектрической среды между обкладками конденсатора):

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{l}, \quad (1)$$

где S — площадь поверхности пластин конденсатора преобразователя;

l — расстояние между пластинами конденсатора преобразователя;

ε_0 — электрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Изменения этих параметров и емкости конденсатора описываются следующим соотношением:

$$dC = \frac{\partial C}{\partial \varepsilon_a} d\varepsilon_a + \frac{\partial C}{\partial S} dS + \frac{\partial C}{\partial l} dl. \quad (2)$$

Выражения для относительных чувствительностей емкостного преобразователя к изменению зазора S_l , площади пластин конденсатора S_s и диэлектрической проницаемости среды между пластинами S_ε с учетом паразитных емкостей $C_{\text{п}}$ от конструктивных узлов и проводов преобразователя могут быть записаны следующим образом из [1]:

$$S_l = \frac{1}{1 + (C_{\text{п}}/C_0)}, S_s = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{\Delta S}{S_0}\right)^2\right)} \cdot \frac{1}{1 + (C_{\text{п}}/C_0)},$$

$$S_\varepsilon = -\frac{1}{\left(1 + \left(\frac{\Delta \varepsilon_a}{\varepsilon'_a}\right)^2\right)} \cdot \frac{1}{1 + (C_{\text{п}}/C_0)}, \quad (3)$$

где S_0 — начальное значение площади пластин конденсатора преобразователя;

ΔS — изменение площади пластин конденсатора преобразователя;

ε'_a — начальное значение абсолютной диэлектрической проницаемости среды между пластинами конденсатора преобразователя; $\Delta \varepsilon_a$ — изменение абсолютной диэлектрической проницаемости среды между пластинами конденсатора преобразователя; $C_{\text{п}}$ — паразитная емкость; C_0 — емкость преобразователя.

Относительная чувствительность емкостного преобразователя к изменению расстояния между пластинами S_l линейно зависит от величины изменения расстояния, т.е. от Δl [1]. Что же касается зависимостей от S и ε_a , то из формул (2) видно, что здесь наблюдаются нелинейные зависимости.

В связи с этим вопрос создания измерительных приборов с линейной измерительной характеристикой при изменении абсолютной диэлектрической проницаемости среды приобретает особое звучание.

Теория. Эффективность применения емкостных датчиков для измерения неэлектрических величин в различных областях железнодорожного транспорта обусловлена их высокой чувствительностью, а также возможностью использования при бесконтактном неразрушающем контроле различных параметров электротехнических устройств.

Емкостные датчики, как электростатические преобразователи, применяются для контроля влажностного содержания сыпучих, твердых и вязких веществ и различных инородных включений, к которым

можно отнести, например, частицы электропроводящих материалов в твёрдых изоляционных листовых материалах.

Измерение толщины слоев электроизоляционных материалов, таких как ткани или изоляционные пленки, возможно в автоматическом режиме, в этом случае обследуемый материал пропускают с высокой скоростью в зазоре между обкладками емкостного преобразователя. Достоинство такого метода измерения заключается в том, что емкостной датчик является практически безынерционным элементом и определение его информационного параметра ограничивается рабочей частотой измерителя емкости [2].

Перспективные исследования связаны с гибкой и растяжимой электроникой, которая будет использоваться в электрических проводниках, датчиках и исполнительных механизмах для различных приложений, таких как роботизированные системы и системы с силовым приводом [3]. Предложена схема измерения емкости на основе полосового фильтра и настраивается по параметрам ее электрических компонентов. Схема измеряет емкость датчика деформации с точностью, эквивалентной современным измерителям LCR. Авторами получено, что комбинация измерителя емкости и датчика деформации измеряет длину растяжения объекта с высокой точностью и частотой дискретизации 10 кГц.

В статье [4] описывается разработка портативного электронного измерителя емкости на основе резонансного метода. Аппаратное обеспечение измерителя емкости состоит из цепи генератора, катушки индуктивности, которая параллельна образцу в виде LC-цепи, и измерителя частоты. Предполагается, что образец представляет собой обнаружение объекта в диэлектрике конденсатора LC-контра, который резонирует с генератором. Частота, полученная в результате резонанса, считывается и обрабатывается IC 74HC93 и Arduino, кроме того, значение емкости отображается на ЖК-дисплее. Портативный электронный измеритель емкости, основанный на резонансном методе, оказался успешным для измерения небольших значений емкости образцов, поэтому это устройство потенциально может использоваться в процессе идентификации, особенно для обнаружения загрязнений в пищевых продуктах.

Подобно контурам фазовой автоподстройки частоты, контуры частотной автоподстройки частоты (FLL) используются во многих приложениях, связанных с синхронизацией или синтезом сигналов. Генераторы релаксации на основе простых логических схем преобразуют емкость в частоту, что представляет собой характерную обратную зависимость между выходной частотой и входной емкостью [5]. Выходной прямоугольный сигнал логического уровня генератора можно подавать на полностью цифровой FLL, который будет привязываться по частоте к входному сигналу, и формировать цифровое выходное слово N, где N обратно пропорционально входной частоте. В результате N линейно пропорционально неизвестной емкости генератора. Этот новый подход обеспечивает простую реализацию FLL для измерения емкости и демонстрируется на аппаратном уровне с использованием емкостного датчика.

Результаты, полученные в статье [6], направлены на то, чтобы предложить лучший подход к анализу вольт-фарадной характеристики емкостных МЭМС-

переключателей путем введения аналитической модели, учитывающей случай реального устройства, где заряд неравномерно распределен по поверхности диэлектрической пленки и пластин конденсатора. Предложенная модель позволяет использовать производную вольт-фарадной характеристики, наклон которой напрямую связан с механическими характеристиками устройства и напряжением, возникающим при зарядке конденсатора.

В работе [7] исследуется линейность емкостного датчика температуры, изготовленного из недорогих материалов. Датчик представляет собой конденсатор с плоскими пластинами, в котором диэлектрический материал полидиметилсилоксан (ПДМС) чувствителен к температуре. Датчик работает по принципу, согласно которому плотность чувствительного слоя уменьшается с повышением температуры в соответствии с уравнением Клаузиуса – Мосотти, из-за чего диэлектрическая проницаемость также уменьшается. Причем толщина чувствительного слоя также увеличивается с повышением температуры за счет положительного коэффициента линейного расширения.

К измерителю емкости, как элементу измерительной системы, предъявляются следующие требования:

1. Диапазон измерений (единицы или десятки пикофарад) должен обеспечивать требуемую чувствительность для достоверности результатов измерения.

2. Рабочая частота должна обеспечивать снижение реактивного сопротивления и уменьшение инерционности измерительной системы при наблюдении за быстропротекающими процессами, более 10^4 Гц [8].

3. Измерения должны производиться по трехзажимной схеме для уменьшения влияния емкости подводящих проводов и внешних электромагнитных помех.

4. Измеритель емкости должен иметь автономное питание от встроенных элементов напряжением не более 9–12 В для обеспечения возможности эксплуатации в полевых нестационарных условиях.

5. Шкала измерителя должна быть градуирована в единицах емкости или в единицах той физической величины, которая измеряется.

Постановка задачи. Существующие методы измерения емкости и приборы (резонансные схемы [1], портативные измерители электрической ёмкости зарубежного производства с питанием от встроенных источников [2]) обладают следующими недостатками:

1. Низкой чувствительностью измерительных приборов при регистрации малых разностей электрических емкостей.

2. Низкой рабочей частотой (порядка 1000 Гц), ограничивающей функциональные возможности измерительного прибора при исследовании быстропротекающих процессов.

Для проведения измерений с высокой точностью в широком частотном диапазоне на кафедре «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I разработан измеритель электрической емкости, технические характеристики которого представлены в табл. 1.

Измеритель емкости построен на базе функционального генератора, схема которого показана на рис. 1 [9, 10]. Функциональный генератор явля-

Таблица 1

Технические характеристики измерителя

Характеристика, единица измерения	Значения
Диапазон измерений электрической емкости, пФ	0,01...10 ⁶
Рабочая частота измерителя, Гц	100...5×10 ⁴
Предел допустимой приведенной погрешности измерителя, %	0,5...1,0
Напряжение питания измерителя, В	±1,5...±9
Потребляемый ток, мА	2,0...9,0
Масса измерителя, кг	0,3
Габаритные размеры, мм	50×100×150

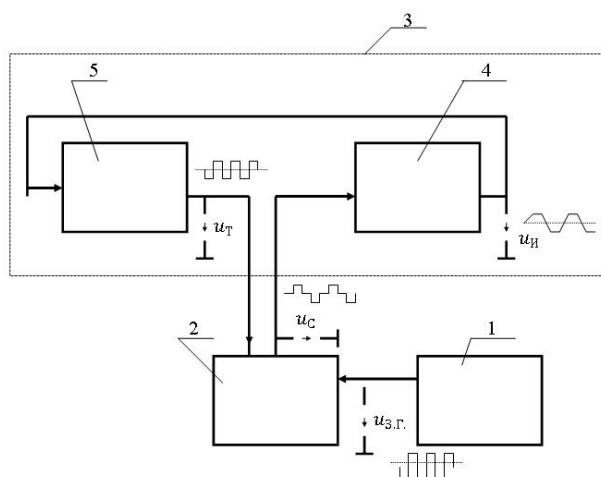


Рис. 1. Блок-схема функционального генератора

ется измерительным преобразователем, который реагирует на изменение входной емкости прибора.

На рис. 1 выход задающего генератора 1 соединен с первым входом сумматора 2; простой генератор 3 состоит из интегратора 4, триггера Шмитта 5; второй вход сумматора 2 соединен с выходом триггера Шмитта 5; выход сумматора 2 соединен с интегратором 4.

На выходных зажимах генератора 1 формируются прямоугольные сигналы напряжения, сигналы симметричны относительно нуля. Сумматор 2 выполняет логическое суммирование напряжений триггера 5 и генератора 1. Триггер 5 сравнивает напряжение на его выходе с напряжением на выходе интегратора 4.

На выходных зажимах функционального генератора формируется напряжение $u_{з.г.}$, частота которого равна частоте генератора 1 (рис. 2а).

На выходных зажимах интегратора 4 сигналы напряжения $u_{и}$ совпадают с частотой генератора 1 (рис. 2б), начала сигналов интегратора 4 и задающего генератора совпадают по времени.

Триггер Шмитта 5 генерирует сигналы напряжения $u_{т}$ с частотой задающего генератора 1 (рис. 2в), но при этом сигналы напряжений $u_{з.г.}$ и $u_{т}$ сдвинуты по времени на величину $\Delta t = t_{з.г.} - t_{и'}$, где $t_{з.г.}$ — длительность импульса задающего генератора 1, $t_{и'}$ — время интегрирования интегратора 4.

На выходе сумматора 2 формируются разнополярные и широтномодулированные сигналы напря-

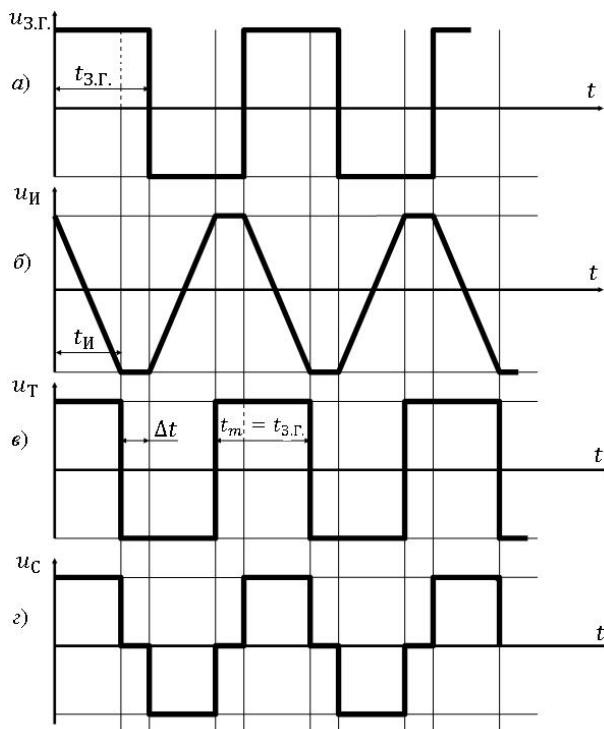


Рис. 2. Диаграммы напряжений элементов функционального генератора:

- а) — выходное напряжение задающего генератора;
- б) — выходное напряжение интегратора;
- в) — выходное напряжение триггера Шмитта;
- г) — выходное напряжение сумматора

жения $u_{с}$ (рис. 2г) с длительностью импульсов $t_{с} = t_{и} = t_{з.г.} - \Delta t$.

Обсуждение эксперимента и его результаты. Из [11] известно, что функция $y(x)$ является линейной, если ее изменение на величину Δy однозначно соответствует изменению ее аргумента на величину Δx , другими словами, $\Delta y = k\Delta x$, причем k — коэффициент пропорциональности.

Сдвиги по времени Δt между сигналами триггера 5 и генератора 1 регулируются параметрами интегратора с характеристикой, которая определяется уравнениями:

$$t_{с} = t_{и} = \alpha\tau_{и'} \quad (4)$$

где $\tau_{и}$ — постоянная интегрирования интегратора 4, α — коэффициент, значение которого определяется временем срабатывания компаратора 5,

$$\Delta t = t_{з.г.} - \alpha\tau_{и'} \quad (5)$$

Следовательно, уравнения (4) и (5) являются линейными, а постоянная интегрирования $\tau_{и}$ зависит от значения параметров RC -цепочки интегратора 4 и определяется как $\tau_{и} = RC$ [12]. При изменении эквивалентного активного сопротивления R на величину ΔR и эквивалентной емкости C на величину ΔC , значения функций $t_{с}$ и Δt изменятся следующим образом:

$$t_{с} = K\Delta\tau_{и'} \quad (6)$$

$$\Delta(\Delta t) = -K\Delta\tau_{и'} \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) следует, что сдвиг по времени между сигналами триггера Шмитта 5

и задающего генератора 1 можно линейно регулировать параметрами RC -цепочки интегратора 4 в диапазоне от 0 до $t_{з.г.}$

Заключение. Анализ временных диаграмм дает право сделать вывод, что использование функционального генератора позволяет получить импульсы напряжений прямоугольной формы со сдвигом по времени. При этом параметры интегратора влияют на величину этого сдвига и позволяют изменять его значения в диапазоне от 0 до 180 электрических градусов, а длительность импульсов сумматора является функцией измеряемой емкости.

Таким образом, разработанный измеритель малых емкостей на основе функционального генератора, сумматора и простого генератора обладает линейной характеристикой.

Библиографический список

1. Батищев В. И., Мелентьев В. С. Измерение параметров емкостных датчиков положения и перемещения. Москва: Машиностроение-1, 2005. 123 с.
2. Kim K. K., Barbarovich V. Yu., Asmus V. I. An autonomous instrument for measuring small electrical capacitances with a linear characteristic // *Measurement Techniques*. 2003. Vol. 46. P. 673.
3. Nakamoto H. [et al.]. Design and response performance of capacitance meter for stretchable strain sensor // 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2015. P. 2348–2353. DOI: 10.1109/IROS.2015.7353694.
4. Sanjaya W. S. M. [etal.]. Portable Electronic Capacitance Meter using Resonance Method for Lard Capacitance Measurement // 2018 3rd International Conference on Information Technology, Information System and Electrical Engineering (ICITISEE). 2018. P. 16–21. DOI: 10.1109/ICITISEE.2018.8720949.
5. Dean R. N., Rane A. K. A Digital Frequency-Locked Loop System for Capacitance Measurement // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2013. Vol. 62, no. 4. P. 777–784. DOI: 10.1109/TIM.2013.2240092.
6. Koutsourelis M., Birmpiliotis D., Michalas L. [et al.]. An in depth analysis of pull-up capacitance-voltage characteristic for dielectric charging assessment of MEMS capacitive switches // *Microelectronics Reliability*. 2016. Vol. 64. P. 688–692. DOI: 10.1016/j.microrel.2016.07.027.
7. Salmaz U., Islam T., Sohail S. Novel Linear Capacitive Temperature Sensor Using Polydimethylsiloxane // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. Vol. 69, no. 10. P. 7887–7894. DOI: 10.1109/TIM.2020.2986120.
8. Измерения в промышленности. В 3 т. Т. 2. Способы измерения и аппаратура: Справочное издание / Под ред.

П. Профоса. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Металлургия, 1990. 293 с.

9. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Москва: Мир, 1982. 168 с.
10. Пат. 2221327 Российская Федерация, МПК Н 03 К 3/02. Функциональный генератор / Ким К. К., Барбарович В. Ю., Асмус В. И. № 2001121641/09; заявл. 01.08.01; опубл. 10.01.04, Бюл. № 1.
11. Арутюнов В. О. Электрические измерительные приборы и измерения. Москва—Ленинград: Гос. энергет. изд-во, 1958. 213 с.
12. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. А. Теоретические основы электротехники: В 3 т. 4-е изд. Санкт-Петербург: Питер, 2003. Т. 2. 576 с.

КИМ Константин Константинович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщений Императора Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3278-4938

AuthorID (РИНЦ): 690443

Адрес для переписки: kimkk@inbox.ru

ТКАЧУК Антон Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7335-2340

AuthorID (РИНЦ): 726854

Адрес для переписки: a.a.tkachuk@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск.

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

ResearcherID: A-5017-2017

Адрес для переписки: te@omgups.ru

Для цитирования

Ким К. К., Ткачук А. А., Кузнецов А. А. Разработка измерителя малых емкостей с линейной характеристикой // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 66–69. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-66-69.

Статья поступила в редакцию 12.09.2022 г.

© К. К. Ким, А. А. Ткачук, А. А. Кузнецов