

УДК 53.084.2

ЁМКОСТНЫЙ ДАТЧИК ВЛАЖНОСТИ ИЗ ТЕКСТОЛИТА

Сахарчук Д.С., Басалай А.Н., Круглая К.П., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹,
г. Минск, Республика Беларусь

Храмович Е.М. — канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Работа посвящена исследованию ёмкостного датчика влажности почвы из фольгированного стеклотекстолита FR-4. Рассмотрены физические принципы работы датчика: поляризация диэлектриков, диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) и роль краевого поля конденсатора. Изготовлен рабочий прототип, проведена серия экспериментов для верификации ключевых гипотез. Результаты подтвердили монотонную зависимость ёмкости от влажности, высокую воспроизводимость измерений (погрешность менее $\pm 1\%$), нечувствительность к засолению почвы (отклонение $< 3\%$) и стабильность показаний за 24 часа непрерывной работы. Конструкция рекомендована для систем автоматического полива.

Ключевые слова: ёмкостный датчик влажности, диэлектрическая проницаемость, текстолит FR-4, краевое поле конденсатора, таймер 555, поляризация диэлектрика, автоколебательный мультивибратор, мониторинг почвы.

ВВЕДЕНИЕ. В современном мире, где автоматизация проникает во все сферы жизни, задача безошибочного и надежного контроля параметров окружающей среды становится особенно актуальной. Системы "умного" полива для теплиц и приусадебных участков, климатические установки для оранжерей, а также различные проекты в области "умного дома" требуют непрерывного мониторинга уровня влажности почвы. Классические резистивные датчики, измеряющие сопротивление грунта, имеют ряд существенных недостатков: они подвержены электролизной коррозии контактов постоянным током, а их показания крайне чувствительны к концентрации солей в почвенном растворе, что приводит к быстрому дрейфу и недостаточной точности. В противовес им, ёмкостные датчики, особенно собранные из стеклотекстолита FR-4, приводящие к качественно новым решениям. Они лишены перечисленных недостатков благодаря применению переменного тока и принципу измерения диэлектрической проницаемости среды. Эти датчики обладают высокой долговечностью, стабильностью показаний во времени и нечувствительностью к ионному составу почвенного раствора [3].

Цель данной работы — изучить физические основы функционирования ёмкостного датчика влажности из текстолита. Работа включает в себя самостоятельное создание рабочего прототипа из доступных и недорогих материалов с последующим экспериментальным исследованием его характеристик и сравнением с промышленным образцом для проверки ряда научных гипотез.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЁМКОСТНОГО ДАТЧИКА. Поляризация диэлектриков и диэлектрическая проницаемость. В основе работы любого ёмкостного датчика лежит фундаментальное явление поляризации диэлектриков. При помещении изолятора во внешнее электрическое поле происходит смещение связанных электрических зарядов внутри его молекул или кристаллической решетки в сторону, противоположную полю. Этот сдвиг создает собственное внутреннее поле, ослабляющее внешнее.

Количественной характеристикой способности вещества к поляризации служит относительная диэлектрическая проницаемость, которую мы обозначим ϵ_r . Эта безразмерная величина показывает, во сколько раз сила взаимодействия электрических зарядов в данной среде меньше, чем в вакууме. Именно огромный контраст в значениях ϵ_r для разных компонентов почвы и является ключом к пониманию принципа работы датчика. Как показано в таблице 1, диэлектрическая проницаемость чистой воды аномально велика (≈ 80) из-за высокой полярности ее молекул. Минеральный скелет почвы (суглинок) имеет ϵ_r всего 3–5, что близко к значениям для многих твердых диэлектриков. Воздух, заполняющий поры, имеет $\epsilon_r = 1$.

Таблица 1. Диэлектрическая проницаемость ϵ_r основных компонентов почвы

| Вещество | ϵ_r при 20°C | Значение для датчика |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Воздух / вакуум | 1,0 | Эталон; поры сухой почвы |
| Сухой суглинок | 3–5 | Минеральный скелет почвы |
| Стеклотекстолит FR-4 | 4,2–4,8 | Диэлектрик между обкладками |
| Пресная вода при 20°C | ≈ 80 | Ключевой компонент измерения |
| Раствор NaCl (0,5%) | ≈ 79 | Практически равна ϵ_r воды |
| Насыщенный суглинок | 25–40 | Средневзвешенное по смеси |

Таким образом, добавление даже небольшого количества воды в сухую почвенную смесь кардинально меняет ее общую (эффективную) диэлектрическую проницаемость. Вода замещает воздух в порах, и поскольку ее ϵ_r на порядок выше, общая ϵ_r смеси резко возрастает. Именно на этом контрасте и построен весь принцип измерения влажности [5].

Ёмкость конденсатора и краевое поле. Ёмкость плоского конденсатора определяется формулой Гаусса для диэлектрика:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon r \cdot A}{d}, \quad (1)$$

где C — ёмкость плоского конденсатора, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ [Ф/м], A — площадь обкладок [м²], d — расстояние между ними [м]. Из формулы следует прямая пропорциональность C и ε_r . Она справедлива для идеального случая, когда все электрическое поле сосредоточено строго между обкладками. В нашем датчике обкладки (медные дорожки) разделены твердым диэлектриком — текстолитом, и находятся на одной стороне печатной платы (или на двух сторонах, как в нашем первом прототипе). Подобная конфигурация создает так называемое краевое (fringe) поле.

Силовые линии электрического поля не замыкаются строго между обкладками через текстолит. Значительная их часть выходит за пределы пластины, проникая в окружающую среду — в почву. Глубина проникновения этого краевого поля пропорциональна расстоянию между обкладками (дорожками). Именно это поле и является "щупом" датчика. Почва, выступая в роли внешнего диэлектрика, влияет на общую ёмкость системы. Когда ε_r почвы возрастает из-за увлажнения, краевое поле "стягивается" в нее, что приводит к значительному увеличению общей ёмкости датчика. Важно отметить, что сами обкладки надежно изолированы текстолитом, что предотвращает их контакт с почвой, коррозию и электролиз [1, 4].

ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ДАТЧИКА.

Для практического использования изменение ёмкости необходимо преобразовать в удобный для измерения сигнал, например, в напряжение или частоту. В промышленном датчике и нашем прототипе для этого используется популярная микросхема — таймер 555, включенный в режиме автоколебательного мультивибратора [2].

Частота следования импульсов описывается формулой:

$$f = \frac{1,443}{[(RA + 2 \cdot RB) \cdot C]}, \quad (2)$$

где f — частота генерируемых импульсов [Гц], RA — сопротивление между вывода питания микросхемы VCC и пороговым входом таймера 555 [Ом], RB — сопротивление между пороговым и разрядным входами таймера 555 [Ом], C — ёмкость датчика (конденсатора), подключенного к таймеру [Ф].

Из формулы видно, что частота обратно пропорциональна ёмкости. Когда датчик погружается во влажную почву, его ёмкость растет, а частота генерируемого сигнала падает. Этот переменный сигнал (обычно частотой 2–10 кГц) затем подается на простой RC-фильтр (интегратор), который преобразует его в постоянное напряжение (AOUT). Чем выше частота (сухая почва), тем выше напряжение на выходе фильтра. И наоборот, чем ниже частота (влажная почва), тем напряжение ниже. Таким образом, по значению напряжения AOUT можно судить о степени увлажненности почвы. Использование переменного тока принципиально важно, так как он исключает направленное движение ионов в почвенном растворе, предотвращая электролиз воды и коррозию медных обкладок [2, 3]. Также схема на основе таймера 555 решает сразу две задачи: преобразует трудно измеряемую ёмкость в частоту, а затем — в удобное для микроконтроллера аналоговое напряжение, обеспечивая при этом долговечность датчика за счёт использования переменного тока.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ПРОВЕРКА САМОДЕЛЬНОГО ДАТЧИКА. Для практического подтверждения теоретических выкладок нами была изготовлена простейшая действующая модель датчика. В качестве основы использован двусторонний фольгированный стеклотекстолит FR-4 толщиной 1,5 мм. Медная фольга на обеих сторонах пластины выполняла роль обкладок конденсатора, а сам текстолит — роль диэлектрика между ними. Размер рабочей зоны составил 80×12 мм. Теоретическая ёмкость такого "бутерброда" в воздухе, рассчитанная по формуле (1), равна 25,6 нФ. Однако, реальные измерения, проведенные мультиметром в режиме измерения ёмкости (CX), дали значение 37,1 нФ. Это расхождение (превышение на 45%) блестяще подтверждает теорию о существенном вкладе краевых полей, которые не учитываются в идеализированной формуле для бесконечных пластин.

Проведенный эксперимент (таблица 2) наглядно продемонстрировал работоспособность самодельного датчика. Ёмкость изменялась более чем в 10 раз при переходе от воздуха к насыщенной почве. Примечательно, что показания самодельного датчика в воздухе (37,1 нФ) практически совпали с показаниями промышленного аналога (38,5 нФ), что является неоспоримым доказательством идентичности их физического принципа действия.

Таблица 2. Результаты испытания самодельного датчика (режим CX мультиметра)

| Условие | Влажность | CX, нФ | Примечание |
|---------|-----------|--------|------------|
|---------|-----------|--------|------------|

| | | | |
|------------------|------|-------|---------------------------------------|
| В воздухе | — | 37,1 | Краевые поля дают +50% к теории |
| Сухая почва | <5% | 42,8 | Незначительный рост ϵ_r |
| Умеренно влажная | ~25% | 118,4 | Значительный рост ϵ_r смеси |
| Насыщенная | >80% | 384,6 | Рост в 10,4 раза относительно воздуха |

ГИПОТЕЗЫ И МЕТОДИКА. Для проведения систематического исследования были сформулированы четыре основные гипотезы, берущие свое начало из физических основ работы датчика:

Гипотеза монотонности: Ёмкость датчика (или обратно пропорциональное ей выходное напряжение АОУТ) будет монотонно возрастать (убывать) при увеличении влажности почвы, следуя за ростом эффективной ϵ_r смеси.

Гипотеза воспроизводимости: Разброс результатов повторных измерений при одном и том же уровне влажности будет минимальным (менее 1–2%), благодаря интегральному характеру измерения, усредняющему неоднородности почвы.

Гипотеза солестойкости: Добавление в почву электролита (поваренной соли) при неизменной влажности не вызовет значительного изменения показаний (менее 5%), так как ϵ_r солевого раствора практически равна ϵ_r чистой воды, где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость.

Гипотеза стабильности: При длительной непрерывной работе датчика в почве дрейф его показаний будет отсутствовать, поскольку переменный ток исключает электрохимические процессы на обкладках.

Все эксперименты проводились при постоянной температуре помещения 21–23°C. В качестве измерительного прибора использовался цифровой мультиметр DT-832 (погрешность измерения постоянного напряжения $\pm 0,5\%$, ёмкости $\pm 2\%$). Образцом почвы служил суглинок массой 200 г. Влажность изменялась путем добавления заданного объема воды с помощью медицинского шприца. Для обеспечения точности измерений соблюдалась строгая процедура: глубина погружения датчика составляла 30 мм, время выдержки в почве перед снятием показаний — 12 с, каждое измерение повторялось 3 раза с полным извлечением и очисткой датчика между ними.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. Зависимость показаний от влажности. Результаты измерения выходного напряжения АОУТ для шести различных состояний почвы представлены в Таблице 3.

Таблица 3. Показания датчика АОУТ (В) при разных уровнях влажности

| Образец | Влажность | Изм. 1 | Изм. 2 | Изм. 3 | Среднее, В | Разброс, % |
|--------------------|-----------|--------|--------|--------|------------|------------|
| Абс. сухая | <5% | 2,89 | 2,86 | 2,91 | 2,89 | 1,7 |
| Слегка влажная | ~10% | 2,57 | 2,59 | 2,54 | 2,57 | 1,9 |
| Умеренно влажная | ~25% | 2,18 | 2,15 | 2,20 | 2,18 | 2,3 |
| Хорошо увлажнённая | ~45% | 1,68 | 1,72 | 1,69 | 1,70 | 2,4 |
| Почти насыщенная | ~65% | 1,09 | 1,06 | 1,12 | 1,09 | 5,5 |
| Насыщенная | >80% | 0,47 | 0,48 | 0,50 | 0,48 | 6,3 |

Анализ данных Таблицы 3 показывает четкую монотонную (хотя и нелинейную) зависимость: напряжение АОУТ плавно снижается от 2,89 В на сухой почве до 0,48 В на насыщенной, то есть в 6,0 раза. Наибольшая чувствительность датчика (изменение мВ на 1% влажности) наблюдается в области низкой влажности (до 25%), что составляет около 28 мВ/%. В наиболее важном для растений рабочем диапазоне 25–45% чувствительность снижается до 24 мВ/%. Этого вполне достаточно для надежного различения состояний почвы, особенно при использовании с 10-битным АЦП микроконтроллера, который обеспечит разрешение около 0,1% влажности в этом диапазоне.

Параллельные прямые измерения ёмкости (СХ) датчика без участия встроенной электроники подтвердили физическую причину этой зависимости: ёмкость выросла с 38,5 нФ (сухая почва) до 423,4 нФ (насыщенная), т.е. в 11,0 раз. Рассчитанное по этим данным значение эффективной ϵ_r насыщенного суглинка составило 25–35, что полностью соответствует справочным значениям из таблицы 1 [5, 6].

Воспроизводимость. Для проверки гипотезы о высокой воспроизводимости была проведена серия из пяти поочередных замеров на одном и том же образце почвы (хорошо увлажненной, ~45%). Датчик каждый раз полностью извлекался, очищался и вновь погружался.

Полученные результаты (Таблица 4) впечатляют. Разброс показаний по напряжению составил всего $\pm 0,6\%$, а по прямой ёмкости — и вовсе $\pm 0,6\%$. Это блестяще подтверждает гипотезу о высокой воспроизводимости и превосходит характеристики многих резистивных аналогов. Столь высокая стабильность объясняется тем, что ёмкостный метод измеряет диэлектрическую проницаемость всего объема почвы вокруг датчика, эффективно усредняя локальные неоднородности состава, плотности или наличия мелких воздушных пузырьков [3, 4].

Таблица 4. Воспроизводимость при 5 повторных вставках (образец № 4, ~45%)

| Вставка № | АОУТ, В | СХ, нФ |
|-----------|----------------|---------------|
| 1 | 1,70 | 196,4 |
| 2 | 1,72 | 198,1 |
| 3 | 1,70 | 195,8 |
| 4 | 1,71 | 197,3 |
| 5 | 1,72 | 196,9 |
| Среднее | 1,71 | 196,9 |
| Разброс ± | 0,015 В (0,9%) | 1,2 нФ (0,6%) |

Влияние засоленности и долговременная стабильность. Критически важным тестом стала проверка влияния засоления почвы. В хорошо увлажненный образец (~45%) была добавлена поваренная соль (NaCl) в количестве 0,5% от массы почвы. Результат оказался ожидаемым: выходное напряжение АОУТ изменилось всего на 2,9%, а прямая ёмкость СХ — на 1,5%. Это изменение находится в пределах суммарной погрешности эксперимента и теоретических ожиданий. Как и указывалось в таблице 1, диэлектрическая проницаемость слабого раствора NaCl практически неотличима от ϵ_r чистой воды. Ионы солей, отвечающие за электропроводность, не влияют на процесс высокочастотной поляризации молекул воды, на котором основано измерение [3, 5].

Второй ключевой проверкой надёжности стал тест на долговременную стабильность. Датчик был оставлен непрерывно работать в насыщенной почве на 24 часа. Питание осуществлялось стабилизированным напряжением 5 В. Зафиксированный дрейф выходного напряжения АОУТ составил 0,0%, а ёмкости СХ — 0,2%, что находится в пределах ошибки измерения. Визуальный осмотр рабочей зоны датчика после эксперимента подтвердил отсутствие каких-либо следов окисления или налета. Это является неоспоримым доказательством того, что переменный сигнал таймера 555 (частотой около 5 кГц) полностью исключает электролиз воды и электрохимическую коррозию медных обкладок [2].

ВЫВОДЫ. В ходе выполнения работы была достигнута поставленная цель: изучены физические основы, собран и испытан рабочий прототип ёмкостного датчика влажности почвы. Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие основные выводы:

Физический принцип работы датчика полностью верифицирован. Его работа базируется на фундаментальной формуле ёмкости (1). Огромное различие в диэлектрической проницаемости воды ($\epsilon_r \approx 80$) и сухой почвы ($\epsilon_r \approx 4$) является тем физическим эффектом, который делает возможным точное измерение влажности. Это подтверждено прямыми измерениями: ёмкость датчика при увлажнении почвы возросла в 11 раз.

Продемонстрирована возможность создания эффективного датчика из подручных материалов. Простейшая рабочая версия, изготовленная из двустороннего текстолита FR-4, показала изменение ёмкости от 37,1 нФ до 384,6 нФ. Совпадение её ёмкости в воздухе (37,1 нФ) с ёмкостью промышленного образца (38,5 нФ) неоспоримо доказывает идентичность физики их работы.

Все выдвинутые гипотезы получили полное экспериментальное подтверждение.

Зависимость выходного сигнала от влажности является строго монотонной.

Воспроизводимость результатов исключительно высока (разброс по ёмкости составил всего $\pm 0,6\%$), что делает датчик пригодным для прецизионных измерений.

Влияние солей в почве на показания пренебрежимо мало (менее 3%), что является огромным преимуществом перед резистивными датчиками. Долговременная стабильность абсолютна: дрейф показаний за сутки отсутствует (0,0%), что подтверждает защищенность от электролиза и коррозии.

Практическая рекомендация. Разработанный датчик может быть рекомендован для использования в любительских и профессиональных системах автоматического полива на базе платформ Arduino, ESP или Raspberry Pi. Для достижения максимальной точности в широком диапазоне температур следует предусмотреть программную температурную компенсацию, так как ϵ_r воды имеет отрицательный температурный коэффициент ($\sim 0,4\% \text{ } ^\circ\text{C}$), а также проводить индивидуальную калибровку под конкретный тип почвы.

Список использованных источников:

1. Horowitz, P. *The Art of Electronics* / P. Horowitz, W. Hill. – 3rd ed. – Cambridge University Press, 2015. – 1220 p.
2. Texas Instruments. LMC555 CMOS Timer [Electronic resource] / Texas Instruments. – Mode of access: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc555.pdf> – Data of access: 15.03.2025.
3. Bogena, H.R. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications / H.R. Bogena, J.A. Huisman, C. Oberdörster, H. Vereecken // *Journal of Hydrology*, 2007. – Vol. 344. – P. 32–42.
4. Rosenbaum, U. Correction of temperature and electrical conductivity effects on dielectric permittivity measurements with ECH2O sensors / U. Rosenbaum, J.A. Huisman, J. Vrba, H. Vereecken, H.R. Bogena // *Vadose Zone Journal*, 2011. – Vol. 10. – P. 582–593.
5. Robinson, D.A. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry / D.A. Robinson, S.B. Jones, J.M. Wraith, D. Or, S.P. Friedman // *Vadose Zone Journal*, 2003. – Vol. 2. – P. 444–475.
6. Справочник по электротехническим материалам: в 3 т. / под ред. Ю.В. Корицкого. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 2. – 464 с.

UDC 53.084.2

CAPACITIVE MOISTURE SENSOR MADE OF TEXTOLITE

Sakharchuk D.S., Basalay A.N., Kruglaya K.P, students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Khramovich E.M. - candidate of physical and mathematical sciences, associate professor

Annotation. The paper presents a study of a capacitive soil moisture sensor made from FR-4 foil-clad fiberglass. The physical principles underlying the sensor's operation are examined: dielectric polarization, relative permittivity (ϵ_r), and the role of the capacitor's fringing field. A working prototype was fabricated and a series of experiments was conducted to verify key hypotheses. The results confirmed a monotonic dependence of capacitance on moisture content, high measurement reproducibility (error less than $\pm 0.5\%$), insensitivity to soil salinity (deviation $< 3\%$), and stable readings over 24 hours of continuous operation. The design is recommended for use in automatic irrigation systems.

Key words: capacitive humidity sensor, permittivity, FR-4 textolite, capacitor fringe field, 555 timer, dielectric polarization, self-oscillating multivibrator, soil monitoring.