

АНАЛИЗ ПРИНЦИПА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ЕМКОСТНЫМ СПОСОБОМ

Абзалов Муслим Аликович¹, Бакиров Сергей Мударисович^{2✉},
Широбокова Татьяна Александровна³, Елисеев Сергей Сергеевич⁴

^{1,2,4}Вавиловский университет, Саратов, Россия

³Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

²s.m.bakirov@mail.ru

Аннотация. Основным критическим показателем, определяющим рост и развитие растений, их микробиологическую активность, является влажность почвы. Измерение влажности почвы – важный параметр, который позволяет оценить состояние грунта, его водный режим и влияет на эффективность орошения и роста растений. Актуальность работы обусловлена точностью измерения влажности почвы, необходимой для мониторинга засух и проведения научных исследований в области почвоведения. Целью исследования является выявление основных закономерностей и путей достижения высокой точности измерения влажности почвы, установление основных принципов ее измерения. Существует широкий спектр методов и датчиков для определения влажности почвы, основанных на различных физических принципах. Авторами исследований представлен анализ принципа измерения влажности емкостным методом. Рассмотрены физические основы взаимодействия электромагнитных волн с влажным материалом, определяющим изменение диэлектрической проницаемости и, как следствие, емкости измерительной ячейки. Проанализированы факторы, влияющие на точность измерений, такие как температура, плотность и состав измеряемого вещества. Для достижения заданного уровня точности измерения влажности почвы как физической величины требуется выбор надлежащего метода измерения, основанного на измерении диэлектрической проницаемости, выбор соответствующего первичного преобразователя, разработка и реализация измерительной схемы – вторичного преобразователя. Особое внимание уделено анализу емкостного способа измерения влажности как одного из наиболее распространенных и перспективных. Предложенная методика позволяет оценить ключевые характеристики датчиков влажности почвы, включая точность, стабильность и воспроизводимость результатов. Также методика обеспечивает возможность сравнительного анализа различных методов измерения влажности, что способствует выбору оптимального решения для конкретных задач и условий. Результаты исследования позволили смоделировать усовершенствованную измерительную систему влажности почвы с обоснованием первичного и вторичного преобразователей.

Ключевые слова: емкостной датчик, измерение влажности, электрический сигнал, первичный и вторичный преобразователь, линейность, градуировка.

Для цитирования: Анализ принципа измерения влажности емкостным способом / М. А. Абзалов, С. М. Бакиров, Т. А. Широбокова, С. С. Елисеев // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1(85). С. 149-157. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2026_1_149-157.

Введение. Влажность почвы – критически важный параметр, определяющий рост и развитие растений, микробиологическую активность и протекание почвенных процессов. Точное измерение влажности необходимо для оптимизации систем ирригации, мониторинга засушливых периодов и проведения научных исследований в области почвоведения. Существует широкий спектр методов и датчиков для определения влажности почвы, основанных на различных физических принципах. Для обоснованного выбора метода и оценки

точности используемых датчиков требуется их экспериментальная проверка в контролируемых лабораторных условиях.

Материал и методы. Любое измерение сопровождается рядом характерных особенностей. Датчик влажности представляет собой устройство, которое, подвергаясь воздействию физической измеряемой величины (влажности почвы), выдает эквивалентный сигнал, обычно электрической природы (заряд, ток, напряжение или импеданс), являющийся функцией измеряемой величины:

$$s = f(m), \quad (1)$$

где s – электрический сигнал;

m – значение физической величины, а именно в нашем случае – влажность почвы.

Соотношение (1) выражает в общей теоретической форме физические законы, положенные в основу работы датчиков. Будучи выраженными численно, эти законы предопределяют выбор конструкций (геометрии и размеров) и материалов для их изготовления, допустимые характеристики окружающей среды, при которых датчики могут работать, и условия применения.

Для всех датчиков характеристика преобразования соотношения (1) в численной форме определяется экспериментально в результате градуировки, при проведении которой для ряда точно известных значений m измеряют соответствующие значения s , что позволяет построить градуировочную кривую. Обычно датчик стараются сконструировать таким образом, чтобы существовала линейная зависимость между малыми приращениями выходного сигнала и входной физической величины:

$$\Delta s = S \Delta m, \quad (2)$$

где S – чувствительность датчика.

В качестве первичного преобразователя прием электрический конденсатор с переменной диэлектрической проницаемостью, то есть переменный пассивный элемент. Электрическая схема, непосредственно связанная с пассивным датчиком, формирует его сигнал.

Вторичным преобразователем датчика влажности почвы является электрическая измерительная схема. В различных научно-технических источниках [5, 7] представлены различные схемы: потенциометрическая схема, мостовая схема, колебательный контур, операционный усилитель.

Выбор схемы формирования сигнала изменения влажности почвы влияет на метрологические характеристики измерительного комплекса [2, 4] (погрешность, чувствительность, линейность и помехоустойчивость). В общем виде на датчики, а именно на первичный и вторичный преобразователи, влияют следующие традиционные факторы:

– температура, которая влияет на электрические свойства датчиков, а также на размеры их компонентов;

– атмосферное давление и другие механические воздействия;

– переменные или постоянные магнитные поля, которые способствуют образованию наводок в электрических схемах;

– диапазоны изменения амплитуд или частот напряжения питания источника и др.

Тогда зависимость электрического сигнала примет вид:

$$s = f(m, t, p, e, w, \dots), \quad (3)$$

где t – температура;

p – атмосферное давление;

e – напряженность электрического поля;

w – напряженность магнитного поля.

При конструировании датчиков влажности сталкиваются с решением задач по снижению погрешностей. Реальная влажность почвы отличается от влажности почвы, в которую установлен датчик, так как при установке этого датчика нарушается структура почвы, что приводит к погрешности получения данных о реальном влажностном состоянии почвы. В научно-технической литературе [1, 4] встречаются разные методы снижения погрешностей. Систематические погрешности возникают из-за неточностей в измерительной системе или неправильного ее использования.

Поддержание стабильной работы датчика, контролирующего влажность, связано с возможными наводками и влиянием магнитного поля Земли на диэлектрическую проницаемость измерительного конденсатора, а также дополнительных элементов измерительной электрической схемы: стабилизация напряжения питания; применение усилителей с малым дрейфом и АЦП с достаточным разрешением; надлежащее заземление экранов и установок; применение усилителей с высокой степенью подавления синфазных помех; применение фильтров. В нашем случае работоспособность существующих послонных средств измерения, изготовленных ООО «Кайпос» и ООО «Статус Агро» [11], снижена из-за системной погрешности диэлектрической проницаемости на глубине. Это подтверждается данными сравнительной оценки различных способов определения влажности (рис. 1–3).

При сравнении результатов измерений видно, что данные существенно расходятся (рис. 1 и 3). В динамике данные массовой влажности в слое 50 см должны были измениться так же, как и более динамический 30-сантиметровый слой (рис. 1). Это связано с погрешностью способа измерения влажности, основанной на измерении диэлектрической проницаемости [5-11].



Рисунок 1 – Показания датчика послойного контроля влажности (ООО «Статус Агро»)

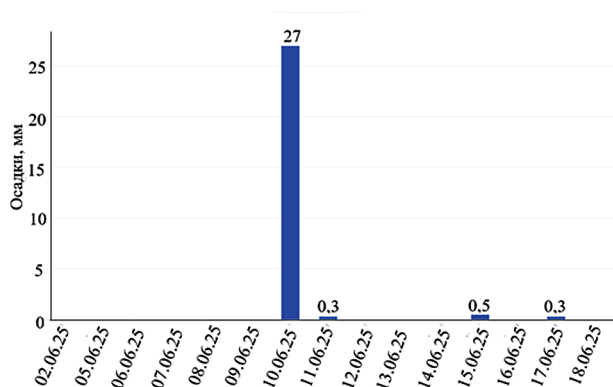


Рисунок 2 – Показания осадков в этот же период измерения (ООО «Статус Агро»)

По рисунку видно, что на глубине 30 см не происходит изменения влажности, хотя в периоде со 2.06 по 18.06 выпадали осадки или осуществлялся полив. При этом контрольная проверка влажности термостатно-весовым методом показала другие результаты (рис. 3).

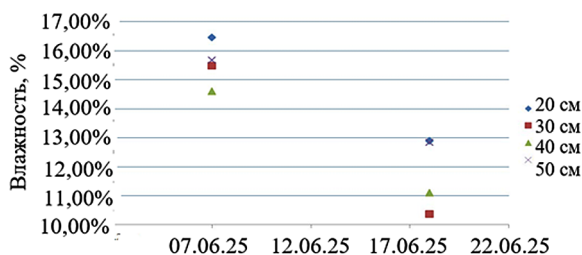


Рисунок 3 – Изменение влажности в тот же период (рис. 1), измеренное термостатно-весовым методом 7.06 и 18.06 (2025 г.)

Рассмотрим первичный преобразователь, который измеряет влажность на глубине 30-70 см (рис. 4). Влага насыщает диэлектрик между обкладками. Далее при высыхании почвы влажность среды изменяется и происходит вырав-

нивание, равномерное распределение влаги внутри первичного преобразователя и среды вокруг датчика. Однако на глубине эти процессы происходят очень медленно, даже незаметно. По рисунку 1 видно, что на протяжении 20 дней данные влажности на глубинах 30-70 см абсолютно не изменяются. Это подтверждает тот факт, что для послойного контроля требуется использовать другой принцип измерения, который будет более чувствителен к изменению влажности, что требует проведения дополнительных исследований. Поэтому возникают требования к определению влажности по слоям, основанным на другом принципе.

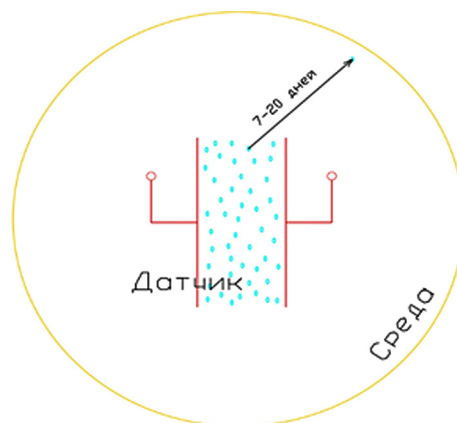


Рисунок 4 – Модель первичного преобразователя в виде электрического конденсатора

Результаты исследования. Существуют методы дифференциальных измерений (например, применение пушпульных схем); устранение паразитных сетевых наводок путем применения преобразователей с подводкой сигнала по двухпроводной линии; извлечение сигнала из шумов, его селекция

путем синхронного детектирования и использования корреляционных методов [8]. Статистическая обработка результатов позволяет определить наиболее вероятное значение измеренной величины и оценить пределы его погрешности. Если измерение одной и той же (неизвестной) величины повторяется n раз и дает результаты m_1, m_2, \dots, m_n , то среднее значение \bar{m} по определению равно:

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n}. \quad (4)$$

Разброс результатов характеризуется среднеквадратическим отклонением

$$\sigma = \sqrt{\frac{(m_1 - \bar{m})^2 + (m_2 - \bar{m})^2 + \dots + (m_n - \bar{m})^2}{n-1}}. \quad (5)$$

Если случайные погрешности измерения влажности, сопровождающие различные серии измерений, взаимно независимы, то вероятность появления различных результатов обычно удовлетворительно описывается нормальным законом, называемым также законом Гаусса [5]. Вероятность соответствия полученного значения емкости (напряжения) на первичном преобразователе измеряемой влажности почвы в пределах от m_1 до m_2 $P(m_1, m_2)$ можно записать в виде:

$$P(m_1, m_2) = \int_{m_1}^{m_2} p(m) dm, \quad (6)$$

где $P(m)$ – плотность вероятности для измеряемой величины m . В случае соблюдения закона Гаусса

$$p(m) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(m - \bar{m})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (7)$$

наиболее вероятная величина m равна \bar{m} , а вероятность появления результатов измерения в указанных ниже пределах равна:

$$P(\bar{m} \pm \sigma) = 68,27 \%, \quad (8)$$

$$P(\bar{m} \pm 2\sigma) = 95,45 \%, \quad (9)$$

$$P(\bar{m} \pm 3\sigma) = 99,73 \%. \quad (10)$$

Для достижения заданного уровня точности измерения влажности почвы как физической величины требуется:

а) выбор надлежащего метода измерения, основанного на измерении диэлектрической проницаемости [2, 5];

б) выбор соответствующего первичного преобразователя [3, 10];

в) разработка и реализация измерительной схемы – вторичного преобразователя [7].

Влажность определена составом минералов. Чем больше минеральных, солевых соединений, тем больше влияние на диэлектрическую проницаемость первичного преобразователя. Когда измеряемая величина зависит только от одного физического параметра, а датчик невосприимчив к другим влияющим величинам, градуировка упрощается. Градуировка датчиков влажности определяется простым способом. Она называется прямой и абсолютной, то есть грунт высушивается до нулевой влажности, и значение электрического сигнала соответствует в этот момент нулю. Далее в соответствии с [6], задаваясь единицей массовой или объемной влажности, рассчитывают количество необходимой влаги, чтобы получить 100 % влажности почвы, и измеряют это значение электрического сигнала. Больше 100 % значение влажности не может быть, а значение электрического сигнала в первичном преобразователе может изменяться в ограниченных пределах в зависимости от геометрических параметров, например, конденсатора. Линейность шкалы от 0 до 100 % рассмотрим далее.

Чувствительность S датчика в общем случае определяется для диапазона близ некоторого постоянного значения измеряемой величины m_i как отношение вариации сигнала Δs на выходе к изменению Δm измеряемой величины, которое вызвало эту вариацию сигнала:

$$S = \frac{\Delta s}{\Delta m} \Big|_{m=m_i}. \quad (11)$$

Единицы, в которых выражается S , зависят от принципа работы датчика и от природы измеряемой величины – мВ/%.

Частота изменений измеряемой величины является другим важным параметром, влияющим на чувствительность. В зависимости от частоты существуют два различных режима работы датчиков, с которыми связаны соответствующие параметры чувствительности [4]:

а) статический режим работы, при котором измеряемая величина постоянна или меняется очень медленно (постоянный поток излучения, постоянное ускорение);

б) динамический режим работы, при котором измеряемая величина меняется быстро (модулированный поток излучения, ускорение, связанное с вибрациями конструкции).

При измерении влажности в первую очередь следует обратить внимание на свойство диполей молекул воды к изменению частоты воздействующих колебаний. На разной частоте измерительной схемы можно получить абсолютно разные значения отклика электрического сигнала при одной и той же влажности. Частотные характеристики описываются дифференциальным уравнением первого и второго порядка. Рассмотрим уравнение первого порядка:

$$A \frac{ds}{dt} + Bs = m(t), \tag{12}$$

где A и B – постоянные.

Чувствительность датчика зависит также от частоты и выражается [5]:

$$S(f) = \frac{s_1}{m_1} = \frac{1}{B \sqrt{1+(f/f_c)^2}}, \tag{13}$$

При $f \rightarrow 0$ чувствительность в динамическом режиме стремится к значению статической чувствительности $S(0) = 1/B$. Следовательно, частотную характеристику можно записать в виде

$$S(f) = S(0) \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_c)^2}}. \tag{14}$$

Дифференциальное уравнение, описывающее такую систему, имеет форму

$$A \left(\frac{d^2s}{dt^2}\right) + B \left(\frac{ds}{dt}\right) + Cs = m(t), \tag{15}$$

где A, B, C – константы.

Если измеряемая величина изменяется по синусоидальному закону

$$m(t) = m_1 \cos \omega t, \tag{16}$$

то чувствительность в установившемся режиме можно записать следующим образом:

$$s(t) = s_1 \cos(\omega t + \varphi). \tag{17}$$

Используя комплексные обозначения, после соответствующих преобразований

$$m(t) \rightarrow m_1 e^{j\omega t}, s(t) \rightarrow s_1 e^{j\varphi} e^{j\omega t}, \tag{18}$$

где m_1 и s_1 – действительные числа, получим уравнение колебаний системы:

$$-A\omega^2 s_1 e^{j\varphi} + j\omega Bs_1 e^{j\varphi} + Cs_1 e^{j\varphi} = m_1. \tag{19}$$

Подставляя $f_0 = 1/2\pi\sqrt{C/A}$ и $\theta = B/2\sqrt{CA}$, где f_0 и θ – собственная частота незатухающей системы и коэффициент затухания, соответственно, имеет:

$$\varphi = -\arctg \left\{ \frac{2\theta}{\left(\frac{f_0}{f}\right)\left[1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]} \right\}. \tag{20}$$

Выражение для частной зависимости чувствительности в динамическом режиме принимает вид [1]:

$$S(f) = \frac{s_1}{m_1} = \frac{1}{c \sqrt{\left[1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + 4\theta^2\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}, \tag{21}$$

или, подставляя чувствительность в статическом режиме при $f = 0$ $S(0) = 1/C$, получим:

$$S(f) = S(0) / \sqrt{\left[1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + 4\theta^2\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}. \tag{22}$$

Для $\theta < 1/\sqrt{2} = 0,707$ АЧХ имеет максимум

на частоте $f_M = f_0\sqrt{1-2\theta^2}$; этот максимум выражен тем резче, чем меньше θ в соответствии с формулой [4]:

$$S(f_M) = \frac{S(0)}{2\theta\sqrt{1-\theta^2}}. \tag{23}$$

Для $\theta \geq 1/\sqrt{2}$ АЧХ монотонно убывает, становясь наиболее ровной для $\theta = 1/\sqrt{2}$. В этом последнем случае полоса пропускания равна f_0 . Можно несколько расширить полосу пропускания, если допустить небольшой подъем кривой $S(f)$. Так, если положить $\theta = 0,59$, то $S(f_M) = 1,05S(0)$ и $B = 1,16 f_0$.

В статическом режиме линейность определена наличием линейного участка на статической характеристике датчика. В динамическом режиме, при изменении измеряемой величины с частотой f , чувствительность изменяется в соответствии с определенными зависимостями:

– для системы первого порядка

$$S(f) = \frac{S(0)}{\sqrt{1+(f/f_c)^2}}, \tag{24}$$

– для системы второго порядка

$$S(f) = \frac{S(0)}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + 4\theta^2\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}. \tag{25}$$

Таким образом, линейность зависимости влажности между обкладками конденсатора

и электрического сигнала, например, напряжения на конденсаторе при измерительной схеме в виде колебательного контура, в динамическом режиме зависит от чувствительности статического режима $S(0)$ и параметров частной характеристики (f_c, f_0 и θ), которые не зависят от значений измеряемой величины в диапазоне, где чувствительность $S(0)$ постоянна.

Для определения градуировочной характеристики датчика по полученному некоторому числу пар точек (s_i и m_i) график этой характеристики будет несколько отличаться от прямой линии из-за неточности измерений и (или) несовершенства изготовления датчика. Распределение экспериментальных данных можно аппроксимировать уравнением прямой, что обычно делают методом наименьших квадратов [2]. Для такой прямой сумма квадратов отклонений ε_s экспериментальных точек минимальна. Установлено, что приближение к прямой вида

$$s = am + b \tag{26}$$

достигается при

$$a = \frac{N \cdot \sum s_i \cdot m_i - \sum s_i \cdot \sum m_i}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}, \tag{27}$$

$$b = \frac{\sum s_i \cdot \sum m_i^2 - \sum s_i \cdot m_i \cdot \sum m_i}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}, \tag{28}$$

где N – число градуировочных точек.

Опишем некоторые особенности измерительных схем (вторичных преобразователей) в виде колебательного контура, в схеме которого используется эталонный и измерительный конденсаторы. При этом влажность почвы определяется изменением электрического сигнала (напряжение, емкость, заряд и т. п.).

Тогда согласно [7] в генераторных измерительных схемах частота синусоидальных колебаний генератора является определенной и при соответствующих условиях равняется резонансной частоте контура, состоящего из катушки с индуктивностью L_0 и емкостью конденсатора C_0 , соединенных последовательно или параллельно.

На резонансной частоте F_0 сопротивление контура оказывается чисто активным, и F_0 определяется выражениями:

а) для последовательного колебательного контура:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}; \tag{29}$$

б) для параллельного колебательного контура:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \sqrt{1 - 1/Q_L^2}. \tag{30}$$

где Q_L – добротность катушки, $Q_L = L_0 \Omega_0 / R_s$, R_s – сопротивление катушки, $\Omega_0 = 2\pi F_0$, обычно

$Q_L^2 \gg 1$, так что для обоих контуров

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}. \tag{31}$$

Когда емкостной датчик является элементом резонансного контура генератора, вариации его реактивного сопротивления вызывают соответствующие изменения частоты колебаний. В предположении, что амплитуда изменений его реактивного сопротивления невелика, для соответствующих изменений частот ΔF справедливы соотношения:

$$\frac{\Delta F}{F_0} = - \frac{\Delta C}{2C_0}, \tag{32}$$

т. е.

$$F = F_0 \left(1 - \frac{\Delta C}{2C_0} \right). \tag{33}$$

Если генераторы колебательного контура вторичного преобразователя являются источником заряда $q_c(m)$ с емкостью C_c , то вследствие малой выходной мощности источника к его выходу обычно подключают усилитель с большим входным сопротивлением (рис. 5а).

При этом необходимо учитывать паразитную емкость для таких датчиков лучше использовать усилитель (рис. 5б). Причем напряжение на зажимах усилителя пропорционально заряду, а не емкости конденсатора, то есть конкретной влажности почвы. На основе представленного анализа разработана электрическая схема послыонного контроля влажности с высокой чувствительностью за счет использования двух генераторов частоты на 700 Гц и 7700 Гц (рис. 6).

Измерительная схема (рис. 6) содержит два генератора, подключаемые в цепь с измерительными конденсаторами (первичные преобразователи) поочередно для создания колебательного контура с разным значением частот. Измеряемая влажность почвы определяется количеством молекул, которые на разных частотах успевают изменять свое состояние с разным откликом из-за высокого дипольного момента [12].

Этот принцип обеспечит высокий отклик и чувствительность измерительной системы.

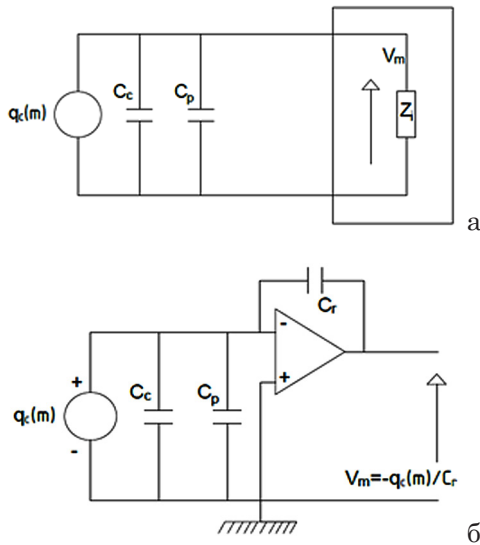


Рисунок 5 – Эквивалентные схемы согласования с измерительной цепью датчика, являющегося источником заряда (V_m – напряжение на импедансе, C_r – емкость усилителя, Z_i – импеданс датчика): а – общая эквивалентная электрическая схема; б – схема с электрическим усилителем

Заключение. Таким образом, анализ нормативно-технической литературы и работ разных ученых позволяет установить основные принципы измерения влажности почвы, охарактеризовать устройство и принцип работы первичного и вторичного преобразователя, а также выявить основные закономерности и пути достижения высокой точности измерения влажности почвы. Существующие принципы измерения, общее устройство датчиков и разных измерительных систем позволяет выявить недостатки существующих датчиков послынного контроля влажности и смоделировать усовершенствованную измерительную систему влажности почвы с обоснованием первичного и вторичного преобразователей. Вторичный преобразователь, содержащий два генератора с мостом Вина, позволит моделировать колебательные контуры на первичном преобразователе (измерительном конденсаторе) и добиться высокого отклика измерительной системы. С учетом выполненных исследований предложено использовать измерение влажности в цепи колебательного контура на частотах 700 Гц и 7700 Гц. Однако эти значения требуют подтверждения в лабораторных условиях и определения оптимальных частот.

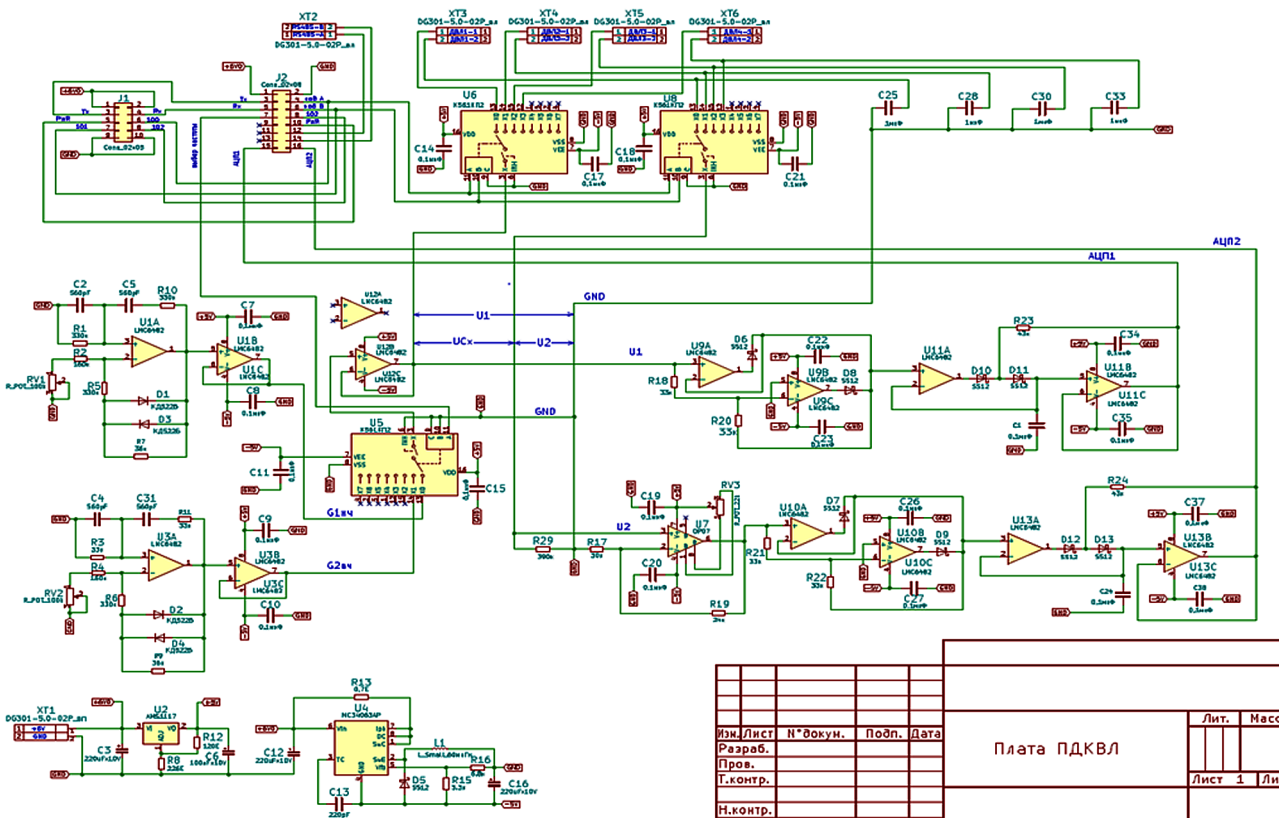


Рисунок 6 – Схема платы датчика контроля влажности почвы: 1...4 – первичные преобразователи на слоях 10, 20, 30, 40 см от поверхности; 5 – эталонные конденсаторы; 6 – АЦП; 7 – переключатель схем генераторов; 8 – выпрямитель; 9 – прецизионный усилитель; 10, 11 – задающие генераторы на мосте Вина

Список источников

1. Афанасьев А. Ю. Теоретические основы электротехники. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 208 с.
2. Аш Ж., Андре П., Бофрон Ж. Датчики измерительных систем. Москва: Мир, 1992. С. 8-102.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 11-е изд., перераб. и доп. Москва: Гардарики, 2007. 701 с.
4. Буторин В. А., Чарыков В. И., Малышев М. А. Вопросы теории и инновационных решений при эксплуатации электрооборудования: моногр. Курган: Дамми, 2011. 206 с.
5. Васильев С. И. Электротехнические материалы. Самара: СамГАУ, 2021. 59 с.
6. Гайнуллин Рен. Х., Гайнуллин Риш. Х., Волдаев М. Н. Проведение экспериментального исследования и обработка его результатов. Йошкар-Ола: Поволж. гос. технол. ун-т, 2019. 94 с.
7. Кравцов А. В., Пузарин А. В. Электрические измерения. Москва: РИОР: ИНФРА-М, 2025. 148 с.
8. Новиков Ю. Н. Электрические цепи и сигналы: базовые сведения, методы анализа процессов в цепях. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 356 с.
9. Чернов В. Ю., Анисимов Э. А. Введение в технику эксперимента и основы обработки результатов измерений. Йошкар-Ола: Поволж. гос. технол. ун-т, 2020. 68 с.
10. Пашипян И. А. Контент-анализ как метод исследования: достоинства и ограничения // Научная периодика: проблемы и решения. 2012. № 3(9). С. 13-18. EDN PEEZJH.
11. Kaipos [Электронный ресурс]. URL: <https://kaipos.ltd/> (дата обращения: 08.01.2026).
12. Shostak S. L., Ebenstein W. L., Muentner J. S. The dipole moment of water. I. Dipole moments and hyperfine properties of H₂O and HDO in the ground and excited vibrational states. The Journal of chemical physics. 1991; 94(9): 5875-5882.

Сведения об авторах:

М. А. Абзалов¹, ассистент;

С. М. Бакиров^{2✉}, доктор технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-9392-7627>;

Т. А. Широкова³, доктор технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4421-576X>;

С. С. Елисеев⁴, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-9392-7627>

^{1,2,4}Вавиловский университет, 410012, Россия, Саратов, просп. им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3

³Удмуртский ГАУ, 426069, Россия, Ижевск, ул. Студенческая, 11

²s.m.bakirov@mail.ru

References

1. Afanas'ev A. Yu. Teoreticheskie osnovy` e`lektrotexniki. Moskva; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2023. 208 s.
2. Ash Zh., Andre P., Bofron Zh. Datchiki izmeritel'ny`x sistem. Moskva: Mir, 1992. S. 8-102.
3. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy` e`lektrotexniki. E`lektricheskie cepi. 11-e izd., pererab. i dop. Moskva: Gardariki, 2007. 701 s.
4. Butorin V. A., Chary`kov V. I., Maly`shev M. A. Voprosy` teorii i innovacionny`x reshenij pri e`kspluatatsii e`lektooborudovaniya: monogr. Kurgan: Dammi, 2011. 206 s.
5. Vasil'ev S. I. E`lektrotexnicheskie materialy`. Samara: SamGAU, 2021. 59 s.
6. Gajnullin Ren. X., Gajnullin Rish. X., Voldaev M. N. Provedenie e`ksperimental'nogo issledovaniya i obrabotka ego rezul'tatov. Jshkar-Ola: Povolzh. gos. texnol. un-t, 2019. 94 s.
7. Kravczov A. V., Puzarin A. V. E`lektricheskie izmereniya. Moskva: RIOR: INFRA-M, 2025. 148 s.
8. Novikov Yu. N. E`lektricheskie cepi i signaly`: bazovy`e svedeniya, metody` analiza processov v cepyax. 2-e izd., ster. Sankt-Peterburg: Lan', 2023. 356 s.
9. Chernov V. Yu., Anisimov E`. A. Vvedenie v tekniku e`ksperimenta i osnovy` obrabotki rezul'tatov izmerenij. Jshkar-Ola: Povolzh. gos. texnol. un-t, 2020. 68 s.
10. Pashinyan I. A. Kontent-analiz kak metod issledovaniya: dostoinstva i ogranicheniya // Nauchnaya periodika: problemy` i resheniya. 2012. № 3(9). S. 13-18. EDN PEEZJH.
11. Kaipos [E`lektronny`j resurs]. URL: <https://kaipos.ltd/> (data obrashheniya: 08.01.2026).
12. Shostak S. L., Ebenstein W. L., Muentner J. S. The dipole moment of water. I. Dipole moments and hyperfine properties of H₂O and HDO in the ground and excited vibrational states. The Journal of chemical physics. 1991; 94(9): 5875-5882.

Original article

ANALYSIS OF THE PRINCIPLE OF MOISTURE MEASUREMENT BY THE CAPACITANCE METHOD

Muslim A. Abzalov¹, Sergey M. Bakirov^{2✉}, Tatyana A. Shirobokova³, Sergey S. Eliseev⁴^{1,2,4}Vavilov University, Saratov, Russia³Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia²s.m.bakirov@mail.ru

Abstract. Soil moisture is the main critical factor determining the growth and development of plants and their microbiological activity. Soil moisture measurement is a crucial indicator that helps evaluate the condition of the ground, its water balance, and affects the efficiency of irrigation and plant growth. The study is relevant because the accuracy of soil moisture measurement is necessary for monitoring droughts and conducting scientific research in the soil science. The purpose of this study is to identify the main patterns and ways to achieve high accuracy in measuring soil moisture, as well as to establish the basic principles of soil moisture measurement. There is a wide range of methods and sensors available for measuring soil moisture, which are based on various physical principles. The article provides an analysis of the principle of moisture measurement by the capacitance method. The physical basic principles of the interaction of electromagnetic waves with wet material, which determines the change in the dielectric constant and, as a result, the capacitance of the measuring cell, were considered. The factors affecting the accuracy of measurements, such as temperature, density, and composition of the measured substance, were analyzed. To achieve the desired level of accuracy in measuring soil moisture as a physical quantity, it is necessary: to select an appropriate measurement method based on measuring the dielectric constant, to select an appropriate primary transducer, and to develop and implement a measurement circuit using a secondary transducer. Special attention is paid to the analysis of the capacitance method of moisture measurement, as one of the most widespread and promising. The proposed methodology allows evaluating the key characteristics of soil moisture sensors, including accuracy, stability, and reproducibility of the results. Additionally, the methodology provides an opportunity for a comparative analysis of various methods of moisture measurement, which promotes the optimal solution for specific tasks and conditions. The research results made it possible to model an improved soil moisture measurement system with the justification of the primary and secondary transducers.

Key words: capacitance sensor, moisture measurement, electrical signal, primary and secondary transducer, linearity, calibration.

For citation: Abzalov M. A., Bakirov S. M., Shirobokova T. A., Eliseev S. S. Analysis of the principle of moisture measurement by the capacitance method. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2026; 1 (85): 149-157. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2026_1_149-157.

Authors:

M. A. Abzalov¹, Assistant;**S. M. Bakirov^{2✉}**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-9392-7627>;**T. A. Shirobokova³**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-4421-576X>;**S. S. Eliseev⁴**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-9392-7627>^{1,2,4}Vavilov University, 4 build. 3, Imeny Petra Stolypina St., Saratov, Russia, 410012³Udmurt State Agricultural University, 11 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069²s.m.bakirov@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.10.2025; одобрена после рецензирования 27.01.2026; принята к публикации 03.03.2026.

The article was submitted 17.10.2025; approved after reviewing 27.01.2026; accepted for publication 03.03.2026.