

УДК 621.3.088.3: 621: 351

© И. С. Лактионов, А. В. Вовна

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

Предложен метод контроля влажности почв, которые являются характерными для оранжерей ботанического сада (чернозем с рыхлой кладкой зерен). Реализация данного метода позволила повысить эффективность анализа почвы на влажность в 2–4 раза по сравнению с существующими аналогами. С целью реализации предложенного метода сконструирован макетный образец измерителя и определены его основные метрологические характеристики: основная абсолютная погрешность — не более $\pm 1.4\%$; дополнительная абсолютная погрешность — не более $\pm 3\%$; суммарная абсолютная погрешность — не более $\pm 5\%$ в рабочем диапазоне изменения влажности от 30 до 90 %. Установлено, что метрологические характеристики разработанного макетного образца измерителя удовлетворяют требованиям нормативной документации. Полученные теоретические и практические результаты исследований дают эффективный измерительный инструментарий в практической ботанике и растениеводстве.

Кл. сл.: эффективность измерений, точность, измеритель, влажность, почва

ВВЕДЕНИЕ

Окружающая среда представляет собой сложный синтез физических, химических и биологических взаимосвязанных факторов. Современные тенденции развития науки и техники выдвигают необходимость компьютеризации процесса получения измерительной информации о состоянии различных природных объектов, в том числе и почвы.

Актуальность исследований влажности почв связана с недостаточностью знаний о принципах воздействия влаги на режимы развития растений. В прикладном плане изучение влажности почв необходимо рассматривать в экологической, сельскохозяйственной, экономической и других плоскостях [1, 2].

Проведенный анализ существующих методов и средств измерения влажности почв показал, что они характеризуются либо недостаточной оперативностью, либо зависимы в своих показаниях от автоматически не учитываемых артефактов, таких как температура и кислотность почв.

Таким образом, имеется необходимость в математической формулировке критерия эффективности для сравнения различных методов измерения влажности почв и в разработке эффективного измерительного прибора.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ

Информационный анализ измерительных систем показывает, что имеются некоторые общие

тенденции развития средств измерительного контроля физико-химических величин. К ним можно отнести стремление повысить точность и быстродействие измерения требуемых параметров [3]. Измерительный процесс определения влажности почвы носит случайный характер. Для оценки эффективности измерителя влажности почвы предложено использовать критерий, который получен на основании метода аналогий из выражения для информационной пропускной способности измерительной системы [4]. Данный критерий может быть вычислен по формуле

$$K_{\text{эф}} = \frac{J}{\Delta\tau} = \frac{1}{\Delta\tau} \cdot \log_2 \left(\frac{W_{\text{max}} - W_{\text{min}}}{2 \cdot \Delta W} \right), \quad (1)$$

J — количество измерительной информации; $\Delta\tau$ — промежуток времени, требуемый на проведение анализа почвы на влажность, ч; W_{max} — верхняя граница диапазона изменения влажности, %; W_{min} — нижняя граница диапазона изменения влажности, %; ΔW — суммарная абсолютная погрешность измерения влажности почвы, %.

Выражение (1) позволяет оценить совокупное влияние временных затрат и точности определения влажности почвы. Анализ формулы (1) показывает, что для повышения эффективности измерителя влажности почвы необходимо обеспечить уменьшение фактора временных затрат, а также увеличение точности процесса измерения.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведенный анализ априорной информации

о методах и средствах определения влажности почвы [1, 5, 6] показал следующее.

– Основной стандартизированной технологией анализа почвы на влажность является метод горячей сушки, который является лабораторным методом. Основные характеристики метода и средств: время анализа — не менее 3 ч; суммарная абсолютная погрешность в диапазоне изменения влажности от 30 до 90 % — не более ± 2 %.

– В существующих инструментальных образцах кондуктометрических измерителей влажности почвы полностью или частично отсутствует компенсация основных дестабилизирующих факторов (температура и проводимость солей почвенного раствора). Основные характеристики метода и средств: время анализа — не более 0.5 ч; основная абсолютная погрешность в диапазоне изменения влажности от 30 до 90 % — не более ± 3 %.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ, РЕАЛИЗОВАННЫЕ В РАЗРАБОТАННОМ ПРИБОРЕ

Повышения эффективности измерителя влажности почвы можно добиться за счет разработки и исследования метода и средства инструментального анализа почвы на влажность с компенсацией дестабилизирующего влияния температуры и кислотности [7–9].

В основу предложенного авторами настоящей работы способа повышения эффективности измерителя влажности почвы положен метод вспомогательных измерений, который является частным случаем метода информационной избыточности [10]. Поставленная задача решается путем введения аппаратной избыточности и последующей функциональной коррекции результатов измерения за счет использования вспомогательных средств измерения pH и температуры почвы на основании следующей предложенной методики [8, 9].

1. Вычисление величины удельного электрического сопротивления (УЭС) почвы при нормальных условиях (pH = 7 ед. и $t = 20$ °C). Величина УЭС определяется на основании детектирования падения напряжения между измерительными электродами М и N кондуктометрической ячейки с последующим пересчетом по формуле [7, 8]

$$\rho \Big|_{\text{pH}=7, t=20^\circ\text{C}} = \frac{U_{\text{MN}} \cdot R_{\text{вн.}}}{(U_{\text{XX}} - \frac{l_{\text{AB}}}{l_{\text{MN}}} \cdot U_{\text{MN}}) \cdot K}, \quad (2)$$

где ρ — УЭС почвы, Ом·м; U_{MN} — детектируемое падение напряжения между измерительными электродами, В; $R_{\text{вн.}}$ — внутреннее сопротивление источника сигнала, Ом; U_{XX} — напряжение холостого хода источника сигнала, В; l_{AB} — расстояние

между питающими электродами, м; l_{MN} — расстояние между измерительными электродами, м; K — коэффициент измерительной установки, зависящий от расположения измерительных и питающих электродов, м⁻¹.

2. Вычисление относительной влажности почвы при нормальных условиях (pH = 7 ед. и $t = 20$ °C) по формуле [5]

$$W = \frac{\gamma}{\rho^2 \Big|_{\text{pH}=7, t=20^\circ\text{C}}} + \chi, \quad (3)$$

где W — относительная влажность почвы, %; γ и χ — коэффициенты аппроксимации функции, которые характеризуют тип исследуемой почвы.

3. Измерение pH в рабочем диапазоне от 5 до 8 ед. и введение поправки на результат измерения УЭС почвы по формуле (4). Выражение (4) экспериментально получено на основании анализа регрессионных зависимостей между УЭС и содержанием (см. рис. 1, а) для различных типов почв [5, 9]. Установлено, что данные регрессионные зависимости являются линейными:

$$\rho(\text{pH}) = \rho \Big|_{\text{pH}=7, t=20^\circ\text{C}} \cdot [1 + \alpha \cdot (\text{pH}_7 - \text{pH})], \quad (4)$$

где pH_7 — нормальное значение кислотности почвы (нейтральная почва); α — угловой коэффициент аппроксимации функции, величина которого составляет -0.364 [9].

4. Измерение температуры t в рабочем диапазоне от 10 до 30 °C и введение поправки на результат измерения УЭС почвы по формуле (5). Выражение (5) получено на основании анализа регрессионных зависимостей между УЭС и температурой (см. рис. 1, б) для парниковых почв [5, 11]:

$$\rho(t) = \rho \Big|_{\text{pH}=7, t=20^\circ\text{C}} \cdot [1 + \beta \cdot (20 - t)], \quad (5)$$

где $\rho(t)$ — измеренное значение УЭС при температуре t , Ом·м; t — температура почвы, °C; β — температурный коэффициент сопротивления почвы, величина которого составляет 0.029 1/°C в диапазоне температур от -20 до 40 °C [11].

5. Функциональная коррекция результата измерения УЭС почвы с учетом поправок на дестабилизирующее влияние температуры и кислотности почвы по формуле

$$\rho(\text{pH}; t) = \rho \Big|_{\text{pH}=7, t=20^\circ\text{C}} \times [1 + \beta \cdot (20 - t)] \cdot [1 + \alpha \cdot (7 - \text{pH})]. \quad (6)$$

6. Функциональная коррекция результата определения относительной влажности почвы с учетом поправок на дестабилизирующее влияние температуры и кислотности почвы по формуле

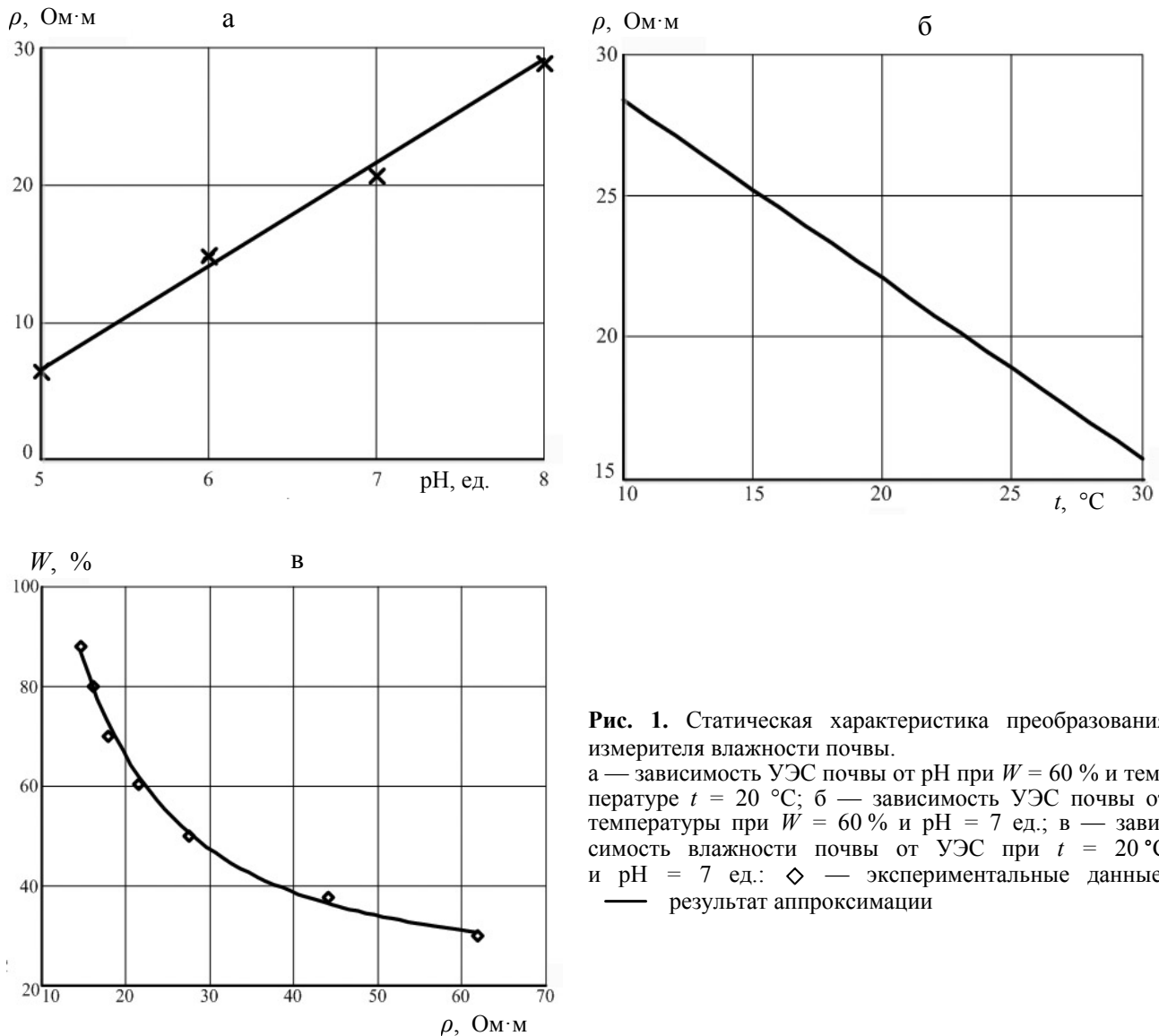


Рис. 1. Статическая характеристика преобразования измерителя влажности почвы. а — зависимость УЭС почвы от рН при $W = 60\%$ и температуре $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$; б — зависимость УЭС почвы от температуры при $W = 60\%$ и $\text{pH} = 7$ ед.; в — зависимость влажности почвы от УЭС при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ и $\text{pH} = 7$ ед.: \diamond — экспериментальные данные, — результат аппроксимации

**КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРИБОРА.
ЕГО МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

В результате проведенных исследований разработан и реализован макетный образец средства измерительного контроля влажности почвы [13], который состоит из следующих функциональных блоков.

– Генератор двухполярных прямоугольных импульсов с регулируемой амплитудой в диапазоне от ± 3 до ± 6 В и частотой следования от 100 Гц до 100 кГц. Нестабильность амплитуды составляет ± 30 мВ; нестабильность частоты составляет ± 5 Гц.

– Трехканальный детектор действующего значения напряжения с функциями RMS-to-DC пре-

$$W = \frac{\gamma \cdot \left(U_{XX} - \frac{I_{AB}}{I_{MN}} \cdot U_{MN} \right)^2}{U_{MN}^2 \cdot R_{вн.}^2} \times K^2 \cdot [1 + \beta(20 - t)]^2 [1 + \alpha(7 - \text{pH})]^2 + \chi. \quad (7)$$

Коэффициенты аппроксимации функции (7) γ и χ найдены путем регрессионного анализа эмпирических зависимостей, которые сняты на основании ранее разработанных авторами настоящей статьи методик [9, 12, 13]. Графический вид полученной градуировочной характеристики измерителя влажности почвы и результат аппроксимации при нормальных условиях ($t = 20\text{ }^\circ\text{C}$; $\text{pH} = 7$ ед.) представлены на рис. 1, в.

образования и записью данных в ПК через USB-порт (ArduinoLeonardo).

– Цифровой измерительный канал температуры с предельной абсолютной погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$ в диапазоне изменения температур от 0 до 70°C .

– Аналоговый измерительный канал кислотности почвы с предельной абсолютной погрешностью ± 0.25 ед. в диапазоне изменения pH от 5 до 8 ед.

– Программное обеспечение в среде LabView для сбора и обработки измерительной информации.

На основании анализа зависимостей, представленных на рис. 1, определена чувствительность измерителя:

– по влажности $0.7 \text{ Ом}\cdot\text{м} / \%$ в рабочем диапазоне изменения относительной влажности почвы от 30 до 90 % (см. рис. 1, в);

– по кислотности $7.3 \text{ Ом}\cdot\text{м} / \text{ед.}$ в рабочем диапазоне изменения pH почвы от 5 до 8 ед. (см. рис. 1, а);

– по температуре $3.6 \text{ Ом}\cdot\text{м} / ^\circ\text{C}$ в рабочем диапазоне изменения температуры почвы от 10 до 30°C (см. рис. 1, б).

При проведении лабораторных испытаний макетного образца измерителя влажности почвы установлено амплитудное значение шумовой со-

ставляющей детектируемого падения напряжения. Полученное действующее значение $U_{\text{ш}}$ не превышает ± 20 мВ, что с доверительной вероятностью ($P = 0.95$) соответствует среднеквадратичному значению ± 10 мВ. Шумовая составляющая детектируемого падения напряжения обуславливает основную погрешность измерения УЭС почвы и, как следствие, погрешность определения влажности почвы. Основная погрешность измерения УЭС почвы ($\Delta\rho_{\text{осн.}}$) определена на основании уравнения (2) с учетом $U_{\text{ш}}$ и составила $\pm 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Полученное значение $\Delta\rho_{\text{осн.}}$ с учетом чувствительности измерителя по влажности (S_W) позволило рассчитать основную погрешность разработанного макетного образца измерителя влажности почвы:

$$\Delta_{W_{\text{осн.}}} = \frac{\Delta\rho}{S_W} = \frac{\pm 1}{0.7} = \pm 1.4 \%. \quad (8)$$

Результат работы аппаратно-программной реализации измерителя влажности почвы с визуализацией измерительной информации на ПК представлен на рис. 2.

Полученные значения коэффициентов чувствительности измерителя по pH (S_{pH}) и температуре (S_t) позволили определить составляющие дополнительной погрешности измерения влажности почвы по следующим формулам:

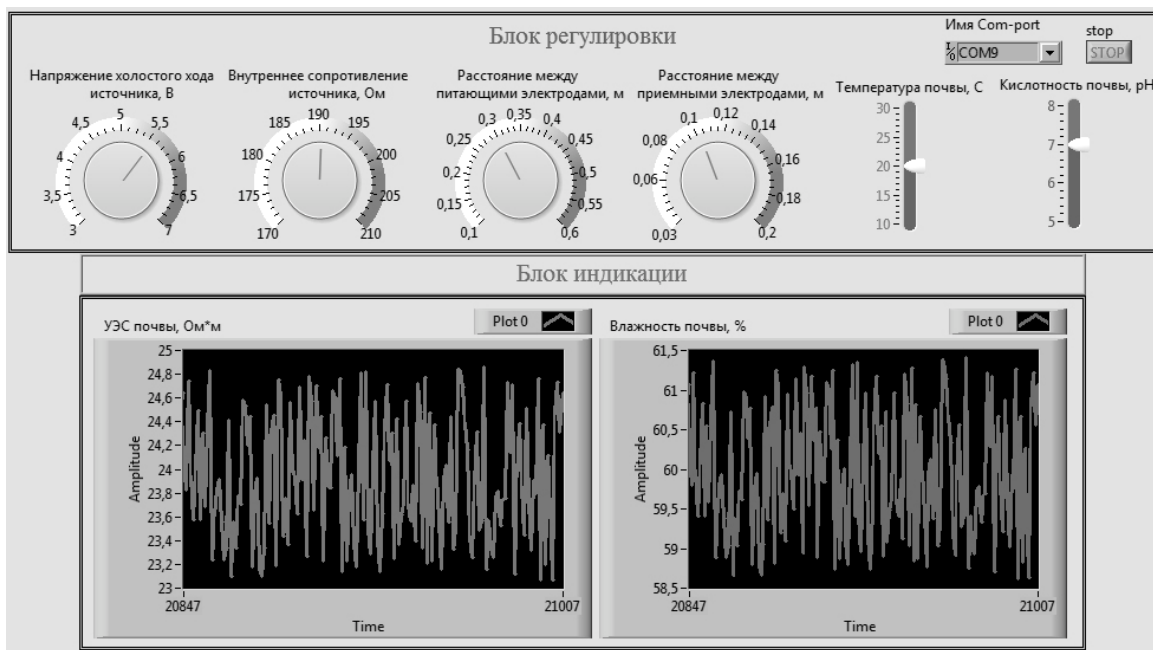


Рис. 2. Вид интерфейса аппаратно-программного комплекса измерителя влажности почвы. Результат единичного измерения влажности почвы при $W = 60 \%$, pH = 7 ед. и $t = 20^\circ\text{C}$

$$\Delta W_{\text{доп.рН}} = \frac{\Delta \rho_{\text{доп.рН}}}{S_W} = \frac{S_{\text{рН}} \cdot \Delta \text{рН}}{S_W} = \frac{\pm 7.3}{0.7} \Delta \text{рН} = 10 \Delta \text{рН}; \quad (9)$$

$$\Delta W_{\text{доп.т}} = \frac{\Delta \rho_{\text{доп.т}}}{S_W} = \frac{S_t \cdot \Delta t}{S_W} = \frac{\pm 3.6}{0.7} \Delta t = 5 \Delta t. \quad (10)$$

На основании полученных значений основной и составляющих дополнительной погрешности получена формула (11) для расчета суммарной абсолютной погрешности измерения влажности почвы. Выражение (11) получено для независимых составляющих абсолютной погрешности измере-

ния влажности почвы:

$$\Delta W_{\Sigma} = \sqrt{\Delta W_{\text{осн.}}^2 + \Delta W_{\text{доп.рН}}^2 + \Delta W_{\text{доп.т}}^2} = \sqrt{2 + 100(\Delta \text{рН})^2 + 25(\Delta t)^2}, \%. \quad (11)$$

Полученные функциональные зависимости (9), (10) и (11) позволили провести сравнительную характеристику метрологических показателей существующих измерителей влажности почвы и разработанного макетного образца средства измерительного контроля. Графики распределения основной, дополнительной и суммарной абсолютной погрешностей различных типов измерителей представлены на рис. 3.

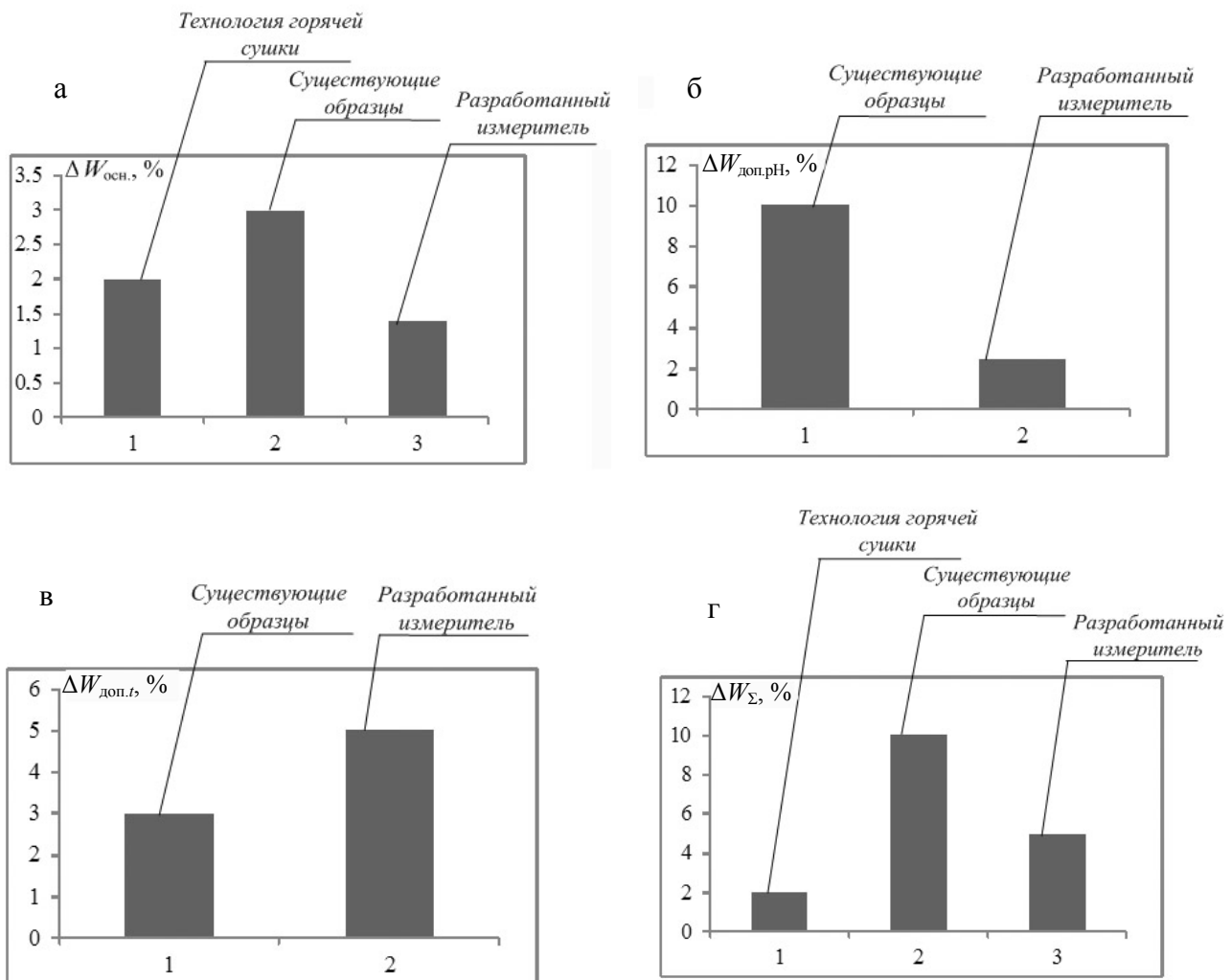


Рис. 3. Сравнительная характеристика метрологических показателей измерителей влажности почвы. а — основная абсолютная погрешность; б — дополнительная абсолютная погрешность от дестабилизирующего влияния рН; в — дополнительная абсолютная погрешность от дестабилизирующего влияния температуры; г — суммарная абсолютная погрешность

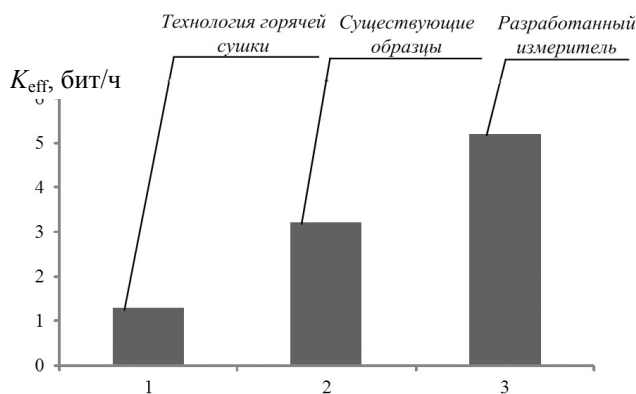


Рис. 4. Коэффициенты эффективности различных типов измерителей влажности почвы

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3, показывает, что:

- суммарная абсолютная погрешность определения влажности почвы разработанным измерителем равна $\pm 5\%$, что не превышает максимально допустимого значения $\pm 6\%$ [6];

- определение влажности почвы на основании предложенного метода позволяет уменьшить суммарную абсолютную погрешность по сравнению с существующими инструментальными измерителями в 2 раза.

Количественный анализ метрологических характеристик разработанного средства измерительного контроля влажности почвы позволил определить дальнейшие пути и направления повышения эффективности измерителя. С математических позиций этого можно добиться за счет повышения точности измерения дестабилизирующих факторов, т. к. величина дополнительной погрешности ($\Delta W_{\text{доп.}} = \pm 3\%$) в 2 раза превышает значение основной погрешности ($\Delta W_{\text{осн.}} = \pm 1.4\%$).

На основании полученных значений погрешности измерения влажности почвы выполнена оценка эффективности разработанного измерителя по формуле (1). Графический вид распределения коэффициентов эффективности для различных типов измерителей влажности почвы, примененных в сходных условиях, представлен на рис. 4.

Анализ этих зависимости свидетельствует, что эффективность разработанного измерителя влажности почвы в 2–4 раза выше, чем у существующих технологий и средств. Повышение эффективности достигается за счет:

- уменьшения времени анализа почвы на влажность в 6 раз путем использования компьютеризированного инструментального средства измерения, которое позволяет выполнять оперативный

контроль в полевых условиях без процедур пробоотбора и пробоподготовки;

- увеличения точности измерения влажности почвы, которое достигается за счет компенсации дестабилизирующих воздействий температуры и кислотности на основании разработанного метода.

ВЫВОДЫ

1. Математически обоснован критерий определения эффективности измерителей влажности почвы, который позволяет оценить совокупное влияние факторов временных затрат и точности измерения на эффективность анализа почвы на влажность в полевых условиях.

2. Предложен и обоснован метод определения влажности почвы, а также структурно и функционально описан реализующий его макетный образец.

3. Определены его основные метрологические характеристики в рабочем диапазоне изменения влажности от 30 до 90 %: основная абсолютная погрешность — не более $\pm 1.4\%$; дополнительная абсолютная погрешность — не более $\pm 3\%$; суммарная абсолютная погрешность — не более $\pm 5\%$. Метрологические характеристики разработанного макетного образца измерителя удовлетворяют требованиям нормативной документации. Эффективность анализа почвы на влажность разработанным прибором в 2–4 раза выше по сравнению с существующими методами и средствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kirkham M.B. Principles of soil and plant water relations. San Diego: Elsevier Academic Press, 2005. 519 p.
2. Киселев Е.Н. Территориальная структура и динамика поля влажности почвы в пределах степной зоны Западного Предкавказья. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Краснодар: Кубанский государственный университет, 2009. 23 с.
3. Седалищев В.Н. Физические основы повышения эффективности (создания нелинейных) измерительных устройств. Учеб. пособие. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. 287 с.
4. Вовна О.В. Компьютеризована інформаційно-вимірювальна система контролю концентрації метану у вугільних шахтах. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Донецьк: Донец. нац. техн. ун-т, 2009. 20 с.
5. Поздняков А.И., Гюладыев Ч.Г. Электрофизические свойства некоторых почв. Москва-Баку: Адильоглы, 2004. 240 с.
6. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. Межгосударственный стандарт ГОСТ 28268-89. М.: Стандартинформ, 2006. 8 с.

7. *Вовна А.В., Лактионов И.С.* Математическая модель компьютеризированной системы измерительного контроля влажности почвы // *Научные работы Донецкого национального технического университета. Серия "Обчислювальна техніка та автоматизація"*. Донецьк, 2013. Вып. 2. С. 197–206.
8. *Лактионов И.С.* Розроблення математичної моделі та обґрунтування структури засобу вимірювального контролю вологості ґрунту // *Метрологія та прилади*. Харків, 2014. Т. 46, № 2. С. 35–39.
9. *Лактионов И.С., Вовна А.В.* Способ уменьшения дополнительной погрешности измерителя влажности почвы оранжерей ботанического сада // *Научные работы Донецкого национального технического университета. Серия: "Обчислювальна техніка та автоматизація"*. Донецьк, 2014. Т. 27, № 2. С. 183–192.
10. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений. Рекомендация МИ 2301-2000 ГСИ. М.: ВНИИМС, 2000. 14 с.
11. *Качинский Н.А.* Физика почвы. Ч. 2. Водные физические свойства и режимы почвы. М.: Высшая школа, 1970. 358 с.
12. *Лактионов И.С., Бурмистрова А.А.* Способ компенсации влияния температурного фактора на метрологические характеристики измерителя влажности почв // *Збірник наукових праць XIV науково-технічної конференції аспірантів та студентів "Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих"*. Донецьк, 2014. С. 275–279.
13. *Лактионов И.С., Турупалов В.В.* Разработка и исследование макетного образца измерителя влажности почвы // *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту української державної академії залізничного транспорту*. Донецьк, 2014. № 38. С. 13–19.

*Донецкий национальный технический университет,
Украина*

Контакты: *Лактионов Иван Сергеевич,*
ivanlaktionov88@mail.ru

Материал поступил в редакцию 17.10.2014

METHOD FOR THE EFFICIENCY IMPROVING OF THE SOIL MOISTURE METER

I. S. Laktionov, A. V. Vovna

Donetsk National Technical University, Ukraine

The monitoring method for the botanical garden greenhouses soil moisture has been proposed, that are specific to the botanical garden greenhouses (black earth with loose masonry grains). The implementation of this method has improved the soil moisture analysis efficiency by 2–4 times in comparison with existing analogues. In order to implement the proposed method the model sample of the meter has been designed and its basic metrological characteristics have been determined: the main absolute error — no more than $\pm 1.4\%$; the additional absolute error — no more than $\pm 3\%$; the total absolute error — no more than $\pm 5\%$ in the working range of the moisture from 30 to 90 %. Established metrological characteristics of the developed meter prototype satisfy regulatory requirements. The theoretical and practical results of the researches give an effective set of measuring tools in the industrial botany and plant breeding.

Keywords: efficiency, accuracy, meter, moisture, soil

REFERENCES

1. *Kirkham M.B.* Principles of soil and plant water relations. San Diego: Elsevier Academic Press, 2005. 519 p.

Contacts: *Laktionov Ivan Sergeevich,*
ivanlaktionov88@mail.ru

Article arrived in edition: 17.10.2014