

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 621.317.73

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-1

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ И ПРИМЕСЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

С. В. Мишуков

Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия
stas.mishukov.92@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Контроль влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов является основной производственной задачей, влияющей на их качество, снижение энергозатрат при хранении и переработке, стоимость, техническую и пищевую ценности, наличие полезных потребительских свойств. *Материалы и методы.* Предложен двухступенчатый метод определения влажности и примесей в продуктах, исследование которого выполнено посредством компьютерного моделирования в среде SimInTech с получением результатов расчетов модели в режиме реального времени на основе программируемых блоков. *Результаты.* Построена имитационная модель предлагаемого метода и получены результаты ее расчета в сравнении с известным способом определения параметров измерительных цепей. Разработана функциональная схема предлагаемой информационно-измерительной системы контроля влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов. *Вывод.* Результаты расчета показали, что предлагаемый метод обладает существенным преимуществом по критерию относительной погрешности результатов определения информативных параметров.

Ключевые слова: емкостной датчик, моделирование, измерительная схема, операционный усилитель, относительная погрешность, влажность, примеси

Для цитирования: Мишуков С. В. Разработка и исследование системы контроля влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 5–12. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-1

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A SYSTEM FOR CONTROLLING HUMIDITY AND IMPURITIES OF AGRICULTURAL PRODUCTS

S.V. Mishukov

Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia
stas.mishukov.92@mail.ru

Abstract. *Background.* Control of moisture and impurities of agricultural products is the main production task affecting their quality, reduction of energy consumption during storage and processing, cost, technical and nutritional values, availability of useful consumer properties. *Materials and methods.* A two-stage method for determining moisture and impurities in products is proposed, the study of which is carried out by computer modeling in the SimInTech environment with obtaining the results of model calculations in real time based on programmable blocks. *Results.* A simulation model of the proposed method is constructed and the results of its calculation are obtained in comparison with the

known method for determining the parameters of measuring circuits. A functional scheme of the proposed information and measurement system for monitoring humidity and impurities of agricultural products has been developed. *Conclusion.* The results of the calculation showed that the proposed method has a significant advantage in terms of the relative error of the results of determining informative parameters.

Keywords: capacitive sensor, simulation, measuring circuit, operational amplifier, relative error, humidity, impurities

For citation: Mishukov S.V. Development and research of a system for controlling humidity and impurities of agricultural products. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-1

Введение

По данным исследований Центра развития потребительского рынка Московской школы управления «Сколково» ежегодные продовольственные потери производимых продуктов составляют 1,3 млрд тонн (рис. 1), что является серьезной проблемой продовольственной безопасности всего мира.



Рис. 1. Доля мировых продовольственных потерь и отходов по товарам (% от общего числа потерь)

Значительная доля потерь приходится на сельскохозяйственные продукты растительного происхождения – фрукты и овощи 44 %, корнеплоды 20 %, зерно 19 %, масличные и бобовые культуры 3 %, что свидетельствует о серьезных проблемах в указанном секторе пищевой промышленности (рис. 2).

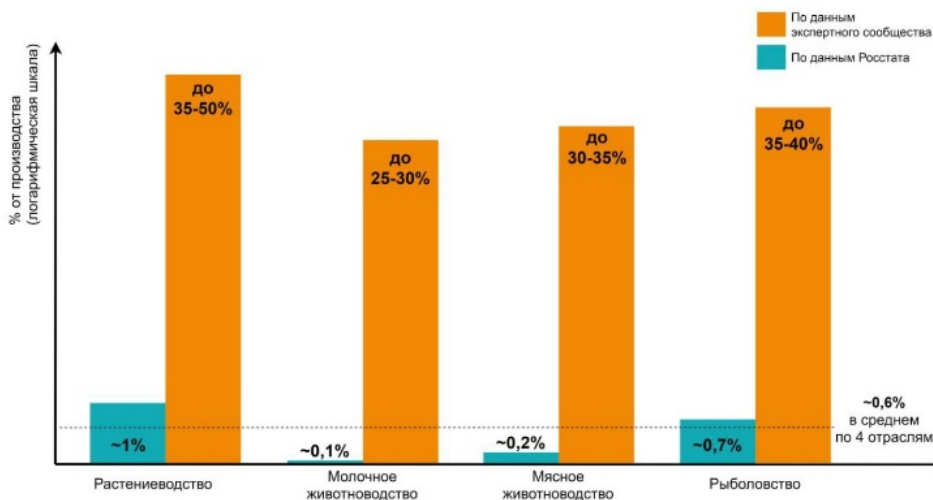


Рис. 2. Оценка продовольственных потерь в РФ

По данным экспертов, в России потери продовольственных продуктов в растениеводстве достигают 35–40 %, при этом их порча происходит на всех этапах производства, транспортировки, хранения и переработки. Например, при выращивании растительных продуктов к их порче и потерям приводит неправильный выбор сроков сборки урожая, в результате чего сельхозпроизводители получают продукцию низкого качества, которая имеет повышенную влажность и повреждения, развитие процессов гниения или поражения вредителями, как следствие, ритейлеры не принимают продукцию по причине несоответствия ее характеристик установленным требованиям. В процессе транспортировки сельхозпродукции потери могут достигать 30 %, что связано с невыполнением условий перевозки – температуры, влажности, загазованности, вибрации и другое, нарушением предельных сроков транспортировки, перегрузкой транспорта и отсутствием логистики. При хранении продукции к порче и потерям приводят несоблюдение температурного режима, влажность, отсутствие вентиляции, механические или биологические повреждения, развитие микроорганизмов, насекомых или клещей, дыхание, прорастание и др. [1].

Из вышесказанного можно сделать вывод, что одной из причин потерь продовольственной сельхозпродукции является ее высокая влажность, превышающая допустимые пределы и приводящая к ускорению процессов гниения, развитию микроорганизмов, появлению плесени, прорастанию и другое, при этом оценка степени увлажненности продуктов на всех технологических этапах производства, транспортировки и хранения не выполняется, а если и выполняется, то с помощью трудоемких и медлительных методик, которые установлены ГОСТ и выполняются в лабораторных условиях. В редких случаях сельхозпроизводители применяют дорогостоящие портативные влагомеры, которые требуют ручного отбора проб и загрузки в контейнер устройства [2].

Подобные устройства сокращают потери продовольственных продуктов на разных технологических этапах, однако требуют дополнительных затрат времени на выполнение отбора проб в разных партиях продукта, полевых условиях, отдельных складов и т.д., что приводит к дополнительным издержкам на транспортные расходы, а также на содержание отдельного специалиста для проведения указанных работ. Также следует отметить, что указанные устройства не имеют возможности хранить или передавать полученные результаты измерений влагосодержания на съемные носители либо на ПК, в связи с чем сильно ограничены для возможности реализации какой-либо системы мониторинга состояния продуктов.

В таких условиях единственным рациональным решением для сельхозпроизводителей является внедрение в оборудование на всех этапах производства систем контроля влагосодержания сельскохозяйственных продуктов, которые в автоматическом режиме смогут выполнять измерения всех партий продуктов на всех технологических этапах производства, транспортировки и хранения, при этом смогут выполнять оценку качества и управлять процессами подготовки продукта к транспортировке, складированию, обработке, сушке и т.д. [3]. Однако на текущий момент таких информационно-измерительных систем (ИИС) для сельхозпродуктов очень мало, а те, которые применяются, не отвечают современным требованиям точности, быстродействия, простоты и универсальности для внедрения в эксплуатируемое сельскохозяйственное оборудование.

Материалы и методы

Указанная проблема свидетельствует о необходимости разработки новых ИИС контроля и управления на основе перспективных методов определения влажности сельскохозяйственных продуктов. Одним из таких методов является диэлькометрический метод получения информации о степени увлажнения продукта посредством емкостных датчиков (ЕД) [4], который основан на двухступенчатой схеме измерений (рис. 3), обеспечивающей упрощение алгоритма получения информативных данных об исследуемом объекте.

Как видно из представленной структурной схемы, ЕД можно представить в виде четырехэлементной схемы замещения (СЗ), включающей основные информативные параметры, описывающие датчик с исследуемым продуктом: R_1 – сквозное активное сопротивление, характеризующее сквозную активную проводимость среды; C_1 – емкость, характеризующая мгновенную поляризацию, зависящую от электрофизических и естественных свойств среды; R_2 – активное релаксационное сопротивление, характеризующее релаксационную проводи-

мость среды, зависящую от содержания и наличия примесей в среде; C_2 – емкость, характеризующая релаксационную поляризацию и являющаяся основным информативным параметром для системы, поскольку она имеет прямую зависимость от количества частиц воды и их размеров, т.е. от влажности контролируемой среды.

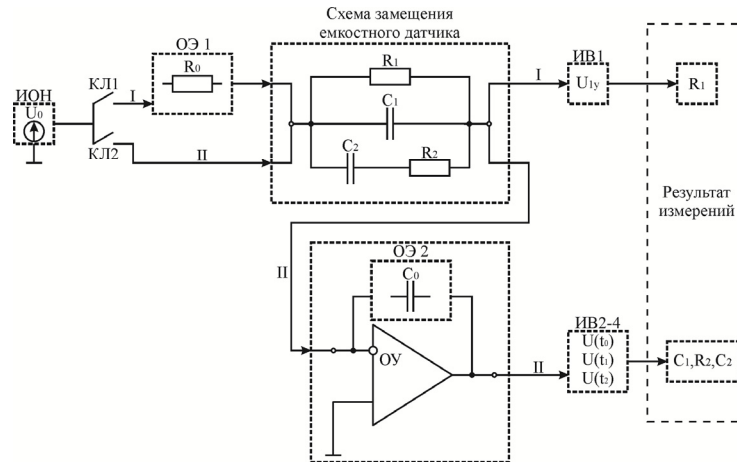


Рис. 3. Структурная схема метода определения влажности и примесей продуктов

Первая ступень измерений по предлагаемому методу позволяет определить сквозное сопротивление ЕД R_1 , для этого от источника опорного напряжения (ИОН) через ключ (КЛ1) и опорный элемент (ОЭ1) в виде резистора R_0 подается скачок постоянного напряжения U_0 , при этом сквозное сопротивление датчика R_1 и опорный резистор R_0 образуют резистивный делитель напряжения, описываемый выражением

$$R_1 = \frac{R_0 U_{1y}}{U_0 - U_{1y}}, \quad (1)$$

где U_{1y} – измеренная величина напряжения (ИВ1), В.

Модель измерительной схемы (ИС) для I ступени, построенная в среде SimInTech, представлена на рис. 4.

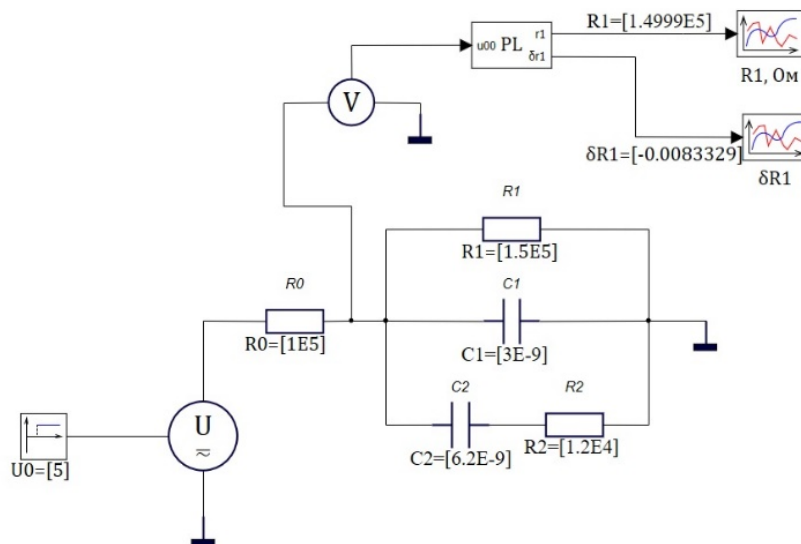


Рис. 4. ИС I ступени измерений

Значения параметров модели ИС взяты из известного способа определения параметров многоэлементных цепей [5]: $U_0 = 5$ В; $R_0 = 100$ кОм; $C_0 = 17$ нФ; $R_1 = 150$ кОм; $C_1 = 3$ нФ; $R_2 = 12$ кОм; $C_2 = 6,2$ нФ; $\tau = 74,4$ мкс.

Для выполнения расчетов в модели ИС предусмотрен блок «Язык программирования», в который введено выражение (1), в результате чего получено значение параметра ЕД $R_1 = 149,999$ кОм с относительной погрешностью $\delta R_1 = \pm 0,008$ %, что свидетельствует о работоспособности и высокой точности предлагаемого метода на I ступени измерений.

На второй ступени измерений выполняется определение значений C_1 , C_2 и R_2 , для этого от ИОН через ключ (КЛ2) на ЕД, подключенный к операционному усилителю (ОУ), отрицательная обратная связь которого реализована посредством опорного элемента (ОЭ2) в виде конденсатора C_0 , подается еще один скачок постоянного напряжения U_0 , в результате чего напряжение на выходе ОУ изменяется по экспоненциальному закону переходного процесса, в течение которого в строго заданные моменты времени t_0 , t_1 и t_2 измеряются напряжения $U(t_0)$, $U(t_1)$ и $U(t_2)$ (ИВ2-4).

Данные отсчеты напряжений являются основой для построения системы уравнений:

$$\begin{cases} U(t_0) = A_0 + A_1 t_0 + A_3 \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}} \right), \\ U(t_1) = A_0 + A_1 t_1 + A_3 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right), \\ U(t_2) = A_0 + A_1 t_2 + A_3 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}} \right). \end{cases} \quad (2)$$

С учетом вычисленного сквозного сопротивления R_1 на I ступени измерений из приведенной системы уравнений определяются соотношения коэффициентов A_0 , A_1 , A_3 и постоянная времени τ :

$$A_0 = U(t_0), \quad (3)$$

$$A_1 = \frac{U_0}{R_1 C_0}, \quad (4)$$

$$A_3 = \frac{(U(t_1) - A_0 - A_1 t_1)^2}{2U(t_1) - A_0 - U(t_2)}, \quad (5)$$

$$\tau = \frac{t_1}{\ln \left(\frac{U(t_1) - A_0 - A_1 t_1}{U(t_2) - U(t_1) - A_1 t_1} \right)}. \quad (6)$$

На основе функциональных зависимостей определяются значения информативных параметров ЕД:

$$C_1 = \frac{A_0 C_0}{U_0}; \quad C_2 = \frac{A_3 C_0}{U_0}; \quad R_2 = \frac{\tau}{C_2}. \quad (7)$$

Модель ИС для II ступени, построенная в среде SimInTech, представлена на рис. 5.

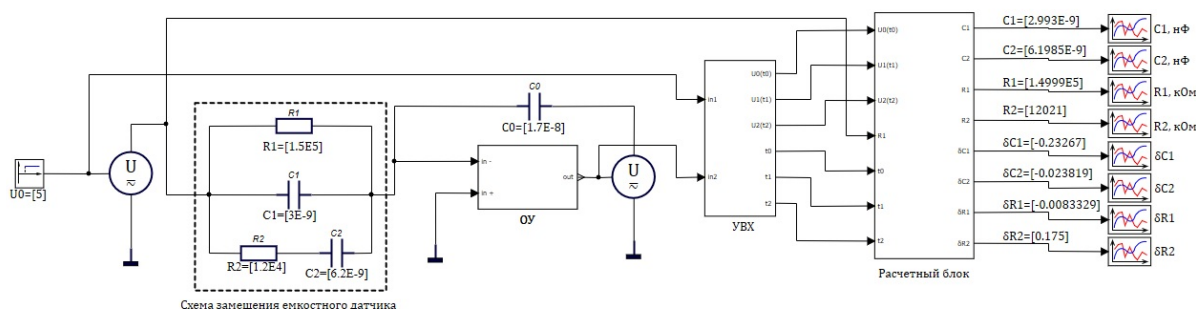


Рис. 5. ИС II ступени измерений

В приведенной модели ИС применяются пользовательские блоки: «ОУ» – операционный усилитель, схема которого была подробно описана в статье [6]; «УВХ» – устройство выборки и хранения, необходимое для получения точных временных отсчетов, выборки сигналов и точных значений напряжений $U(t_0)$, $U(t_1)$, $U(t_2)$; «Расчетный блок», выполняющий расчеты информативных параметров по выражениям (1)–(7).

Результаты

Результаты расчетов информативных параметров построенной модели ИС выведены на линии связи и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета модели ИС в среде SimInTech

Расчетные параметры	R_1 , кОм	C_1 , нФ	R_2 , кОм	C_2 , нФ
Действительные значения	150	3	12	6,2
Расчетные значения	149,999	2,993	12,021	6,198
Относительная погрешность измерений δ , %	$\pm 0,008$	$\pm 0,232$	$\pm 0,175$	$\pm 0,023$

Положительные результаты имитационного моделирования предлагаемого метода определения информативных параметров ЕД свидетельствуют о целесообразности его применения в разрабатываемой ИИС контроля влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов, функциональная схема которой представлена на рис. 6.

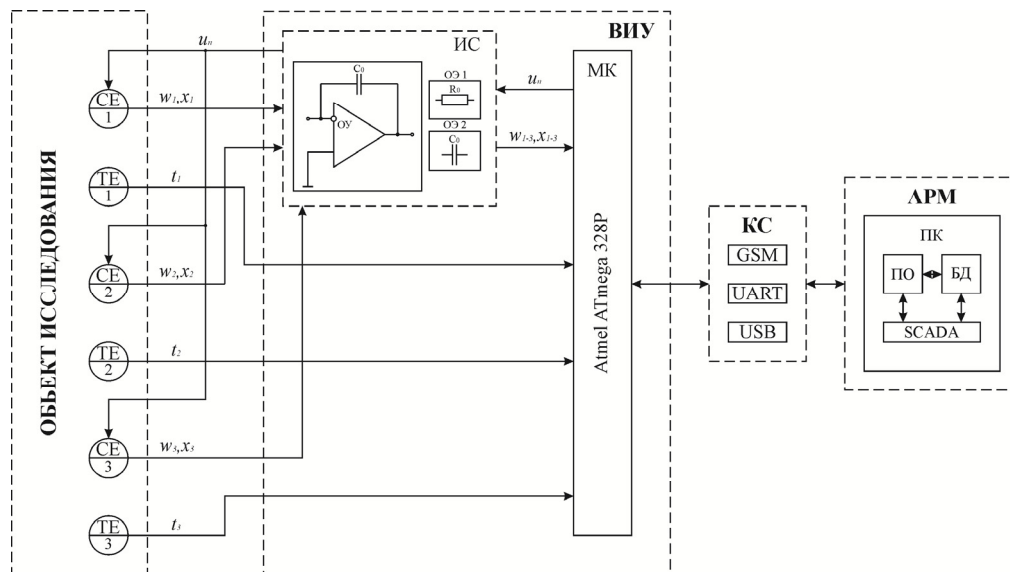


Рис. 6. Функциональная схема ИИС: CE1-3 – емкостной датчик; TE1-3 – датчик температуры; ИС – измерительная схема; ВИУ – вторичное измерительное устройство; КС – канал связи; АРМ – автоматизированное рабочее место; GSM – протокол беспроводной связи; UART – протокол связи (универсальный асинхронный приемопередатчик); USB – протокол связи (универсальная последовательная шина); ПК – персональный компьютер; ПО – программное обеспечение; БД – база данных; SCADA – программный пакет диспетчерского управления и сбора данных

Принцип работы ИИС, приведенной на функциональной схеме, заключается в следующем: в объект исследования (например, уборочную, очистительную, сушильную технику) встраиваются ЕД и датчики температуры (ДТ), которые посредством ИС предлагаемого метода и напрямую передают в ВИУ на основе МК Atmel ATmega 328P значения измеряемых величин влажности (w , %), примесей (x , % массы) и температуры (t , °C), передаваемых любым доступным КС в АРМ оператора, представляющее из себя персональный компьютер с предустановленным ПО (например, SCADA), выполняющим контроль и управление технологическим процессом сборки, транспортировки, обработки и хранения сельскохозяйственных продуктов.

Схема внедрения разработанной ИИС в сельхозпредприятие, занимающееся выращиванием пшеничных культур, приведена на рис. 7.

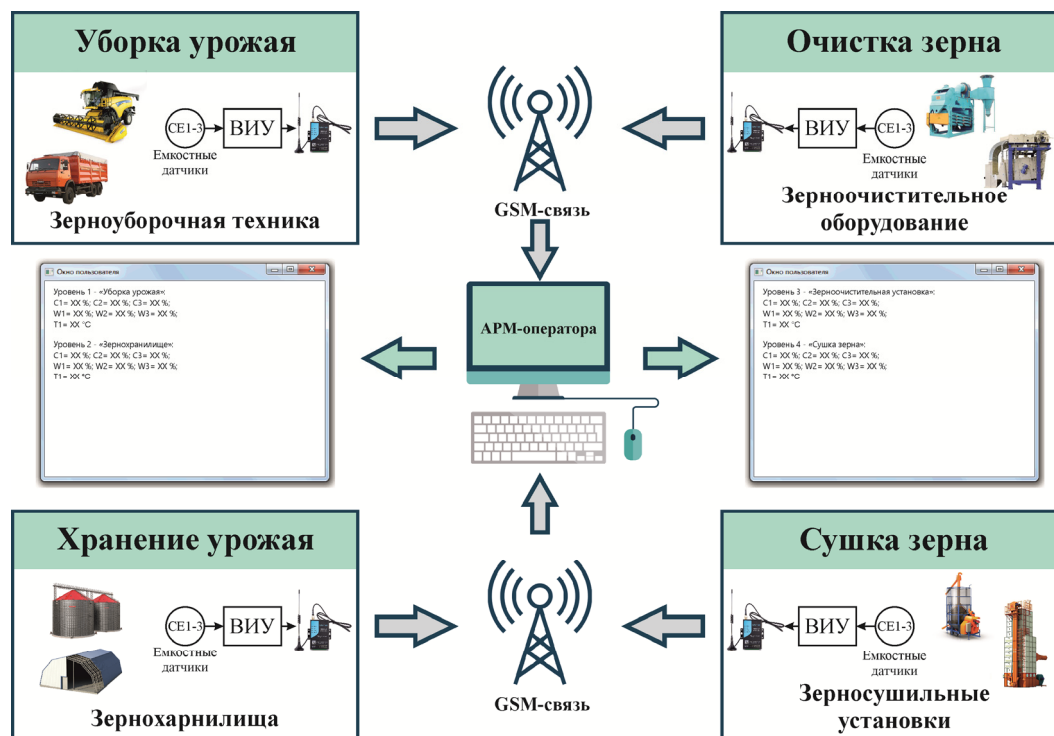


Рис. 7. Схема внедрения ИИС в технологический процесс сельскохозяйственного предприятия

Заключение

Анализ результатов имитационного моделирования в среде SimInTech показывает, что предлагаемый метод определения информативных параметров ЕД обладает невысокой относительной погрешностью измерений, достаточным быстродействием и универсальностью для применения в разработанной ИИС контроля влажности и примесей сельскохозяйственных продуктов. Применение предлагаемой ИИС позволит сельскохозяйственным предприятиям значительно упростить процесс определения схемы обработки и класса продукта на всех технологических этапах уборки, послеуборочной обработки и хранения урожая. Данная система может быть встроена в уборочную технику, что позволит еще на этапе уборки урожая получить первичные полевые сведения о состоянии продукта. Для этого датчики и ВИУ системы встраиваются в уборочную технику, например, комбайны или грузовые автомобили, информация от которых посредством GSM-связи передается в АРМ оператора и обрабатывается в диспетчерском пункте предприятия.

Предлагаемый метод определения информативных параметров многоэлементных цепей имеет практическую ценность для специалистов в области контрольно-измерительной техники при измерении физических величин (влажности, давления, температуры, плотности и т.д.), контроле характеристик радиокомпонентов в составе электрических схем, исследовании процессов в диэлектрических и полупроводниковых средах, изучении свойств тканей живых организмов и др.

Список литературы

1. Воротников И. Н., Мишуков С. В. Мобильный цифровой измерительный комплекс для определения влажности семян сельскохозяйственных культур // Цифровые технологии в сельском хозяйстве: текущее состояние и перспективы развития : сб. науч. тр. по материалам I Междунар. науч.-практ. конф. (Ставрополь, 25 сентября 2018 г.). Ставрополь : АГРУС, 2018. С. 307–314.
2. Муравлев В. К., Мырзабекова А. М. Методы контроля влажности зерновых продуктов на элеваторах // Инновации в науке. 2015. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-kontrolya-vlazhnosti-zernovykh-produktov-na-elevatorah> (дата обращения: 04.01.2022).

3. Vorotnikov I. N., Mastepanenko M. A., Gabrielyan S. Z., Mishukov S. V. Information-measurement system for determining moisture content of dry and liquid agricultural produce // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019 (Saint Petersburg, 23–24 May 2019). Saint Petersburg : Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012041. doi:10.1088/1757-899X/643/1/012041
4. Пат. 2714954 Российская Федерация, МПК7 G01R 27/02 (2006.01). Способ определения параметров многоэлементных двухполюсников / Воротников И. Н., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Мишуков С. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ ; № 2019118177 ; заявл. 11.06.2019 ; опубл. 21.02.2020, Бюл. № 6. 2 с.
5. Князьков А. В., Колдов А. С., Родионова Н. В., Светлов А. В. Совокупные измерения параметров многоэлементных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3. С. 69–78. doi:10.21685/2307-5538-2018-3-9
6. Воротников И. Н., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Мишуков С. В. Моделирование измерительных схем емкостных датчиков в среде SimInTech // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 48–53. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-6

References

1. Vorotnikov I.N., Mishukov S.V. Mobile digital measuring complex for determining the moisture content of agricultural seeds. *Tsifrovye tekhnologii v sel'skom khozyaystve: tekushchee sostoyanie i perspektivy razvitiya: sb. nauch. tr. po materialam I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Stavropol', 25 sentyabrya 2018 g.) = Digital technologies in agriculture: current state and prospects of development : collection of scientific tr. based on the materials of the I International Scientific and Practical Conference (Stavropol, September 25, 2018)*. Stavropol: AGRUS, 2018:307–314. (In Russ.)
2. Muravlev V.K., Myrzabekova A.M. Methods of moisture control of grain products at elevators. *Innovatsii v nauke = Innovations in science*. 2015;(3). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-kontrolya-vlazhnosti-zernovykh-produktov-na-elevatorah> (accessed 04.01.2022).
3. Vorotnikov I.N., Mastepanenko M.A., Gabrielyan S.Z., Mishukov S.V. Information-measurement system for determining moisture content of dry and liquid agricultural produce. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019 (Saint Petersburg, 23–24 May 2019)*. Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019:012041. doi:10.1088/1757-899X/643/1/012041
4. Pat. 2714954 Russian Federation, МПК7 G01R 27/02 (2006.01). Method for determining the parameters of multi-element bipolar. Vorotnikov I.N., Mastepanenko M.A., Gabrielyan Sh.Zh., Mishukov S.V.; the applicant and the patent holder of the Stavropol State Agrarian University; No. 2019118177; appl. 11.06.2019; publ. 21.02.2020, bull. № 6. (In Russ.)
5. Knyaz'kov A.V., Koldov A.S., Rodionova N.V., Svetlov A.V. Cumulative measurements of parameters of multi-element electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(3):69–78. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2018-3-9
6. Vorotnikov I.N., Mastepanenko M.A., Gabrielyan Sh.Zh., Mishukov S.V. Modeling of measuring circuits of capacitive sensors in the SimInTech environment. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(3):48–53. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-6

Информация об авторах / Information about the authors

Станислав Вадимович Мишуков

ассистент кафедры электротехники,
автоматики и метрологии,
Ставропольский государственный
аграрный университет
(Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12)
E-mail: stas.mishukov.92@mail.ru

Stanislav V. Mishukov

Assistant of the sub-department of electrical engineering,
automation and metrology,
Stavropol State Agrarian University
(12 Zootechnical lane, Stavropol, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 10.01.2022

Поступила после рецензирования/Revised 14.02.2022

Принята к публикации/Accepted 25.03.2022