

Метод измерения влажности пиломатериала, реализуемый на ПЛК

В. В. Нгуен¹, А. А. Шилин¹✉, П. М. Момот¹

¹ Томский политехнический университет,
пр. Ленина 30, г. Томск 634050, Российская Федерация

✉ e-mail: shiiln@tpu.ru

Резюме

Цель исследования. Решение научно-практической проблемы измерения влажности пиломатериала на базе программируемого логического контроллера (ПЛК), позволяющее реализовывать системы управления сушкой пиломатериалов на недорогих контроллерах широкого применения с преимуществами современных SCADA систем.

Методы. Для достижения поставленной цели исследованы современные методы оценки влажности пиломатериала по электрическому сопротивлению. Приведён обзор и анализ известных зависимостей электрического сопротивления пиломатериала от влажности. Отмечена необходимость измерения сопротивления в диапазоне 2,5 Ком до 25 Мом. Описано схематическое решение согласования с ПЛК моста измерения высокоомного сопротивления с дополнительным источником напряжения. Предложена методика расчёта схемы согласования. Получены выражения для вычисления влажности по данным аналого-цифрового преобразователя. Приведена процедура настройки канала измерения по показаниям двух эталонных измерений.

Результаты. Выполнена оценка погрешности измерения влажности и сопротивления. Показано, что погрешность измерения сопротивления до 20 % приводит к погрешности измерения влажности до 1 %, при условии корректной настройки параметров. Для настройки достаточно выполнить два эталонных измерения, чтобы выполнить процедуру настройки параметров измерения влажности.

Заключение. В процессе проектирования современных систем сушки пиломатериалов можно воспользоваться доступными и хорошо представленными в литературе алгоритмами и программами технологического процесса для реализации на ПЛК. В статье предложено необходимое для указанных алгоритмов и программ решение основной проблемы измерения влажности пиломатериала. Материал может быть полезен для исследования технологических этапов процесса сушки и разработки промышленных систем управления на базе недорогих контроллеров.

Ключевые слова: программируемые логические контроллеры; ПЛК; влажность древесины; линеаризация; электрическое сопротивление древесины; системы управления камерой осушения.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Нгуен В. В., Шилин А. А., Момот П. М. Метод измерения влажности пиломатериала, реализуемый на ПЛК // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 110-121. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-110-121>.

Поступила в редакцию 10.02.2021

Подписана в печать 04.03.2021

Опубликована 31.03.2021

© Нгуен В. В., Шилин А. А., Момот П. М., 2021

PLC-based lumber humidity measurement method

Van V. Nguyen¹, Aleksandr A. Shilin¹ ✉, Pavel M. Momot¹

¹ Tomsk Polytechnic University
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation

✉ e-mail: shiiln@tpu.ru

Abstract

Purpose or research. The paper considers the solution of the scientific and practical problem of measuring the humidity content of lumber on the basis of a programmable logic controller (PLC), which makes it possible to implement control systems for drying lumber on inexpensive controllers of wide application with the advantages of modern SCADA systems.

Methods. To achieve this goal, modern methods for assessing the humidity content of lumber by electrical resistance have been investigated. We have provided a review and analysis of the known dependences of the electrical resistance of lumber on moisture. It is noted the need to measure resistance in the range of 2.5 K Ω to 25 M Ω . The schematic solution for matching a high-resistance measurement bridge with an additional voltage source with a PLC is described here. We have proposed a method for calculating the matching scheme. Expressions are obtained for calculating humidity according to the data of an analog-to-digital converter. The procedure for setting up the measurement channel according to the readings of two reference measurements is presented.

Results. The estimation of the measurement error of humidity and resistance is carried out. It is shown that a resistance measurement error of up to 20% leads to a humidity measurement error of up to 1%, provided that the parameters are correctly configured. To set it up, it is enough to take two reference measurements to complete the procedure for setting the humidity measurement parameters.

Conclusion. In the process of designing modern systems for drying lumber, you can use the algorithms and programs of the technological process available and well presented in the literature for implementation on the PLC. The article offers a solution to the main problem of measuring the humidity content of lumber, which is necessary for these algorithms and programs. The material can be useful for researching technological stages of the drying process and developing industrial control systems based on inexpensive controllers.

Keywords: programmable logic controllers; PLC; wood humidity content ; linearization; electrical resistance of wood ; drying chamber control systems.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Nguyen V. V., Shilin A. A., Momot P. M. PLC-based lumber humidity measurement method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 110-121 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-110-121>.

Received 10.02.2021

Accepted 04.03.2021

Published 31.03.2021

Введение

Проблема измерения влажности пиломатериалов на программируемых логических контроллерах заключается в

том, что в качестве датчиков влажности материала промышленностью предлагается дорогое (от 20 т. руб) решение с

унифицированным выходом (4-20 мА или 0-10V). Стоимость таких датчиков чрезвычайно завышена, в связи с тем, что метод измерения является интеллектуальной собственностью. В научных работах [1] имеется достаточно много информации, пригодной для разработки устройства измерения сопротивления [2] и статических характеристик [3], из которой возможен синтез алгоритмов вычисления влажности [4]. Существуют и другие методы измерения влажности [5, 6]. Проблема реализации технологии сушки древесины является актуальной и подробно рассматривается в статьях [7, 8, 9, 10].

При разработке системы управления камерой сушки пиломатериалов [11, 12, 13] на базе ПЛК не возникает особых проблем кроме реализации датчика влажности материала. Решение научно-практической задачи согласования измерительного зонда с контроллером и синтеза алгоритма вычисления влажности позволило бы создать систему управления со многими преимуществами унифицированных ПЛК таких как: совместимость со SCADA системами [14, 15], архивирование данных, удалённое наблюдение и управление процессом и т. д. По этой причине создание методики измерения влажности пиломатериала на базе ПЛК является актуальной задачей, позволяющей расширить возможности системы управления осушением. В статье [16] рассматривается методика измерения сопротивления древесины, но не приводятся алгоритмы для практической реализации.

Целью работы является разработка схемы согласования измерительного зонда, пригодной для реализации на ПЛК, метод расчёта элементов схемы, а также синтез алгоритма вычисления влажности и процедуры настройки.

Материалы и методы

Поскольку унифицированный аналоговый вход ПЛК не предназначен для измерения высокоомных сопротивлений, предлагается схема согласования со стандартным входом измерения напряжения с максимально возможным входным сопротивлением. Схема согласования представлена на рис. 1

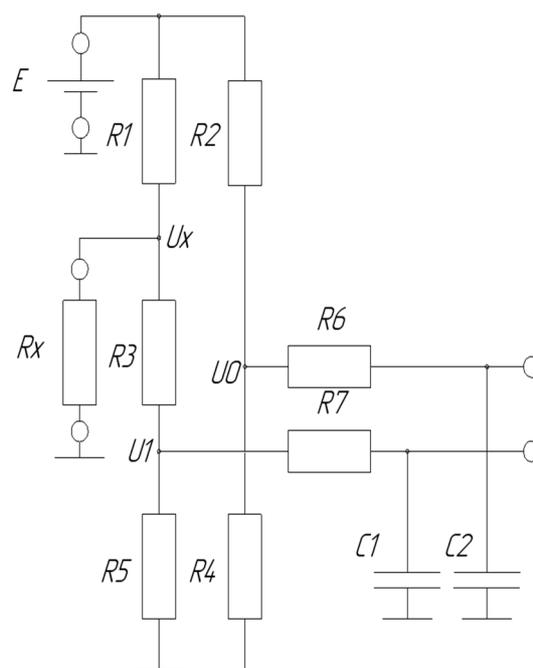


Рис.1. Схема согласования

Fig.1. Matching scheme

На схеме: E — дополнительный источник напряжения от 12 до 500 вольт; R_x — измеряемое сопротивление зонда. Для схемы можно записать систему уравнений

$$\begin{cases} u_0 = \frac{ER_4}{(R_2 + R_4)}, \\ u_1 = \frac{u_x R_5}{(R_3 + R_5)}, \\ u_x = \frac{R_x(R_3 + R_5)}{R_x(R_3 + R_5) + R_1(R_3 + R_5 + R_x)}. \end{cases} \quad (1)$$

Систему уравнений (1) следует решить относительно R_x .

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{k_1 R_1 u_1}{k_0 u_0 - u_1(k_1 + R_1 / R_5)}, \\ k_0 &= \frac{R_2 + R_4}{R_4}, k_1 = \frac{R_3 + R_5}{R_5}. \end{aligned} \quad (2)$$

Значение R_6 и R_7 имеют достаточно малое значение сопротивления, которым можно пренебречь. Сопротивления R_4 и R_5 представляют собой параллельные соединения подстраиваемого резистора и входного сопротивления АЦП ПЛК. По этой причине, чем больше входное сопротивление АЦП, тем большую чувствительность к изменению сопротивления R_x можно достичь. Максимальная точность измерения сопротивления R_x достигается при его значении

$$R_x = R_1(R_3 + R_5) / (R_1 + R_3 + R_5). \quad (3)$$

Значение R_5 не рекомендуется выбирать больше 100 кОм, так как входной ток канала АЦП станет соизмеримым с токами утечки в транзисторах, что повлияет на качество и линейность измерения.

Определившись с серединой диапазона согласно выражению (3) выбираются значения R_1 и R_3 . Далее можно

определиться с напряжением источника питания моста

$$\begin{aligned} R_x &= R_1(R_3 + R_5) / (R_1 + R_3 + R_5), \\ E &< \frac{R_1 + R_3 + R_5}{R_5} \cdot u_{ref}, \end{aligned}$$

где u_{ref} – опорное напряжение АЦП.

В конце вычисляется сопротивление

$$R_2 = \frac{ER_4}{u_{ref}} - R_4, R_4 = R_5.$$

Рассмотрим пример реализации, где $R_1 = R_3 = 510$ кОм, $R_2 = 1000$ кОм, $R_4 = R_5 = 100$ кОм, $E = 24$ В. На примере микроконтроллера STM32F103 оценим чувствительность и точность измерения сопротивления зонда. Чувствительность определяется разрядностью АЦП. Для рассматриваемого контроллера она составляет 12 бит. Согласно документации, точность ограничена 10 битами. В выражении (2) значения u_0 и u_1 могут быть представлены как напряжением, так и целыми числами в качестве результата измерения АЦП, поскольку применена мостовая схема измерения сопротивления. Оценка чувствительности и погрешности вычислялась из выражения

$$\begin{aligned} \sigma(\%) &= \frac{R_x(u_1 + 1) - R_x(u_1)}{R_x(u_1)} \cdot 100\%, \\ (u_1 \text{ и } u_0) &\in (0 \dots (2^N - 1)), \end{aligned}$$

где N – разрядность АЦП ($N = 12$ – для вычисления чувствительности, $N = 10$ – для вычисления погрешности).

В табл. 1 приведены вычисленные значения.

Таблица 1. Результаты вычисления

Table 1. Calculation results

R_x	Чувствительность, % / Sensitivity, %	Погрешность, % / Measurement error, %
2,5 КОм	4,4	17
25 КОм	0,5	2
250 КОм	0,2	0,8
2,5 МОм	0,4	1,6
25 МОм	3,6	14

Как видно из табл. 1, схема измерения высокоомного сопротивления в рамках двух декад не превышает 2 %, а четырех декад не превышает 20 %.

Для синтеза элементов вычисления влажности в качестве исходной информации используются результаты работы [17], которая до сих пор активно цитируется [18]. Для формирования алгоритма расчета влажности на ПЛК рассматривается зависимость электрического сопротивления пиломатериала [19] от влажности (рис. 2).

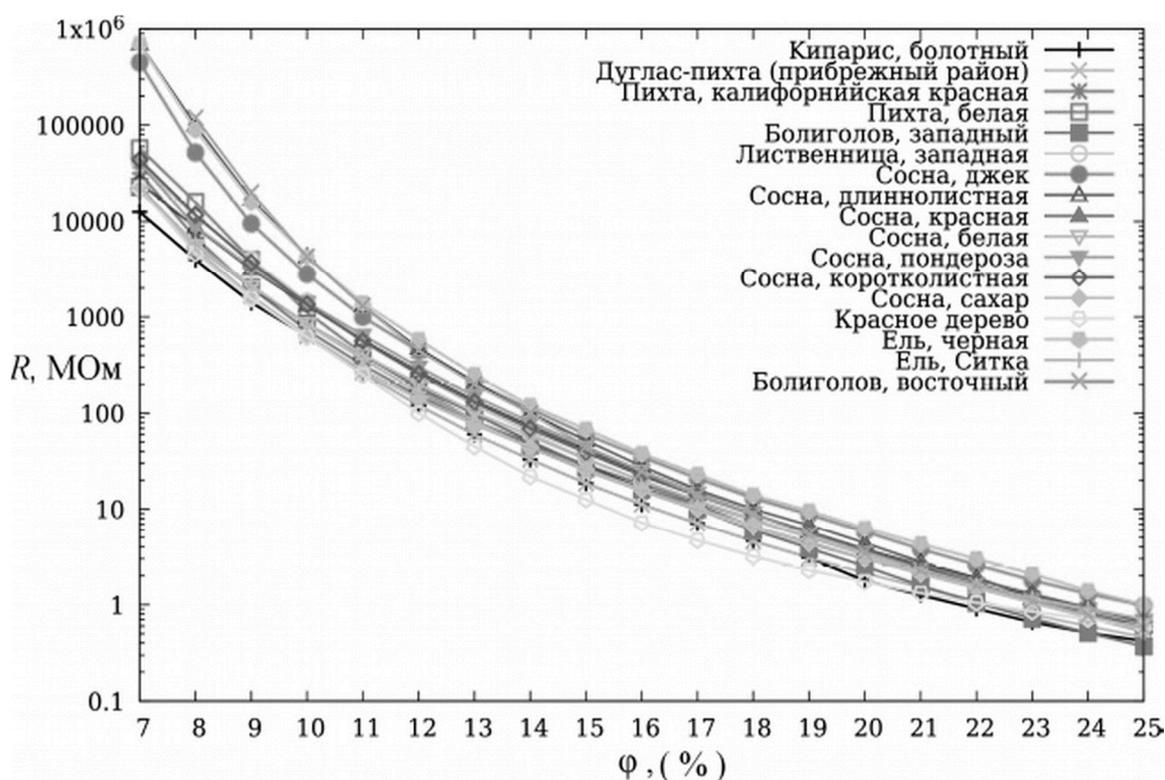


Рис. 2. Зависимость сопротивления от влажности пиломатериала

Fig. 2. Dependence of resistance on lumber humidity content

Результаты эксперимента получены при условии измерения электрического сопротивления между двумя саморезами длиной 0,8 см. Расстояние между саморезами – постоянное: 3,2 см. Эксперимент выполнялся при температуре 27°C.

Как видно из рис. 2, если ось сопротивления представлена логарифмической шкалой сопротивления в мегаомах, то эта зависимость с некоторыми допущениями линейна особенно в диапазоне от 15% до 25%. Для обеспечения работы автомати-

ческой системы достаточно обеспечить диапазон 20% до 40%.

Функция электрического сопротивления пиломатериала от влажности в этом диапазоне примет вид десятичного логарифма электрического сопротивления – L_R , который зависит от влажности древесины φ .

Если предположить, что функция $L_R(\varphi)$ – линейная, то зависимость сопротивления от влажности должна быть представлена функцией относительно влажности.

$$R(\varphi) = R(\varphi_0) \cdot k^{(\varphi_{25} - \varphi)},$$

где $R(\varphi_0)$ – сопротивление зонда, при влажности 25 %; k – нормирующий параметр, основание степенной функции.

Для вычисления влажности решается уравнение относительно φ , где R – входная величина; k – параметр функции, который следует найти для заданных условий применения зонда:

$$\log_{10}(R(\varphi)) = \log_{10}(R(\varphi_0)) + \frac{\varphi_0 - \varphi}{\log_k 10}.$$

Решение будет содержать функцию логарифма с произвольным основанием k , которое является параметром. Вычислить логарифма с таким основанием в ПЛК сложно. Поэтому результат преобразований удобней представить логарифмом с основанием равным двум. Тогда решение уравнения можно записать в виде

$$\varphi = \varphi_0 + a_k \cdot \log\left(\frac{R(\varphi_0)}{R(\varphi)}\right); a_k = \log_k 2. \quad (4)$$

Следующим важным вопросом для реализации измерения является настройка параметров в выражении (4). Для этого достаточно выполнить два измерения для пиломатериала с влажностью, близкой к нижнему и верхнему диапазону измерения. В качестве эталонного прибора для измерения можно выбрать более прецизионный прибор, или выполнить более трудоемкую процедуру измерения массы двух экземпляров пиломатериала одинакового объема и сравнить с массой абсолютно сухой доски этого же объема. В любом случае в качестве исходной информации будут два измерения влажности.

Если предварительно установить параметры в выражении (4) согласно начальным условиям:

$$R(\varphi_0) = 1 \text{ Мом}, \varphi_0 = 0,$$

$$k = 2 \text{ или } a_k = \log_2 2 = 1,$$

то для первого и второго материала получим предварительные значения влажности $\tilde{\varphi}_1, \tilde{\varphi}_2$ (показания прибора) при заданных параметрах. В этих же условиях выполняется измерение влажности эталонным прибором, получают значения φ_1, φ_2 .

Теперь можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_0 + a_k \tilde{\varphi}_1 \\ \varphi_2 = \varphi_0 + a_k \tilde{\varphi}_2. \end{cases}$$

И решить ее относительно параметров настройки канала – φ_0, a_k

$$\begin{cases} a_k = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\tilde{\varphi}_2 - \tilde{\varphi}_1}, \\ \varphi_0 = \frac{\varphi_1 \cdot \tilde{\varphi}_2 - \varphi_2 \cdot \tilde{\varphi}_1}{\tilde{\varphi}_2 - \tilde{\varphi}_1}. \end{cases} \quad (5)$$

На примере коротко-лиственной сосны выполнены: измерения влажности на эталонном приборе, сопротивлений – на ПЛК. Из которых вычислены согласно (5) параметры схемы измерения φ_0, a_k . Соответствие влажности и сопротивления зонда приводится ниже

$$\varphi_1 = 17 \%, R(\varphi_1) = 13,8 \text{ МОм}$$

$$\varphi_2 = 25 \%, R(\varphi_2) = 0,66 \text{ МОм.}$$

Результаты вычисления влажности, которой соответствует $R(\varphi_T)$, сводятся в табл. 2.

Для оценки погрешности измерения воспользуемся данными из рис. 2. Сформируем таблицу, где φ_T и R получены из рис. 2. φ_C – по формуле (4) с настроенными согласно выражениям (5). Ошибка в процентах представлена в последней строке.

Таблица 2. Результаты вычисления влажности и погрешности

Table 2. Results of calculating humidity and error

$\varphi_T, \%$	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$R, \text{МОм}$	13,8	8,7	5,76	3,8	2,63	1,82	1,29	0,93	0,66
$\varphi_C, \%$	17,01	18,22	19,3	20,39	21,36	22,33	23,23	24,09	24,99
$\Delta, \%$	0,01	0,22	0,3	0,39	0,36	0,33	0,23	0,09	0,01

Как видно из табл. 2 ошибка вычисления влажности не превышает 0,4 %. На практике нужно обеспечить более широкий диапазон от 17 % до 40 %. В этом случае погрешность измерения возрастёт, но не превысит 1,0 %.

В процессе эксплуатации и установки зонда обслуживающий персонал может допустить погрешность в расстоянии между саморезами и глубиной вкручивания. Эксперименты показали [20], что расстояние между саморезами имеет простую пропорциональную зависимость сопротивления от расстояния. Так же было отмечено, что ошибка в измерении сопротивления не превышает 20 %, согласно табл.1. Оценим погрешность, вызванную изменением рас-

стояния между саморезами или погрешностью измерения зонда на 20 % с помощью выражения:

$$e(\%) = a_k \cdot \lg_2(1,2).$$

Из результатов измерений при условиях, представленных после рис. 2 – $a_k = 1,8$. Таким образом можно рассчитать погрешность измерения влажности, которая равна 0,48 %. Следовательно, ошибка в расстоянии или в измерении сопротивления до 20 %, приводит к ошибке измерения влажности пиломатериала, не превышающей 0,5 %. Такие же результаты можно получить, проанализировав погрешность при допущении ошибки в глубине вворачивания самореза зонда.

Результаты и их обсуждение

Решена основная проблема измерения высокоомного электрического сопротивления пиломатериала на базе ПЛК добавлением согласующей схемы с дополнительным источником питания. Не смотря на то, что эта схема достаточно простая, расчёт её элементов требует выполнения анализа схемы и получения основных выражений для формирования методики определения значений элементов схемы. В работе приведены результаты анализа схемы и основные формулы для расчета.

Для вычисления влажности собраны и использованы результаты многочисленных экспериментов, опубликованных в научных изданиях. По данным экспериментов отмечена возможность

использования с некоторыми допущениями линейной зависимости логарифма сопротивления пиломатериала от влажности. Из этого тезиса получено выражение для вычисления влажности, пригодное для настройки канала измерения по двум эталонным замерам влажности. Погрешность измерения влажности не превышает 0,5 %.

Выводы

Результаты работы могут быть полезны для разработчиков систем управления камерами сушки пиломатериалов, поскольку приведена достаточно подробная для использования инструкция реализации измерения влажности на базе любого ПЛК, в котором есть возможность измерения напряжения высоким входным сопротивлением.

Список литературы

1. Хандожко В. А., Матлахов В. П., Копыткин С. М. Система управления влажностью в сушильной камере на базе приборов фирмы "ОВЕН" // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. научн. трудов. Курск, 2014. С. 270-275. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22546753>
2. Чепурин Г. В., Бронза Ю. В. Сухое хранение, как защита от коррозии // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2013. №. 12. С. 80-84. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23340406>
3. Dumitran L. M., Oancea D. C., Dumitran G. E. Experimental study of air dehumidification in an electrostatic wire-cylinder condenser // 2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). IEEE, 2017. P. 440-443. DOI: 10.1109/ATEE.2017.7905182
4. A novel dehumidification technique using electric field / M. Arif-uz-Zaman, M. Khan, A. Sadrul M. F. Khan // IEEE Transactions on Industry Applications. 1996. Vol. 32. No. 1. P. 36-40. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Novel-Dehumidification-Technique-Using-Electric-Field-Arifuzzaman-Khan/b2c94eeb1e0f73d5ec22a4deec8bcc54802a02ef#paper-header>

5. Measurement of lumber moisture content based on PCA and GS-SVM / J. Zhang, W. Song, B. Jiang, M. Li. // *Journal of Forestry Research*. 2017. Vol. 29. No. 2. P. 557–564. DOI:10.1007/s11676-017-0448-x
6. Oh G.-H., Kim H.-S., Park D.-W. In-situ monitoring of moisture diffusion process for wood with terahertz time-domain spectroscopy // *Optics and Lasers in Engineering*. 2020. Vol. 128. No. 106036. DOI:10.1016/j.optlaseng.2020.106036
7. Characterisation of wood–water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade / L. A. Redman, H. Bailleres, I. Turner, P. Perré // *Wood Science and Technology*. 2016. Vol. 50. No. 4. P. 739–757. DOI:10.1007/s00226-016-0818-0
8. Effects of Drying Temperature and Drying Rate on Occurring Behaviors of Microcracks during Wood Drying / K. Kojiro, M. Ohno, K. Tanaka, Y. Miyoshi, Y. Furuta // *Journal of the Society of Materials Science, Japan*. 2020. Vol. 69. No. 4, P. 323–328. DOI:10.2472/jsms.69.323
9. Zhan J., Gu J., Cai Y. Analysis of moisture diffusivity of larch timber during convective drying condition by using Crank’s method and Dincer’s method // *Journal of Forestry Research*. 2017. Vol. 18. No. 3. P. 199–202. DOI:10.1007/s11676-007-0040-x
10. Рудак О. Г., Короб А. Ю. Исследование характера изменения влажности поверхностных и внутренних слоев древесины сосны при прогреве в ненасыщенной среде // *Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов*. 2021. № 1 (240). С. 162–168. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-haraktera-izmeneniya-vlazhnosti-poverhnostnyh-i-vnutrennih-sloev-drevesiny-sosny-pri-progreve-v-nenasyschennoy-srede>
11. Simulation model of an automated system of wood drying process in the VisSim dynamic programming environment/ V. Gryzhov, V. Korolkov, V. Reut, L. Stepanenkova // *Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 403. No 012190. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012190
12. Zheng Z., Keqi W. Rbf based sliding mode control method for lumber drying system// *Wood and fiber science*. 2019. Vol. 51. No. 3. DOI: 10.22382/wfs-2019-028
13. Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation / S. Zohrabi, M. Aghbashlo, S.S. Seiedlou, H. Scaar, J. Mellmann // *Journal of Cleaner Production*. 2020. No. 120394. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120394.
14. Дмитриев В. М., Ганджа Т. В. Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей SCADA-систем для управления сложными технологическими объектами // *Информатика и системы управления*. 2013. №. 2. С. 24-35. URL: http://ics.khstu.ru/media/2013/N36_03.pdf

15. Компьютерное моделирование визуальных интерфейсов виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, С.А. Панов // Научная визуализация. 2016. Т. 8. №. 3. С. 111-131. URL: <http://sv-journal.org/2016-3/09/?lang=ru>
16. Cracking the code: real-time monitoring of wood drying and the occurrence of cracks / Н. Р. Botter-Kuisch, J. Van den Bulcke, J. M. Baetens, J. Van Acker// Wood Science and Technology. 2020. DOI:10.1007/s00226-020-01200-6
17. James W. L. Electric moisture meters for wood. – US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1963. Vol. 8. URL: <https://www.fpl.fs.fed.us/documents/fplrn/fplrn008.pdf>
18. Fredriksson M., Thybring E. E., Zelinka S. L. Artifacts in electrical measurements on wood caused by non-uniform moisture distributions // Holzforschung. 2020. Vol. 1. No. ahead-of-print. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0138>
19. Lynch C. T. CRC Handbook of Materials Science: Material Composites and Refractory Materials. CRC press, 2020. Vol. 2. URL: https://books.google.ru/books?id=XDwY0WbE_EEC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false
20. Wood moisture meter [Электронный ресурс]. URL: https://woodgears.ca/lumber/moisture_meter.html, (свободный, дата обращения 25.01.2021)

References

1. Handozhko V. A., Matlahov V. P., Kopytkin S. M. [Humidity control system in the drying chamber based on the devices of the company "OVEN"]. *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii* [Modern tool systems, information technologies and innovations]. Kursk, 2014, pp. 270-275 (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22546753>.
2. СНепурин G. V., Bronza YU. V. Suhoe hranenie, kak zashchita ot korrozii [Dry storage as the protection against corrosion]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie = Plumbing, Heating, Air conditioning*, 2013, pp. 80-84 (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23340406>.
3. Dumitran L. M., Oancea D. C., Dumitran G. E. Experimental study of air dehumidification in an electrostatic wire-cylinder condenser. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. IEEE, 2017, pp. 440-443. DOI: 10.1109/ATEE.2017.7905182
4. Arif-uz-Zaman M., Khan A M., Sadrul M. F. Khan A novel dehumidification technique using electric field. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, no. 1, pp. 36-40. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Novel-Dehumidification-Tec-Using-Electric-Field-Arifuzzaman-Khan/b2c94eeb1e0f73d5ec22a4deec8bcc54802a02ef#paper-header>

5. Zhang J., Song W., Jiang B., Li M. Measurement of lumber moisture content based on PCA and GS-SVM. *Journal of Forestry Research*, 2017, vol. 29, no. 2, pp. 557–564. DOI:10.1007/s11676-017-0448-x
6. Oh G.-H., Kim H.-S., Park D.-W. In-situ monitoring of moisture diffusion process for wood with terahertz time-domain spectroscopy. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 128, no. 106036. DOI:10.1016/j.optlaseng.2020.106036
7. Redman L. A., Bailleres H., Turner I., Perré P... Characterisation of wood–water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade. *Wood Science and Technology*, 2016, no. 4, vol. 50, pp. 739–757. DOI:10.1007/s00226-016-0818-0
8. Kojiro K., Ohno M., Tanaka K., Miyoshi Y., Furuta Y. Effects of Drying Temperature and Drying Rate on Occurring Behaviors of Microcracks during Wood Drying. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 2020, vol. 69, no. 4, pp. 323–328. DOI: 10.2472/jsms.69.323
9. Zhan J., Gu J., Cai Y. Analysis of moisture diffusivity of larch timber during convective drying condition by using Crank's method and Dincer's method. *Journal of Forestry Research*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 199–202. DOI:10.1007/s11676-007-0040-x
10. Rudak O. G., Korob A. Yu. [Study of the character of moisture change in surface and inner layers of pine wood during heating in a unsaturated environment]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khozvo, prirodopol'zovanie i pererab. vozobnovlyaemykh resursov = Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2021, no. 1 (240), pp. 162–168 (In Russ). <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-haraktera-izmeneniya-vlazhnosti-poverhnostnyh-i-vnutrennih-sloev-drevesiny-sosny-pri-progreve-v-nenasyschennoy-srede>
11. Gryzhov V., Korolkov V., Reut V., Stepanenkova L. Simulation model of an automated system of wood drying process in the VisSim dynamic programming environment. *Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 403, no 012190. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012190
12. Zheng Z., Keqi W. RBF based sliding mode control method for lumber drying system. *Wood and Fiber Science*, 2019, vol. 51, no. 3. DOI: 10.22382/wfs-2019-028
13. Zohrabi S., Aghbashlo M., Seiiedlou S.S., Scaar H., Mellmann J. Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, no. 120394. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120394.
14. Dmitriev V. M., Gandzha T. V. Princip formirovaniya mnogourovnevnyh komp'yuternykh modelej SCADA-sistem dlya upravleniya slozhnymi tekhnologicheskimi obektami [The principle of forming multi-level computer models of SCADA systems for managing complex technological objects]. *Informatika i sistemy upravleniya = Computer Science and Control Systems*, 2013, no. 2, pp. 24-35. (In Russ.). Available at: http://ics.khstu.ru/media/2013/N36_03.pdf

15. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Gandzha V.V., Panov S.A. Komp'yuternoe modelirovanie vizual'nyh interfejsov virtual'nyh instrumentov i priborov [Computer modeling of visual interfaces of virtual instruments and devices]. *Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 111-131 (In Russ.). Available at: <http://sv-journal.org/2016-3/09/?lang=ru>
16. Botter-Kuisch H. P., Van den Bulcke J., Baetens J. M., Van Acker J. Cracking the code: real-time monitoring of wood drying and the occurrence of cracks. *Wood Science and Technology*, 2020. DOI:10.1007/s00226-020-01200-6
17. James W. L. Electric moisture meters for wood. US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1963, vol. 8. Available at: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrn/fplrn008.pdf>
18. Fredriksson M., Thybring E. E., Zelinka S. L. Artifacts in electrical measurements on wood caused by non-uniform moisture distributions. *Holzforschung*, 2020, vol. 1, no. ahead-of-print. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0138>
19. Lynch C. T. CRC Handbook of Materials Science: Material Composites and Refractory Materials. CRC press, 2020, vol. 2. Available at: https://books.google.ru/books?id=XDwY0WbE_EEC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false
20. Wood moisture meter. ARIS BPM Community. Available at: https://woodgears.ca/lumber/moisture_meter.html, (accessed: January 25, 2021).

Информация об авторах / Information about the Authors

Нгуен Ван Вьонг, аспирант,
Томский политехнический университет,
г. Томск, Российская Федерация,
e-mail: vuongoicolen@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-2747>

Vinh V. Nguyen, Post-Graduate Student, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation,
e-mail: vuongoicolen@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-2747>

Шилин Александр Анатольевич, доктор технических наук, Томский политехнический университет,
г. Томск, Российская Федерация,
e-mail: shiiln@tpu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Aleksandr A. Shilin, Dr. of Sci. (Engineering), Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation,
e-mail: shiiln@tpu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Момот Павел Михайлович, студент, Томский политехнический университет,
г. Томск, Российская Федерация,
e-mail: vjvjngfif@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2781-718X>

Pavel M. Momot, Student, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation,
e-mail: vjvjngfif@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2781-718X>