

УДК 674.047.3, 510.644.4
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5201
Шифр специальности ВАК: 2.3.2, 2.3.3
Научная статья

Исследование переходных процессов осциллирующего метода управления сушкой древесины для синтеза алгоритмов подстройки параметров резистивных датчиков влажности

В.В. Гречушников[✉], С.В. Прохоров, А.А. Шилин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]grechvv@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Применение резистивных датчиков влажности пиломатериала позволяет повысить уровень автоматизации. Однако достоверность показаний таких датчиков следует проверять, поскольку отказоустойчивость резистивных датчиков достаточно низкая. В работе рассматривается актуальная задача контроля работы, выявления отказов и настройки параметров датчиков влажности пиломатериала по переходным процессам осциллирующего метода сушки на основании показаний более надёжных и отказоустойчивых датчиков температуры. Данный метод сопровождается разнообразными переходными процессами, в которых может содержаться полезная информация, дающая возможность оценивать качество сушки и основные показатели технологического процесса. **Цель:** разработка алгоритма оценки влажности пиломатериала на основе анализа переходных процессов датчиков температуры для оценки корректности работы резистивных датчиков, настройки параметров тарирования. **Методы:** анализ переходных процессов из архивной базы о технологических процессах, полученных в течение полутора лет работы системы диспетчеризации основных параметров для 28 полных циклов сушки пиломатериала. Анализ основан на выявлении корреляции времени остывания и нагрева воздуха при открытии и закрытии заслонок. В условиях закрытых заслонок исследуется возможность определения влажности пиломатериала на основе аппроксимации зависимости от равновесной влажности. **Результаты.** Разработаны алгоритмы автоматизированной подстройки параметров тарирования резистивных датчиков на основе аппроксимации вычисления влажности пиломатериала по равновесной влажности воздуха, автоматического управления режимом сушки пиломатериалов в зависимости от показаний резистивных датчиков влажности. **Выводы.** Анализ зависимости времени переходного процесса остывания и нагрева влажного датчика имеет слабую корреляцию с влажностью пиломатериала и не может обеспечить адекватную оценку влажности. В условиях, когда заслонки закрыты в течение 30–40 минут можно наблюдать равновесную влажность пиломатериала с погрешностью до 2 %, что позволяет подстраивать резистивные датчики для непрерывного наблюдения за влажностью пиломатериала. Исследование может представить интерес для инженерно-технических работников лесной промышленности, занимающихся созданием современных систем автоматизации и улучшением существующих методов управления процессами сушки древесины. Работа может служить основой для разработки новых методов и алгоритмов управления технологическим процессом сушки на основе анализа переходных процессов и получения дополнительных параметров.

Ключевые слова: осциллирующий метод сушки, резистивный датчик влажности, переходные процессы, управление режимом сушки, автоматизация, эквивалентное содержание влаги в древесине

Для цитирования: Гречушников В.В., Шилин А.А., Прохоров С.В. Исследование переходных процессов осциллирующего метода управления сушкой древесины для синтеза алгоритмов подстройки параметров резистивных датчиков влажности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 174–188. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5201

UDC 674.047.3, 510.644.4
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5201
Scientific paper

Transient processes of oscillating method of wood drying control for synthesis of algorithms for adjustment of parameters of resistive humidity sensors

V.V. Grechushnikov[✉], S.V. Prokhorov, A.A. Shilin

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]grechvv@tpu.ru

Abstract. Relevance. The use of resistive lumber humidity sensors allows increasing the level of automation. However, the reliability of readings of such sensors should be checked, since the fault tolerance of resistive sensors is quite low. The paper deals with the urgent task of monitoring the operation, response to failures and setting up the parameters of lumber moisture sensors for the transient process of the oscillatory drying method about the occurrence of events of more reliable and fault-tolerant temperature sensors. This method generates a set of transient processes that may contain useful information, the analysis of which allows evaluating the quality of drying and the main indicators of the technological process. **Aim.** Development of an algorithm for assessing the moisture content of lumber based on the analysis of transient processes of temperature sensors to assess the correct operation of resistive sensors and adjust calibration parameters. **Methods.** Analysis of transient processes from the archive database of technological processes obtained during one and a half years of operation of the dispatching system of the main parameters for 28 complete cycles of drying of sawn timber. The analysis is based on identifying the correlation of the time of air cooling and heating when opening and closing the dampers. Under conditions of closed dampers, the possibility of determining the moisture content of sawn timber is studied based on the approximation of the dependence on the equilibrium moisture content. **Results.** The authors have developed the algorithms for automated adjustment of calibration parameters of resistive sensors relying on approximation of calculation of lumber moisture content derived from equilibrium air humidity, automatic control of lumber drying mode depending on readings of resistive humidity sensors. **Conclusions.** The analysis of the dependence of the transient cooling and heating time of the wet sensor has a weak correlation with the moisture content of the lumber and cannot provide an adequate assessment of the moisture content. Under conditions when the dampers are closed for 30–40 minutes, it is possible to observe the equilibrium moisture content of the lumber with an error of up to 2%, which allows adjusting the resistive sensors for continuous monitoring of the moisture content of the lumber. The study may be of interest to engineers and technical workers in the forestry industry involved in the creation of modern automation systems and the improvement of existing methods for controlling wood drying processes. The work can serve as a basis for developing new methods and algorithms for controlling the technological process using transient analysis to extract additional parameters.

Keywords: oscillation drying, resistive humidity sensor, transient processes, drying mode control, automation, wood equivalent moisture content

For citation: Grechushnikov V.V., Shilin A.A., Prokhorov S.V. Transient processes of oscillating method of wood drying control for synthesis of algorithms for adjustment of parameters of resistive humidity sensors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 174–188. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5201

Введение

Древесина используется человеком практически во всех сферах деятельности. Общеизвестным является тот факт, что сухая древесина имеет более стабильные свойства (геометрия, размеры, прочность, цвет и др.), чем влажная. Для снижения влажности древесины с естественной (около 60 %) до заданной (8–20 %) существует множество различных технологий сушки пиломатериалов (ПМ) [1]:

- естественная – самый старинный из методов сушки. ПМ укладываются на открытом воздухе,

защищенные от дождя и прямых солнечных лучей. Сушка происходит за счет естественной циркуляции воздуха и солнечного света. Этот метод экономичен, но требует много времени и зависит от погодных условий;

- конвекционная – использует специальные сушильные камеры с контролируемыми условиями (температура, влажность, скорость воздуха). ПМ помещаются в камеру, где горячий воздух циркулирует, ускоряя процесс сушки. Это более быстрый и контролируемый метод по сравнению с естественной сушкой;

- инфракрасная – в этом методе используются инфракрасные лампы, которые нагревают поверхность ПМ, вызывая испарение влаги. Этот способ позволяет сократить время сушки и сохранить качество древесины;
- вакуумная – ПМ помещаются в вакуумную камеру, где давление снижается, что позволяет воде испаряться при низких температурах. Это помогает избежать повреждений древесины и сохранить ее свойства;
- СВЧ (микроволновая) – использует микроволновое излучение для нагрева древесины и испарения влаги. Этот метод позволяет быстро сушить ПМ, но требует специализированного оборудования;
- конденсационная – тепловые насосы перекачивают тепло из окружающей среды для нагрева воздуха в сушильной камере. Это энергоэффективный метод, который позволяет контролировать уровень влажности и температуры.

Каждая из технологий имеет свои преимущества и недостатки, и выбор зависит от конкретных условий и требований к конечному продукту. Перечисленные традиционные методы сушки, как правило, основываются на поддержании стационарных параметров сушильного агента – температуры, влажности и скорости движения воздуха. Наибольшее распространение в промышленности получил метод конвекционной сушки, для которого формируется карта поддержания основных технологических параметров на всех этапах техпроцесса. Для снятия напряженности на всех этапах сушки применяется так называемое пропаривание в течение 2–4 часов для снятия напряженности внутренних слоев древесины [1–3]. Однако такой подход не всегда оптимален, поскольку не учитывает изменяющееся состояние древесины в процессе сушки.

В качестве альтернативы пропариванию в работах [1, 4–6] рассматриваются осциллирующие методы сушки (ОМС), предполагающие динамическое и периодическое изменение технологических параметров, что позволяет адаптировать процесс к текущим потребностям материала. Этот метод сочетает в себе элементы естественной, традиционной конвективной сушки и современных технологий управления воздухом. При использовании ОМС циклически изменяются величины температуры и влажности сушильного агента в заданном диапазоне, а также направление потока воздуха. Частота и амплитуда этих колебаний подбираются таким образом, чтобы оптимизировать скорость сушки, минимизировать дефекты и улучшить качество конечного продукта.

Преимущества ОМС проявляются в нескольких аспектах. Во-первых, периодическое изменение параметров способствует более равномерному рас-

пределению влаги в древесине, снижая градиент влажности между поверхностью и сердцевиной. Переменный поток воздуха позволяет улучшить распределение тепла и влаги по всей сушильной камере, а также помогает избежать образования «мертвых зон», где воздух может застаиваться и не проходить через ПМ. Это обеспечивает более равномерную сушку, уменьшает риск растрескивания и коробления.

Во-вторых, осциллирующий режим может ускорить процесс сушки, особенно на начальных этапах, когда удаление свободной влаги происходит наиболее интенсивно [4].

В-третьих, такой метод позволяет снизить энергопотребление, поскольку не требует поддержания постоянных высоких температур [5].

В качестве недостатка этого метода указывается сложность алгоритма и методики использования показаний техпроцесса в реальном времени, поскольку процессы температуры и влажности в камере периодически меняются. Однако наличие большого числа информативных переходных процессов (ПП) можно определять как достоинство ОМС, так как активно меняющиеся переходные процессы могут содержать дополнительную информацию о процессе. Современные SCADA системы управления техпроцессом позволяют наблюдать и сохранять ПП всех этапов для дальнейшего анализа как в реальном времени, так и по окончании процесса.

В данной статье рассматриваются ПП (рис. 1), представляющие собой зависимости изменения температур влажного (T_w) и сухих (T_{in} , T_d) датчиков температуры, сигналов направления вращения вентиляторов ($Vent$), положения заслонки ($Zasl$) от времени начала сушки ПМ. С помощью данных термометров можно с высокой точностью определять величину влажности в сушильной камере (H), а по ней, в свою очередь, можно судить о величине влажности ПМ (Wood Equivalent Moisture Content) (EMC) [7].

Основным недостатком использования рассматриваемых датчиков является возможность высыхания влажного датчика температуры. Если влажный датчик высох, то его показания начинают приближаться к показаниям сухого датчика и как следствие, оцененная относительная влажность начинает увеличиваться. При полном пересыхании показания будут совпадать с показаниями сухого датчика, и измеренная влажность будет равняться 100 %. Пересыхание датчика с большой вероятностью приведет к избыточной сушке древесины, вследствие чего проявятся такие дефекты, как растрескивание и деформация, которые приведут к порче ПМ. Этот недостаток решается своевременным контролем количества воды и установкой ем-

костей большого объема вне сушильной камеры с возможностью их автоматического пополнения по критерию уровня жидкости.

Другим методом определения величины влажности является использование специальных UGL-датчиков (датчиков влажности). В [8, 9] отмечено, что UGL-датчики имеют несколько существенных недостатков. Одним из них является большая инерционность измерений и большая погрешность измерений при высокой влажности воздуха. Из-за этих особенностей автоматика сушильной камеры может неправильно настраивать режим сушки первой ступени, определяющей вероятность появления дефектов, и неверно принимать решение о переходе ко второму этапу, что в итоге может привести к порче ПМ.

Также широкое распространение в камерах сушки ПМ получили резистивные датчики влажности (РДВ). В [10, 11] указано, что из-за крайне агрессивной среды эксплуатации показания датчиков могут отклоняться от фактических значений влажности из-за деградации сенсорного элемента. Эта деградация может быть вызвана различными факторами: окислением электродов, изменением структуры полимерного материала, воздействием экстремальных температур и влаги.

В [12] для устранения помехи от факторов окружающей среды и обеспечения устойчивого высокоточного измерения влажности пиломатериалов в режиме реального времени при измерении последней методом измерения сопротивления авторами предложено использование нейронной сети.

Но даже если снизить величину помех от факторов внешней среды до нуля, показания РДВ могут быть искажены. В литературе [1–3] рассматриваются следующие факторы, влияющие на измеренное омическое сопротивление:

- загрязнение поверхности датчика пылью или древесной стружкой, в результате чего увеличивается сопротивление между электродами;
- подвод иглами датчика лишнего тепла к древесине в местах заглубления. Из-за подсушки древесины в этих местах контакт между датчиком и материалом нарушается;
- глубина и место фиксации датчика. Если датчик установлен в смолу или сучек измеренная величина влажности будет сильно отличаться от реальной.

Для поддержания точности РДВ необходима регулярная тарировка. Тарировка – это процесс корректировки показаний датчика путем сравнения их с известными эталонными значениями влажности. Существует несколько методов тарировки, включая использование камер климатического контроля, солевых растворов с известной относительной влажностью и специализированных эталонных вла-

гомеров. Процесс тарировки обычно включает в себя помещение датчика в среду с известной влажностью и сравнение его показаний с эталонным значением. Если показания датчика отклоняются от эталона, необходимо внести корректировку, обычно путем изменения параметров в программном обеспечении или аппаратной части измерительного прибора.

Вышеописанные методы тарировки можно использовать только до начала или после окончания процесса сушки, но, как было описано, измеренное омическое сопротивление изменяется в процессе сушки, следовательно, тарировка должна происходить в режиме реального времени.

В данной статье рассматривается *гипотеза* о том, что переходные процессы осциллирующего метода сушки содержат достаточную информацию, основываясь на которой можно провести тарирование омических датчиков влажности древесины, а также выявить их некорректную работу. Данная гипотеза основывается на том, что влажность связана и изменяется по тем же законам, что и относительная влажность сушильного агента [5, 7]. В свою очередь, равновесная влажность древесины соответствует текущему состоянию сушильного агента, т. е. напрямую зависит от температуры (T , °C) и относительной влажности воздуха (H) в камере, что подтверждается диаграммой равновесной влажности Н.Н. Чулинского, уравнением Хейлвуда–Хорробина [13] и информацией, изложенной в [3, 8, 14].

Для принятия решения о переходе с одного режима сушки на другой необходимо с достаточной точностью знать величину EMC [15]. Для этого обслуживающему персоналу приходится периодически измерять эту величину дополнительными переносными средствами измерения непосредственно в камере. Данная процедура не входит в контур автоматического управления и может быть игнорирована или выполнена халатно в силу неблагоприятных условий в камере. Сама процедура ручных замеров не влияет на качество высушенного материала, но позволяет вовремя принять вполне осмысленные решения согласно технологической карте процесса сушки.

В результате чего можно *сделать вывод* о том, что использование тарировки позволит максимально исключить человеческий фактор и в автоматическом режиме правильно выполнять переход с одного режима сушки к другому.

Задачами данного исследования являются:

- анализ процессов нагрева и остывания датчиков с целью обнаружения корреляции с равновесной влажностью;
- решение проблемы оценки влажности пиломатериалов по резистивным датчикам влажности

методом анализа переходных процессов при осциллирующем методе сушки;

- подтверждение гипотезы о возможности подстройки параметров тарирования;
- разработка алгоритмов определения условий отказа датчиков и автоматизированной подстройки параметров тарирования РДВ;
- формирование алгоритмов автоматического перехода между этапами сушки.

Методы и подходы

Как было отмечено выше, осциллирующие режимы сушки имеют ряд определенных достоинств. Одним из достоинств является тот факт, что в этом методе параметры режима изменяются периодически и по определенным законам, в результате чего можно наблюдать определенные ПП, которые можно оценивать и анализировать. В данной статье рассматривается сушка, в которой режим работы сушильной камеры поддерживается при помощи регулировки времени открытия и закрытия клапанов, через которые выбрасывается влажный воздух из камеры. Данный режим можно использовать либо в течение всего времени сушки, либо периодически (раз в 12 часов) для получения информации и принятия решений о переходе на следующую ступень сушки.

На рис. 1 представлен полный график ОМС пиломатериалов, полученный в процессе работы сушильной камеры в г. Томске. Продолжительность всей сушки составляет 13500 минут. Промежуток

времени с 320 по 1895 минут представлен предварительным этапом прогрева. Первому этапу сушки соответствует диапазон времен с 1896 по 1680, второму – 1681–8735, третьему – 8736–12154, этапу остывания – 12155–13500.

Конструктивной особенностью данной камеры является наличие одного влажного и двух сухих датчиков температуры. Как можно заметить из рис. 2, иллюстрирующего промежуток времени, относящийся к первому этапу сушки ПМ, температуры этих датчиков (T_d , синий график, и T_{in} , голубой график) неодинаковы. Это связано с пространственным расположением датчиков внутри сушильной камеры.

Датчик T_d расположен возле влажного датчика T_w , а T_{in} – на противоположном конце камеры, ближе к калориферам. В зависимости от направления вращения вентиляторов циркуляция воздуха в камере имеет прямое и обратное направления. В первом случае воздух проходит через штабель → датчик T_w → датчик T_d → датчик T_{in} → калорифер, в другом – наоборот. В результате при работе в прямом направлении измеренная величина будет примерно одинаковой, а при обратном возле теплообменника влажность будет ниже, в то время как после прохождения через штабель доска отдаст влагу, и разница показаний датчиков увеличится ($T_{in}-T_d > 0$). В сочетании с предложениями, изложенными в [16], данный эффект позволит снизить время реакции автоматики на нештатную работу вентиляции.

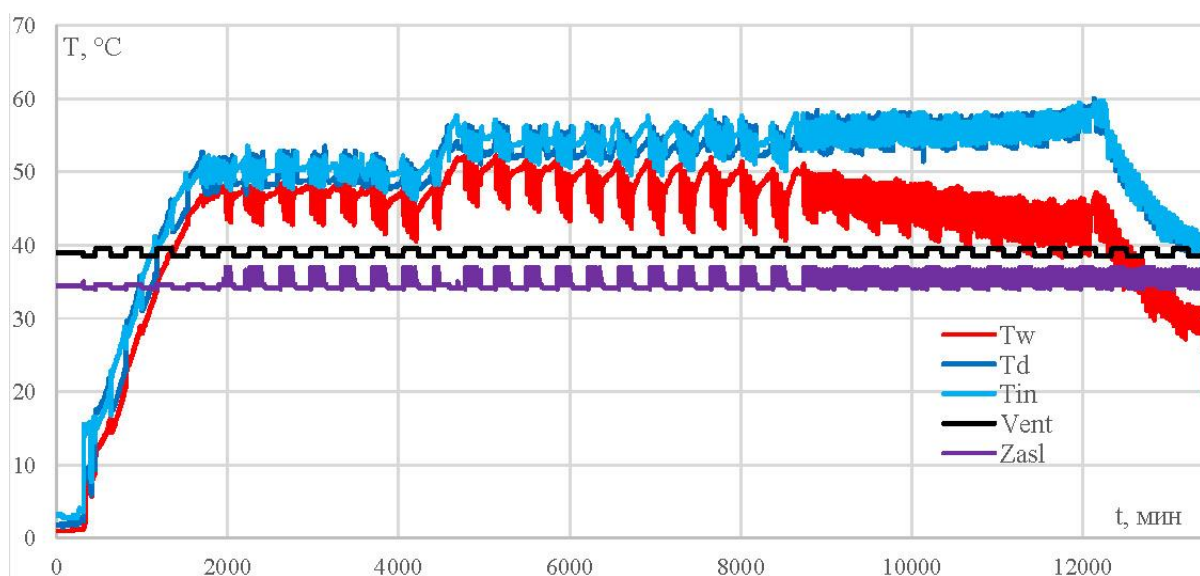


Рис. 1. График сушки пиломатериала осциллирующим методом: T_w – температура влажного датчика; T_d – температура сухого датчика, расположенного возле влажного; T_{in} – температура сухого датчика, расположенного на противоположном конце камеры ближе к калориферам; Vent – направления вращения вентиляторов; Zasl – положение заслонки сброса воздуха

Fig. 1. Schedule of drying sawn timber using oscillating method: T_w – wet temperature sensor; T_d – temperature of a dry sensor located near a wet one; T_{in} – temperature of a dry sensor located at the opposite end of the chamber closer to the heaters; Vent – fan rotation directions; Zasl – air bleed flap position

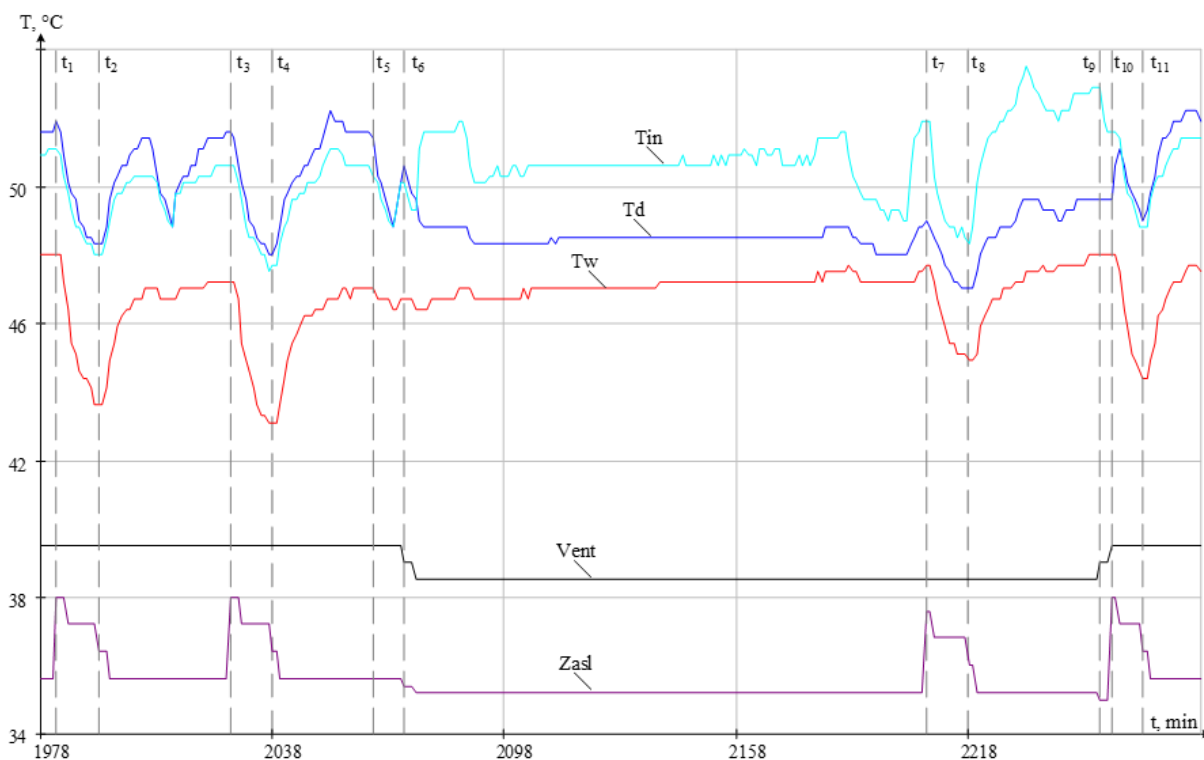


Рис. 2. Переходные процессы осциллирующего метода сушки
Fig. 2. Transient processes of oscillation drying

На рис. 2 интервалам времени t_1-t_2 , t_3-t_4 , t_7-t_8 , $t_{10}-t_{11}$ соответствует ПП остывания, при этом заслонка открывается, влага из сушильной камеры выбрасывается в окружающую среду, температуры датчиков снижаются. ПП нагрева представлен интервалами времени t_2-t_3 , t_4-t_5 , t_8-t_9 . В данном режиме заслонка закрыта, древесина нагревается и отдает влагу в камеру, температура датчиков увеличивается. На интервале времени t_6-t_7 происходит процесс перемешивания. Заслонка закрыта, изменяется направление циркуляции воздуха, происходит перемешивание объема воздуха, достигается равновесная влажность, температура датчиков увеличивается. В моменты времени t_6 и t_9 вентиляторы меняют направление своего вращения с прямого на обратный соответственно.

В процессе анализа ПП при осциллирующем методе сушки было замечено, что величина температуры при нагреве и остывании изменяется по экспоненциальным законам, которые можно описать формулами (1), (2) соответственно:

$$Y_{\text{нагрев}}(t) = k_{1\text{нагр}} \left(1 - e^{-\frac{t-k_{2\text{нагр}}}{\tau_{\text{нагр}}}} \right), \quad (1)$$

$$Y_{\text{остывание}}(t) = k_{1\text{ост}} + (T_{0\text{ост}} - k_{1\text{ост}}) e^{-\frac{t-k_{2\text{ост}}}{\tau_{\text{ост}}}}. \quad (2)$$

Решая вариационную задачу методом Левинберга–Марквардта для влажного датчика (T_w) на про-

межутке времени t_1-t_2 , используя формулу (2), получаем результаты, сведенные в табл. 1, для промежутка времени t_2-t_3 и формулы (1) – табл. 2. Как видно из табл. 1, 2, коэффициент детерминации имеет значения больше 98,5 %. Это означает, что функциональные зависимости определены верно.

На рис. 3 приведены зависимости для решения с $R^2=99,5\%$ (решение 1, табл. 1) и $R^2=98,4\%$ (решение 3, табл. 2). Как видно из графика, присутствуют некоторые отклонения между полученными зависимостями остывания и нагрева (светло- и темно-зеленый графики) и величиной температуры, измеренной влажным датчиком (красный график, T_w). Отклонения могут быть объяснены погрешностями измерений датчиков температуры и высокой инерционностью датчика T_w .

Анализируя изменение показаний сухих датчиков T_d и T_{in} , можно заметить, что ПП остывания также описываются экспоненциальной зависимостью (промежуток времени t_1-t_2 и др., рис. 1). Однако на промежутке времени t_2-t_3 (рис. 1) (переходный процесс нагрева влажного датчика), наблюдается два ПП остывания с последующими нагреваниями датчиков T_d и T_{in} . При этом с течением времени сушки амплитуда данных ПП снижается, пока на третьем этапе сушки не исчезает совсем. Данный эффект предлагается рассмотреть как одну из составляющих, расширяющих слой признаков нейронной сети, предложенной в [17].

Таблица 1. Результаты решения вариационной задачи ПП остывания

Table 1. Results of the solution of the variational problem of transient cooling processes

Параметр Parameter		Решение/Solution			
		1	2	3	4
Время начала аппроксимации, мин Approximation start time, min	t_{start}	1983	1983	1984	1984
Время конца аппроксимации, мин Approximation end time, min	t_{end}	1994	1993	1994	1993
Начальная температура, °C Initial temperature, °C	$T_{\text{ост}}$	48	48	47,2	47,2
Коэффициент остывания 1, °C Cooling coefficient 1, °C	$k_{1\text{ост}}$	43,184	43,148	43,31	43,311
Коэффициент остывания 2, мин Cooling coefficient 2, °C	$k_{2\text{ост}}$	1983,07	1983,07	1983,98	1983,98
Постоянная времени остывания, мин Cooling time constant, min	$\tau_{\text{ост}}$	4,314	4,38	3,863	3,86
Коэффициент детерминации Coefficient of determination	R^2	0,995	0,994	0,992	0,991

При этом стоит учитывать, что в табл. 1, 2 величина R^2 определяется для промежутка аппроксимации, при рассмотрении определенных отрезков времени результат будет отличаться. Рассчитаем коэффициент детерминации для трех промежутков решений из табл. 2 и сведем их в табл. 3.

Таблица 2. Результаты решения вариационной задачи ПП нагрева

Table 2. Results of the solution of the variational problem of transient heating processes

Параметр/Parameter		Решение/Solution		
		1	2	3
Время начала аппроксимации, мин Approximation start time, min	t_{start}	1994	1994	1994
Время конца аппроксимации, мин Approximation end time, min	t_{end}	2008	2020	2028
Начальная температура, °C Initial temperature, °C	$T_{0\text{нагр}}$	43,6	43,6	43,6
Коэффициент остывания 1, °C Cooling coefficient 1, °C	$k_{1\text{нагр}}$	47,135	46,942	47,042
Коэффициент остывания 2, мин Cooling coefficient 2, °C	$k_{2\text{нагр}}$	1983,86	1985,07	1984,19
Постоянная времени остывания, мин Cooling time constant, min	$\tau_{\text{нагр}}$	3,964	3,45	3,8
Коэффициент детерминации Coefficient of determination	R^2	0,996	0,989	0,984

Таблица 3. Величина R^2 для различных промежутков времени аппроксимации

Table 3. R^2 value for different approximation time intervals

Промежуток времени, мин. Time interval, min.	R^2		
	Решение/Solution		
	1	2	3
1994–2008	0,996	0,996	0,995
1994–2020	0,986	0,988	0,989
1994–2028	0,983	0,984	0,983

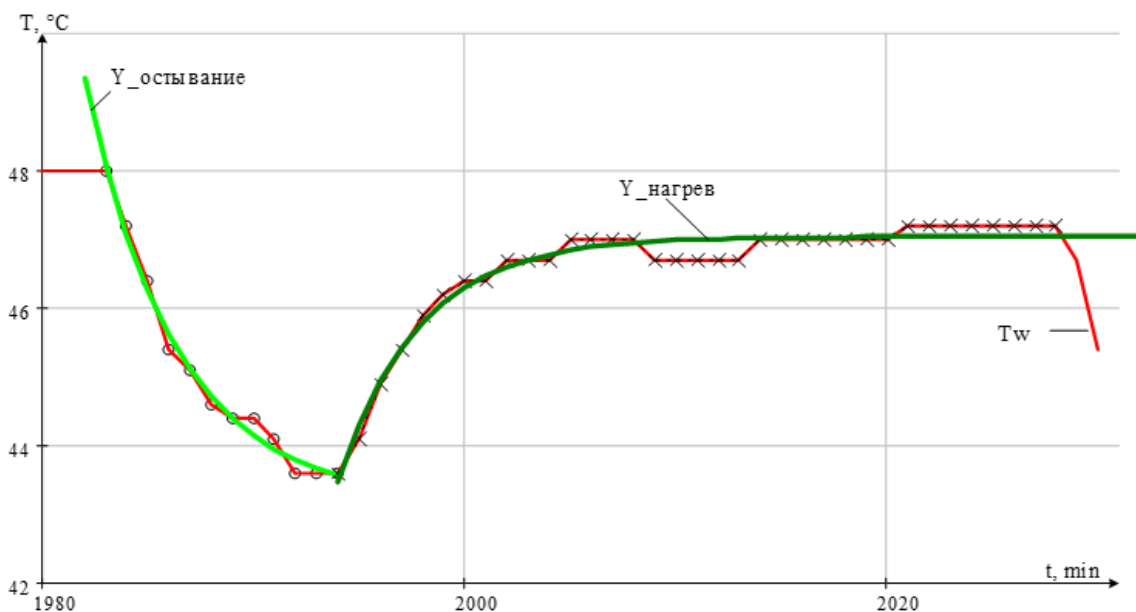


Рис. 3. Графики переходных процессов и их аппроксимаций
Fig. 3. Graphs of transient processes and their approximations

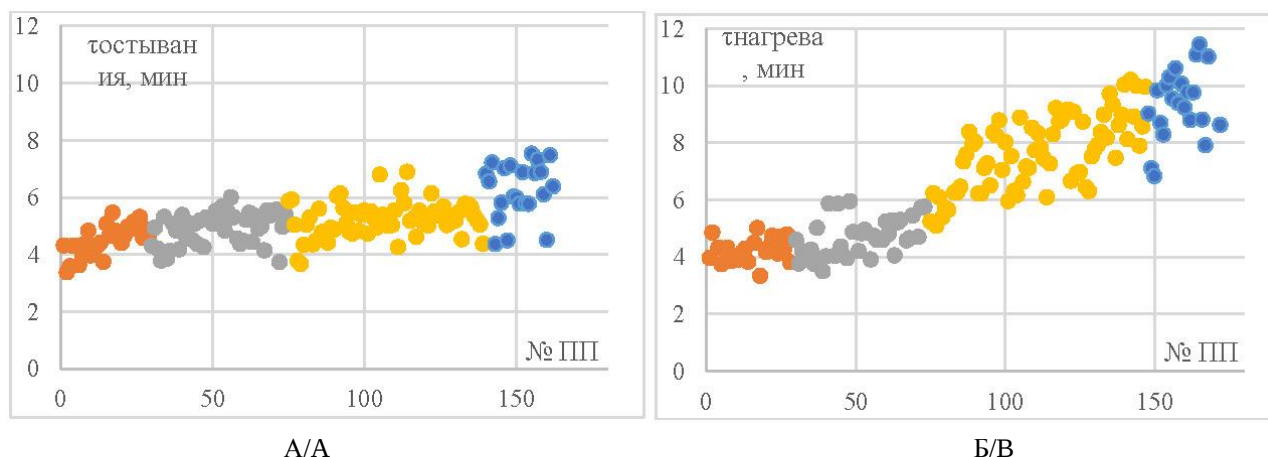


Рис. 4. Постоянные времени влажного датчика: А – ПП остывания, Б – нагрева. Оранжевые точки – первый этап сушки ПМ, серые – второй, желтые – третий, синие – остывание

Fig. 4. Time constants of the wet sensor: А – transient cooling process, В – heating. Orange dots – first stage of lumber drying, grey – second, yellow – third, blue – cooling

Результаты исследования и их обсуждение

На основе проведенного анализа ПП остывания и нагрева влажного датчика можно сделать вывод о том, что функциональные зависимости (1) и (2) и постоянные времени (τ , мин) были определены верно, поскольку величина R^2 превышает 98,3 % на всех временных интервалах. Исходя из полученных данных (рис. 4), видно, что постоянная времени влажного датчика имеет большую дисперсию и во время сушки увеличивается. Дальнейший качественный и количественный анализ корреляций величин τ и ЕМС следует вести после определения постоянных времени нагрева и остывания сухих датчиков. На данном этапе полученные данные нельзя напрямую использовать для определения влажности древесины, требуются дополнительные исследования, целесообразным является применение технологий искусственного интеллекта для поиска возможных скрытых корреляций.

Рассмотрим подробнее зависимость влажности древесины от параметров окружающей среды. Данная зависимость может быть описана уравнением Хейлвуда–Хорробина (формула (3)) и поверхностями, представленными на рис. 5.

$$EMC(T, H) = \frac{1800}{W} \left(\frac{KH}{1-KH} + \frac{K_1KH + 2K_2K_1K^2H^2}{1 + K_1KH + K_2K_1K^2H^2} \right), \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} W &= 349 + 1,29 \cdot T + 0,0135 \cdot T^2, \\ K &= 0,805 + 7,36 \cdot 10^{-4} \cdot T - 2,73 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \\ K_1 &= 6,27 + 9,38 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,03 \cdot 10^{-4} \cdot T^2, \\ K_2 &= 1,91 + 4,07 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2,93 \cdot 10^{-4} \cdot T^2. \end{aligned}$$

Несмотря на то, что уравнение Хейлвуда–Хорробина получило довольно обширную критику [18, 19], в частности из-за того, что коэффициенты не учитывают типы пород деревьев и их механические свойства, данное уравнение с достаточной точностью соответствует диаграмме Н.Н. Чулицкого (рис. 5, А) и имеет эмпирическое соответствие данным, полученным в процессе ОМС в рассматриваемой сушильной камере (рис. 7, Б).

На рис. 6 представлена зависимость величины психрометрической разницы (ΔT_1 , °С), равной разности мгновенных величин показаний сухого (T_d) и влажного (T_w) датчиков температуры. По величине среднего установившегося значения ΔT_1 для каждого ПП нагрева (на графике не отмечены) можно судить о текущем режиме и параметрах сушильного агента внутри камеры сушки. Как видно из графика, данная величина в полной мере соответствует необходимым диапазонам для каждого из режимов, вследствие чего достигается бездефектный результат сушки ПМ. Замечено, что величина ΔT_1 также изменяется по экспоненциальному закону, следовательно, для нее также можно определить постоянную времени нагрева и остывания. Проверка наличия корреляции постоянных времени с влажностью ПМ в данной работе не проводилась.

Нижние огибающие графика, получаемые при закрытии клапана сброса воздуха и изменении вращения вентиляторов, в сочетании с диаграммой равновесной влажности в координатах T от ΔT [20] (рис. 7, А) позволяют получить представление о величине ЕМС. В данном случае это будет величина обобщенной влажности всех досок в сушильной камере. На рис. 6 точками отмечены средние величины ΔT_1 ПП перемешивания за промежуток в 60 минут для 1 и 2 режимов и 35 минут для третьего

режима. Каждой точке соответствует величина ΔT_1 , момент времени $t_{пп}$ и номер ПП (ппп). Для 1-го и 2-го режимов средняя установившаяся величина может быть описана полиномом второго порядка, а для третьего режима – линейной функцией. Как видно из графика, величина разности температур влажного и сухого датчика с течением времени увеличивается, что говорит о процессе высыхания ПМ. Данный процесс изображен красной линией на рис. 7.

По рис. 7 хорошо видно, что при заданной температуре режима 2 в 55 °С по разности показаний влажного и сухого датчиков мы можем определить величину EMC только начиная с 26 %. До этой величины психрометрическая разница должна быть равна нулю, что соответствует 100 % влажности в сушильной камере. Но на графике 6 видно, что

данная величина отлична от нуля вследствие погрешности датчиков температуры. Основываясь на этом факте, среднюю величину $\Delta T_1 = 1,2$ за период перемешивания, предшествующий первому этапу сушки ПМ (промежуток времени 1831–1891 мин.), примем как тарировочную для датчиков температуры, поскольку в начале сушки влажность доски может составлять 30–80 %, что существенно больше возможного диапазона определения по психрометрической влажности. Из вышесказанного следует, что по окончании сушки ПМ для 17-ти точек ПП можно определить величину EMC(T,H). Таким образом, по величине ΔT_1 можно с высокой точностью судить о величине влажности ПМ и принимать решение о переходе со второго режима сушки на третий, по критерию достижения EMC(T,H)=15 %.

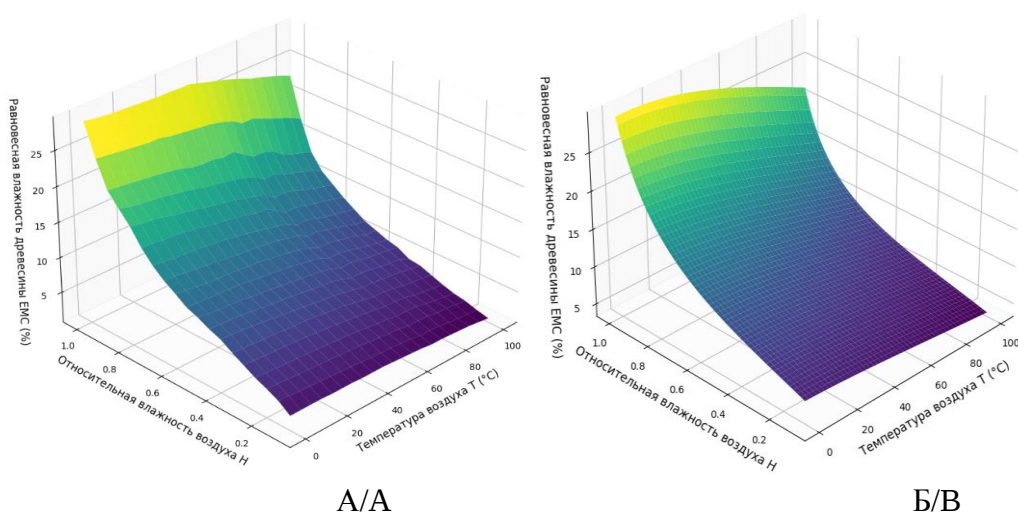


Рис. 5. Поверхности равновесной влажности древесины (EMC, %) в зависимости от температуры (T , °С) и относительной влажности воздуха (H , о.е.) на основе: А) диаграмм равновесной влажности Н.Н. Чулицкого; Б) уравнения Хейлвуда–Хорробина

Fig. 5. Equilibrium moisture content surfaces of wood (EMC, %) depending on temperature (T , °C) and relative air humidity (H , o.e.) based on: А) equilibrium moisture content diagrams by N.N. Chulitsky; Б) the Hailwood–Horrobin equation

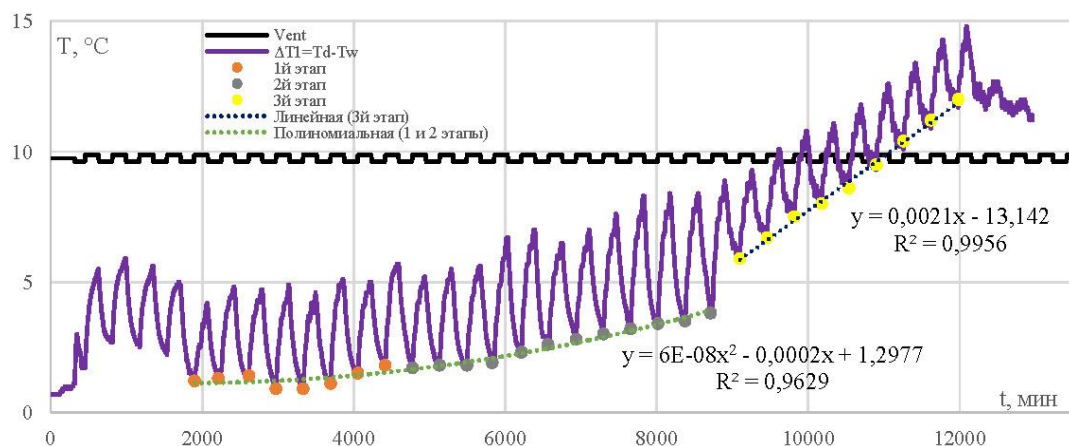


Рис. 6. Изменение величины психрометрической влажности в процессе сушки

Fig. 6. Change in the value of psychrometric humidity during drying

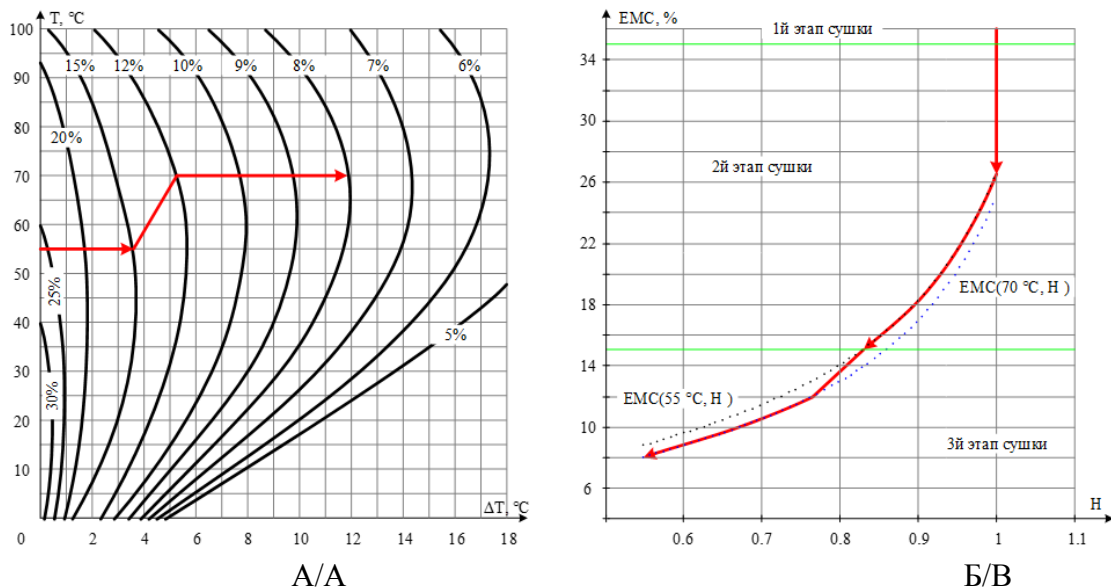


Рис. 7. Равновесная влажность: А) диаграмма; Б) по уравнению Хейлвуда–Хорробина
Fig. 7. Equilibrium moisture content: А) diagram; Б) according to the Hailwood–Horrobin equation

Величина ΔT_1 на втором и третьем этапах сушки также используется для тарирования резистивных датчиков влажности с целью их точной подстройки под текущие условия и определения факта их отказа.

Для описания зависимости равновесной влажности древесины от измеренного сопротивления (R) РДВ используют эмпирические формулы, поскольку связь между этими величинами нелинейная и зависит от породы древесины, температуры, а также других факторов (например, наличия солей или пропитки) [21–24]. На практике наиболее часто используют логарифмическую зависимость (4) [22, 25, 26]:

$$EMC(R) = a_0 + a_1 \lg(R). \quad (4)$$

Авторами предлагается следующий алгоритм автоматизированной подстройки параметров тарирования резистивных датчиков на основе аппроксимации вычисления влажности пиломатериала по равновесной влажности и температуре воздуха по окончании сушки пиломатериалов (рис. 8). В алгоритме используются следующие обозначения:

- $N_{дат\sum}$ – суммарное количество РДВ, установленных в сушильной камере;
- $N_{пп\sum}$ – количество ПП прогрева сушки, для которых по (3) можно определить величину $EMC(T, H)$;
- $N_{хор}$ – количество составленных уравнений системы (5);
- k – степень «доверия» новым данным;
- nd – номер датчика;
- $ппп$ – номер ПП;
- a_0 и a_1 – коэффициенты, формула (4);
- EMC_{R_min} EMC_{R_max} – доверительный диапазон измерений.

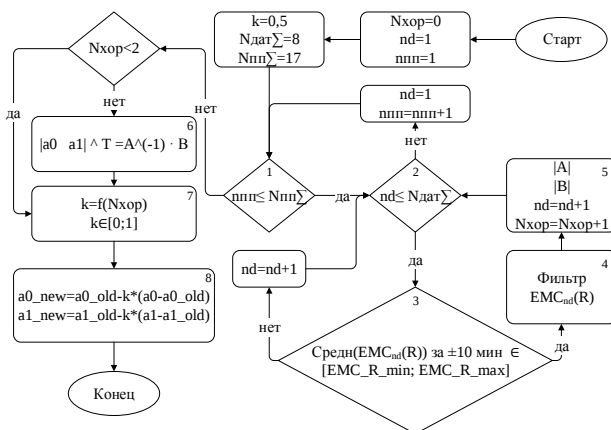


Рис. 8. Алгоритм автоматизированной подстройки параметров тарирования РДВ

Fig. 8. Algorithm for automated adjustment of calibration parameters of resistive humidity sensors

В процессе работы алгоритма при помощи блока – 1 последовательно проверяются точки ПП, для данной сушки их количество равно 17, в которых по величине температуры и влажности воздуха можно вычислить $EMC(T, H)$. Блок 2 отвечает за последовательную проверку каждого из установленных РДВ в камере (8 шт.). В блоке 3 среднее показание каждого датчика $EMC(R)$ за 10 минут до и после $t_{пп}$ проверяется на соответствие коридору значений $EMC(T, H)$, это необходимо для того, чтобы определить, что в течение этого времени датчик находился в работе и его показаниям в момент времени $t_{пп}$ можно доверять. Блок 4 предусмотрен для того, чтобы снизить величину шума в измерениях и исключить случайные значения. В блоке 5

формируются матрицы А и В. Матрица А формируется на основании уравнений (5) и является матрицей коэффициентов, матрица В – значений системы (уравнение (6)). В связи с тем, что количество неизвестных коэффициентов a может оказаться сильно меньше числа уравнений, для решения вычисляется псевдообратная матрица по методу Гревилля, и затем рассчитываются коэффициенты a_0 и a_1 , за данные вычисления отвечает блок 6.

$$EMC(T_1, H_1) = a_0 + a_1 \lg(R_1),$$

$$EMC(T_2, H_2) = a_0 + a_1 \lg(R_2),$$

...

$$EMC(T_{N_{\text{хор}}}, H_{N_{\text{хор}}}) = a_0 + a_1 \lg(R_{N_{\text{хор}}}), \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \lg(R_1) \\ 1 & \lg(R_2) \\ \dots & \dots \\ 1 & \lg(R_{N_{\text{хор}}}) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} EMC(T_1, H_1) \\ EMC(T_2, H_2) \\ \dots \\ EMC(T_{N_{\text{хор}}}, H_{N_{\text{хор}}}) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Величина $N_{\text{хор}}$ изменяется в пределах от 0 до 136 (8 датчиков, 17 точек ПП). При этом коэффициент k (уравнение (7)), показывает, насколько мы «доверяем» новым полученным данным и зависит от количества успешных измерений (блок 7). Чем больше будет величина $N_{\text{хор}}$, тем ближе к единице будет коэффициент k . В случае, если все датчики перестали работать до достижения влажности в $(26 \pm 8) \%$, или уравнений было составлено меньше двух, $N_{\text{хор}}$ и k будут равняться нулю, а коэффициенты a_0 и a_1 останутся прежними (блок 8).

$$k(N_{\text{хор}}) = \frac{N_{\text{хор}}}{136}. \quad (7)$$

В результате использования данного алгоритма в процессе четырех полных циклов сушки были получены коэффициенты a_0 и a_1 (табл. 4). На рис. 9 показано, как изменяются показания РДВ (W_{R1} , W_{R2}) в процессе сушки. Датчики были настроены согласно результатам третьей сушки. Анализируя полученные зависимости (рис. 9), можно сделать вывод о том, что датчик W_{R1} периодически терял контакт из-за его плохого крепления в древесине, т. к. его показания в некоторые моменты времени резко снижались и затем восстанавливались, пока не стали равны нулю, в отличие от показаний второго датчика. При возникновении замыкания в датчике измеряемое сопротивление упадет до нуля, а величина $EMC(R)$ значительно увеличится. Для исключения влияния этих эффектов на коэффициенты a_0 и a_1 в алгоритме используются блоки 3 и 4. При этом стоит отметить, что полученные коэффициенты справедливы для рассматриваемой камеры в г. Томске, при последовательной сушке Сибирского Кедра размерами $50 \times 100 \times 6000$ мм.

Таблица 4. Коэффициенты тарирования резистивных датчиков

Table 4. Calibration factors for resistive sensors

№ сушки/Drying no.	a_0	a_1
1	50	-4,5
2	48,8	-4,3
3	48,7	-4,3
4	48,7	-4,3

Также из рис. 9 видно, что благодаря тарированию удалось достичь точности измерения $EMC(R)$ на 2-м и 3-м этапах сушки в коридоре значений $(EMC(T, H) \pm 4) \%$. На этапе прогрева показания датчиков могут сильно разниться. Это связано не только с местом и качеством их крепления, но также с исходным состоянием древесины. Например, если сушка происходит зимой и ПМ хранились замороженными на улице. В этом случае показания датчиков могут быть нулевыми, пока ПМ не оттают. На первом этапе сушки показания первого датчика находятся в коридоре аппроксимированных значений $(EMC(T, H) \pm 8) \%$, в то время как значения второго с течением времени приближаются к нему. Это может быть объяснено тем, что формула (4) справедлива для диапазона влажности примерно от 7 до 35 %, и при более высокой влажности (выше точки насыщения волокон) точность падает. Несмотря на это полученной точности достаточно для того, чтобы, опираясь на средние показания тарированных по предыдущей сушке ПМ такого же типа работающих датчиков, осуществить критически важный для итогового качества ПМ переход с первого на второй режим сушки.

Авторами предлагается следующий алгоритм автоматического управления режимом сушки пиломатериалов на основе показаний резистивных датчиков влажности (рис. 10). В данном алгоритме добавляются следующие обозначения:

- $N_{\text{этап}}$ – номер этапа сушки;
- N_x – количество датчиков, показаниям которых можно доверять;
- Bad – число раз, когда в работе не осталось РДВ;
- MC – средняя величина $EMC(R)$ всех работающих датчиков в текущий момент времени;
- W – матрица для вычисления величины MC ;
- i – количество элементов матрицы W ;
- $t_{\text{старт}}$ – время начала действия алгоритма после старта сушки.

Как отмечалось выше, РДВ необходимо определенное количество времени, чтобы их показания стали попадать в доверительный интервал. Для осуществления выдержки времени в алгоритм введено условие (блок 1), определяющее момент начала измерения текущей влажности ПМ в сушильной камере. Время начала действия алгоритма было определено на основании анализа предыдущих полных циклов сушки пиломатериала и составляет 2880 минут с момента начала сушки ПМ.

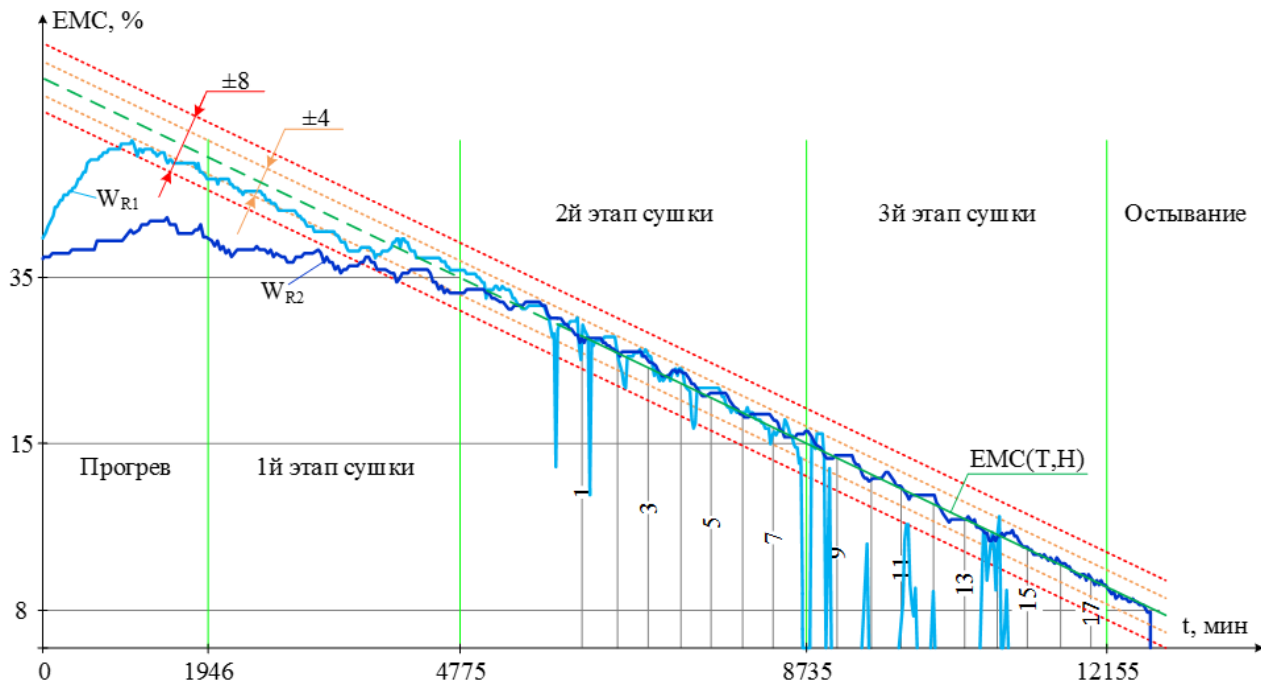


Рис. 9. Сушка № 3, показания EMC(R) РДВ
Fig. 9. Drying no. 3, EMC(R) readings of the resistive humidity sensor

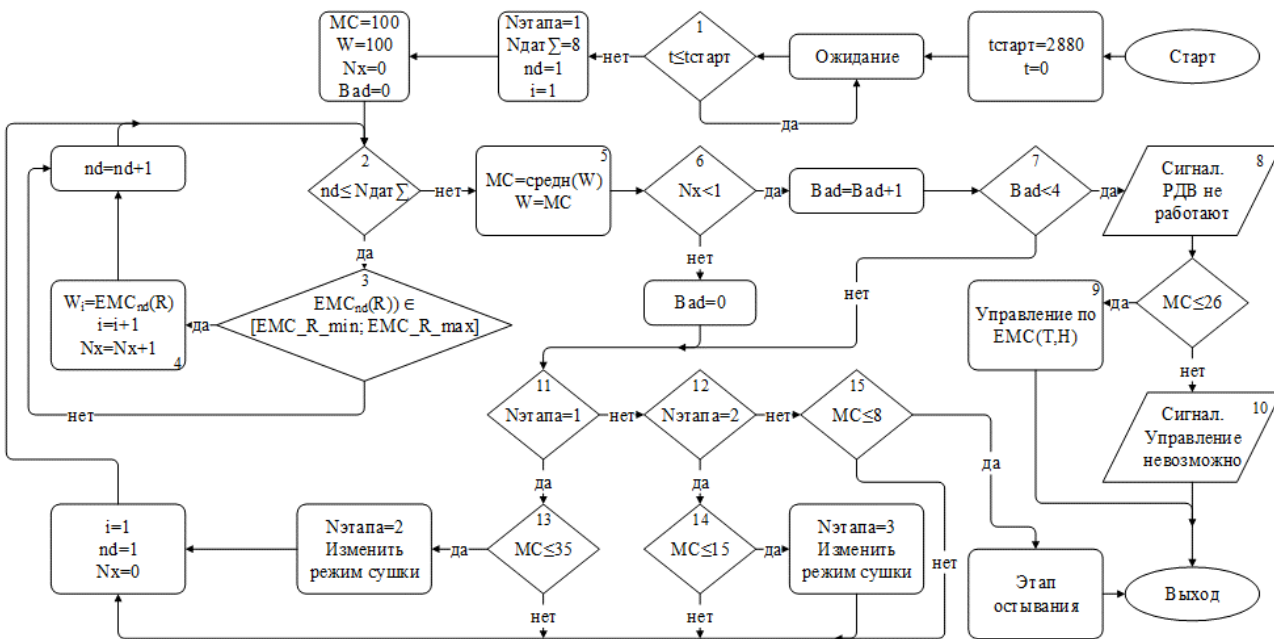


Рис. 10. Алгоритм автоматического управления режимом сушки пиломатериалов
Fig. 10. Automatic control algorithm for drying lumber

Перед принятием решения о том, можно ли переходить на следующий режим сушки или нет, необходимо проверить датчики на работоспособность, это осуществляется блоками 2 и 3. Блок 2, так же, как и в первом алгоритме, отвечает за последовательную проверку каждого из установленных РДВ в камере. Блок 3 проверяет, принадлежит ли текущая измеренная дат-

чиком величина влажности доверительному интервалу. Если принадлежит, то данное значение записывается в матрицу W, если нет – проверяются показания следующего датчика. Параллельно с этим ведется подсчет количества датчиков, чьи показания были записаны. В пятом блоке ведется вычисление средней влажности всех работающих датчиков (MC) и уменьшение

размера матрицы W до одного элемента. После этого в блоке 6 проводится оценка количества отказавших датчиков. При отказе всех датчиков величина MC не меняется, при последовательном отказе всех датчиков более четырех раз подряд (блок 7) оператор сушильной камеры получает уведомление (блок 8). Для увеличения степени автоматизации перехода между режимами алгоритм дополнен тем, что при отказе всех РДВ и достижении влажности доски ниже 26 % дальнейшее управление режимом будет вестись по величине $EMC(T, H)$ (блок 9). В противном случае оператор получит сообщение о том, что управление и переход между режимами в автоматическом режиме невозможен (блок 10). В блоках 11 и 12 ведется определение текущего этапа сушки, тогда как в 13–15 заданы величины EMC , при достижении которых необходимо перейти на следующий этап. Для рассматриваемой сушильной камеры эти величины составляют 35, 15 и 8 % для перехода с первого на второй, со второго на третий и с третьего на этап остывания соответственно.

Рассмотренные алгоритмы применимы только для камер, работающих по осциллирующему методу сушки ПМ. При этом следует учитывать, что коэффициенты a_0 и a_1 могут незначительно меняться при смене сезонов, замене резистивных датчиков влажности в рамках одной камеры. Для камер с иными конструктивными особенностями величины коэффициентов могут быть отличными, но в результате нескольких итераций сушки будут определены оптимальные. Изменение геометрических размеров ПМ не оказывает влияния на измеряемое омическое сопротивление древесины и на величину равновесной влажности в камере, следовательно, можно использовать величины коэффициентов, полученных ранее для данного типа древесины. При изменении типа ПМ, подвергающегося сушке, может возникнуть необходимость в корректировке коэффициентов уравнения (3) для лучшего соответствия эмпирическим данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макартичан С.В., Шилин А.Н., Стрижиченко А.В. Контроль влажности древесины и управление процессом ее сушки. – М.: ИД Акад. естествознания, 2014. – 175 с.
2. ГОСТ 16588-91 Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. – М.: Стандартинформ, 2006. – 6 с.
3. Менде Ф.Ф., Шурупов И.А. Разработка и эксплуатация лесосушильных камер. Монография. – Харьков, 2014. – 68 с.
4. Energy consumption of beech timber drying in oscillation climates / G. Milić, B. Kolin, N. Todorović, Ž. Gorišek // *Drvna industrija*. – 2014. – Vol. 65. – P. 309–314. DOI: 10.5552/drind.2014.1367
5. Milić G., Kolin B. Oscillation drying of beech timber – initial experiments // *COST E53*. – 2008. – P. 115–124.
6. Сушильные камеры для сушки древесины // 2021–2023 «СКРОН»® URL: <http://www.scron.ru/> (дата обращения: 03.06.2025).
7. Ray P.P. Internet of Things based smart measurement and monitoring of wood Equilibrium Moisture Content // 2015 International Conference on Smart Sensors and Systems (IC-SSS). – 2015. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SMARTSENS.2015.7873612.
8. Мазаник Н.В., Бабич Д.П., Рудак О.Г. Контроль состояния сушильного агента при камерной сушке пиломатериалов // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2016. – № 2 (166). – С. 104–106.
9. Лызенко А.В., Буданов В.Ю., Кротова Л.Л. Анализ точности регулирования процесса сушки // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск: СГТУ, 2007. – С. 42–45.
10. Comparison of wood moisture meters operating on different principles of measurement / A. Běťák, J. Zach, P. Misák, J. Vaněrek // *Buildings*. – 2023. – № 13 (2). – P. 531. DOI: 10.3390/buildings13020531

Обсуждение и заключение

В результате работы было показано, что ОМС порождает большое количество ПП, которые содержат обширную информацию о параметрах внутри сушильной камеры и текущем состоянии ПМ. Показано, что по величине постоянной времени влажного датчика нельзя напрямую судить о влажности древесины. Подтверждено, что по величине психрометрической разности при закрытии клапанов и изменении направления вращения вентилизации, что соответствует ПП «Перемешивание», можно с точностью до 2 % судить о текущей влажности ПМ. Благодаря этому становится возможным с помощью разработанного алгоритма провести в автоматическом режиме на основе аппроксимации вычисления влажности пиломатериала по равновесной влажности и температуре воздуха по окончании сушки ПМ.

В результате тарирования по РДВ становится возможным определять величину EMC не менее $(35 \pm 8) \%$, что достаточно для перехода в автоматическом режиме с первого на второй и затем на третий этапы сушки. Предложен алгоритм автоматического управления режимом сушки ПМ на основе показаний тарированных РДВ. Алгоритм учитывает факт возможного отказа всех РДВ и позволяет при достижении влажности доски ниже 26 % вести дальнейшее управление режимом по величине EMC , полученной на основании параметров сушильного агента в сушильной камере.

Дальнейшие исследования предполагают:

- изучение корреляции между постоянными времени остывания и нагрева для сухих датчиков;
- анализ взаимосвязи величины психрометрической разности с текущей влажностью ПМ;
- поиск скрытых корреляций для влажного датчика;
- создание математической модели для обучения нейросети, которая сможет оценивать и прогнозировать результат сушки.

11. Holger F., Veikko T. Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. – Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2000. – 102 p.
12. Zhang J., Cao J., Sun L. A novel fusion technique based functional link artificial neural network for lmc measuring // 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – 2007. – P. 17–35. DOI: 10.1109/iciea.2007.4318453
13. Simpson W.T. Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the united states and worldwide. – Madison, WI: USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., 1998. – 14 p.
14. Мазаник Н.В., Бабич Д.П. Режимы и качество сушки пиломатериалов в сушильных камерах различных производителей // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2015. – № 2 (175). – С. 191–195.
15. Development and validation of a programmable logic device (PLD) based sensor and processor microarchitecture system for equilibrium moisture content calculation in wood industries / P. Tangirala, J.R. Heath, A. Radun, T. Conners // Proceedings of the 2006 IEEE Sensors Applications Symposium. – 2006. – P. 135–140. DOI: 10.1109/sas.2006.1634255
16. Прохоров С.В., Шилин А.А., Примочкин И.А. Синтез алгоритма диагностики работы электроприводов камеры сушки по датчикам температуры // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – Т. 25. – № 4. – С. 70–83. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-70-83.
17. Grechushnikov V.V., Kachin O.S., Prokhorov S.V. Automated system of knowledge base acquisition for lumber drying processes // International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2023: Proceedings. – Sochi, October 10–16, 2023. – P. 505–509.
18. Гигроскопические свойства древесины лиственных пород / С.П. Лоскутов, О.А. Шапченкова, А.А. Анискина, З. Пастори // Лесной вестник. – 2022. – Т. 26. – № 2. – С. 92–102. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-92-102
19. Common sorption isotherm models are not physically valid for water in wood / E.E. Thybring, C.R. Boardman, S.L. Zelinka, S.V. Glass // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2021. – Vol. 627. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127214
20. Кречетов И.В. Сушка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 432 с.
21. Wood moisturecontent measurement accuracy of impregnated and nonimpregnated wood / J. Barański, A. Suchta, S. Barańska, I. Klement, T. Vilková, P. Vilkovský // Sensors. – 2021. – № 21. DOI: 10.3390/s21217033
22. Investigation of electrical characteristics using various electrodes for evaluating the moisture content in wood / S. Hwang, T. Lee, K. Ahn, S. Pang, J. Park, J. Oh, H. Kwak, H. Yeo // BioResources. – 2021. – № 16 (4). – P. 7040–7055.
23. Tamme V., Muiste P., Tamme H. Experimental study of resistance type wood moisture sensors for monitoring wood drying process above fibre saturation point // Forestry Studies. Metsanduslikud Uurimused. – 2013. – № 59. – P. 28–44.
24. Божелко И.К., Олехнович А.М., Снопков В.Б. Измерение электропроводности древесины, используемой для шпал // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2006. – № 2. – С. 241–244.
25. Wood handbook: wood as an engineering material. – Madison, WI, USDA Forest Service, 2010. – 508 p.
26. Sramm A.J. The electrical resistance of wood as a measure of its moisture content // Industrial and Engineering Chemistry. – 1927. – № 19 (9). – P. 1021–1025. DOI: 10.1021/ie50213a022

Информация об авторах

Владислав Викторович Гречушников, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. grechvv@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4827-5906>

Сергей Валерьевич Прохоров, аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. sergei_prohorov@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

Александр Анатольевич Шилин, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. shilin@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Поступила в редакцию: 09.06.2025

Поступила после рецензирования: 18.06.2025

Принята к публикации: 27.06.2025

REFERENCES

1. Makkartichyan S.V., Shilin A.N., Strizhichenko A.V. *Control of wood moisture content and management of its drying processing*. Moscow, Academy of Natural Sciences Publ. house, 2014. 175 p. (In Russ.)
2. SS 16588-91 *Sawn timber products and wooden parts. Methods for determining moisture content*. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 6 p. (In Russ.)
3. Mende F.F., Shurupov I.A. *Development and operation of timber drying chambers*. Monograph Kharkov, 2014. 68 p. (In Russ.)
4. Milić G., Kolin B., Todorović N., Gorišek Ž. Energy consumption of beech timber drying in oscillation climates. *Drvna industrija*, 2014, vol. 65, pp. 309–314. DOI: 10.5552/drind.2014.1367
5. Milić G., Kolin B. Oscillation drying of beech timber – initial experiments. *COST E53*, 2008, pp. 115–124.
6. Drying chambers for drying wood. 2021–2023 "SCRON"® Available at: <http://www.scron.ru/> (accessed 3 June 2025).
7. Ray P.P. Internet of Things based smart measurement and monitoring of wood Equilibrium Moisture Content 2015 *International Conference on Smart Sensors and Systems (IC-SSS)*, 2015. pp. 1–5. DOI: 10.1109/SMARTSENS.2015.7873612.

8. Mazanik N.V., Babich D.P., Rudak O.G. Monitoring the state of the drying agent during chamber drying of lumber. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2016, no. 2(166), pp. 104–106 (In Russ.)
9. Lyzenko A.V., Budanov V.Yu., Krotova L.L. Analysis of the accuracy of regulation of the drying process. *Forest and chemical complexes – problems and solutions. Collection of articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, SSTU Publ., 2007. pp. 42–45 (In Russ.)
10. Běťák A., Zach J., Misák P., Vaněrek J. Comparison of wood moisture meters operating on different principles of measurement. *Buildings*, 2023, no. 13 (2), pp. 531. DOI: 10.3390/buildings13020531
11. Holger F., Veikko T. *Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters*. Finland, VTT Technical Research Centre of Finland, 2000. 102 p.
12. Zhang J., Cao J., Sun L. A Novel fusion technique based functional link artificial neural network for LMC measuring. *2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2007. pp. 17–35. DOI: 10.1109/iciea.2007.4318453
13. Simpson W.T. *Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the united states and worldwide*. Madison, WI, USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., 1998. 14 p.
14. Mazanik N.V., Babich D.P. Drying modes and quality of sawn timber in drying chambers of various manufacturers. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2015, no. 2 (175), pp. 191–195. (In Russ.)
15. Tangirala P., Heath J.R., Radun A., Conners T. Development and validation of a programmable logic device (PLD) based sensor and processor microarchitecture system for equilibrium moisture content calculation in wood industries. *Proceedings of the 2006 IEEE Sensors Applications Symposium*, 2006. pp. 135–140. DOI: 10.1109/sas.2006.1634255
16. Prokhorov S.V., Shilin A.A., Primochkin I.A. Synthesis of an algorithm for diagnosing the operation of electric drives of a drying chamber using temperature sensors. *Bulletin of the South-West State University*, 2021. vol. 25, no. 4, pp. 70–83. (In Russ.) DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-70-83.
17. Grechushnikov V.V., Kachin O.S., Prokhorov S.V. Automated system of knowledge base acquisition for lumber drying processes. *International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2023. Proceedings*. Sochi, October 10–16, 2023. pp. 505–509.
18. Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A., Pastori Z. Hygroscopic properties of deciduous wood. *Forest Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 92–102. (In Russ.) DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-92-102
19. Thybring E.E., Boardman C.R., Zelinka S.L., Glass S.V. Common sorption isotherm models are not physically valid for water in wood. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, vol. 627. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127214
20. Krechetov I.V. *Drying of wood*. Moscow, Forest industry Publ., 1980. 432 p. (In Russ.)
21. Barański J., Suchta A., Barańska S., Klement I., Vilkovská T., Vilkovský P. Wood moisture content measurement accuracy of impregnated and nonimpregnated wood. *Sensors*, 2021, no. 21. DOI: 10.3390/s21217033
22. Hwang S., Lee T., Ahn K., Pang S., Park J., Oh J., Kwak H., Yeo H. Investigation of electrical characteristics using various electrodes for evaluating the moisture content in wood. *BioResources*, 2021, no. 16 (4), pp. 7040–7055.
23. Tamme V., Muiste P., Tamme H. Experimental study of resistance type wood moisture sensors for monitoring wood drying process above fibre saturation point. *Forestry Studies. Metsanduslikud Uurimused*, 2013, no. 59, pp. 28–44.
24. Bozhelko I.K., Olekhovich A.M., Snopkov V.B. Measurement of electrical conductivity of wood used for sleepers. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2006, no. 2, pp. 241–244.
25. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, WI, USDA Forest Service, 2010. 508 p.
26. Sramm A.J. The electrical resistance of wood as a measure of its moisture content. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1927, no. 19 (9), pp. 1021–1025. DOI: 10.1021/ie50213a022

Information about the authors

Vladislav V. Grechushnikov, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. grechvv@tpu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4827-5906>

Sergey V. Prokhorov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. sergei_prokhorov@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

Alexander A. Shilin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shilin@tpu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Received: 09.06.2025

Revised: 18.06.2025

Accepted: 27.06.2025