

Синтез алгоритма диагностики работы электроприводов камеры сушки по датчикам температуры

С. В. Прохоров¹, А. А. Шилин¹ ✉, И. А. Примочкин¹

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

✉ e-mail: shiiln@tpu.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка метода оценки состояния электроприводов камеры сушки на основе архивных данных с температурных датчиков. Метод включает в себя использование архивных данных, анализ и определение корреляции между изменениями температуры и влажностью воздуха с техническим состоянием вентиляторов и воздушных клапанов. Разработанная математическая модель функционального блока диагностики должна работать в режиме реального времени на основании текущих показаний температуры.

Методы. Метод основан на исследовании экспериментальных данных с применением узкополосных фильтров, блоков усреднения и корреляционных функций для сопоставления спектральных составляющих сигнала управления и отклика в виде температуры на факт совпадения.

Результаты. На основании результатов исследования реализовано техническое решение для ПЛК, позволяющее определить неисправность работы электроприводов камеры сушки без использования дополнительных датчиков потока воздуха и положения заслонок. Решение основано только на данных температурных датчиков. Тестирование работы блока диагностики выполнено в ручном режиме, когда исполнительные элементы не подчиняются контроллеру.

Заключение. Метод может быть полезен для разработчиков систем управления камерами сушки пиломатериалов, поскольку позволяет получать дополнительную диагностическую информацию о технологическом процессе, повышая надёжность системы управления в целом.

Ключевые слова: программируемые логические контроллеры (ПЛК); узкополосный фильтр; корреляция; система управления камерой осушения.

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

Для цитирования: 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; 25(4): 70-83. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-70-83>.

Поступила в редакцию 06.09.2021

Подписана в печать 24.09.2021

Опубликована 20.12.2021

Synthesis of an Algorithm for Diagnosing the Operation of Drying Chamber Electric Drives According to Temperature Sensors

Sergey V. Prohorov ¹, Aleksandr A. Shilin ¹ ✉, Ilya A. Primochkin ¹

² Tomsk Polytechnic University

30, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation

✉ e-mail: shilin@tpu.ru

Abstract

Purpose of research is the development of a method for assessing the condition of drying chamber electric drives based on historical data from temperature sensors. The method includes the use of historical data, analysis and determination of the correlation between changes in temperature and humidity and the technical condition of fans and air valves. The developed mathematical model of the functional diagnostic unit should work in real time based on the current temperature readings.

Methods. The method is based on the study of experimental data using narrow-band filters, averaging blocks and correlation functions to compare the spectral components of the control signal and the response in the form of temperature to the fact of coincidence.

Results. Based on the results of the study, a technical solution for the PLC was implemented, which makes it possible to determine the malfunction of the electric drives of the drying chamber without using additional air flow sensors and the position of the dampers. The solution is based only on temperature sensor data. Testing of the operation of the diagnostic unit is performed in manual mode, when the executive elements are not controlled by the controller.

Conclusion. The method can be useful for developers of control systems for lumber drying chambers, since it allows obtaining additional diagnostic information about the technological process, increasing the reliability of the control system as a whole.

Keywords: programmable logic controllers (PLCs); narrowband filter; correlation; control system of the drying chamber.

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

For citation: Prohorov S. V., Shilin A. A., Primochkin I. A. Synthesis of an Algorithm for Diagnosing the Operation of Drying Chamber Electric Drives According to Temperature Sensors. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 70-83 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-70-83>.

Received 06.09.2021

Accepted 24.09.2021

Published 20.12.2021

Введение

Использование конвекционных камер позволяет сократить время сушки пиломатериала [1,2] от 6-8 месяцев до 2-3 недель. Качество итогового продукта напрямую зависит от соблюдения технологических параметров [3,4]. В настоящее время применяют различные типы подобных установок [5-8]. В рабо-

те рассматривается система с конвекционным способом сушки [9,10]. Способ предполагает наличие закрытого пространства с сырым пиломатериалом, в котором циркулирует с определенной периодичностью в разных направлениях нагретый воздух. При достижении определенного уровня влажности воздуха, система утилизирует его [11]. В

работе исследуются архивные данные за последний год с действующего объекта, который расположен в Томской области. Основным пиломатериалом является кедр.

Для обеспечения качества технологического процесса, необходим контроль таких параметров как: температура, влажность, состояние воздушных клапанов, состояние циркулирующих вентиляторов. Для контроля температуры используется достаточно надежный и устойчивый к агрессивной среде резистивный датчик. В определении остальных параметров использовались измерительные средства такие как: каналный датчик влажности, реле перепада давления и концевые выключатели. Эти датчики подвержены влиянию агрессивной среды и часто выходят из строя из-за нали-

чия множества мелких древесных частиц и пыли, а также высокой влажности.

Надежным решением для оценки влажности является использование дополнительного «мокрого» датчика температуры. Это позволит использовать психометрическую разность для определения влажности [12, 13]. Анализ переходных процессов температур двух датчиков позволяет опытному технологу определять нарушения технологического процесса. При этом оказалось, что для оценки состояния электроприводов и текущей влажности пиломатериала технологу достаточно данных с этих двух процессов. В статье рассматривается задача синтеза алгоритма диагностики состояния электроприводов камеры сушки по рекомендациям технолога.

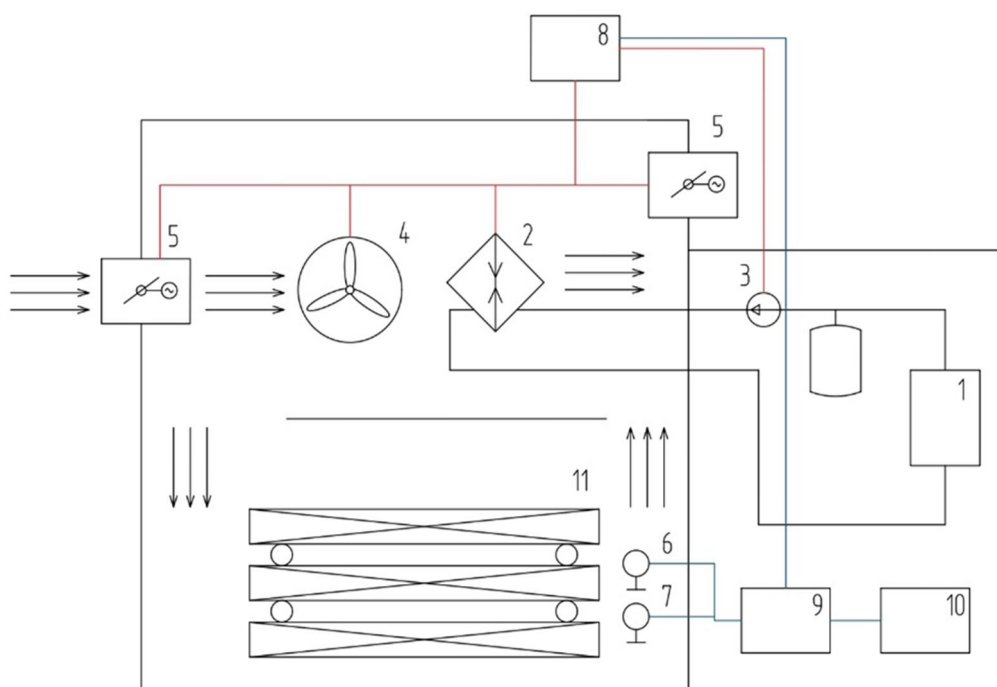


Рис. 1. Структурная схема сушильной камеры

Fig. 1. Block diagram of the drying chamber

Камера состоит из следующих частей (рис. 1): (1) газовый котел, соединенный с калориферами (2) связанные теплоносителем. Движение теплоносителя обеспечивает циркуляционный насос (3). Рядом с калориферами, под потолком, установлены реверсивные вентиляторы (4). В противоположных частях крыши, встроены воздушные клапаны (5). Помимо основных исполнительных устройств в составе системы имеются датчики температуры сухой (6) и влажный (7), средства управления, находящиеся в техническом помещении силовой шкаф (8) управления вентиляторами, насосом и приводами клапанов. Основным устройством контроля является программируемый логический контроллер (ПЛК) (9). В помещении обслуживающего персонала организовано автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора (10). В камере помещен сушаемый пиломатериал (11).

Процесс сушки организован следующим образом: после загрузки в помещение сушки сырых деревянных заготовок, включается газовый котел, который подогревает теплоноситель. Циркуляция последнего осуществляется за счет управляемого насоса. Включаются реверсивные вентиляторы, воздушные потоки снимают тепло с поверхности калориферов и нагревают помещение. При этом направление вращения лопастей двигателя регулярно меняется. Клапаны, установленные в крышу, организуют сброс влажного воздуха, для

уменьшения влажности внутри помещения. При этом стоит отметить, что выброс производится промежутками времени с полностью открытыми клапанами. Управление всеми элементами системы осуществляется ПЛК [14,15]. За состоянием процесса осушения следит оператор с АРМ. Такой режим может уменьшить вероятность замерзания [16, 17] и дальнейшее заклинивание механизма заслонок.

Материалы и методы

Как уже отмечалось, исходными данными для синтеза метода диагностики являются архивные данные измерения сухого и влажного датчиков температуры. На рис. 2 показаны переходные процессы работы камеры сушки пиломатериала в штатном режиме. Под штатным режимом будем считать режим, в котором выполняются условия:

1. Используется автоматический режим управления, где исполнительные устройства подключены к ПЛК.
2. Исполнительные устройства исправны и их влияние на поведение температур сухого и влажного датчика имеет достаточную корреляцию.

На рисунке: T_{dr} – температура сухого датчика, T_{wt} – температура влажного датчика, U_{vnt} – управление двигателями вентиляции, U_{vlv} – положение заслонки. Из рисунка видно, что переходные процессы температур содержат в себе спектр сигналов управления. При этом

на переходном процессе температуры сухого датчика лучше виден спектр сигнала управления вентиляторами, а на графиче-

ске температуры влажного датчика лучше отражён спектр управления положением задвижки.

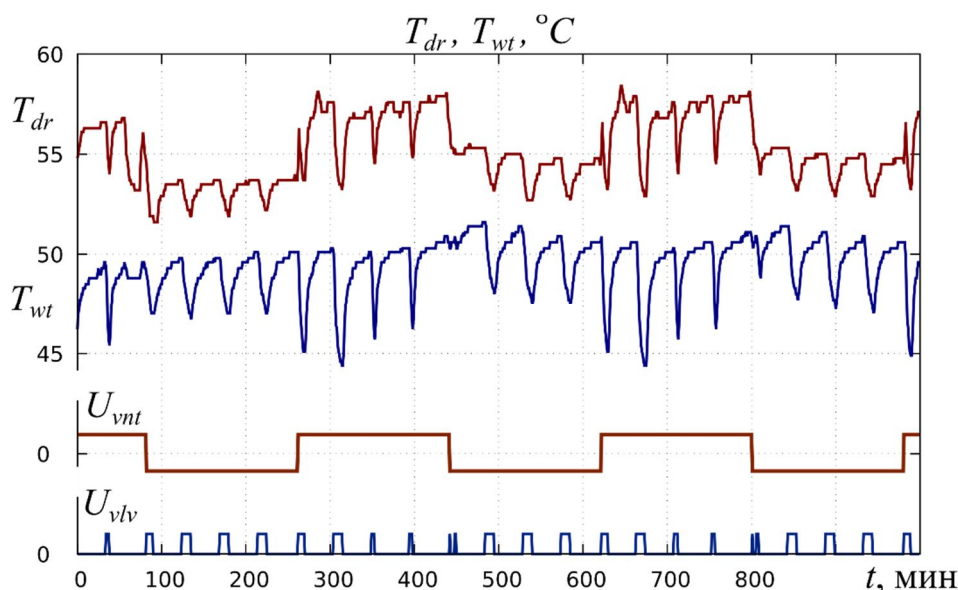


Рис. 2. Переходные процессы сигналов управления и температур

Fig. 2. Transient processes of control signals and temperatures

Для выполнения анализа можно использовать преобразование Фурье, однако для микроконтроллера требования к объёму оперативной памяти может быть не приемлемым. По этой причине предложено воспользоваться априорной информацией о периодичности управляющих сигналов и выполнить анализ с помощью обычных управляемых узкополосных фильтров [18]. Воспользуемся наиболее популярной передаточной функцией подобного фильтра, которая представлена выражением

$$W(s) = \frac{b_1 s}{a_0 + a_1 s + s^2}. \quad (1)$$

Коэффициенты передаточной функции (1) определяются по выражениям:

$$a_0 = \omega_r^2, a_1 = \frac{\omega_r}{Q}, b_1 = a_1 k, \omega_r = \frac{2\pi}{T_p},$$

$$Q = \frac{\omega_r}{(\omega_{\max} - \omega_{\min})}, \quad (2)$$

где ω_r – выделяемая частота из спектра, выраженная в радианах. Для формирования функционального блока ПЛК удобней эту частоту представлять в виде периода T_p и добротности фильтра Q . Физический смысл значения добротности фильтра (2) представлен отношением резонансной частоты к полосе пропускания.

Разностное уравнение можно получить с помощью билинейного преобразования Тастина [19] в общем виде, относительно параметров T_p и Q . Для уменьшения требований к ресурсам ПЛК, разностное уравнение можно получить непосредственно из дифференциального уравнения в форме Коши для выражения (1)

$$\frac{d^2y}{dt^2} = b_1 \frac{dx}{dt} - a_0 y - a_1 \frac{dy}{dt}, \quad (3)$$

заменяв дифференцирование обычным отношением приращений функций выхода и входа за конечное время дискретизации фильтра. В результате получим из (3) пригодное для программирования фильтра выражение разностного уравнения

$$y_0 = (2y_1 - y_2) + b_1 t_d (x_0 - x_1) - a_0 t_d^2 y_1 - a_1 t_d (y_1 - y_2), \quad (4)$$

где t_d – время дискретизации фильтра, y_0, y_1, y_2 – текущее, прошлое и позапрошлые значения выхода, x_0, x_1 – текущее и прошлые значения входа.

На рис. 3 показаны переходные процессы сигналов на выходе узкополосных фильтров, построенных в виде функциональных блоков на базе выражения (4), где в качестве параметров приняты T_p и Q , вычисленные согласно (2).

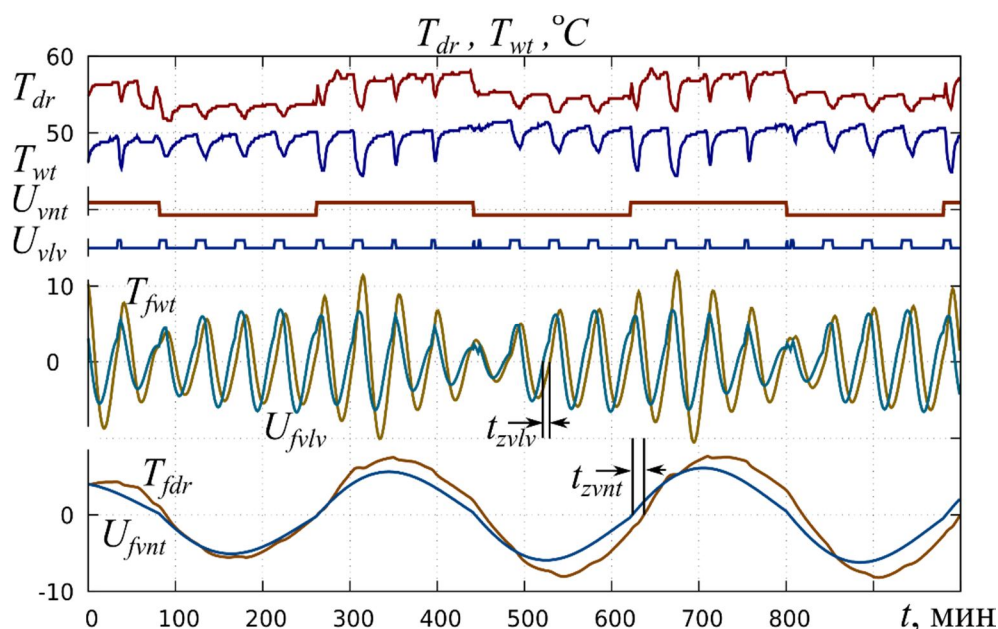


Рис. 3. Переходные процессы на выходе узкополосных фильтров

Fig. 3. Transients at the output of narrowband filters

Как видно из рис. 3 сигналы управления и температуры имеют весьма похожую спектральную составляющую на выходе фильтров при этом наблюдается чувствительное смещение по фазе, выраженное значениями ($t_{zvnt} \approx 15$ м) и ($t_{zvlt} \approx 9$ м). Это связано с инерционными свойствами объекта управления. Поскольку для синтеза алгоритма диагно-

стики достаточно учесть только эффект запаздывания в функциональный блок диагностики включены элементы имитации запаздывания в виде трёх апериодических звеньев 1-го порядка.

На рис. 4 представлен алгоритм реализации блока диагностики на языке непрерывных функциональных схем (CFC) стандарта ИЕС (МЭК)-61131-3 [20].

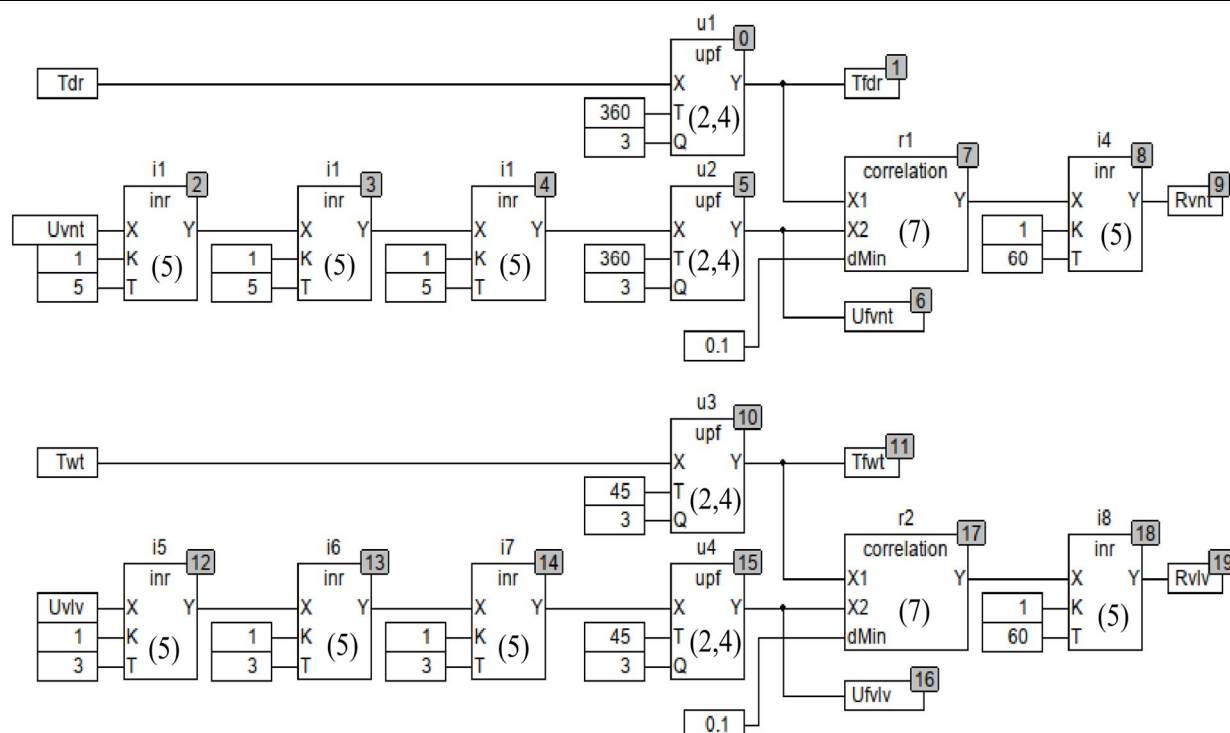


Рис. 4. Алгоритм блока диагностики на языке CFC

Fig. 4. The algorithm of the diagnostic block in the CFC language

Функциональные блоки узкополосных фильтров реализованы согласно выражениям (2) и (4). Апероодическое инерционное звено представлено разностным уравнением

$$y_0 = y_1 + \frac{t_d(kx - y_1)}{T_o}, \quad (5)$$

где k – коэффициент передачи звена, T_o – время инерции. На рис. 4 также присутствуют блоки вычисления нормированной корреляции сигнала управления и его отклика на значения датчиков температуры. Из классического выражения для вычисления корреляции

$$R(u_{upf}, T_{upf}) = \frac{\sum(u_{upf} T_{upf})}{\sqrt{\sum u_{upf}^2 \sum T_{upf}^2}} \quad (6)$$

принято решение вместо суммы по всей выборке использовать свойство аперии-

дического звена (5) усреднять значения за время выборки примерно равному времени инерции T_o . В выражении (6) u_{upf} и T_{upf} – значения выходов узкополосных фильтров для сигнала управления и температуры соответственно.

Элемент вычисления корреляции без усреднения представлен выражением

$$r_i(u_{upf}, T_{upf}) = \frac{u_{upf} T_{upf}}{\max(|u_{upf} T_{upf}|, \sigma)}, \quad (7)$$

где существует вероятность деления на ноль, которая исключается введением малого значения ($\sigma \approx 0,1$). С выхода элемента вычисления корреляции сигнал поступает на блок усреднения.

На рис. 5 представлены результаты работы блока диагностики в виде переходных процессов в штатном режиме работы камеры сушки.

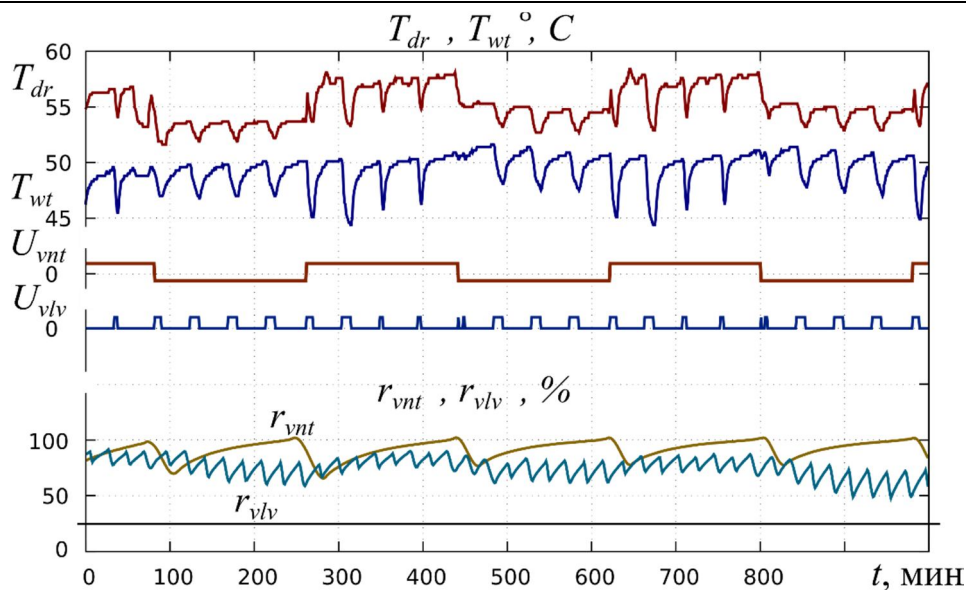


Рис. 5. Переходные процессы на выходах блоков корреляции

Fig. 5. Transients at the outputs of correlation blocks

Сигнал на выходе блока корреляции нормирован относительно единицы, и если принять критический уровень ($\approx 25\%$) корреляции спектра сигналов управления и температуры, то можно сравнивая с ним принять решение о работоспособности электроприводов по каналу управления вентиляцией (r_{vnt}) и положением заслонки (r_{vlv}).

Для тестирования блока диагностики использованы архивные значения сигналов в условиях, когда оператор использовал ручной режим управления. В этом случае блок диагностики должен определить факт несоответствия управления и поведения объекта. На рис. 6 показаны переходные процессы системы в нештатной ситуации.

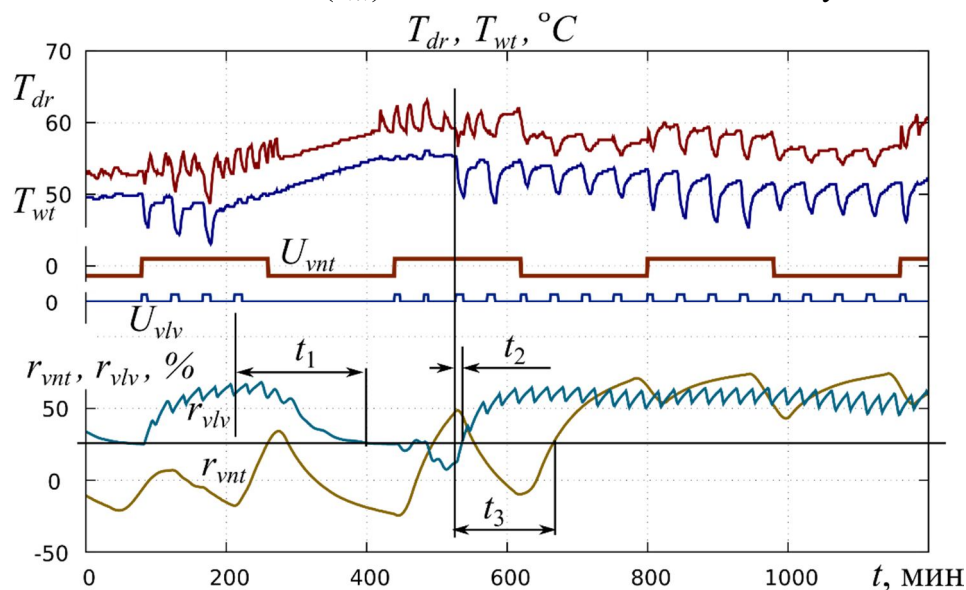


Рис. 6. Переходные процессы при нештатной ситуации

Fig. 6. Transients in an emergency situation

Как видно из рис. 6 выход блоков корреляции адекватно оценивает управляемость объекта и обнаруживает нештатную ситуацию, в самом худшем случае, в течение 80 минут для канала управления положением заслонки. Восстановление штатной ситуации обнаруживается в течение 5-8 минут для канала управления приводами заслонки и в течение 60 минут для канала управления вентиляцией.

Результаты и их обсуждение

Изучение и анализ переходных процессов датчиков температуры в камерах сушки позволяет увидеть и определить основные показатели корректности и качества технологического процесса. Опытный технолог может увидеть в этих переходных процессах работоспособность электроприводов, обобщённую влажность пиломатериала и другие показатели, позволяющие обойтись без дорогостоящих датчиков влажности, наличия потока воздуха. Чтобы формализовать все необходимые аналитические решения и выводы технолога в виде математического представления пригодного для реализации на ПЛК требуется решить достаточно сложную задачу синтеза алгоритма.

В статье решена одна из задач обнаружения нештатной ситуации в каналах управления электроприводами. Метод основан на использовании анализа переходных процессов температур су-

хого и влажного термометра в камере сушки пиломатериала. Решение представлено в виде алгоритма, разработанного на языке SFC, и может быть легко реализовано программистом на большинстве ПЛК, поддерживающие стандарт IEC (МЭК)-61131-3.

Время обнаружения нештатной ситуации может достигать до полутора часов, однако такое время вполне приемлемо если учитывать, что время всего технологического процесса составляет не менее 10 суток.

Выводы

Результаты работы могут быть полезны для разработчиков систем управления камерами сушки пиломатериалов, поскольку предложенный метод позволяет получать дополнительную диагностическую информацию о технологическом процессе, повышая надёжность системы управления в целом. Реализация на ПЛК всех аналитических решений позволяет получить все необходимые показатели процесса сушки.

В частности, решение задачи вычисления влажности пиломатериала из оценок равновесной влажности воздуха камеры при закрытых заслонках позволяет создавать достаточно надёжные и недорогие системы управления сушкой. Однако решение этой задачи выходит за рамки данной статьи и может быть рассмотрено в дальнейших работах.

Список литературы

1. Степка О. Г., Маковецкий Ф. А. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование процесса микроволновой сушки древесины // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. №. 4-2. С. 215-221. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45842964>
2. 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. № 120394. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120394>.
3. 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://elibrary.ru/item.asp?id=44694941>
4. Гороховский А. Г., Шишкина Е. Е. Синтез оптимальной по быстродействию системы управления сушкой пиломатериалов // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1 (49). С. 98-103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44831201>
5. Барахоев М. Н. Сравнительная характеристика способов сушки древесины и определение оптимального варианта среди них // Взгляд молодых исследователей: лесной комплекс, экономика и управление. Красноярск, 2019. С. 13-18. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41437883>
6. Савин А. М., Степанова П. А., Шевелева Е. В. Автоматизация процесса сушки пиломатериалов в вакуумных сушильных камерах // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. №. 5 (49). С. 126-129. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36702389>
7. Анализ влияния различных факторов на скорость осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки пиломатериалов / Ш.Р. Мухаметзянов, П.А. Кайнов, А.Х. Сафиуллина, П.М. Мазуркин. Воронеж, 2017. С. 8. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29214599>
8. Zheng Z., Keqi W. RBF based sliding mode control method for lumber drying system // Wood and fiber science. 2019. Vol. 51. No. 3. <https://doi.org/10.22382/wfs-2019-028>
9. 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>.
10. Максименко В. А., Евдокимов В. С., Калита В. С. Разработка метода низкотемпературной сушки древесины // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. 2020. С. 176-177. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42638236>

11. Максименко В. А., Евдокимов В. С., Ракша И. С. Опыт-экспериментальная камера для низкотемпературной сушки древесины // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. 2021. С. 88-89. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44809521>
12. Касимов Д. В., Заргарян Ю. А. Основные принципы работы систем регулирования температуры и влажности // Вестник молодёжной науки России. 2021. №. 2. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46710429>
13. Куракова П. С., Воропай Н. Н. Сравнение температуры воздуха по данным разных измерительных приборов // Двенадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатозоологическому мониторингу. Томск, 2017. С. 217-218. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30609906>
14. 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>
<https://elibrary.ru/item.asp?id=26460847>
15. 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. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01200-6>
16. Nasr M. R. et al. Experimental methods for detecting frosting in cross-flow air-to-air energy exchangers // Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. Т. 77. С. 100-115. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.04.009>
17. Shilin A. et al. IA method for measuring the amount of hoar frost formation in the recuperation channels of ventilation systems using the adjustable mathematical model of this process // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Т. 141. С. 01032. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201714101032>
18. Куликов Р. С., Царегородцев Д. В. Модифицированный алгоритм адаптивного фильтра // Электронные средства и системы управления. 2017. №. 1-1. С. 30-32. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30732318>
19. Хохловский В. Н. и др. Совершенствование процесса разработки программного обеспечения для ПЛК путем генерации кода из созданной математической модели объекта управления // Modern Science. 2020. №. 9-2. С. 347-359. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44003815>
20. Иванова В. Р., Иванов И. Ю., Киселев И. Н. Разработка автоматизированной системы управления с использованием языка программирования стандарта МЭК 61131-3 // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 6. С. 44-49. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44401104>

References

1. Stepka O. G., Makovetskii F. A. Komp'yuternoe modelirovanie i ehksperimental'noe issledovanie protsessa mikrovolnovoi sushki drevesiny [Computer modeling and experimental study of the process of microwave drying of wood]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire = Current scientific research in the modern world*, 2021, no. 4-2, pp. 215-221. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45842964>
2. Zohrabi S., Aghbashlo M., Seiedlou 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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120394>.
3. Rudak O. G., Korob A. Y. Issledovanie kharaktera izmeneniya vlazhnosti poverkhnostnykh i vnutrennikh sloev drevesiny sosny pri progreve v nenasyshchennoi srede [Investigation of the nature of changes in the humidity of the surface and inner layers of pine wood during heating in an unsaturated environment]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khozvo, prirodopol'zovanie i pererab. obnovlyaemykh resursov = Proceedings of BSTU. Ser. 1, Forest management, nature management and reworking. renewable resources*. 2021, no. 1 (240), pp. 162–168. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44694941>
4. Gorokhovskii A. G., Shishkina E. E. Sintez optimal'noi po bystrodeistviyu sistemy upravleniya sushkoi pilomaterialov [Synthesis of the optimal speed control system for drying lumber]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = System. Methods. Technologies*, 2021, no. 1 (49), pp. 98-103. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44831201>
5. Barakhoev M. N. [Comparative characteristics of wood drying methods and determination of the optimal option among them]. *Vzglyad molodykh issledovatelei: lesnoi kompleks, ekonomika i upravlenie [The view of young researchers: the forest complex, economics and management]*, Krasnoyarsk, 2019, pp. 13-18 (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41437883>
6. Savin A. M., Stepanova P. A., Sheveleva E. V. Avtomatizatsiya protsessa sushki pilomaterialov v vakuumnykh sushil'nykh kamerakh [Automation of the process of drying lumber in vacuum drying chambers]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika = Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2018, vol. 6, no. 5 (49), pp. 126-129. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36702389>
7. Mukhametzyanov S. R., Kainov P.A., Safiullina A.K., Mazurkin P.M. *Analiz vliyaniya razlichnykh faktorov na skorost' ostsilliruyushchei vakuumno-konduktivnoi sushki pilomaterialov* [Analysis of the influence of various factors on the speed of oscillating vacuum-conductive drying of lumber]. Voronezh, 2017, 8 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29214599>
8. Zheng Z., Keqi W. RBF based sliding mode control method for lumber drying system. *Wood and fiber science*, 2019, vol. 51, no. 3. <https://doi.org/10.22382/wfs-2019-028>

9. 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>.

10. Maksimenko V. A., Evdokimov V. S., Kalita V. S. Razrabotka metoda nizkotemperaturnoi sushki drevesiny [Development of a method of low-temperature drying of wood]. *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva = Equipment and technology of petrochemical and oil and gas production*, 2020, pp. 176-177. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42638236>.

11. Maksimenko V. A., Evdokimov V. S., Raksha I. S. Opytno-ekspperimental'naya kamera dlya nizkotemperaturnoi sushki drevesiny [Experimental chamber for low-temperature drying of wood]. *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva = Equipment and technology of petrochemical and oil and gas production*, 2021, pp. 88-89. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44809521>

12. Kasimov D. V., Zargaryan Yu. A. Osnovnye printsipy raboty sistem regulirovaniya temperatury i vlazhnosti [Basic principles of operation of temperature and humidity control systems]. *Vestnik molodezhnoi nauki Rossii = Bulletin of Youth Science of Russia*. 2021, no. 2. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46710429>

13. Kurakova P. S., Voropai N. N. [Comparison of air temperature according to different measuring instruments]. *Dvenadtsatoe Sibirskoe soveshchanie i shkola molodykh uchenykh po klimatoekologicheskemu monitoringu [The twelfth Siberian Meeting and the School of young scientists on climate and environmental monitoring]*. Tomsk, 2017, pp. 217-218 (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30609906>

14. Dmitriev V. M., Gandzha T.V., Gandzha V.V., Panov S.A. Komp'yuternoe modelirovanie vizual'nykh interfeisov virtual'nykh 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. <http://sv-journal.org/2016-3/09/?lang=ru> <https://elibrary.ru/item.asp?id=26460847>

15. 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. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01200-6>

16. Nasr M. R. et al. Experimental methods for detecting frosting in cross-flow air-to-air energy exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, vol. 77, pp. 100-115. doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.04.009

17. Shilin A. et al. IA method for measuring the amount of hoar frost formation in the recuperation channels of ventilation systems using the adjustable mathematical model of this process. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*, 2017, vol. 141, 01032 p. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201714101032>

18. Kulikov R. S., Tsaregorodtsev D. V. Modifitsirovannyi algoritm adaptivnogo fil'tra [Modified adaptive filter algorithm]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya = Electronic means and control systems*, 2017, no. 1-1, pp. 30-32. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30732318>

19. Khokhlovskii V. N. Sovershenstvovanie protsessa razrabotki programmno ob'especheniya dlya PLK putem generatsii koda iz sozdannoi matematicheskoi modeli ob'ekta upravleniya [Improving the software development process for PLC by generating code from the created mathematical model of the control object]. *Modern Science*, 2020, no. 9-2, pp. 347-359. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44003815>

20. Ivanova V. R., Ivanov I. YU., Kiselev I. N. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy upravleniya s ispol'zovaniem yazyka programmirovaniya standarta MEHK 61131-3 [Development of an automated control system using the programming language of the IEC 61131-3 standard]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy security and energy conservation*, 2020, no. 6, pp. 44-49. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44401104>

Информация об авторах / Information about the Authors

Прохоров Сергей Валерьевич, аспирант,
Томский политехнический университет,
г. Томск. Российская Федерация,
e-mail: sergei_prohorov@inbox.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

Sergey V. Prohorov, Post-Graduand Student,
Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russian Federation,
e-mail: sergei_prohorov@inbox.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

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>

Примочкин Илья Анатольевич, магистрант,
Томский политехнический университет,
г. Томск. Российская Федерация,
e-mail: primochkin2012@mail.ru

Ilya A. Primochkin, Master Student,
Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russian Federation,
e-mail: primochkin2012@mail.ru