

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 674.093:047

DOI: 10.53374/1993-0135-2025-2-70-76

Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. XLIII, № 2. С. 70–76

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РАСКРОЯ БРЁВЕН И СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

В. В. Огурцов, А. А. Орлов, Д. В. Дук

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: vogurtsov@mail.ru

Аннотация. Гармонизация функционирования поточных линий лесопильного и сушильного цехов является проблемой при создании и эксплуатации предприятий с массовой крупно-поточной технологией. В настоящее время она обостряется тем, что требование «вытеснить не более 8 сечений» практически не выполняется из-за большого количества мелких заказов, которые не поддаются группированию и унификации.

Для синхронизации процессов раскроя брёвен и сушки пиломатериалов система «накопитель штабелей – сушильные туннели» представлена как мультиканальная система массового обслуживания с ожиданием. Для её описания применён специальный вид разомкнутой марковской цепи «процессов гибели и размножения».

Используя размеченный граф состояний системы, получена матрица для марковских переходов, дифференциальные уравнения Колмогорова и выражения для основных операционных характеристик системы: вероятности полной загрузки сушильных туннелей (коэффициента полезного использования туннелей); ёмкости накопителя штабелей; времени ожидания штабелей в накопителе.

Ключевые слова: распиловка, пиломатериал, накопитель, туннель, синхронизация, сушка.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 70–76

IDENTIFICATION OF THE PROBLEM OF SYNCHRONIZATION OF LOG CUTTING AND SAWN TIMBER DRYING PROCESSES

V. V. Ogurtsov, A. A. Orlov, D. V. Duk

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: vogurtsov@mail.ru

Annotation. Harmonization of the flow lines of sawmills and drying shops is a problem in the foundation and operation of enterprises with large-scale mass flow technology. At present, it is aggravated by the fact that the requirement to “cut no more than 8 sections” is practically not met due to a large number of small orders that cannot be grouped and unified.

To synchronize the processes of cutting logs and drying lumber, the “stack accumulator – drying tunnels” system is presented as a multi-channel mass service system with waiting. A special type of open Markov chain of “death and reproduction processes” is used to describe it.

Using the marked graph of system states, a matrix for Markov transitions, Kolmogorov differential equations and expressions for the main operational characteristics of the system are obtained: the probability of full loading of drying tunnels (the efficiency of tunnels); the capacity of the stack accumulator; the waiting time of stacks in the accumulator.

Keywords: sawing, lumber, storage unit, tunnel, synchronization, drying.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее остро проблема гармонизации функционирования отдельных поточных линий, образующих единый производственный процесс лесопиления, стоит при создании и эксплуатации предприятий с массовой крупно-поточной технологией [1–4]. Её реше-

ние обеспечивается введением участков накопления партий запуска (межлинейных запасов) обрабатываемых материалов (рис. 1).

Традиционно считается, что гармонизация производственного процесса лесопиления в основном обеспечивается оптимизацией партии запуска пиломате-

риалов перед участком окончательной обработкой пиломатериалов после сушки. Для эффективной работы этого участка настраиваются соответствующим образом все предшествующие цеха и участки, начиная от участка подготовки пиловочника к раскрою и заканчивая операцией окончательной обработки сухих пиломатериалов. Оптимизируется дробность сортировки брёвен по толщине [3; 4; 14–17], количество сечений пиломатериалов в поставе [2], а также градация длин досок [1; 3]. В частности, рекомендуется выпиливать в рамках технологического периода не более 8 сечений [3]. При этом считается, что вопросы формирования партии запуска штабелей пиломатериалов перед камерной сушкой не требуют специального рассмотрения, так как они автоматически решаются при реализации мероприятий по минимизации партии запуска перед линией окончательной обработкой пиломатериалов

после сушки. Это объясняется тем, что в сушильный штабель помещают доски разных ширин, снижая в 3–5 раз количество сорторазмеров пиломатериалов, напрямую влияющих на объём партии запуска штабелей перед камерной сушкой. Учитывая это и минимизируя затраты на производства и эксплуатацию цеха сушки пиломатериалов, перед камерами непрерывного действия (туннелями), как правило, предусматривают участок накопления штабелей, ёмкость которого достигает суммарной ёмкости всех туннелей. Предполагается, что буферный задел штабелей такой ёмкости обеспечивает бесперебойную работу сушильных туннелей при выполнении условий выработки не более 8 сечений пиломатериалов в течение технологического периода. На рис. 2 представлена структура цеха камерной сушки пиломатериалов крупно-поточного лесопильного производства [3; 5].

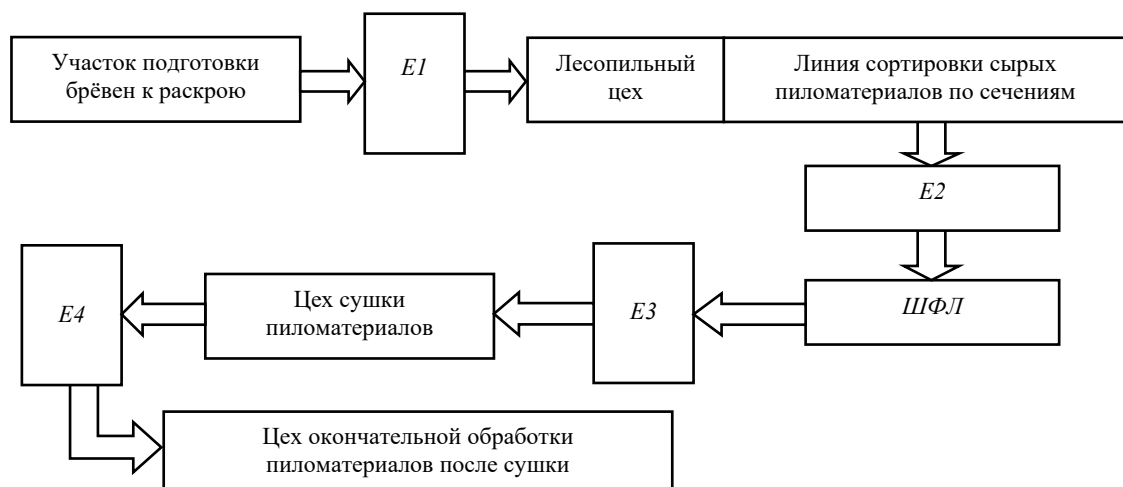


Рис. 1. Схема размещения межлинейных запасов:

E1 – партия запуска брёвен; *E2* – партия запуска пакетов (пачек) пиломатериалов перед штабелеформирующей линией (*ШФЛ*); *E3* – партия запуска штабелей (накопитель штабелей) перед камерной сушкой; *E4* – партия запуска пиломатериалов перед окончательной обработкой пиломатериалов

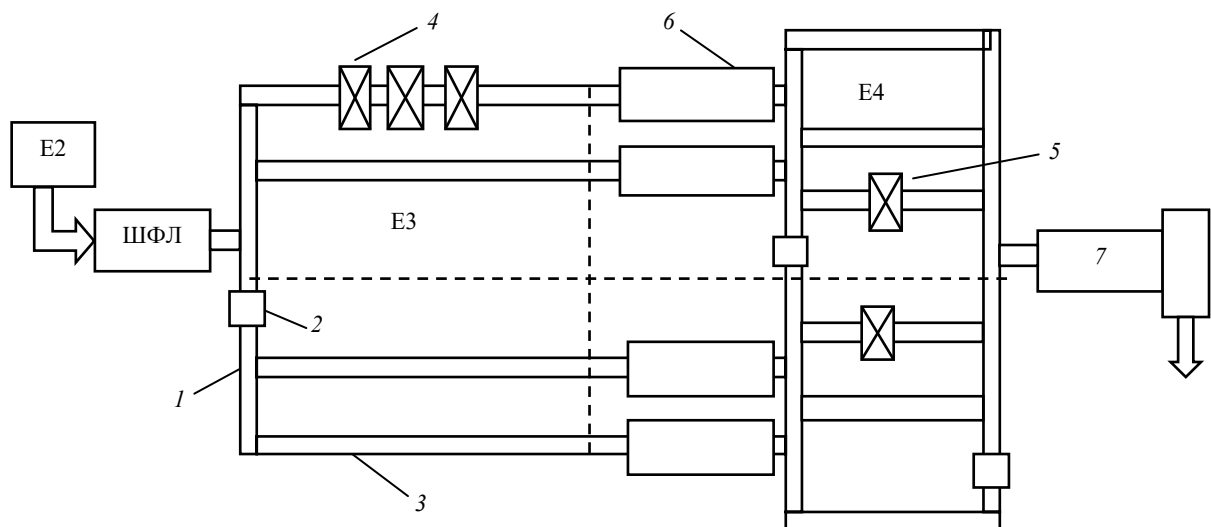


Рис. 2. Структура цеха камерной сушки пиломатериалов:

1 – траверсный путь; 2 – траверсная тележка; 3 – рельсовый путь перед туннелем; 4 – штабеля сырых пиломатериалов; 5 – штабеля сухих пиломатериалов; 6 – сушильные камеры непрерывного действия (туннели); 7 – цех окончательной обработки пиломатериалов после сушки

В настоящее время на крупно-поточных предприятиях практически не выполняется требование «выпиливать не более 8 сечений» из-за большого количества мелких заказов со специфическими сечениями пиломатериалов, которые не поддаются группированию и унификации. Встаёт вопрос ёмкости буферного накопителя штабелей для обеспечения оптимального функционирования сушильных туннелей при реально существующем количестве сечений пиломатериалов и закономерностях их поступления из лесопильного цеха. Для ответа на этот вопрос необходимо иметь общие закономерности: накопления штабелей пиломатериалов перед сушильными туннелями; полной загрузки туннелей штабелями; времени ожидания штабелей в накопителе при различных характеристиках процессов распиловки брёвен и сушки пиломатериалов.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим задачу определения ёмкости буферного накопителя перед блоком сушильных туннелей как типовую задачу теории массового обслуживания [7]. Воспользуемся унифицированной терминологией и обозначениями, общепринятыми в теории массового обслуживания и называемыми обозначениями Кендалла [8].

В качестве обслуживающей системы принимаем часть буферного накопителя штабелей $EЗ$ и сушильные туннели, выделенные для пиломатериалов данной толщины. Дисциплина очереди (порядок выбора штабелей из очереди) – случайная. Механизм обслуживания – мультиканальный с параллельным функционированием c туннелей (каналов) и единичный, так как в туннель загружаются штабеля «по одному».

Интервал времени, через который штабелеформирующая линия ($ШФЛ$) выдаёт очередной штабель, является случайной величиной, а входной поток штабелей на буферный накопитель является пуассоновским [6–10] (стационарным, ординарным и не обладающим памятью), поскольку $ШФЛ$ выдаёт по одному штабелю и процесс формирования очередного штабеля не зависит от «шкалы времени». Такие процессы называют марковскими цепями (М-процессами) [6; 7; 13], так как будущее состояние системы «буферный накопитель – сушильные туннели» зависит от настоящего состояния системы и не зависит от предыдущего. Плотность распределения времени t между любой парой смежных поступлений штабелей для такого потока описывается экспоненциальным законом [6–8]:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1)$$

со средним значением $1/\lambda$ и дисперсией $1/\lambda^2$; где λ – среднее число штабелей, поступающих в систему в сутки; $1/\lambda$ – среднее значение времени между поступлениями штабелей.

С позиций функционирования рассматриваемой обслуживающей системы имеет принципиальное значение состояние только загрузочной части туннеля, а именно, свободна или занята первая позиция туннеля. То есть, для системы массового обслуживания состояние туннеля, когда занята только первая позиция туннеля и состояние, когда заняты все его позиции – эквивалентны. Обязательной характеристикой функционирования системы является средняя интенсивность μ , с которой освобождается первая позиция туннеля. Следует отметить, что в стационарном режиме среднее число штабелей, прошедших через первую позицию одного туннеля в сутки, равно среднему числу выгруженных штабелей сухих пиломатериалов за сутки из этого туннеля. Поэтому можно считать, что μ является средней интенсивностью сушки пиломатериалов. Процессы такого рода называются процессами чистой гибели [7].

Процесс продвижения штабелей через туннели также считается пуассоновским, а плотность распределения времени t нахождения штабелей на первых позициях туннелей также имеет экспоненциальный вид:

$$l(t) = \mu e^{-\mu t}, \quad (2)$$

где μ – среднее число штабелей, прошедших через первую позицию одного туннеля в сутки.

Коэффициент загрузки первой позиции туннеля (трафик интенсивности) определяется выражением:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (3)$$

Таким образом, рассматриваемый процесс массового обслуживания описывается типовой моделью $M/M/S$, где первый символ M обозначает экспоненциальное распределение интервалов времени между моментами поступления штабелей в буферный накопитель $EЗ$, а второй символ M – экспоненциальное распределение интервалов времени между моментами их загрузки в сушильные туннели.

Для описания причинно-следственных связей состояний системы «накопитель штабелей – сушильные туннели» воспользуемся специальным видом разомкнутой марковской цепи, который применяется в теории массового обслуживания для «процессов гибели и размножения» [10–12]. Размеченный (с указанием интенсивностей переходов) граф состояний системы представлен на рис. 3.

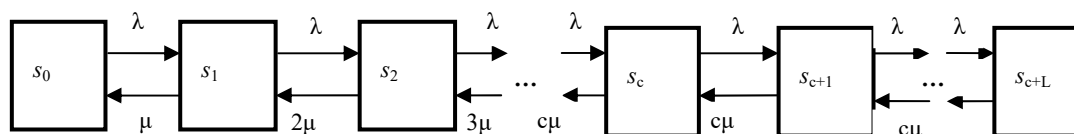


Рис. 3. Граф состояний системы:

S_0 – все туннели свободны для загрузки штабелей; S_1 – занят один туннель; S_2 – занято два туннеля; ... S_c – заняты все c туннелей и нет очереди в накопителе; S_{c+1} – заняты c туннелей и один штабель находится в накопителе; S_{c+L} – заняты c туннелей и L штабелей – в накопителе

Из рис. 3 видно, что средняя интенсивность λ поступления штабелей в систему не зависит от состояния системы, а средняя интенсивность μ освобождения туннелей для загрузки возрастает между состояниями $S_0, S_1, S_2, \dots, S_c$ от μ до $c\mu$, а затем не меняется, так как μ пропорциональна количеству занятых туннелей.

Используя размеченный граф состояний системы, получаем матрицу Λ для марковских переходов, опи-

сывающих поведение системы в моменты времени, разделённые интервалом $1/\mu$. При формировании данной матрицы учитывается, что сумма элементов каждой строки равна нулю. Это свойство [7] используется для определения диагональных элементов матрицы. Для упрощения и наглядности примем, что количество туннелей $c = 4$.

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -\lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu & -(\lambda+\mu) & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu & -(\lambda+2\mu) & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\mu & -(\lambda+3\mu) & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\mu & -(\lambda+4\mu) & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4\mu & -(\lambda+4\mu) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4\mu & -(\lambda+4\mu) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4\mu \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\bar{P} = \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_c \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\bar{P}_1 = {}_{\Lambda} \bar{P} \quad (6)$$

где $\bar{P}_1$ – система дифференциальных уравнений Колмогорова; P_0 – вероятность того, что в системе нет штабелей (во всех c туннелях есть свободные для загрузки места); P_1 – вероятность того, что один туннель занят штабелями; P_2 – вероятность того, что два туннеля заняты штабелями; P_c – вероятность того, что все c туннелей заняты штабелями; P_n – вероятность того, что в системе находятся n штабелей.

Тогда систему уравнений Колмогорова имеет вид [7]:

$$\begin{aligned} dP_0 / dt &= -\lambda P_0 + \mu P_1, \\ dP_1 / dt &= \lambda P_0 - (\lambda + \mu) P_1 + 2\mu P_2, \\ dP_2 / dt &= \lambda P_1 - (\lambda + 2\mu) P_2 + 3\mu P_3, \\ dP_3 / dt &= \lambda P_2 - (\lambda + 3\mu) P_3 + 4\mu P_4, \\ dP_4 / dt &= \lambda P_3 - (\lambda + 4\mu) P_4 + 4\mu P_5, \\ dP_5 / dt &= \lambda P_4 - (\lambda + 4\mu) P_5 + 4\mu P_6, \\ dP_6 / dt &= \lambda P_5 - (\lambda + 4\mu) P_6 + 4\mu P_7. \end{aligned} \quad (7)$$

Обобщая дифференциальные уравнения, получаем:

$$\begin{aligned} dP_n / dt &= \lambda P_{n-1} - (\lambda + n\mu) P_n + (n+1)\mu P_{n+1} \text{ при } n < C, \\ dP_n / dt &= \lambda P_{n-1} - (\lambda + c\mu) P_n + c\mu P_{n+1} \text{ при } n \geq C. \end{aligned} \quad (8)$$

Так как все состояния рассматриваемой системы существенные (в каждую можно вернуться) и сообщающиеся (соединены разнонаправленными ориентированными рёбрами), то состояния марковской цепи являются предельными (финальными). Для нахождения предельных вероятностей, соответствующих стационарному режиму функционирования системы, положим $dP_i/dt = 0, i = \overline{1, n}$. В результате получим систему алгебраических уравнений с бесконечным множеством решений [7]:

$$\begin{aligned} -\lambda P_0 + \mu P_1 &= 0, \\ \lambda P_0 - (\lambda + \mu) P_1 + 2\mu P_2 &= 0, \\ \lambda P_1 - (\lambda + 2\mu) P_2 + 3\mu P_3 &= 0, \\ \lambda P_2 - (\lambda + 3\mu) P_3 + 4\mu P_4 &= 0, \\ \lambda P_3 - (\lambda + 4\mu) P_4 + 4\mu P_5 &= 0, \\ \lambda P_4 - (\lambda + 4\mu) P_5 + 4\mu P_6 &= 0, \\ \lambda P_5 - (\lambda + 4\mu) P_6 + 4\mu P_7 &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Для преодоления неопределённости в выборе решений полученной системы уравнений используется условие [7]:

$$\sum_{i=0}^{\infty} P_i = 1. \quad (10)$$

Из выражений (9) находим:

$$P_1 = \frac{\lambda}{\mu} P_0. \quad (11)$$

Видим, что вероятность состояния системы S_1 получается из вероятности предыдущего состояния S_0 путём умножения на интенсивность входного потока λ и деления на интенсивность μ освобождения туннеля. Тогда, применяя метод математической индукции [7] и учитывая, что интенсивность освобождения мест в туннелях возрастает от μ до 4μ , а затем не изменяется, получаем:

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{\lambda}{2\mu} P_1 = \frac{\lambda}{2\mu} \frac{\lambda}{\mu} P_0, \\ P_3 &= \frac{\lambda}{3\mu} P_2 = \frac{\lambda}{3\mu} \frac{\lambda}{2\mu} \frac{\lambda}{\mu} P_0, \end{aligned}$$

$$P_4 = \frac{\lambda}{4\mu} P_3 = \frac{\lambda}{4\mu} \frac{\lambda}{3\mu} \frac{\lambda}{2\mu} \frac{\lambda}{\mu} P_0,$$

$$P_5 = \frac{\lambda}{4\mu} P_4 = \frac{\lambda}{4\mu} \frac{\lambda}{4\mu} \frac{\lambda}{3\mu} \frac{\lambda}{2\mu} \frac{\lambda}{\mu} P_0,$$

$$P_6 = \frac{\lambda}{4\mu} \frac{\lambda}{4\mu} \frac{\lambda}{4\mu} \frac{\lambda}{3\mu} \frac{\lambda}{2\mu} \frac{\lambda}{\mu} P_0. \quad (12)$$

Учитывая, что $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, получаем:

$$P_1 = \frac{\rho}{1!} P_0, \quad P_2 = \frac{\rho^2}{2!} P_0, \quad P_3 = \frac{\rho^3}{3!} P_0,$$

$$P_4 = \frac{\rho^4}{4!} P_0, \quad P_5 = \frac{\rho^5}{4!*4} P_0,$$

$$P_6 = \frac{\rho^6}{4!*4*4} P_0, \quad P_7 = \frac{\rho^7}{4!*4*4*4} P_0. \quad (13)$$

Из выражения (10) следует, что $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + \dots = 1$, тогда

$$\begin{aligned} P_0 + \frac{\rho}{1!} P_0 + \frac{\rho^2}{2!} P_0 + \frac{\rho^3}{3!} P_0 + \frac{\rho^4}{4!} P_0 + \frac{\rho^5}{4!*4} P_0 + \\ + \frac{\rho^6}{4!*4*4} P_0 + \frac{\rho^7}{4!*4*4*4} P_0 + \dots = 1, \\ P_0 \left(1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \frac{\rho^4}{4!} + \frac{\rho^5}{4!*4} + \frac{\rho^6}{4!*4^2} + \frac{\rho^7}{4!*4^3} + \dots \right) = 1, \\ P_0 = \left(1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \frac{\rho^4}{4!} + \left(1 + \frac{\rho}{4} + \frac{\rho^2}{4^2} + \frac{\rho^3}{4^3} + \dots \right) \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

Нетрудно видеть, что выражение в скобке является геометрической прогрессией со знаменателем $\frac{\rho}{4} < 1$.

Поэтому справедливо равенство:

$$1 + \frac{\rho}{4} + \frac{\rho^2}{4^2} + \frac{\rho^3}{4^3} + \dots = \frac{1}{1 - \frac{\rho}{4}}. \quad (15)$$

Обобщая полученные результаты и переходя от конкретных четырёх туннелей к любому их количеству (c), получаем выражения для вероятностей состояний системы «накопитель штабелей – сушильные туннели»:

$$P_n = \frac{\rho^n}{n!} P_0 \text{ при } c > n > 0,$$

$$P_n = \frac{\rho^n}{C! C^{n-C}} P_0 \text{ при } n \geq c,$$

$$P_0 = \left(\sum_{j=0}^{c-1} \frac{\rho^j}{j!} + \frac{\rho^c}{C! \left(1 - \frac{\rho}{C} \right)} \right)^{-1}. \quad (16)$$

Полученные выражения соответствуют типовым [7–10] выражениям. Это подтверждает то, что рассматриваемая система относится к мультиканальным системам массового обслуживания с параллельным функционированием c каналов и ожиданием [6].

Имея выражение для P_0 , находим с помощью алгебраических действий [7] важнейшие операционные характеристики для рассматриваемой системы массового обслуживания:

$$P_{пз} = \frac{\rho^c}{C! \left(1 - \frac{\rho}{C}\right)} P_0, \quad (17)$$

$$L_q = \frac{\rho^{c+1}}{(C-1)!(C-\rho)^2} P_0, \quad (18)$$

$$L_q = P_{пз} \frac{\rho}{c-\rho}, \quad (19)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}, \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{Q_{сут}^{пм} \Delta_{тол}^j}{K_{тол}^j H_{шт} B_{шт} L_{шт} K_{шт}^j}, \quad (21)$$

$$\mu = \frac{24E_{тон}}{\tau_{суш}^j}, \quad (22)$$

где $P_{пз}$ – вероятность полной загрузки туннелей; L_q – среднее количество штабелей в накопителе; W_q – среднее время нахождения штабеля в накопителе, сутки; $Q_{сут}^{пм}$ – объём пиломатериалов, м³ в сутки; $\Delta_{тол}^j$ – доля пиломатериалов J -й группы толщин: тонких ($j = 1$) или толстых ($j = 2$); $K_{тол}^j$ – количество толщин J -й группы толщин; $H_{шт} B_{шт} L_{шт}$ – габаритные размеры сушильного штабеля, м; $K_{шт}^j$ – коэффициент объёмного заполнения штабеля пиломатериалами j -й толщины; $E_{тон}$ – ёмкость туннеля, количество штабелей; $\tau_{суш}^j$ – время сушки пиломатериалов j -й толщины, час.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Гармонизация функционирования поточных линий лесопильного и сушильного цехов является проблемой при создании и эксплуатации предприятий с массовой крупно-поточной технологией.

2. При синхронизации процессов раскря брёвен и сушки пиломатериалов система «накопитель штабелей – сушильные туннели» представлена как мультиканальная система массового обслуживания с ожиданием.

3. Для описания системы «накопитель штабелей – сушильные туннели» применён специальный вид разомкнутой марковской цепи для «процессов гибели и размножения».

4. Используя размеченный граф состояний системы, получена матрица для марковских переходов, дифференциальные уравнения Колмогорова и выражения для основных операционных характеристик системы: вероятности полной загрузки сушильных туннелей (коэффициента полезного использования туннелей); ёмкости накопителя штабелей; времени ожидания штабелей в накопителе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Турушев В. Г. Технологические основы автоматизированного производства пиломатериалов. М. : Лесная пром-сть, 1975. 208 с.
2. Калитеевский Р. Е. Технология лесопиления. М. : Лесная пром-сть, 1986. 264 с.
3. Калитеевский Р. Е. Лесопиление в 21 веке. Технология, оборудование, менеджмент. 2-е изд., испр. и доп. СПб. : ПрофиКС, 2008. 496 с.
4. Огурцов В. В. Теория брусо-развальной распиловки брёвен : монография. Красноярск : СибГТУ, 2013. 233 с.
5. Калитеевский Р. Е., Артеменко А. М., Тамби А. А. Информационные технологии в лесопилении. СПб. : Профи, 2010. 191 с.
6. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т. 3. М. : Мир, 1973. 501 с.
7. Таха Х. Введение в исследование операций. Т. 2. М. : Мир, 1985. 496 с.
8. Трухан А. А., Кудряшев Г. С. Теория вероятностей в инженерных приложениях. Иркутск : «ООО Форвард», 2009. 364 с.
9. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М. : Машиностроение, 1979. 432 с.
10. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. М. : Наука, 1988. 480 с.
11. Новиков Д. А. Сетевые структуры и организационные системы. М. : ИПУ РАН, 2003. 102 с.
12. Оре О. Теория графов. М. : Наука, 1968. 352 с.
13. Введение в общие цепи Маркова : учеб.-метод. пособие / А. В. Зорин, В. А. Зорин, Е. В. Пройдакова, М. А. Федоткин. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2013. 51 с.
14. Огурцов В. В., Каргина Е. В., Матвеева И. С. Двухкритериальная математическая модель оптимизации дробности сортировки брёвен по толщине // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. XLII, № 4. С. 89–94.
15. Makkonen M. Renewing the sawmill industry: studies on innovation, customer value and digitalization. Academic Dissertation. Helsinki, Finland, University of Helsinki, 2019. 65 p.
16. Johansson J. Mechanical processing for improved products made from Swedish hardwood // Acta Wexionensia 2008. Vol. 157. P. 58.
17. Chang S. J., Gazo R. Measuring the Effect of Internal Log Defect Scanning on the Value of Lumber Produced // Forest Products Journal. 2009. 59 (11-12). P. 56–59. DOI: 10.13073/0015-7473-59.11.56.

REFERENCES

1. Turushev V. G. Tekhnologicheskie osnovy avtomatizirovannogo proizvodstva pilomaterialov. M. : Lesnaya promyshlennost', 1975. 208 s.
2. Kaliteevskij R. E. Tekhnologiya lesopileniya. M. : Lesnaya promyshlennost', 1986. – 264 s.
3. Kaliteevskij R. E. Lesopilenie v 21 veke. Tekhnologiya, oborudovanie, menedzhment. Izdanie vtoroe, ispravlennoe i dopolnennoe. SPb. : ProfiKS, 2008. 496 s.

4. Ogurcov V. V. Teoriya bruso-razval'noj raspilovki bryoven: monografiya. Krasnoyarsk : SibGTU, 2013. 233 s.

5. Informacionnye tekhnologii v lesopilenii / R. E. Kaliteevskij, A. M. Artemenko, A. A. Tambi. Sankt-Peterburg : Profi, 2010. 191 s.

6. Vagner G. Osnovy issledovaniya operacij. T. 3. M. : Mir, 1973. 501 s.

7. Taha H. Vvedenie v issledovanie operacij. T. 2. M. : Mir, 1985. 496 s.

8. Truhan A. A., Kudryashev G. S. Teoriya veroyatnostej v inzhenernyh prilozheniyah. Irkutsk : "ООО Forvard", 2009. 364 s.

9. Klejnrok L. Teoriya massovogo obsluzhivaniya. M. : Mashinostroenie, 1979. 432 s.

10. Ventcel'E. S., Ovcharov L. A. Teoriya veroyatnostej i eyo inzhenernye prilozheniya. M. : Nauka, 1988. 480 s.

11. Novikov D. A. Setevye struktury i organizacionnye sistemy. M. : IPU RAN, 2003. 102 s.

12. Ore O. Teoriya grafov. M. : Nauka, 1968. 352 s.

13. Vvedenie v obshchie cepi Markova : uchebno-metodicheskoe posobie / A. V. Zorin, V. A. Zorin, E. V. Projdakova, M. A. Fedotkin. Nizhnij Novgorod : Nizhegorodskij gosuniversitet, 2013. 51 s.

14. Ogurcov V. V., Kargina E. V., Matveeva I. S. Dvuhkriterial'naya matematicheskaya model' optimizacii drobnosti sortirovki bryoven po tolshchine // Hvojnye boreal'noj zony. 2024. T. XLII, № 4. S. 89–94.

15. Makkonen M. Renewing the sawmill industry: studies on innovation, customer value and digitalization. Academic Dissertation. Helsinki, Finland, University of Helsinki, 2019. 65 p.

16. Johansson J. Mechanical processing for improved products made from Swedish hardwood // Acta Wexionensia 2008. Vol. 157. P. 58.

17. Chang S. J., Gazo R. Measuring the Effect of Internal Log Defect Scanning on the Value of Lumber Produced // Forest Products Journal. 2009. 59 (11-12). P. 56–59. DOI: 10.13073/0015-7473-59.11.56.

© Огурцов В. В., Орлов А. А., Дук Д. В., 2025

Поступила в редакцию 20.02.2025
Принята к печати 25.04.2025