

УДК 621.311

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.121

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЖИМА РАБОТЫ ЛЕСОПИЛЬНЫХ РАМ

С.П. Агеев¹, д-р техн. наук, проф.; Publons: 1758124/sergey-ageev, ORCID: 0000-0003-0362-6722

А.Н. Минаев², д-р техн. наук, проф.

С.И. Рощина³, д-р техн. наук, проф.

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005;

e-mail: doctor.mart11@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, просп. Институтский, д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: stl@spbtu.ru

³Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, ул. Горького, д. 87, г. Владимир, Россия, 600000;

e-mail: rsi3@mail.ru

Характер процессов деревообработки в значительной мере подвержен влиянию различных случайных факторов. С математической точки зрения эти процессы следует рассматривать как один из случайных видов. Наиболее энергоемким является лесопиление. В нем лесопильная рама и околорамное оборудование составляют отдельный участок, который формирует характер потребления электроэнергии как поточной линией, так и цехом в целом. Поэтому вопросы повышения энергоэффективности деревообрабатывающего производства могут быть решены только путем совместного рассмотрения технологических и энергетических показателей процесса распиловки древесины. Цель исследования – теоретико-вероятностный анализ взаимосвязей показателей работы лесопильных рам, а также нахождение законов распределения и численных характеристик этих показателей как случайных величин при распиловке сортировочной партии бревен. В качестве математической модели работы механизма резания лесопильной рамы использована система массового обслуживания. Применение теории вероятностей позволило установить плотность распределения и числовые характеристики эффективного времени, среднечасовой производительности по распилу сырья, среднечасовой потребляемой мощности, потерь электроэнергии в сети, абсолютного и удельного расходов электроэнергии во взаимосвязи с геометрическими характеристиками сырья и параметрами режима работы лесопильных рам. Показатели потребления электроэнергии носят вероятностный характер и распределены по закону, отличному от нормального. Для упрощения процедуры анализа плотность распределения параметров была аппроксимирована плотностью закона Гаусса. При этом ошибка аппроксимации составила не более 1,71 %. Предложены формулы для расчета характеристик технологических и энергетических показателей работы лесопильных рам.

Для цитирования: Агеев С.П., Минаев А.Н., Рощина С.И. Вероятностный анализ взаимосвязей показателей режима работы лесопильных рам // Лесн. журн. 2019. № 3. С. 121–131. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.121

Ключевые слова: лесопильная рама, сортировочная партия бревен, потребляемая мощность, расход электроэнергии, потери электроэнергии, распределение вероятностей, характеристики распиливаемого сырья.

Введение

Потребление электроэнергии отдельно взятым механизмом зависит от характера технологической операции, выполняемой им. Лесопильное производство – один из видов процесса деревообработки. При этом затраты электр-

троэнергии на выпуск единицы пилопродукции могут быть необоснованно завышены, а иногда существенно отличаются от нормированных значений. При планировании электропотребления не учитываются взаимосвязи между технологическими показателями производства и удельным потреблением электроэнергии. В этом случае задача повышения энергетической эффективности деревообрабатывающего производства может быть решена при совместном рассмотрении технологической и энергетической составляющих процесса. Вопросам повышения энергоэффективности промышленных предприятий посвящен ряд работ [5, 8, 11–13, 16].

Объекты и методы исследования

Автором работы [1] была рассмотрена математическая модель лесопильной рамы как однофазной системы массового обслуживания (СМО). Время, затрачиваемое на обслуживание одной заявки (распиловку одного бревна), является непрерывной случайной величиной, распределенной по закону Эрланга. Распиловка отдельных бревен рассматривается как случайный марковский процесс, состоящий из последовательных этапов.

Решению этих задач посвящен также ряд работ зарубежных исследователей, в частности [17–20 и др.], в которых используются различные подходы.

В настоящей статье проанализированы взаимосвязи показателей режима работы лесопильных рам (ЛР), а также определены законы распределения и числовые характеристики этих показателей как случайных величин при распиловке сортировочной партии бревен. Для целей планирования и нормирования электропотребления к числу таких показателей следует отнести:

- эффективное время распиловки T_3 сортировочной партии бревен;
- среднечасовую производительность A_3 по распилу сырья;
- среднечасовую потребляемую мощность P_3 ;
- электроэнергию W_3 , потребляемую двигателем механизма резания ЛР;
- потери электроэнергии ΔW_3 в сети;
- удельный расход электроэнергии d_3 .

Результаты исследования и их обсуждение

Определим закон распределения вероятностей T_3 . Тогда длительность распиловки всей группы, состоящей из n бревен:

$$T_3 = \tau_{31} + \tau_{32} + \dots + \tau_{3n},$$

где $\tau_{31}, \tau_{32}, \dots, \tau_{3n}$ – эффективное время цикла распиловки 1-го, 2-го и n -го бревен.

Процесс распиловки группы бревен не является марковским, поскольку продолжительность распиловки каждого бревна τ_3 распределена по закону Эрланга k -го порядка [1]:

$$f_k(\tau_3) = \frac{\lambda(\lambda\tau_3)^{k-1}e^{-\lambda\tau_3}}{(k-1)!} \quad (\tau_3 > 0; k = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

где λ – параметр закона Эрланга.

Характеристическая функция случайной величины τ_3 определяется по выражению [6]:

$$\vartheta_{\tau_3} = \left(\frac{\lambda}{\lambda - j\nu} \right)^k,$$

где j – мнимая единица, $j = \sqrt{-1}$; ν – параметр характеристической функции.

С другой стороны, распиловку бревен сортировочной партии можно рассматривать как последовательное выполнение kn стадий. Тогда рассматриваемый процесс будет марковским. В этом случае характеристическая функция процесса распиловки как случайного процесса будет равна произведению отдельных характеристических функций слагаемых:

$$\vartheta_{T_3} = \left(\frac{\lambda}{\lambda - j\nu} \right)^{kn}.$$

Выполнив над характеристической функцией ϑ_{T_3} преобразование Лапласа, найдем плотность распределения эффективного времени T_3 распиловки партии бревен:

$$f(t_3) = \lambda \frac{(\lambda t_3)^{kn-1}}{(kn-1)!} e^{-\lambda t_3}. \quad (2)$$

Воспользовавшись формулой (2), определим математическое ожидание времени эффективной работы ЛР при распиловке одной сортировочной партии бревен:

$$MT_3 = \int_0^{\infty} t_3 f(t_3) dt_3 = \frac{\lambda^{kn}}{(kn-1)!} \int_0^{\infty} t_3^{kn} e^{-\lambda t_3} dt_3.$$

Вычислив интеграл методом интегрирования по частям [9], получим

$$MT_3 = \frac{\lambda^{kn}}{(kn-1)!} \frac{(kn)!}{\lambda^{kn+1}} = \frac{kn}{\lambda} = n\bar{\tau}_3, \quad (3)$$

где $\bar{\tau}_3$ – среднее время распиловки одного бревна (эффективное время цикла), $\bar{\tau}_3 = k/\lambda$ [2].

Дисперсия времени эффективной работы

$$\begin{aligned} DT_3 &= \int_0^{\infty} (t_3 - MT_3)^2 f(t_3) dt_3 = \int_0^{\infty} t_3^2 f(t_3) dt_3 - (MT_3)^2 = \\ &= \frac{\lambda^{kn}}{(kn-1)!} \int_0^{\infty} t_3^{kn+1} e^{-\lambda t_3} dt_3 - \left(\frac{kn}{\lambda} \right)^2, \end{aligned}$$

или

$$DT_3 = \frac{\lambda^{kn}}{(kn-1)!} \frac{(kn+1)!}{\lambda^{kn+2}} - \left(\frac{kn}{\lambda} \right)^2 = \frac{kn}{\lambda^2} = nD\tau_3, \quad (4)$$

где $D\tau_3$ – дисперсия времени распиловки одного бревна [1], $D\tau_3 = k/\lambda^2$.

В работе [4] были получены формулы для определения параметров закона Эрланга:

$$\lambda = u \frac{ML}{DL}; \quad k = \frac{(ML)^2}{DL}, \quad (5)$$

где L – длина бревна.

Из (5) следует, что параметры закона Эрланга, согласно которому распределено эффективное время T_3 , зависят от геометрических параметров бревен в сортировочной партии, а также от скорости подачи ЛР.

Согласно центральной предельной теореме [10] при увеличении показателя kn распределение Эрланга kn -го порядка неограниченно приближается к нормальному закону (закону Гаусса).

Для дальнейшего изложения произведем аппроксимацию закона Эрланга нормальным законом с теми же параметрами. Практически удовлетвори-

тельную точность можно получить уже при $kn \geq 20$ [15]. Поэтому далее эффективное время T_3 распиловки сортировочной партии бревен рассматривается как случайная величина, имеющая нормальное распределение с плотностью вероятности:

$$f(t_3) = \frac{1}{\sigma_{T_3} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(t_3 - MT_3)^2}{2DT_3} \right\},$$

где σ_{T_3} – среднее квадратическое отклонение времени T_3 , $\sigma_{T_3} = \sqrt{DT_3}$.

Среднечасовую производительность (A_3) ЛР за время распиловки T_3 можно вычислить как

$$A_3 = \frac{Z}{T_3}, \quad (6)$$

где Z – распиливаемый объем группы бревен, м³.

Из (6) следует, что при заданном объеме Z группы бревен среднечасовая производительность A_3 является функцией случайной величины T_3 , т. е. $A_3 = \varphi_1(T_3)$ также является случайной величиной.

Применяя методику, изложенную в [7], последовательно находим:

$$T_3 = \psi_1(A_3) = \frac{Z}{A_3}; \quad |\psi'_1(A_3)| = \frac{Z}{A_3^2};$$

$$g(A_3) = f(\psi_1(A_3)) |\psi'_1(A_3)|,$$

откуда

$$g(A_3) = \frac{Z}{\sigma_{T_3} A_3^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z - MT_3 A_3}{A_3 \sigma_{T_3}} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что среднечасовая производительность ЛР за эффективное время, как случайная величина, распределена не по закону Гаусса. Аппроксимируем (7) плотностью нормального распределения, сохранив основные характеристики случайной величины A_3 . При этом средняя ошибка аппроксимации $A = 1,71$ %.

Математическое ожидание среднечасовой производительности

$$MA_3 = M[\varphi_1(T_3)] = \int_0^{\infty} \varphi_1(T_3) f(t_3) dt_3 = \frac{Z}{\sigma_{T_3} \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{t_3} \exp \left\{ -\frac{(t_3 - MT_3)^2}{2DT_3} \right\} dt_3.$$

Вычислим интеграл методом подстановки:

$$MA_3 = \frac{Z}{MT_3}.$$

Приравняв плотности распределения (7) и нормального закона, получим:

$$\frac{Z}{\sigma_{T_3} A_3^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z - MT_3 A_3}{A_3 \sigma_{T_3}} \right)^2 \right] = \frac{1}{\sigma_{A_3} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(A_3 - MA_3)^2}{2DA_3} \right\}. \quad (8)$$

Подставим значение $A_3 = MA_3$ в (8):

$$\frac{Z}{\sigma_{T_3} (MA_3)^2 \sqrt{2\pi}} = \frac{1}{\sigma_{A_3} \sqrt{2\pi}},$$

откуда среднее квадратическое отклонение среднечасовой производительности

$$\sigma_{A_3} = \sigma_{T_3} \frac{(MA_3)^2}{Z}. \quad (9)$$

В этом случае дисперсию среднечасовой производительности ЛР по распилу сырья за эффективное время T_3 можно вычислить по следующей формуле:

$$DA_3 = DT_3 \frac{(MA_3)^4}{Z^2}.$$

Найдем связь показателей производительности со средним временем распиловки бревна:

$$MA_3 = \frac{Z}{n\bar{\tau}_3} = \frac{\bar{V}_6}{\bar{\tau}_3} \quad \text{и} \quad DA_3 = \frac{(\bar{V}_6)^2 D\tau_3}{n(\bar{\tau}_3)^4},$$

где \bar{V}_6 – средний объем бревна в сортировочной партии, $\bar{V}_6 = Z/n$.

Из формулы для дисперсии следует, что при увеличении количества бревен n в сортировочной партии дисперсия производительности уменьшается, т. е. среднечасовая производительность становится все более неслучайной величиной.

Среднее время распиловки одного бревна для каждого постава может быть найдено по формуле [14]:

$$\bar{\tau}_3 = \frac{100ML}{6\Delta_p n_b},$$

где Δ_p – расчетная посылка, мм; n_b – частота вращения коленчатого вала лесопильной рамы, об/мин.

В работе [3] получено выражение для энергетической характеристики электропривода механизма резания ЛР:

$$P_3 = P_{\text{пост}} + c_d \sqrt{A_3} = P_{\text{пост}} + c_d \sqrt{\frac{Z}{T_3}}, \quad (10)$$

где P_3 – среднечасовая потребляемая мощность, кВт; $P_{\text{пост}}$ – постоянная составляющая потребляемой мощности, не зависящая от полезной нагрузки двигателя, кВт; c_d – коэффициент энергоемкости ЛР, кВт·ч^{0,5}/М^{1,5}.

Выполнив аналогичные (7) преобразования, получим плотности распределения среднечасовой потребляемой мощности:

$$q(P_3) = \frac{2Zc_d^2}{\sigma_{T_3} \sqrt{2\pi} (P_3 - P_{\text{пост}})^3} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Zc_d^2 - MT_3(P_3 - P_{\text{пост}})^2}{(P_3 - P_{\text{пост}})^2 \sigma_{T_3}} \right)^2 \right].$$

Математическое ожидание среднечасовой потребляемой мощности как функции случайного аргумента T_3 найдем по выражению

$$\begin{aligned} MP_3 &= M[\varphi_2(T_3)] = \int_0^{\infty} \varphi_2(T_3) f(t_3) dt_3 = \\ &= \frac{1}{\sigma_{T_3} \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \left[P_{\text{пост}} + c_d \sqrt{\frac{Z}{t_3}} \right] \exp \left\{ -\frac{(t_3 - MT_3)^2}{2DT_3} \right\} dt_3. \end{aligned}$$

После вычисления интеграла методом подстановки получим:

$$MP_3 = P_{\text{пост}} + c_d \sqrt{\frac{Z}{MT_3}}.$$

Для определения дисперсии DP_3 выполним действия, аналогичные действиям в формуле (8):

$$DP_3 = DT_3 \frac{(MP_3 - P_{\text{пост}})^6}{(2Zc_d^2)^2}.$$

Потери электроэнергии на участке электрической сети

$$\Delta W_3 = 3I_3^2 RT_3,$$

где I_3 – среднечасовое значение тока за время T_3 ,

$$I_3 = \frac{P_3}{\sqrt{3}U_l \cos \varphi_3},$$

U_l – линейное напряжение сети; $\cos \varphi_3$ – среднее значение коэффициента мощности двигателя за время T_3 ; R – активное сопротивление участка, Ом.

В этом случае потери электроэнергии в сети

$$\Delta W_3 = \frac{P_3^2 R}{(U_l \cos \varphi_3)^2} T_3,$$

откуда с учетом (10)

$$\begin{aligned} \Delta W_3 &= \frac{R}{(U_l \cos \varphi_3)^2} [P_{\text{пост}}^2 T_3 + 2P_{\text{пост}} c_d \sqrt{Z T_3} + Z c_d^2] = \\ &= \frac{R P_{\text{пост}}^2}{(U_l \cos \varphi_3)^2} T_3 + \frac{2P_{\text{пост}} R c_d \sqrt{Z}}{(U_l \cos \varphi_3)^2} \sqrt{T_3} + \frac{R c_d^2 Z}{(U_l \cos \varphi_3)^2}, \end{aligned}$$

или

$$\Delta W_3 = \varphi_3(T_3) = aT_3 + b\sqrt{T_3} + c, \quad (11)$$

где a, b, c – постоянные для данных условий коэффициенты, которые использованы для краткости представления формул:

$$a = \frac{R P_{\text{пост}}^2}{(U_l \cos \varphi_3)^2}; \quad b = \frac{2P_{\text{пост}} R c_d \sqrt{Z}}{(U_l \cos \varphi_3)^2}; \quad c = \frac{R c_d^2 Z}{(U_l \cos \varphi_3)^2}.$$

Из (11) следует, что потери электроэнергии в сети являются случайными величинами.

Выполнив преобразования, как в (7), получим выражение для определения плотности распределения потерь электроэнергии в сети:

$$\begin{aligned} g(\Delta W_3) &= \frac{\sqrt{b^2 - 4a(c - \Delta W_3)} - b}{a\sigma_{T_3} \sqrt{2\pi(b^2 - 4a(c - \Delta W_3))}} \times \\ &\times \exp \left\{ -\frac{[b^2 - b\sqrt{b^2 - 4a(c - \Delta W_3)} - 2a(c - \Delta W_3) - 2a^2 MT_3]^2}{2(2a^2 \sigma_{T_3})^2} \right\}. \end{aligned}$$

Математическое ожидание потерь электроэнергии

$$M(\Delta W_3) = aMT_3 + b\sqrt{MT_3} + c.$$

Для определения дисперсии $D(\Delta W_3)$ выполним действия, как в (8):

$$D(\Delta W_3) = DT_3 \frac{a^2 [b^2 - 4a(c - M(\Delta W_3))]}{(\sqrt{b^2 - 4a(c - M(\Delta W_3))} - b)^2}.$$

Электроэнергия, потребляемая за эффективное время:

$$W_3 = P_3 T_3 = P_{\text{пост}} T_3 + c_d \sqrt{Z T_3},$$

или

$$W_3 = \varphi_4(T_3) = a T_3 + b \sqrt{T_3},$$

где a, b – постоянные (при определенных условиях) коэффициенты, характеризующие потребление электроэнергии двигателем механизма резания, $a = P_{\text{пост}}$; $b = c_d \sqrt{Z}$.

Математическое ожидание потребления электроэнергии и его дисперсия:

$$MW_3 = aMT_3 + b\sqrt{MT_3};$$

$$DW_3 = DT_3 \frac{a^2(b^2 + 4aMW_3)}{(\sqrt{b^2 + 4aMW_3} - b)^2}.$$

Общее потребление электроэнергии за эффективное время, включая потери в сети:

$$W_{3,\text{общ}} = W_3 + \Delta W_3 = \left[P_{\text{пост}} + \frac{RP_{\text{пост}}^2}{(U_L \cos \varphi_3)^2} \right] T_3 + \left[c_d \sqrt{Z} + \frac{2P_{\text{пост}} R c_d \sqrt{Z}}{(U_L \cos \varphi_3)^2} \right] \sqrt{T_3} + \frac{R c_d^2 Z}{(U_L \cos \varphi_3)^2},$$

или

$$W_{3,\text{общ}} = \varphi_5(T_3) = a T_3 + b \sqrt{T_3} + c, \quad (12)$$

где a, b, c – постоянные (при определенных условиях) коэффициенты, характеризующие общее потребление электроэнергии за эффективное время:

$$a = P_{\text{пост}} + \frac{RP_{\text{пост}}^2}{(U_L \cos \varphi_3)^2}; \quad b = c_d \sqrt{Z} + \frac{2P_{\text{пост}} R c_d \sqrt{Z}}{(U_L \cos \varphi_3)^2}; \quad c = \frac{R c_d^2 Z}{(U_L \cos \varphi_3)^2}.$$

Уравнение (12) имеет такую же структуру, что уравнение (11) для потерь электроэнергии, поэтому плотность распределения случайной величины $W_{3,\text{общ}}$ и ее дисперсия будут определяться аналогично:

$$g(W_{3,\text{общ}}) = \frac{\sqrt{b^2 - 4a(c - W_{3,\text{общ}})} - b}{a \sigma_{T_3} \sqrt{2\pi (b^2 - 4a(c - W_{3,\text{общ}}))}} \times \exp \left\{ - \frac{\left[b^2 - b \sqrt{b^2 - 4a(c - W_{3,\text{общ}})} - 2a(c - W_{3,\text{общ}}) - 2a^2 M T_3 \right]^2}{2(2a^2 \sigma_{T_3})^2} \right\};$$

$$D(\Delta W_{\text{э.общ}}) = DT_3 \frac{a^2 [b^2 - 4a(c - M(W_{\text{э.общ}}))] }{\left(\sqrt{b^2 - 4a(c - M(W_{\text{э.общ}}))} - b \right)^2}.$$

Математическое ожидание общего электропотребления за операционное время

$$MW_{\text{э.общ}} = aMT_3 + b\sqrt{MT_3} + c.$$

Найдем плотность распределения удельного расхода электроэнергии (УРЭ) по распилу сырья, применяя использованную выше методику.

Тогда имеем:

функциональная зависимость УРЭ от случайной величины T_3

$$d_3 = \varphi_6(T_3) = aT_3 + b\sqrt{T_3} + c;$$

плотность распределения УРЭ

$$g(d_3) = \frac{\sqrt{b^2 - 4a(c - d_3)} - b}{a\sigma_{T_3}\sqrt{2\pi(b^2 - 4a(c - d_3))}} \times \exp\left\{-\frac{[b^2 - b\sqrt{b^2 - 4a(c - d_3)} - 2a(c - d_3) - 2a^2MT_3]^2}{2(2a^2\sigma_{T_3})^2}\right\};$$

математическое ожидание УРЭ

$$Md_3 = aMT_3 + b\sqrt{MT_3} + c;$$

дисперсия УРЭ

$$D(d_3) = DT_3 \frac{a^2 [b^2 - 4a(c - Md_3)] }{\left(\sqrt{b^2 - 4a(c - Md_3)} - b \right)^2},$$

где a, b, c – постоянные (при определенных условиях) коэффициенты, характеризующие удельный расход электроэнергии за эффективное время:

$$a = \frac{P_{\text{пост}}}{Z} + \frac{RP_{\text{пост}}^2}{Z(U_{\text{л}} \cos \varphi_3)^2}; \quad b = \frac{c_{\text{д}}}{\sqrt{Z}} + \frac{2P_{\text{пост}}Rc_{\text{д}}}{\sqrt{Z}(U_{\text{л}} \cos \varphi_3)^2}; \quad c = \frac{Rc_{\text{д}}^2}{(U_{\text{л}} \cos \varphi_3)^2}.$$

При этом средняя ошибка аппроксимации составила 0,174 %, что говорит о достаточно высокой точности аппроксимации реального закона распределения УРЭ нормальным.

Заключение

В результате исследований получены выражения, позволяющие по геометрическим характеристикам пиловочного сырья в сортировочной партии и его количеству определить вероятностные характеристики технологических и энергетических показателей процесса распиловки древесины на лесопильных рамах.

Из найденных зависимостей следует, что с ростом количества бревен в сортировочной партии вариация удельного расхода энергии становится меньше, т. е. удельный расход энергии становится все более неслучайной величиной.

Предложенный подход к учету взаимосвязей технологических и энергетических показателей процесса распиловки позволит более качественно подходить к вопросу планирования и нормирования электропотребления на предприятиях лесопромышленного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агеев С.П.* Математическое моделирование процессов распиловки древесины // Изв. СПбЛТА. 2007. Вып. 179. С. 142–152.
2. *Агеев С.П.* Энергетическая характеристика механизма резания лесопильной рамы // Лесн. журн. 2009. № 1. С. 95–100. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. *Агеев С.П.* Энергетическая характеристика электропривода механизма резания лесопильной рамы // Лесн. журн. 2009. № 2. С. 96–101. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. *Агеев С.П.* Стохастические закономерности операционных циклов лесопильных рам // Лесн. журн. 2014. № 4. С. 80–89. (Изв. высш. учеб. заведений).
5. *Алексин М.В., Синев В.С., Пижурин П.А., Коперин И.Ф., Головков С.И., Павлюк В.А.* Экономия энергоресурсов в лесной и деревообрабатывающей промышленности. М.: Лесн. пром-ть, 1982. 216 с.
6. *Аркашов Н.С., Ковалевский А.П.* Теория вероятностей и случайные процессы: учеб. пособие. Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2014. 180 с.
7. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2000. 480 с.
8. *Воскобойников Д.М.* Экономическое стимулирование рационального использования электроэнергии в промышленности. М.: Энергоатомиздат, 1988. 80 с.
9. *Гусак А.Л.* Высшая математика. М.: Тетра Система, 2009. 320 с.
10. *Колемаев В.А., Калинина В.А.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Юнити-Дана, 2007. 250 с.
11. *Конюхова Е.А.* Электроснабжение объектов: учеб. пособие. М.: Мастерство, 2001. 320 с.
12. *Михайлов В.В.* Тарифы и режимы электропотребления. М.: Энергоатомиздат, 1986. 216 с.
13. *Михайлов В.В., Гудков Л.В., Терещенко А.В.* Рациональное использование топлива и энергии в промышленности. М.: Энергоатомиздат, 1985. 210 с.
14. *Рыкунин С.Н., Пятков В.Е.* Методы составления и расчета поставок: учеб. пособие. М.: МГУЛ, 2005. 69 с.
15. *Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А.* Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Высш. шк., 2001. 336 с.
16. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: практ. пособие / под ред. В.А. Веникова. Кн. 5. Экономия электроэнергии на промышленных предприятиях / Т.В. Анчарова, С.И. Гамазин, В.В. Шевченко. М.: Высш. шк., 1990. 143 с.
17. *Kreisel K., Jochem E.* Druckluft rationell erzeugen und nutzen // Fachartikel im Rahmen der Initiative "Energie effizient nutzen – Schwerpunkt Storm". Germany, Baden-Württemberg, 1996.
18. *Matthews M.B., Leber J.F.* Neurale Netzwerke: Ein Übersicht // Bulletin of the Swiss Electronic Society (SEV). 1989. Vol. 15. Pp. 923–932.
19. *Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J.* Learning Representations by Back-Propagating Errors // Nature. 1986. Vol. 323. Pp. 533–536.

20. *Tonsing E.* Stromsparende Beleuchtungssysteme – mehr Licht für weniger Kosten // Fachartikel im Rahmen der Initiative “Energie effizient nutzen – Schwerpunkt Storm”. Germany, Baden-Wurtemberg, 1996.

Поступила 14.02.19

UDC 621.311

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.121

Probability Analysis of Relations between Operation Mode Parameters of Saw Frames

*S.P. Ageev*¹, *Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; Publons: 1758124/sergey-ageev,*

ORCID: 0000-0003-0362-6722

*A.N. Minaev*², *Doctor of Engineering, Assoc. Prof.*

*S.I. Roshchina*³, *Doctor of Engineering, Assoc. Prof.*

¹Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: doctor.mart11@mail.ru

²St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, prosp. Institutskiy, 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: stl@spbftu.ru

³Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs, ul. Gor’kogo, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation; e-mail: rsi3@mail.ru

Nature of woodworking processes is dramatically influenced by various random factors. Mathematically, these processes should be considered as one of accidental types. The most energy-intensive process is sawmilling. Here, saw frame and frame equipment comprise a separate section, which largely forms the electricity consumption nature of product line and the whole plant. Therefore, the issues of improving the energy efficiency of woodworking industry can be solved only by joint consideration of the technological and energy parameters of wood sawing. The research purpose is a probability-theoretical analysis of relationship between the saw frames operating parameters, as well as finding the distribution laws and numerical ratings of these parameters as random variables when sawing the sort log load. The queuing system is used as a mathematical model of the saw frame cutting mechanism. The application of the probability theory has allowed us to find the distribution density and numerical characteristics of the effective time; hourly average sawing raw material output; hourly average power consumption, energy losses in the network; absolute and specific power consumption in conjunction with the geometric parameters of raw materials and operation parameters of saw frame mode. Electricity consumption parameters have probabilistic nature and are distributed by law, different from normal. The density of parameters distribution was approximated by the density of the Gauss’ law in order to simplify the analysis procedure. Herewith, the error of approximation was not more than 1.71 %. Formulas for calculating the values of technological and energy parameters of saw frames operation are proposed.

For citation: Ageev S.P., Minaev A.N., Roshchina S.I. Probability Analysis of Relations between Operation Mode Parameters of Saw Frames. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 3, pp. 121–131. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.121

Keywords: saw frame, sort load of logs, energy input, power consumption, energy losses, probability distribution, sawn raw material parameters.

REFERENCES

1. Ageev S.P. Mathematical Modeling of Sawing Wood Processes. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2007, iss. 179, pp. 142–152.

2. Ageev S.P. Energetic Characteristic of Cutting Mechanism of Frame Saw. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2009, no 1, pp. 95–100.
3. Ageev S.P. Energy Characteristic of Electric Drive for Cutting Mechanism of Saw Frame. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2009, no 2, pp. 96–101.
4. Ageev S.P. Stochastic Pattern of the Sash Operating Cycles. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2014, no. 4, pp. 80–89.
5. Aleksin M.V., Sinev V.S., Pizhurin P.A., Koperin I.F., Golovkov S.I., Pavlosyuk V.A. *Energy Savings in Forest and Woodworking Industry*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 216 p.
6. Arkashov N.S., Kovalevskiy A.P. *Theory of Probability and Stochastic Processes*: Educational Textbook. Novosibirsk, NSTU Publ., 2014. 180 p.
7. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Theory of Probability and Its Engineering Applications*: Educational Textbook for Universities. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 280 p.
8. Voskoboynikov D.M. *Economic Incentives for Sustainable Use of Power in Industry*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 80 p.
9. Gusak A.L. *Higher Mathematics*. Moscow, Tetra Sistema Publ., 2009. 320 p.
10. Kolemaev V.A., Kalinina V.A. *Theory of Probability and Mathematical Statistics*. Moscow, Unity-Dana Publ., 2007. 250 p.
11. Konyukhova E.A. *Electrical Power Supply of Facilities*: Educational Textbook. Moscow, Masterstvo Publ., 2001. 320 p.
12. Mikhaylov V.V. *Power Consumption Charges and Modes*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 216 p.
13. Mikhaylov V.V., Gudkov L.V., Tereshchenko A.V. *Sustainable Use of Fuel and Energy in Industry*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 210 p.
14. Rykunin S.N., Pyatkov V.E. *Methods for Compilation and Calculation of Sawing Schedules*: Educational Textbook. Moscow, MGUL Publ., 2002. 69 p.
15. Sibikin Yu.D., Sibikin M.Yu., Yashkov V.A. *Power Supply of Industrial Enterprises and Installations*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 336 p.
16. Ancharova T.V., Gamazin S.I., Shevchenko V.V. Energy Saving at Industrial Enterprises. Book 5. *Power Saving Technology of Electricity Supply of National Economy: In 5 Books: Practical Guide*. Ed. by V.A. Venikov. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 143 p.
17. Kreisel K., Jochem E. Druckluft rationell erzeugen und nutzen. *Fachartikel im Rahmen der Initiative "Energie effizient nutzen – Schwerpunkt Storm"*. Baden-Württemberg, Germany, 1996.
18. Matthews M.B., Leber J.F. Neurale Netzwerke: Ein Übersicht. *Bulletin of the Swiss Electronic Society (SEV)*, 1989, vol. 15, pp. 923–932.
19. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning Representations by Back-Propagating Errors. *Nature*, 1986, vol. 323, pp. 533–536.
20. Tonsing E. Stromsparende Beleuchtungssysteme – mehr Licht für weniger Kosten. *Fachartikel im Rahmen der Initiative "Energie effizient nutzen – Schwerpunkt Storm"*. Baden-Württemberg, Germany, 1996.

Received on February 14, 2019