

УДК 621.311

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.130

НОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ УСТРОЙСТВ В ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С.П. Агеев, д-р техн. наук, проф.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005;
e-mail: doctor.mart11@mail.ru

Нормирование удельных расходов энергии на деревообрабатывающих предприятиях строится в соответствии с расчленением производства, с одной стороны, на отдельные операции и процессы по видам производимой продукции, с другой – на отдельные участки (агрегаты, цехи, предприятие в целом). В соответствии с этим различают операционные удельные нормы по отдельным операциям и суммарные удельные нормы по отдельным производственным процессам. Цель настоящей статьи – разработка подхода к установлению операционной нормы удельного расхода электроэнергии на выполнение транспортных операций деревообрабатывающего производства, используемых для выгрузки леса из воды, транспортировки лесоматериалов со складов в цех и обслуживания технологических операций между отдельными агрегатами. Исследования энергетических свойств электропривода конвейеров проведены в направлении, при котором потери и полезное потребление энергии определяются через некоторые коэффициенты потерь и производительность агрегатов. Получены аналитические зависимости между потребляемой мощностью, удельным потреблением электроэнергии и производительностью конвейера, названные энергетическими характеристиками. Используемый метод позволяет выразить полезную нагрузку на агрегат через производительность – показатель, по которому практически оцениваются результаты работы агрегата, участка, цеха и т. д. Наличие энергетических характеристик дает возможность более качественно подойти к вопросу планирования удельных расходов энергии по каждому типоразмеру сортиментов и производству в целом. В результате исследований установлено, что энергетическая характеристика мощности, потребляемой транспортными устройствами, носит линейный характер, удельного расхода электроэнергии – нелинейный. Выявлены основные технологические факторы и параметры оборудования и сырья, влияющие на удельное электропотребление конвейеров.

Ключевые слова: конвейер, производительность, энергетическая характеристика, потребляемая мощность, удельный расход электроэнергии, потери электроэнергии, транспортные операции, деревообрабатывающее производство.

Для цитирования: Агеев С.П. Нормирование электропотребления транспортных устройств в деревообрабатывающей промышленности // Лесн. журн. 2017. № 4. С. 130–148. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.130

Введение

Продольные конвейеры на деревообрабатывающем производстве применяют для выгрузки леса из воды, транспортировки лесоматериалов со складов в цех и обслуживания технологических операций между отдельными агрегатами [8]. Энергоемкость конвейерного транспорта составляет 10...15 % общего расхода электроэнергии.

Исследования энергетических свойств механизмов с электроприводом можно проводить по двум принципиально различным направлениям.

При первом направлении потери энергии определяются через коэффициент полезного действия, который изменяется в функции нагрузки на валу приводного двигателя. Способы измерения этой нагрузки могут быть различными, но при этом всегда требуется соответствующее аппаратное сопровождение, так как непосредственно в производственных условиях нагрузка на валу обычно не измеряется.

При втором направлении, предложенном В.И. Вейцем, потери и полезное потребление энергии определяются через некоторые коэффициенты потерь и производительность агрегата. В результате получают аналитические зависимости между потребляемой мощностью (удельным потреблением электроэнергии) и производительностью исследуемого механизма, названные энергетическими характеристиками [1–3]. В настоящей статье используется второй метод, так как он позволяет выразить полезную нагрузку на агрегат через производительность – показатель, по которому практически оцениваются результаты работы агрегата, участка, цеха и т. д.

Решению перечисленных выше задач с использованием различных подходов посвящен ряд работ [10–13].

Методы и результаты исследования

Продольные конвейеры работают при постоянной скорости, их энергетический режим (при постоянной длине конвейера и угле наклона) полностью определяется производительностью, которая в свою очередь зависит от веса транспортируемого материала. В связи с этим удельный расход электроэнергии необходимо выразить в виде зависимости от производительности конвейера:

$$d = \varphi(V_K),$$

где d – удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м³;

V_K – объемная производительность конвейера, м³/ч.

Цель настоящей статьи – построение и анализ энергетических характеристик транспортирующих устройств для решения задач нормирования и планирования электропотребления предприятий деревообрабатывающей промышленности.

Цепные конвейеры

В цепных конвейерах в качестве тягового органа применяют различные цепи. Звездочка в приводном устройстве передает тяговое усилие цепи в результате зацепления.

На рис. 1 показана структурная схема передачи мощности в цепном пластинчатом конвейере, приводимом в движение асинхронным двигателем.

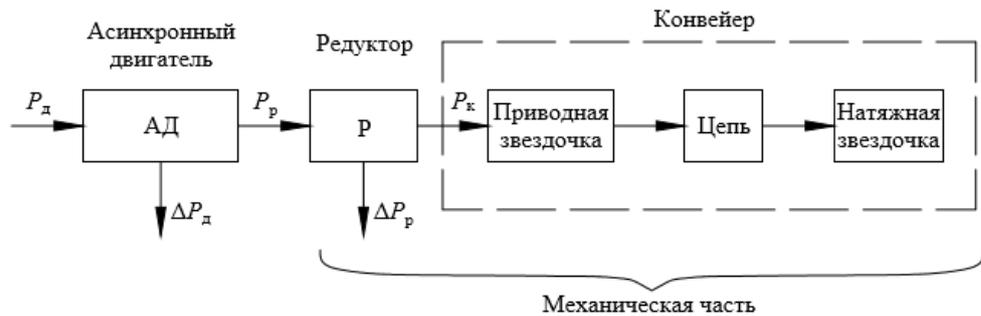


Рис. 1. Структурная схема передачи мощности в цепном конвейере: P_d – мощность, потребляемая двигателем из сети, кВт; P_p – мощность, подводимая к редуктору, кВт; P_k – мощность, подводимая к конвейеру, кВт; ΔP_d – потери мощности в двигателе, кВт; ΔP_p – потери мощности в редукторе, кВт

Подводимая к конвейеру мощность P_k содержит две составляющие: переменную (полезную) $P_{k,пер}$ и постоянную $\Delta P_{k,пост}$ (мощность потерь энергии).

Таким образом,

$$P_k = P_{k,пер} + \Delta P_{k,пост} = c_k V_k + \Delta P_{k,пост}, \quad (1)$$

где c_k – частичный удельный расход энергии, характеризующий конвейер, кВт·ч/м³;

V_k – объемная производительность конвейера, м³/ч.

При номинальной производительности конвейера $V_{ном}$ подводимая к нему мощность имеет номинальное значение:

$$P_{k,ном} = c_k V_{ном} + \Delta P_{k,пост}.$$

Редуктор осуществляет преобразование движения в механической части электропривода конвейера и характеризуется потерями мощности ΔP_p , состоящими из переменных $\Delta P_{p,пер}$ и постоянных $\Delta P_{p,пост}$ потерь энергии:

$$\Delta P_{p,пост} = a_p P_{k,ном}; \quad (2)$$

$$\Delta P_{p,пер} = b_p P_k, \quad (3)$$

где a_p и b_p – коэффициенты постоянных и переменных потерь в редукторе.

Тогда мощность, подводимая к редуктору,

$$P_p = P_k + \Delta P_p = P_k + \Delta P_{p,пост} + \Delta P_{p,пер} = P_k(1 + b_p) + a_p P_{k,ном}. \quad (4)$$

Коэффициенты потерь в редукторе можно определить по номинальному коэффициенту полезного действия – КПД ($\eta_{P,НОМ}$) и отношению потерь:

$$\chi_P = \frac{\Delta P_{P,ПОСТ}}{\Delta P_{P,ПЕР,НОМ}} = \frac{a_P}{b_P}. \quad (5)$$

При этом номинальный КПД представим как отношение полезной (отдаваемой) мощности $P_{K,НОМ}$ редуктора к подводимой мощности $P_{P,НОМ}$:

$$\eta_{P,НОМ} = \frac{P_{K,НОМ}}{P_{P,НОМ}} = \frac{P_{K,НОМ}}{P_{K,НОМ}(1 + a_P + b_P)} = \frac{1}{1 + a_P + b_P}, \quad (6)$$

откуда

$$a_P + b_P = \frac{1 - \eta_{P,НОМ}}{\eta_{P,НОМ}}. \quad (7)$$

Возвращаясь к (4) и учитывая (1), составим уравнение энергетической характеристики мощности $P_P = f(V_K)$, подводимой к редуктору.

Тогда

$$\begin{aligned} P_P &= (c_K A + \Delta P_{K,ПОСТ})(1 + b_P) + a_P P_{K,НОМ} = \\ &= (1 + b_P)c_K V_K + [(1 + b_P)\Delta P_{K,ПОСТ} + a_P P_{K,НОМ}], \end{aligned} \quad (8)$$

или

$$P_P = c_P V_K + P_{P,ПОСТ}, \quad (9)$$

где c_P – частичный удельный расход энергии, характеризующий механическую часть конвейера, кВт·ч/м³.

Слагаемое

$$P_{P,ПОСТ} = (1 + b_P)\Delta P_{K,ПОСТ} + a_P P_{K,НОМ} = P_{K,НОМ}[a_K(1 + b_P) + a_P] \quad (10)$$

есть суммарная мощность постоянных потерь энергии в механической части конвейера (где $a_K = \Delta P_{K,ПОСТ}/P_{K,НОМ}$ – коэффициент постоянных потерь в конвейере).

Определим слагаемые, входящие в (1), используя методику тягового расчета пластинчатого цепного конвейера, изложенную в работе [9]. Введем следующие обозначения:

L – длина конвейера, м;

β – угол наклона конвейера;

L_Γ – длина горизонтальной проекции трассы конвейера, м,

$$L_\Gamma = L \cos \beta;$$

v – скорость движения цепи конвейера, м/с;

H – высота подъема груза, м;

q_Γ – вес транспортируемого груза, приходящийся на 1 м длины конвейера, Н/м;

q_H – вес 1 м настила с цепями и опорными катками, Н/м;

w – коэффициент сопротивления движению ходовой части на катках.

Схема трассы наклонного цепного конвейера приведена на рис. 2.

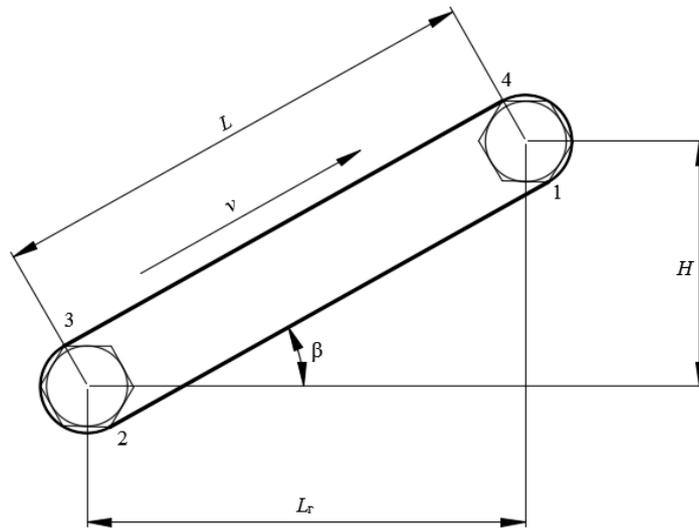


Рис. 2. Схема трассы цепного конвейера

По методике расчет выполняют во всех характерных точках конвейера, при этом силы сопротивления суммируют согласно методу обхода по всему контуру цепи конвейера. Замкнутый контур, образованный тяговым элементом, разбивают на участки так, чтобы на каждом из них характер сопротивления был неизменным, и намечают четыре расчетные точки: т. 1 – на сбегавшей ветви приводной звездочки конвейера, т. 4 – на набегающей ветви приводной звездочки; на натяжной звездочке – соответственно т. 2 и т. 3.

Ввиду того, что тяговое усилие в цепном конвейере передается путем зацепления цепи со звездочками, минимальное натяжение F_{MIN} гибкого элемента может быть принято в точках 1 или 2 в зависимости от соотношения $\text{tg}\beta$ и w . При условии, что $\text{tg}\beta < w$, минимальное натяжение будет иметь место в верхней точке, т. е. $F_{\text{MIN}} = F_1$. В противном случае $F_{\text{MIN}} = F_2$. От нахождения точки с F_{MIN} будут зависеть силы сопротивления в других точках и мощность привода. Определив точку минимального натяжения тягового элемента, примем $F_{\text{MIN}} = 1 \dots 3$ кН.

Рассмотрим случай, когда $F_{\text{MIN}} = F_2$. Тогда силу сопротивления в следующей по направлению движения расчетной т. 3 определим как

$$F_3 = F_2(1 + k_3), \quad (11)$$

где k_3 – коэффициент сопротивления движению цепи на звездочках конвейера, $k_3 = 0,03 \dots 0,07$ [5].

Сила натяжения цепи в т. 4:

$$F_4 = F_3 + (q_{\Gamma} + q_{\text{H}})(L_{\Gamma}w + H). \quad (12)$$

Для определения силы натяжения в т. 1 произведем обход контура против движения цепи.

Тогда

$$F_1 = F_2 - q_H(L_{\Gamma W} - H). \quad (13)$$

Окружное усилие на приводной звездочке

$$F_{\text{ОКР}} = F_4 - F_1 + (F_4 + F_1)k_3, \quad (14)$$

или с учетом (12) и (13):

$$F_{\text{ОКР}} = F_2(3 + k_3)k_3 + q_H(L_{\Gamma W} + H)(1 + k_3) + 2q_H(L_{\Gamma W} + Hk_3). \quad (15)$$

При анализе режимов работы конвейеров различают массовую Q_K (кг/ч) и объемную V_K (м³/ч) производительность. Эти величины связаны зависимостью

$$Q_K = V_K \rho, \quad (16)$$

где ρ – плотность транспортируемого груза, кг/м³.

Объемная производительность оборудования поточной линии при распиловке круглых лесоматериалов -го диаметра соответствует объемной производительности головного станка и определяется по известной формуле [6]:

$$V_i = \frac{3600}{T_{\text{Ци}} + \sum t_{\text{П}}} q_i K_T, \quad (17)$$

где $T_{\text{Ци}}$ – продолжительность рабочего цикла при обработке бревна i -го диаметра, с;

$\sum t_{\text{П}}$ – суммарные внецикловые потери времени головного станка, с;

q_i – объем бревна -го диаметра, м³;

K_T – коэффициент использования оперативного времени смены.

Учитывая, что вес транспортируемого груза (q_{Γ} , Н/м), приходящийся на 1 м длины конвейера, определяется по формуле

$$q_{\Gamma} = \frac{Q_K}{v}, \quad (18)$$

массовую производительность (Q_K , кг/ч) необходимо выразить в ньютонах на секунду. Для этого следует использовать формулу

$$Q_K = \frac{V_K \rho g}{3600}, \quad (19)$$

где g – сила тяжести, $g = 9,81$ Н/кг.

Мощность на приводной звездочке, равная мощности P_K , подводимой к конвейеру, определится как

$$P_K = \frac{F_{\text{ОКР}} v}{1000}. \quad (20)$$

Решая совместно уравнения (15) по (20), находим уравнение энергетической характеристики конвейера:

$$P_K = \frac{(L_{\Gamma}w + H)(1 + k_3)\rho g}{1000 \cdot 3600} V_K + \frac{F_2(3 + k_3)k_3 + 2q_H(L_{\Gamma}w + Hk_3)}{1000} v = c_K V_K + \Delta P_{K.пост}, \quad (21)$$

которое совпадает с полученным ранее выражением (1).

Полагая, что переменные потери мощности в двигателе изменяются пропорционально первой степени нагрузки, можно получить формулы для нахождения коэффициентов переменных (b_D) и постоянных (a_D) потерь в двигателе. Относительная погрешность при этом составляет не более 1,5 % [1].

Тогда

$$a_D + b_D = \frac{1 - \eta_{D.ном}}{\eta_{D.ном}}, \quad (22)$$

где $\eta_{D.ном}$ – номинальный КПД двигателя.

Для определения коэффициентов потерь необходимо также знать отношение потерь:

$$\chi_D = \frac{\Delta P_{D.пост}}{\Delta P_{D.пер.ном}} = \frac{a_D}{b_D}. \quad (23)$$

Следует учесть, что номинальной нагрузкой двигателя будет номинальная мощность $P_{P.ном}$, подводимая к редуктору. Таким образом, номинальная мощность на валу двигателя

$$P_{D.ном} = P_{P.ном} = P_{K.ном}(1 + a_P + b_P). \quad (24)$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети при произвольной нагрузке:

$$P_D = P_{P.ном}[\gamma_P(1 + b_D) + a_D], \quad (25)$$

где γ_P – коэффициент нагрузки редуктора, $\gamma_P = P_P/P_{P.ном}$.

Из (25) можно найти зависимость активной мощности, потребляемой двигателем из сети, от производительности конвейера, т. е. уравнение энергетической характеристики $P_D = f(V)$ электропривода конвейера.

Действительно,

$$\begin{aligned} P_D &= P_{P.ном}[\gamma_P(1 + b_D) + a_D] = P_{P.ном}\gamma_P(1 + b_D) + a_D P_{P.ном} = \\ &= P_P(1 + b_D) + a_D P_{P.ном} = (c_P V_K + P_{P.пост})(1 + b_D) + a_D P_{P.ном} = \\ &= (1 + b_D)c_P V_K + (1 + b_D)P_{P.пост} + a_D P_{P.ном} = (1 + b_D)(1 + b_P)c_K V_K + \\ &\quad + \{(1 + b_D)[a_K(1 + b_D) + a_P] + a_D(1 + a_P + b_P)\}P_{K.ном}, \end{aligned} \quad (26)$$

или с учетом (24):

$$P_D = (1 + b_D)(1 + b_P)c_K V_K + (1 + b_D)(1 + b_P)\Delta P_{K.пост} + [(1 + b_D)a_P\eta_{P.ном} + a_D]P_{D.ном} = c_D V_K + P_{D.пост}, \quad (27)$$

где c_D – частичный удельный расход электроэнергии двигателя, кВт·ч/м³;

$P_{D.пост}$ – постоянная составляющая мощности, потребляемой двигателем из сети, кВт.

Поделив выражение (27) на объемную производительность конвейера V_K , получим выражение для определения энергетической характеристики полного удельного расхода электроэнергии двигателя конвейера:

$$d = c_D + \frac{P_{Д.ПОСТ}}{V_K}. \quad (28)$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что частичные удельные расходы энергии c_K, c_P, c_D в значительной степени зависят от общего коэффициента сопротивления w движению цепи и геометрических характеристик конвейера. Кроме этого, мощность потерь ($P_{Д.ПОСТ}$) энергии пропорциональна скорости (v) движения ленты конвейера.

Практическое значение формул (27) и (28) состоит в том, что они позволяют определить основные показатели электропотребления конвейера через его фактическую производительность и номинальные паспортные данные двигателя и редуктора: номинальную мощность ($P_{Д.НОМ}$), КПД двигателя ($\eta_{Д.НОМ}$) и редуктора ($\eta_{Р.НОМ}$).

Пример. Рассчитать энергетические характеристики продольного цепного конвейера, предназначенного для транспортирования бревен к окорочному станку. Технические данные конвейера представлены ниже.

Скорость движения цепи v	0,5 м/с
Длина конвейера L	25 м
Наибольший диаметр транспортируемого бревна.....	65 см
Ширина полотна B	80 см
Высота подъема H	9 м
Угол наклона конвейера β	21,1°
Установленная мощность двигателя.....	10 кВт
Номинальная частота вращения двигателя	920 об/мин
КПД двигателя.....	0,87
КПД редуктора.....	0,92

Продольный конвейер установлен в рамном потоке, на котором осуществляется распиловка бревен с брусковкой лесопильными рамами 2Р75-1/2 при частоте вращения вала 325 об/мин. Распиловка выполняется пилами толщиной 2,2 мм с шагом зубьев 26 мм. На распиловку поступает хвойный (сосна) пиловочник диаметром 22 см, средняя длина 6 м. Плотность древесины ρ составляет 505 кг/м³ при относительной влажности 12 %. Схемы раскря сортиментов: 16-25-150-25-16 (1-й проход); 16-16-44-44-16-16 (2-й проход).

Решение. 1. Расчет производительности V_{Π} лесопильного потока выполняем согласно методике, изложенной в [6]. В результате получаем $V_{\Pi} = 26,61$ м³/ч. Так как данный конвейер транспортирует все бревна, подлежащие распиловке, то его объемная производительность равна производительности потока, т. е. $V_K = V_{\Pi} = 26,61$ м³/ч.

2. Вес транспортируемого груза, приходящийся на 1 м длины конвейера,

$$q_{\Gamma} = \frac{Q_{\text{к}}}{v} = \frac{V_{\text{к}} \rho g}{3600v} = \frac{26,61 \cdot 505 \cdot 9,81}{3600 \cdot 0,5} = 73,24 \text{ Н/м.}$$

3. Вес 1 м настила с цепями и опорными катками приближенно может быть определен по формуле [5]:

$$q_{\text{н}} = (60B + A)g = (60 \cdot 0,8 + 50)9,81 = 961,4 \text{ Н/м,}$$

где A – эмпирический коэффициент, зависящий от плотности древесины и ширины настила, $A = 50$.

4. Принимаем значение коэффициента сопротивления движению катковых цепей на подшипниках скольжения, соответствующее средним условиям работы конвейера, равным 0,1.

5. Точку минимального натяжения определяем из условия

$$\text{tg}\beta < w.$$

Так как $\text{tg}\beta > 0,1$, то условие не выполняется, а значит, минимальное натяжение тягового элемента находится в т. 2.

6. Окружное усилие на приводной звездочке определяем по формуле (15), предварительно приняв $F_2 = F_{\text{MIN}} = 2000 \text{ Н}$.

Тогда

$$\begin{aligned} F_{\text{ОКР}} &= F_2(3 + k_3)k_3 + q_{\Gamma}(L_{\Gamma}w + H)(1 + k_3) + 2q_{\text{н}}(L_{\Gamma}w + Hk_3) = \\ &= 2000(3 + 0,05) \cdot 0,05 + 73,24(23,3 \cdot 0,1 + 9)(1 + 0,05) + 2 \cdot 961,4 \times \\ &\quad \times (23,3 \cdot 0,1 + 9 \cdot 0,05) = 6521,7 \text{ Н.} \end{aligned}$$

7. Мощность на приводной звездочке находим по формуле (20):

$$P_{\text{к}} = \frac{F_{\text{ОКР}}v}{1000} = \frac{6521,7 \cdot 0,5}{1000} = 3,26 \text{ кВт.}$$

8. Частичный удельный расход энергии конвейера

$$\begin{aligned} c_{\text{к}} &= \frac{(L_{\Gamma}w + H)(1 + k_3)\rho g}{1000 \cdot 3600} = \\ &= \frac{(23,3 \cdot 0,1 + 9)(1 + 0,05) \cdot 505 \cdot 9,81}{3\,600\,000} = 0,0164 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3. \end{aligned}$$

9. Постоянная составляющая мощности на приводной звездочке

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{к.пост}} &= \frac{F_2(3 + k_3)k_3 + 2q_{\text{н}}(L_{\Gamma}w + Hk_3)}{1000} v = \\ &= \frac{2000(3 + 0,05)0,05 + 2 \cdot 961,4(23,3 \cdot 0,1 + 9 \cdot 0,05)}{1000} \cdot 0,5 = 2,827 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Проверка. 10. Рассчитаем мощность на приводной звездочке по формуле (1).

Тогда $P_{\text{к}} = c_{\text{к}}V_{\text{к}} + \Delta P_{\text{к.пост}} = 0,0164 \cdot 26,61 + 2,827 = 3,26 \text{ кВт}$, что совпадает с полученным выше результатом.

11. Находим коэффициенты потерь энергии в редукторе, принимая для простой кинематической схемы $\chi_p = 1$. Тогда

$$a_p = b_p = \frac{1 - \eta_{p,НОМ}}{2\eta_{p,НОМ}} = \frac{1,0 - 0,92}{2 \cdot 0,92} = 0,0435.$$

12. Находим коэффициенты потерь энергии в двигателе. Для рассматриваемого двигателя отношение потерь $\chi_d = 0,3$ [4]. Тогда коэффициент переменных потерь

$$b_d = \frac{1 - \eta_{d,НОМ}}{1,3\eta_{d,НОМ}} = \frac{1,0 - 0,87}{1,3 \cdot 0,87} = 0,1149,$$

коэффициент постоянных потерь

$$a_d = \chi_d b_d = 0,3 \cdot 0,1149 = 0,0345.$$

13. Частичный удельный расход электроэнергии двигателя

$$c_d = (1 + b_d)(1 + b_p)c_k = (1 + 0,1149)(1 + 0,0435) \cdot 0,0164 = 0,0191.$$

14. Постоянная составляющая мощности, потребляемой двигателем:

$$P_{д.пост} = (1 + b_d)(1 + b_p)\Delta P_{к.пост} + [(1 + b_d)a_p\eta_{p,НОМ} + a_d]P_{д,НОМ} = \\ = (1 + 0,1149)(1 + 0,0435) \cdot 2,827 + \\ + [(1 + 0,1149) \cdot 0,0435 \cdot 0,92 + 0,0345] \cdot 10 = 4,08 \text{ кВт}.$$

15. Мощность, потребляемая двигателем из сети при данной производительности:

$$P_d = c_d V_k + P_{д.пост} = 0,0191 \cdot 26,61 + 4,08 = 4,59 \text{ кВт}.$$

16. Удельный расход энергии при данной производительности определим по формуле (28):

$$d = c_d + \frac{P_{д.пост}}{V_k} = 0,0191 + \frac{4,08}{26,61} = 0,172 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3.$$

Выполняя аналогичные расчеты для других диаметров распиливаемого сырья, получим следующие значения объемной производительности, потребляемой мощности и удельного расхода энергии (см. таблицу).

Расчет показателей электропотребления

Диаметр бревна, см	Производительность, м ³ /ч	Мощность, потребляемая двигателем из сети, кВт	Удельный расход энергии, кВт·ч/м ³
14	12,6	4,58	0,3632
16	15,9	4,64	0,2918
18	19,8	4,71	0,2379
20	22,3	4,76	0,2136
22	26,6	4,84	0,1720
24	30,6	4,91	0,1605
26	34,7	4,99	0,1435
28	37,6	5,04	0,1341
30	41,4	5,11	0,1233
32	43,3	5,14	0,1188
34	46,4	5,20	0,1120

Окончание таблицы			
Диаметр бревна, см	Производительность, м ³ /ч	Мощность, потребляемая двигателем из сети, кВт	Удельный расход энергии, кВт·ч/м ³
36	48,3	5,23	0,1084
38	51,8	5,30	0,1023
40	54,6	5,35	0,0981
42	58,5	5,42	0,0927
44	59,1	5,43	0,0919
46	59,4	5,44	0,0916
48	61,9	5,49	0,0886
50	64,0	5,52	0,0863
52	66,4	5,57	0,0838

На рис. 3 приведен график, отражающий связь удельного расхода энергии и диаметра бревен. Аналогичные кривые могут быть получены и для других длин бревен и породы древесины.

С учетом нормы расхода круглых лесоматериалов на производство 1 м³ пиломатериалов можно определить производительность лесопильного потока и удельный расход электроэнергии на выработку пиломатериалов для всех диаметров бревен.

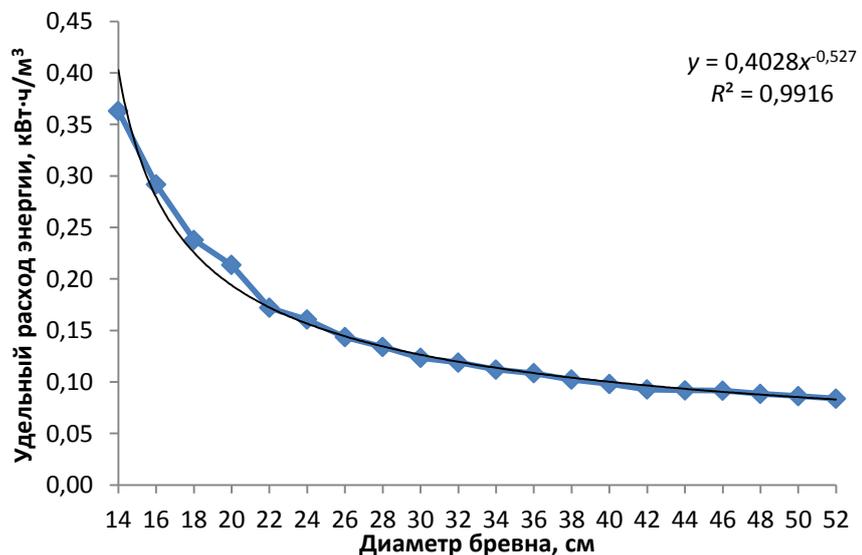


Рис. 3. Зависимость удельного расхода энергии продольного цепного конвейера подачи бревен к окорочному станку от диаметра бревен

Ленточные конвейеры

В ленточных конвейерах в качестве несущего и тягового органа используется прорезиненная гибкая лента, опирающаяся верхней (рабочей) и нижней (холостой) ветвями на роликовые опоры и огибающая на концах конвейера приводной и натяжной барабаны.

На рис. 4 показана структурная схема передачи мощности в ленточном конвейере, приводимом в движение асинхронным двигателем.

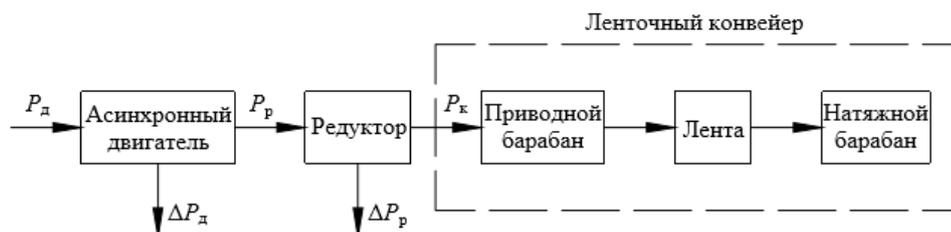


Рис. 4. Структурная схема передачи мощности в ленточном конвейере: P_d – мощность, потребляемая двигателем из сети, кВт; P_r – мощность, подводимая к редуктору, кВт; P_k – мощность, подводимая к конвейеру, кВт; ΔP_d – потери мощности в двигателе, кВт; ΔP_r – потери мощности в редукторе, кВт

Подводимая от редуктора к конвейеру мощность P_k содержит две составляющие: переменную мощность $P_{k.пер}$ и постоянную $\Delta P_{k.пост}$ мощность потерь.

Таким образом

$$P_k = P_{k.пер} + \Delta P_{k.пост} = c_k V_k + \Delta P_{k.пост}. \quad (29)$$

Определим слагаемые, входящие в (29), используя методику выбора мощности приводного двигателя, изложенную в [5]. Введем следующие обозначения:

- L – длина конвейера, м;
- v – скорость движения ленты, м/с;
- $q_{г}$ – вес груза на 1 м длины конвейера, Н/м;
- $q_{л}$ – вес 1 м ленты, Н/м;
- $q_{рг}$ – погонный вес вращающихся частей роликов, поддерживающих грузеную ветвь ленты, Н/м;
- $q_{рп}$ – то же порожнюю ветвь ленты, Н/м;
- w – общий коэффициент сопротивления движению ленты на роликоопорах, складывающийся из сопротивления трению в подшипниках и уплотнениях и сопротивления перекатыванию ленты по роликам.

Расчет выполняем во всех характерных точках ленточного конвейера, а силы сопротивления передвижению ленты суммируем согласно методу обхода по всему контуру ленты конвейера. При использовании этого метода замкнутый контур, образованный тяговым элементом, разбиваем на участки так, чтобы на каждом из них характер сопротивления был неизменным. Затем точ-

ку сбегающего тягового элемента с приводного барабана принимаем за начало и обходим последовательно весь контур по ходу движения ленты, подсчитывая сопротивления на отдельных участках и натяжения в тяговом элементе.

Пусть в т. 1 сила натяжения тягового элемента, сбегающего с приводного барабана, $F_1 = F_{CB}$ (рис. 5).

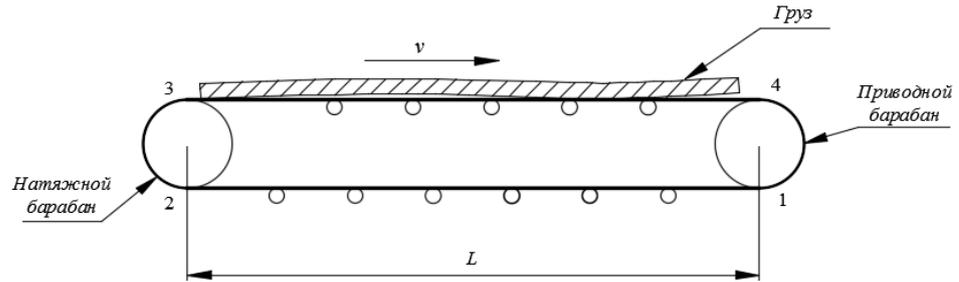


Рис. 5. Схема ленточного конвейера: 1 – 4 – точки приложения силы

Силу сопротивления в следующей по направлению движения т. 2 определяем как

$$F_2 = F_1 + F_{12}, \quad (30)$$

где F_{12} – сила сопротивления движению ленты на участке 1–2,

$$F_{12} = (q_L + q_{RP})Lw.$$

Рассчитываем силу натяжения в т. 3:

$$F_3 = F_2 + F_{23} = F_2 + k_{BH}F_2 = F_2(1 + k_{BH}), \quad (31)$$

где k_{BH} – коэффициент, характеризующий сопротивление на натяжном барабане, $k_{BH} = 0,05 \dots 0,07$ при угле обхвата барабана лентой 180° .

Сила натяжения (набегания) ленты в т. 4:

$$F_4 = F_{HAB} = F_3 + F_{34}, \quad (32)$$

где F_{34} – сила сопротивления на участке 3–4, $F_{34} = (q_G + q_L + q_{RG})Lw$.

С учетом изложенного выше

$$F_4 = F_{HAB} = (1 + k_{BH})[F_1 + (q_L + q_{RP})Lw] + (q_G + q_L + q_{RG})Lw. \quad (33)$$

Окружное усилие F_{OKP} на приводном барабане, которое должно обеспечиваться силами трения между лентой и барабаном, равно разности сил натяжения F_{HAB} ленты в точке набегания ее на барабан и в точке сбегающего F_{CB} ее с барабана:

$$\begin{aligned} F_{OKP} &= F_{HAB} - F_{CB} = F_4 - F_1 = \\ &= F_1 k_{BH} + [(1 + k_{BH})(q_L + q_{RP}) + (q_G + q_L + q_{RG})]Lw. \end{aligned} \quad (34)$$

Для того, чтобы лента не скользила на приводном барабане, между силами F_{HAB} и F_{CB} должно соблюдаться соотношение Эйлера:

$$F_{HAB} \leq F_{CB} e^{\mu\alpha}, \quad (35)$$

где μ – коэффициент сцепления ленты с поверхностью приводного барабана; α – угол обхвата барабана лентой, рад.

Тогда

$$F_{\text{ОКР}} = F_{\text{НАБ}} - F_{\text{СБ}} = F_{\text{СБ}}(e^{\mu\alpha} - 1) = F_1(e^{\mu\alpha} - 1). \quad (36)$$

Решая совместно (34) и (36), получаем

$$F_1 = \frac{[(1 + k_{\text{БН}})(q_{\text{Л}} + q_{\text{РП}}) + (q_{\text{Г}} + q_{\text{Л}} + q_{\text{РГ}})]Lw}{e^{\mu\alpha} - 1 - k_{\text{БН}}}. \quad (37)$$

Согласно (36) окружное усилие

$$F_{\text{ОКР}} = \frac{[(1 + k_{\text{БН}})(q_{\text{Л}} + q_{\text{РП}}) + (q_{\text{Г}} + q_{\text{Л}} + q_{\text{РГ}})]Lw}{e^{\mu\alpha} - 1 - k_{\text{БН}}}(e^{\mu\alpha} - 1). \quad (38)$$

По аналогии с цепным конвейером мощность, подводимая к конвейеру,

$$\begin{aligned} P_{\text{К}} &= \frac{(e^{\mu\alpha} - 1)Lw\rho g}{1000 \cdot 3600 (e^{\mu\alpha} - 1 - k_{\text{БН}})} V + \\ &+ \frac{[(1 + k_{\text{БН}})(q_{\text{Л}} + q_{\text{РП}}) + q_{\text{Л}} + q_{\text{РГ}}]v Lw}{1000(e^{\mu\alpha} - 1 - k_{\text{БН}})} (e^{\mu\alpha} - 1) = \\ &= c_{\text{К}}V_{\text{К}} + \Delta P_{\text{К.ПОСТ}}, \end{aligned} \quad (39)$$

что совпадает с найденной ранее зависимостью (29).

Рассуждая аналогично, получаем зависимость активной мощности, потребляемой двигателем из сети, от производительности конвейера:

$$\begin{aligned} P_{\text{Д}} &= (1 + b_{\text{Д}})(1 + b_{\text{Р}})c_{\text{К}}V_{\text{К}} + (1 + b_{\text{Д}})(1 + b_{\text{Р}})\Delta P_{\text{К.ПОСТ}} + [(1 + b_{\text{Д}})a_{\text{Р}}\eta_{\text{Р.НОМ}} + \\ &+ a_{\text{Д}}]P_{\text{Д.НОМ}} = c_{\text{Д}}V_{\text{К}} + P_{\text{Д.ПОСТ}}. \end{aligned} \quad (40)$$

Пример 2. Рассчитать энергетические характеристики горизонтального ленточного конвейера для транспортировки обрезных досок от лесопильной рамы 2-го ряда, используя условия примера 1. Технические характеристики конвейера представлены ниже.

Ширина ленты.....	500 мм
Длина ленты	50 м
Скорость ленты.....	0,5 м/с
Расстояние между роликowymi опорами нагруженной ветви конвейера...	1,3 м
Расстояние между роликowymi опорами на порожней ветви конвейера....	2,6 м
Вес 1 м (погонного) ленты.....	83 Н/м
Общий коэффициент сопротивления движению по роликowym опорам...	0,025
Коэффициент сцепления ленты с поверхностью приводного барабана.....	0,65
Угол охвата барабана лентой.....	3,14 рад
Коэффициент, характеризующий сопротивление на натяжном барабане.....	0,06
Установленная мощность двигателя.....	5 кВт
КПД редуктора.....	0,92
КПД двигателя.....	0,87

Решение. 1. Выполняем расчет часовой производительности ленточного конвейера.

В работе [7] приведен пример расчета постова при распиловке бревен по указанной схеме. Суммарный объем обрезных досок составляет 0,1188 м³, или 42,42 % объема бревна. В этом случае расчетная производительность ленточного конвейера при транспортировке досок

$$V_K = 0,4242 V_{\Pi} = 0,4242 \cdot 26,61 = 11,29 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

2. Вес транспортируемого груза, приходящийся на 1 м длины конвейера,

$$q_{\Gamma} = \frac{V_K \rho g}{3600 v} = \frac{11,29 \cdot 505 \cdot 9,81}{3600 \cdot 0,5} = 31,06 \text{ Н/м}.$$

3. Погонный вес вращающихся частей роликов, поддерживающих грузеную ветвь,

$$q_{\text{РГ}} = \frac{q_{\text{Р}}}{l_{\text{Р}}} = \frac{73,5}{1,3} = 56,54 \text{ Н/м}.$$

4. Погонный вес вращающихся частей роликов, поддерживающих порожнюю ветвь,

$$q_{\text{РП}} = \frac{q_{\text{Р}}}{2l_{\text{Р}}} = \frac{73,5}{2,6} = 28,27 \text{ Н/м}.$$

5. Окружное усилие на приводном барабане

$$F_{\text{ОКР}} = \frac{[(1 + k_{\text{БН}})(q_{\text{Л}} + q_{\text{РП}}) + (q_{\Gamma} + q_{\text{Л}} + q_{\text{РГ}})]Lw}{e^{\mu\alpha} - 1 - k_{\text{БН}}} (e^{\mu\alpha} - 1) =$$

$$= \frac{[(1 + 0,06)(83 + 28,27) + (31,06 + 83 + 56,54)] \cdot 50 \cdot 0,025}{e^{0,65 \cdot 3,14} - 1 - 0,06} \times$$

$$\times (e^{0,65 \cdot 3,14} - 1) = 364,4 \text{ Н}.$$

6. Мощность на приводном барабане конвейера

$$P_{\text{К}} = \frac{F_{\text{ОКР}} v}{1000} = \frac{364,4 \cdot 0,5}{1000} = 0,182 \text{ кВт}.$$

7. Частичный удельный расход энергии конвейера

$$c_{\text{К}} = \frac{(e^{\mu\alpha} - 1)Lw\rho g}{1000 \cdot 3600 (e^{\mu\alpha} - 1 - k_{\text{БН}})} = \frac{(e^{0,65 \cdot 3,14} - 1) \cdot 50 \cdot 0,025 \cdot 505 \cdot 9,81}{3600000 (e^{0,65 \cdot 3,14} - 1 - 0,06)} =$$

$$= 0,00174 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3.$$

8. Постоянная составляющая мощности на приводном барабане

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{к.пост}} &= \frac{[(1 + k_{\text{БН}})(q_{\text{Л}} + q_{\text{РП}}) + q_{\text{Л}} + q_{\text{РГ}}]vLw}{1000(e^{\mu\alpha} - 1 - k_{\text{БН}})}(e^{\mu\alpha} - 1) = \\ &= \frac{[(1 + 0,06)(83 + 28,27) + 83 + 56,54] \cdot 0,5 \cdot 50 \cdot 0,025}{1000(e^{0,65 \cdot 3,14} - 1 - 0,06)}(e^{0,65 \cdot 3,14} - 1) = \\ &= 0,162 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Проверка. 9. Рассчитываем мощность на приводной звездочке по формуле (1):

$$P_{\text{к}} = c_{\text{к}}V + \Delta P_{\text{к.пост}} = 0,00174 \cdot 11,29 + 0,162 = 0,182 \text{ кВт},$$

что совпадает с полученным выше результатом.

10. Находим коэффициенты потерь энергии в редукторе, принимая для простой кинематической схемы $\chi_{\text{р}} = 1$. Тогда

$$a_{\text{р}} = b_{\text{р}} = \frac{1 - \eta_{\text{р.ном}}}{2\eta_{\text{р.ном}}} = \frac{1 - 0,92}{2 \cdot 0,92} = 0,0435.$$

11. Находим коэффициенты потерь энергии в двигателе. Для рассматриваемого двигателя отношение потерь $\chi_{\text{д}} = 0,4$ [4]. Тогда коэффициент переменных потерь

$$b_{\text{д}} = \frac{1 - \eta_{\text{д.ном}}}{1,4\eta_{\text{д.ном}}} = \frac{1 - 0,87}{1,4 \cdot 0,87} = 0,1067,$$

коэффициент постоянных потерь

$$a_{\text{д}} = \chi_{\text{д}}b_{\text{д}} = 0,4 \cdot 0,1067 = 0,0427.$$

12. Частичный удельный расход электроэнергии двигателя

$$\begin{aligned} c_{\text{д}} &= (1 + b_{\text{д}})(1 + b_{\text{р}})c_{\text{к}} = (1 + 0,1067)(1 + 0,0435) \cdot 0,00174 = \\ &= 0,002 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3. \end{aligned}$$

13. Постоянная составляющая мощности, потребляемой двигателем,

$$\begin{aligned} P_{\text{д.пост}} &= (1 + b_{\text{д}})(1 + b_{\text{р}})\Delta P_{\text{к.пост}} + [(1 + b_{\text{д}})a_{\text{р}}\eta_{\text{р.ном}} + a_{\text{д}}]P_{\text{д.ном}} = \\ &= (1 + 0,1067) \cdot (1 + 0,0435) \cdot 0,162 + \\ &+ [(1 + 0,1067) \cdot 0,0435 \cdot 0,92 + 0,0427] \cdot 5 = 0,62 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

14. Мощность, потребляемая двигателем из сети при данной производительности,

$$P_{\text{д}} = c_{\text{д}}V_{\text{к}} + P_{\text{д.пост}} = 0,002 \cdot 11,29 + 0,62 = 0,64 \text{ кВт}.$$

15. Полный удельный расход электроэнергии, отнесенный к производительности лесопильного потока,

$$d = c_d \frac{V_K}{V_{\Pi}} + \frac{P_{\text{д.пост}}}{V_{\Pi}} = 0,02 \cdot \frac{11,29}{26,61} + \frac{0,62}{26,61} = 0,0318 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3;$$

полный удельный расход электроэнергии, отнесенный к производительности ленточного конвейера,

$$d = c_d + \frac{P_{\text{д.пост}}}{V_K} = 0,02 + \frac{0,62}{11,29} = 0,0749 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3.$$

Выполняя аналогичные расчеты для других диаметров распиливаемого сырья, получаем значения объемной производительности, потребляемой мощности и удельного расхода энергии приведенные в таблице (см. с. 139).

Заключение

В результате исследований найдены аналитические зависимости между потребляемой мощностью, удельным потреблением электроэнергии и производительностью транспортных устройств, получившие название энергетических характеристик.

Установлено, что энергетические характеристики потребляемой мощности конвейеров носят линейный характер. Наличие энергетических характеристик позволяет более качественно подходить к вопросу планирования и нормирования удельных расходов энергии по каждому типоразмеру сортиментов и производству в целом.

Выявлены основные технологические факторы и параметры оборудования и сырья, влияющие на удельное потребление электроэнергии транспортными устройствами.

Используемый метод дает возможность выразить полезную нагрузку на агрегат через производительность – показатель, по которому оцениваются результаты работы агрегата, технологического участка, цеха и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев С.П. Энергетическая характеристика электропривода механизма окорки роторного окорочного станка // Лесн. журн. 2007. № 3. С. 94–100. (Изв. высш. учеб. заведений).
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. 96–100. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Алексин М.В., Синев В.С., Пижурич П.А., Коперин И.Ф., Головкин С.И., Павлюк В.А. Экономия энергоресурсов в лесной и деревообрабатывающей промышленности. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 216 с.
5. Зенков Р.Л., Ивашиков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1987. 432 с.

6. Инструкция по расчету производственной мощности лесопильного предприятия. Архангельск: ЦНИИМОД, 1986. 65 с.
7. Рыкунин С.Н., Пятков В.Е. Методы составления и расчета поставок: учеб. пособие. М.: МГУЛ, 2002. 69 с.
8. Силаев А.Б., Козориз Г.Ф. Подъемные и транспортные устройства деревообрабатывающих предприятий: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 409 с.
9. Стиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины: учеб. пособие для машиностроит. вузов. М.: Машиностроение, 1983. 487 с.
10. Kreisel K., Jochem E. Druckluft rationell erzeugen und nutzen // Fachartikel im Rahmen der Initiative «Energie effizient nutzen-Schwerpunkt Storm», Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 1996.
11. Leber J.F., Matthews M.B. Neurale Netsuke: eine Uebersicht. Bull. SEV/VSE 80.1989.
12. Rummelhart D.E., Hinton D.E., Williams R.J. Learning Representations by Back-Propagating Errors // Nature. 1986. Vol. 323. Pp. 533–536.
13. Tonsing E. Stromsparende Beleuchtungssysteme – mehr Licht für weniger Kosten // Fachartikel im Rahmen der Initiative «Energie effizient nutzen-Schwerpunkt Storm». Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 1996.

Поступила 26.12.16

UDC 621.311
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.130

Electrical Energy Rationing of Transport Units in the Woodworking Industry

S.P. Ageev, Doctor of Engineering Sciences, Professor

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

Electrical energy rationing in woodworking enterprises is based in accordance with the decomposition of production into the items and processes by the output types, and individual sectors (units, shops, enterprises). We distinguish operational specific power requirements for items and total specific power requirements for separate industrial processes. The purpose of this article is to develop an approach to the operating quota setting of the specific energy consumption for underway operations of the woodworking industry: wood hauling, timber transporting from lumber yards to the shops, and technical operations servicing between separate units. We investigate the energy properties of conveyor electric drives when the power waste and useful power consumption are determined by some loss factors and unit capacity. The analytical dependencies – the energetic characteristics – between power consumption, specific energy consumption and conveyor capacity are obtained. This method allows us to express the useful load on the unit through productivity – an evaluating indicator of the results of the unit, site, and shop operation. The presence of energy characteristics helps to consider the issue of specific energy consumption scheduling for each type of timber assortments and the production as a whole. The energy characteristic of power consump-

For citation: Ageev S.P. Electrical Energy Rationing of Transport Units in the Woodworking Industry. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 4, pp. 130–148. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.130

tion of transport devices is linear; of the specific energy consumption is non-linear. The main technological factors and parameters of equipment and raw materials influencing on the specific energy consumption of conveyors are revealed.

Keywords: conveyer, performance, energetic characteristic, consumed power, specific energy consumption, electric power waste, underway operation, woodworking industry.

REFERENCES

1. Ageev S.P. Energeticheskaya kharakteristika elektroprivoda mekhanizma okorki rotnogo okorochnogo stanka [Energy Characteristic of Electric Drive of Barking Mechanism of Rotor Debarking Machine]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2007, no. 3, pp. 94–100.
2. Ageev S.P. Energeticheskaya kharakteristika mekhanizma rezaniya lesopil'noy ramy [Energetic Characteristic of Cutting Mechanism of Frame Saw]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2009, no. 1, pp. 95–100.
3. Ageev S.P. Energeticheskaya kharakteristika elektroprivoda mekhanizma rezaniya lesopil'noy ramy [Energy Characteristic of Electric Drive for Cutting Mechanism of Saw Frame]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2009, no. 2, pp. 96–101.
4. Aleksin M.V., Sinev V.S., Pizhurin P.A., Koperin I.F., Golovkov S.I., Pavlosyuk V.A. *Ekonomiya energoresursov v lesnoy i derevoobrabatyvayushchey promyshlennosti* [Energy Conservation in the Timber and Woodworking Industry]. Moscow, 1982. 216 p.
5. Zenkov R.L., Ivashkov I.I., Kolobov L.N. *Mashiny nepreryvnogo transporta: ucheb. dlya vuzov* [Stream-Flow Transportation]. Moscow, 1987. 432 p.
6. *Instruktsiya po raschetu proizvodstvennoy moshchnosti lesopil'nogo predpriyatiya* [Instruction on the Production Capacity Calculation of the Sawmill]. Arkhangel'sk, 1986. 65 p.
7. Rykunin S.N., Pyatkov V.E. *Metody sostavleniya i rascheta postavov: ucheb. posobie* [Methods of Compilation and Calculation of Sawing Patterns]. Moscow, 2002. 69 p.
8. Silaev A.B., Kozoriz G.F. *Pod'emnye i transportnye ustroystva derevoobrabatyvayushchikh predpriyatiy: ucheb. dlya vuzov* [Lifting and Transport Devices of Woodworking Enterprises]. Moscow, 1989. 409 p.
9. Spivakovskiy A.O., D'yachkov V.K. *Transportiruyushchie mashiny: ucheb. posobie dlya mashinostroit. vuzov* [Transporting Machines]. Moscow, 1983. 487 p.
10. Kreisel K., Jochem E. Druckluft rationell erzeugen und nutzen. *Fachartikel im Rahmen der Initiative "Energie effizient nutzen – Schwerpunkt Storm"*. Baden-Württemberg, Germany, 1996.
11. Matthews M.B., Leber J.F. Neurale Netzwerke: Ein Übersicht. *Bulletin of the Swiss Electronic Society (SEV)*, 1989, vol. 15, pp. 923–932.
12. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning Representations by Back-Propagating Errors. *Nature*, 1986, vol. 323, pp. 533–536.
13. 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 December 26, 2016