

УДК 621.86

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ТЯГОВОМУ РАСЧЕТУ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Гончаров К.А., Дунаев В.П.

Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)

Предложена вероятностная математическая модель распределения тяговых усилий между приводами многоприводных ленточных конвейеров, инверсионно учитывающая изменения скоростей разных точек контуров тяговых и грузонесущей лент за счет искусственного увеличения границ вероятностного интервала отклонения скольжения двигателей приводов. С учетом предложенной математической модели сформулирован комплексный подход к тяговому расчету ленточных конвейеров традиционной конструкции и случайной конфигурации, основанный на представлении структурных элементов процесса тягового расчета в виде классифицирующих признаков с соответствующим математическим описанием, набор которых для каждого уникального проектного случая формирует соответствующие специфические системы уравнений тягового расчета.

Ключевые слова: ленточный конвейер, вероятностная математическая модель, система приводов, отклонение скольжения двигателя, тяговый расчет, комплексный подход.

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-144-151

Распределение тяговых усилий между приводами при работе многоприводных ленточных конвейеров определяет точность тягового расчета и, в связи с этим, непосредственно влияет на выбор типоразмеров грузонесущей и тяговой лент, систем управления приводами, а также непосредственно на структуру системы приводов. В [1, 2] предложены математические модели распределения тяговых усилий между приводами многоприводных ленточных конвейеров, учитывающие следующие особенности:

- в структуру моделей включены механические характеристики не только электропривода, но и объемного насосного гидропривода, а также комплексные механические характеристики при совместной работе электродвигателей и гидромуфта;
- учитывается продольное растяжение грузонесущей и тяговой лент с помощью уравнения идеально растяжимой гибкой нити;
- модели адаптированы для возможности учета при их построении сопротивлений движению лент как зависящих от их натяжения, так и не зависящих от него;
- модели позволяют анализировать работу как нескольких барабанных приводов в структуре конвейера, так и работу барабанных приводов совместно с промежуточными ленточными приводами.

В [3] был предложен вероятностный подход к определению отклонений скольжения электродвигателей приводов ленточных конвейеров на основе закона нормального распределения вероятностей. В основу подхода

положена идея зависимости границ интервала отклонения скольжения электродвигателя от качества его исполнения с одной стороны, и вариации указанных границ в зависимости от применяемых в приводах систем управления и необходимой точности расчета – с другой. Учет продольного растяжения тяговых и грузонесущей лент с помощью уравнения идеально растяжимой гибкой нити [4] по факту приводит к созданию дополнительного интервала дифференциации скоростей в разных точках контуров лент. Поскольку определяющими в данном случае являются значения скоростей в точках набегания лент на приводные барабаны и точки начала зон покоя при контакте тяговых лент с грузонесущей, то указанный интервал разности скоростей можно привязать к вероятностной модели отклонения скольжения электродвигателей, определив в общем виде его границы и степень влияния различных сопутствующих факторов на их значения.

Данное утверждение сводится к следующему принципу: в реальном конвейере упругая лента (с разными скоростями в разных точках трассы) синхронизирует работу приводов, имеющих отклонения механических характеристик в соответствии с качеством их изготовления; в предлагаемой математической модели лента принимается в виде абсолютно неупругого элемента с одинаковыми скоростями в разных точках трассы конвейера, при этом скольжение электродвигателя каждого привода получает дополнительное отклонение, эквивалентное изменению ско-

ростей на обечайках приводных барабанов, в случае учета упругих свойств ленты.

Максимальное значение интервала дифференциации скоростей соответствует возрастанию на рассматриваемом участке натяжения ленты до максимальной величины, по которой производят выбор ленты с учетом коэффициентов запаса. Согласно [5] относительное удлинение резинотканевой ленты определяют при приложении нагрузки, составляющей 10% номинальной прочности образца, при ширине последнего 50 ± 1 мм. Таким образом, в общем случае при применении в качестве грузонесущей и тяговой резинотканевых лент известного типоразмера с определенной шириной максимальный интервал дифференциации скоростей в разных точках контура одной ленты определится из зависимости:

$$V_{i+1} = V_i(1 + \varepsilon_i) = V_i \left(1 + \frac{50\varepsilon}{(0,8...1,2)B} \right), \quad (1)$$

где ε_i – относительное удлинение ленты на рассматриваемом участке трассы конвейера; ε – нормативное относительное удлинение ленты, определенное согласно [5]; B – ширина ленты, мм; V_{i+1} , V_i – линейная скорость точки на обечайке приводного барабана, соответственно учитывающая и не учитывающая искусственное отклонение механической характеристики электродвигателя, эквивалентное изменению скорости ленты при её растяжении-сжатии.

При анализе совместной работы контуров грузонесущей и тяговой лент, с учетом их взаимодействия, зависимость (1) примет вид:

$$V_{i+1} = V_i \left(1 + \frac{50\varepsilon_{cp}}{(0,8...1,2)B_{cp}} \right) \left(1 + \frac{50\varepsilon_m}{(0,8...1,2)B_m} \right), \quad (2)$$

где ε_{cp} – нормативное относительное удлинение грузонесущей ленты на рассматриваемом участке трассы конвейера, определенное согласно [5]; ε_m – нормативное относительное удлинение тяговой ленты на рассматриваемом участке трассы промежуточного привода, определенное согласно [5]; B_{cp} – ширина грузонесущей ленты, мм; B_m – ширина тяговой ленты, мм;

Коэффициенты 0,8...1,2 в зависимостях (1), (2) учитывают рекомендуемый диапазон задаваемого коэффициента запаса прочности (8...12) [6]. С учетом зависимостей (1), (2) максимальное отклонение скольжения (в %)

электродвигателя какого-либо привода по отношению к номинальному значению составит (для контура одной ленты):

$$\Delta s = \left[\left(1 + \frac{50\varepsilon}{(0,8...1,2)B} \right) (1 - s_{ном}) - 1 + s_{ном} \right] \frac{100}{s_{ном}}, \quad (3)$$

где $s_{ном}$ – номинальное скольжение электродвигателя.

Для конвейеров с несколькими контурами лент (грузонесущим и тяговыми)

$$\Delta s = \left[\left(1 + \frac{50\varepsilon_{cp}}{(0,8...1,2)B_{cp}} \right) \times \left(1 + \frac{50\varepsilon_m}{(0,8...1,2)B_m} \right) (1 - s_{ном}) - 1 + s_{ном} \right] \frac{100}{s_{ном}}. \quad (4)$$

К примеру, при применении резинотканевой ленты с прокладками из ткани ТК при величине $\varepsilon = 0,04$, ширине ленты 1600 мм и величине принятого коэффициента запаса прочности 8 (в зависимости (3) соответствует 0,8) отклонение линейной скорости ленты от номинальной величины при максимальной нагрузке участка между приводными барабанами (в структуре трассы конвейера только один контур грузонесущей ленты) эквивалентно отклонению скольжения электродвигателя одного из приводов от номинального на 7,66 %. При этом, согласно [7] допускаются отклонения скольжения электродвигателей в диапазоне $\pm 20\%$.

Введение в математическую модель распределения тяговых усилий между приводами многоприводных ленточных конвейеров увеличенного допустимого интервала отклонения скольжения $\pm 20\% \pm \Delta s$ с учетом вероятностного подхода позволяет уйти от трудоемкой процедуры учета продольного растяжения ленты на каждом участке трассы конвейера, заменив его максимально возможным по прочности ленты эквивалентным отклонением скольжения электродвигателя соответствующего привода. Данный подход также позволяет привести уравнения систем тягового расчета, описанные в [8, 9] к линейному виду.

При использовании в конструкции конвейера резинотросовой ленты учитывать интервал Δs нет необходимости в связи со значительным снижением её нормативного относительного удлинения ε по сравнению с резинотканевыми лентами (в 10 раз и более).

В данном случае достаточно учесть номинальный интервал отклонения скольжения электродвигателей от номинального $\pm 20\%$.

С учетом применения вероятностного подхода математические модели, предло-

женные в [1, 2], приобретают вероятностный характер. Общую для данных моделей последовательность их построения можно представить в виде схемы (рис. 1).



Рис. 1. Последовательность построения вероятностной математической модели распределения тяговых усилий между приводами многоприводных ленточных конвейеров

Предложенная вероятностная математическая модель распределения тяговых усилий между приводами многоприводных ленточных конвейеров совместно с моделями, описанными в [1, 2, 8, 9], а также с учетом

классических методик тягового расчета ленточных конвейеров [4, 6], позволяют создать комплексную процедуру подбора наилучшей методики тягового расчета для каждого уникального проектного случая.

Тяговый расчет ленточного конвейера в общем случае является процедурой с неоднозначно определяемыми параметрами, сочетания которых в каждой конкретной проектной ситуации формируются в зависимости от следующих факторов:

- 1) конфигурации системы приводов по входящим в её структуру типам приводов;
- 2) конфигурации системы приводов по расстановке приводов с учетом особенностей трассы конвейера;
- 3) применяемой при расчете гипотезы (принципа) распределения тяговых усилий между приводами;
- 4) принципа определения сопротивлений движению ленты конвейера.

Влияние первого и третьего из указанных факторов при проведении тягового расчета отражается во введении в систему уравнений расчета [8, 9] дополнительных уравнений и неравенств, определяющих накладываемые условия и ограничения. Второй и четвертый факторы формируют только лишь вид базового уравнения тягового расчета, получаемого обходом по контуру трассы конвейера. Взаимодействие между собой всех четырех факторов можно представить в виде графа (рис. 2). В структуру графа включены следующие признаки:

- **m1.1** – тяговые усилия распределяются пропорционально тяговым факторам приводов;
- **m1.2** – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов при их номинальных значениях;
- **m1.3** – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов и их возможных отклонений;
- **m1.4** – тяговые усилия распределяются пропорционально сопротивлениям соответствующих участков трассы конвейера;
- **m1.5** – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов при их номинальных значениях и продольного растяжения ленты;
- **m1.6** – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов, их возможных отклонений и продольного растяжения ленты;
- **m2.1** – конструкция системы приводов предусматривает наличие дополнительных изгибов грузонесущей ленты на промежуточных приводах;

- **m2.2** – конструкция системы приводов предусматривает отсутствие дополнительных изгибов грузонесущей ленты на промежуточных приводах;

- **m3.1** – сопротивления движению ленты конвейера определяются приближенным тяговым расчетом;

- **m3.2** – сопротивления движению ленты конвейера определяются подробным тяговым расчетом с обходом трассы конвейера при постоянном значении коэффициента сопротивления движению;

- **m3.3** – сопротивления движению ленты конвейера определяются подробным тяговым расчетом с обходом трассы конвейера с дифференцированным подходом к определению коэффициента сопротивления движению на каждом участке трассы конвейера.

Комплексный подход к тяговому расчету ленточного конвейера представляется в виде совокупности систем уравнений в соответствии со смысловым математическим описанием сформулированных выше элементов графа (табл. 1).

В формулах табл. 1 используются следующие обозначения: k – общий коэффициент местных сопротивлений на барабанах и батареях; $S_{сб}$ – натяжение ленты в точке сбега с приводного барабана; $\Sigma W_{лк}$ – сумма сопротивлений движению грузонесущей ленты на прямолинейных горизонтальных и наклонных участках, не зависящих от натяжения ленты (линейные сопротивления); $\Sigma W_{они}$ – сумма тяговых усилий промежуточных барабанных приводов; $\Sigma W_{в}$ – сумма сопротивлений движению верхней ветви грузонесущей ленты при приближенном тяговом расчете; $\Sigma W_{н}$ – сумма сопротивлений движению нижней ветви грузонесущей ленты при приближенном тяговом расчете; $\Sigma W_{лп}$ – сумма тяговых усилий промежуточных ленточных приводов, непосредственно снижающих натяжение грузонесущей ленты на участках этих приводов; e – основание натурального логарифма; μ_i – коэффициент сцепления между приводным барабаном и лентой; α – угол обхвата грузонесущей лентой приводного барабана; $q_{гп}$ – линейная сила тяжести груза; $q_{л}$ – линейная сила тяжести ленты; μ – коэффициент трения между грузонесущей и тяговой лентами; $L_{мкi}$ – длина тягового контура промежуточного привода;

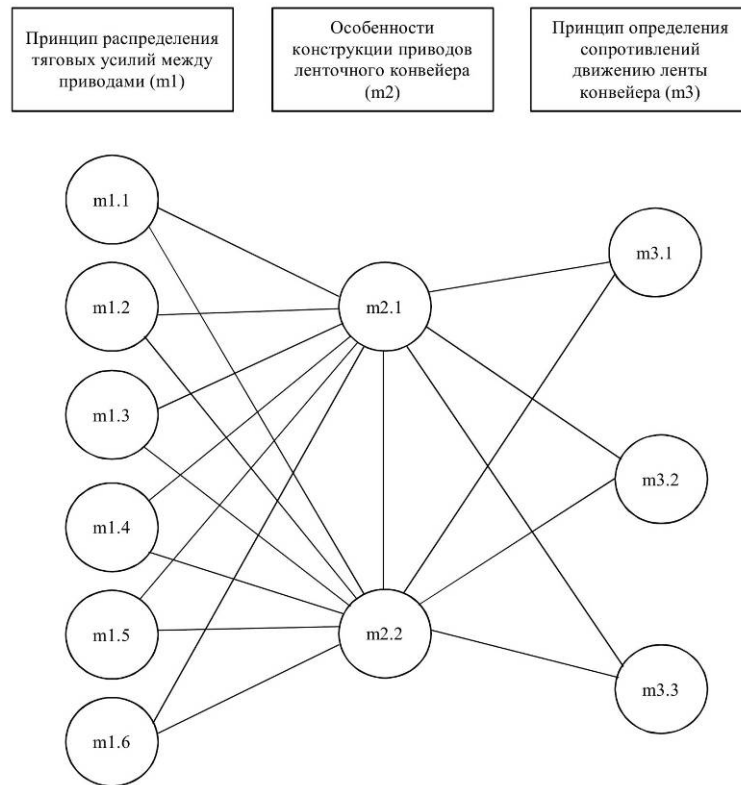


Рис. 2. Граф взаимодействия факторов, определяющих тяговый расчет ленточного конвейера

Таблица 1

Математическое описание элементов графа

{1}	m3.1 m2.1	$\sum W_{\varepsilon} + \sum W_{\text{н}} - \sum W_{\text{они}} = 0$
{2}	m3.1 m2.1 m2.2	$\begin{cases} \sum W_{\varepsilon} + \sum W_{\text{н}} - \sum W_{\text{они}} + \sum W_{\text{лн}} = 0 \\ w_{\text{лн}} \frac{E_{\text{н}} l_{\text{он}}}{E_{\text{н}} + E_{\text{м}}} + (w_{\text{н}} - w_{\text{лн}})(L_{\text{мк}} - l_{\text{он}}) = W_{\text{лн}} \end{cases}$
{3}	m3.2 (m3.3) m2.1	$k S_{\text{сб}} + \sum W_{\text{лк}} - \sum W_{\text{они}} = S_{\text{сб}}$
{4}	m3.2 (m3.3) m2.1 m2.2	$\begin{cases} k S_{\text{сб}} + \sum W_{\text{лк}} - \sum W_{\text{они}} + \sum W_{\text{лн}} = S_{\text{сб}} \\ w_{\text{лн}} \frac{E_{\text{н}} l_{\text{он}}}{E_{\text{н}} + E_{\text{м}}} + (w_{\text{н}} - w_{\text{лн}})(L_{\text{мк}} - l_{\text{он}}) = W_{\text{лн}} \end{cases}$
{5}	m1.1	$\begin{cases} k_{\text{зи}} W_{\text{они}} = S_{\text{сб}} (e^{\mu_i \alpha_i} - k_{\text{зи}}) \\ W_{\text{лн}} = (q_{\text{зп}} + q_{\text{л}}) L_{\text{мк}} \mu \cos \beta \end{cases}$
{6}	m1.2	$\begin{cases} W_{\text{они}} = W_{\text{они}}(n_{\text{инно}}) \\ W_{\text{лн}}(L_{\text{мк}} - l_{\text{он}}) = W_{\text{он}}(n_{\text{лн}}) - F_{\text{мк}}(l_{\text{он}}, S_{\text{сб}}) \\ k_{\text{зи},j} W_{\text{они},j} = S_{\text{сб},j} (e^{\mu_{i,j} \alpha_{i,j}} - k_{\text{зи},j}) \end{cases}$
{7}	m1.3	$\begin{cases} W_{\text{они}} = W_{\text{они}}(n_{i \min} \dots n_{i \max}, \Delta \varepsilon) \\ W_{\text{лн}}(L_{\text{мк}} - l_{\text{он}}) = W_{\text{он}}(n_{i \min} \dots n_{i \max}, \Delta \varepsilon) - F_{\text{мк}}(l_{\text{он}}, S_{\text{сб}}) \\ k_{\text{зи},j} W_{\text{они},j} = S_{\text{сб},j} (e^{\mu_{i,j} \alpha_{i,j}} - k_{\text{зи},j}) \end{cases}$

{8}	m1.4	$\begin{cases} W_{\delta ni} = W_{\pi i} \\ W_{nnj} = W_{\pi j} + F_{mkj} \\ k_{zi,j} W_{\delta ni,j} = S_{c\delta i,j} \left(e^{\mu_{i,j} \cdot \alpha_{i,j}} - k_{zi,j} \right) \end{cases}$
{9}	m1.5	$\begin{cases} W_{\delta ni} = W_{\delta ni}(n_{инно}) \\ W_{nnj}(L_{mkj} - l_{onj}) = W_{\delta nj}(n_{инно}) - F_{mkj}(l_{onj}, S_{c\delta j}) \\ n_j = f(n_i, E_n, E_m, S_{c\delta}, l_{onj}) \\ n_i = f(n_{i-1}, E_n, S_{c\delta}) \\ k_{zi,j} W_{\delta ni,j} = S_{c\delta i,j} \left(e^{\mu_{i,j} \cdot \alpha_{i,j}} - k_{zi,j} \right) \end{cases}$
{10}	m1.6	$\begin{cases} W_{\delta ni} = W_{\delta ni}(n_{i \min \dots n_{i \max}}, \Delta \varepsilon \pm \Delta s) \\ W_{nnj}(L_{mkj} - l_{onj}) = W_{\delta nj}(n_{i \min \dots n_{i \max}}, \Delta \varepsilon \pm \Delta s) - F_{mkj}(l_{onj}, S_{c\delta j}) \\ k_{zi,j} W_{\delta ni,j} = S_{c\delta i,j} \left(e^{\mu_{i,j} \cdot \alpha_{i,j}} - k_{zi,j} \right) \end{cases}$

β – угол наклона конвейера к горизонту; l_{onj} – длина зоны относительного покоя между грузонесущей и тяговой лентами на промежуточном приводе [9]; E_n – жесткость на растяжение грузонесущей ленты; E_m – жесткость на растяжение тяговой ленты; w_{ni} – удельное сопротивление от подъема груза на заданном перепаде высот при наклонном расположении промежуточного привода [9]; w_{jy} – удельное сопротивление движению лент конвейера в зоне относительного покоя грузонесущей и тяговой лент на промежуточном приводе [9]; W_{nni} – удельное полезное тяговое усилие промежуточного привода, передаваемое грузонесущей несущей ленте [9]; F_{mki} – собственное сопротивление движению тягового контура промежуточного привода [9]; $W(n)$ – функции механических характеристик двигателей приводов, в которых в качестве аргумента выступают частоты вращения вала двигателя n .

Предложенное структурированное описание (табл. 1) фактически представляет собой набор базовых структурных элементов, из которых проектировщик составляет уникальную методику тягового расчета для своего проектного случая.

К примеру, при расчете сравнительно короткого ленточного конвейера с одним барабанным головным приводом достаточно использовать сочетание m1.1 - m2.1 - m3.1. Тогда итоговая система уравнений тягового

расчета с учетом данных табл. 1, включит в себя системы уравнений позиций {1} и {5}. При расчете протяженного многоприводного конвейера с резинотканевыми лентами, включающими в структуру конструкции промежуточные барабанные и ленточные приводы, целесообразно использовать сочетание m1.6 - m2.1 - m2.2 - m3.3. Итоговая система уравнений тягового расчета включит в себя системы уравнений позиций {4} и {10}.

Предложенный комплексный подход к тяговому расчету ленточных конвейеров охватывает весь спектр возможных параметров и конфигураций конвейеров как с одним, так и с несколькими приводами, что гармонично вписывается в концепцию создания единого метода проектирования ленточных конвейеров традиционной конструкции.

С учетом предложенной вероятностной математической модели распределения тяговых усилий между приводами многоприводных ленточных конвейеров для самых сложных конфигураций систем приводов можно синтезировать системы линейных уравнений тягового расчета, что значительно упрощает создание автоматизированных алгоритмов их решения.

Список литературы

1. Гончаров, К.А. Обоснование выбора систем приводов протяженных ленточных конвейеров со сложной трассой: дис... канд.

техн. наук: 05.05.04 / Гончаров Кирилл Александрович. – Брянск, 2011. – 148 с.

2. Реутов, А.А. Анализ совместной работы концевой и промежуточного приводов ленточного конвейера / А.А. Реутов, К.А. Гончаров // Вестник Брянского государственного технического университета, 2010. – № 2. – С. 42–45.

3. Гончаров, К.А. Вероятностный подход к определению отклонений скольжения электродвигателей приводов ленточных конвейеров / К.А. Гончаров // Приводы и компоненты машин. – 2016. – № 4-5. – С. 13–15.

4. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В.И. Галкин, В.Г. Дмитриев, В.П. Дьяченко. – М.: Изд-во МГГУ, 2005. – 543 с.

5. ГОСТ 20-85 Ленты конвейерные резиноканевые. Технические условия. Дата введения 01-01-1987.

6. Спиваковский, А.О. Транспортирующие машины / А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. – М.: Машиностроение, 1983. – 437 с.

7. ГОСТ Р 52776-2007 Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. Дата введения 01-01-2008.

8. Гончаров, К.А. Совершенствование тягового расчета многоприводных ленточных конвейеров с учетом механических характеристик приводов / К.А. Гончаров // Подъемно-транспортное дело. – 2011. – № 4. – С. 2–5.

9. Гончаров, К.А. Определение зон относительного скольжения и покоя грузонесущей и тяговой лент при использовании промежуточных приводов ленточных конвейеров / К.А. Гончаров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. – №2. – С.31–37.

Об авторах

Гончаров Кирилл Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», ptm_bstu@mail.ru.

Дунаев Владимир Петрович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», ptm_bstu@mail.ru.

THE INTEGRATED APPROACH TO TRACTION CALCULATION OF BELT CONVEYORS

Goncharov K.A., Dunaev V.P.

Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

There was suggested a probabilistic mathematical model of tractive effort distribution among the drives of multidrive belt conveyors. This model takes into account (in an inverted way) speed variations of different points of tractive and carrying belt forms using an artificial increase in probabilistic interval boundaries of slide departures of drive engines. Taking into consideration the given mathematical model, an integrated approach to traction calculation of belt conveyor of conventional construction and random configuration is formulated. This approach is based on presentation of units of the traction calculation process in the form of classifying characteristics with the corresponding mathematical description. The set of these classifying characteristics for each unique engineering case forms the corresponding specific equation systems of traction calculation.

Key words: belt conveyor, probabilistic mathematical model, drive system, slide departure of engine, traction calculation, integrated approach.

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-144-151

References

1. Goncharov K.A. Justification of the choice of drive systems long belt conveyors with complex route. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Bryansk. 2011. (In Russian)

2. Reutov A.A., Goncharov K.A. Analysis of mutual work of belt conveyor's head and intermediate drives. *Vestnik BGTU*, 2010, No. 2, pp .42–45. (In Russian)

3. Goncharov K.A. The probabilistic approach to determining the slide departures of electric motors of belt conveyors. *Privody i komponenty mashin*, 2016, No. 4-5, pp. 13-15. (In Russian)

4. Galkin V.I., Dmitriev V.G., Dyachenko V.P. Actual theory of belt conveyors in mining. Moscow, MSMU publishing company, 2005. 543 p. (In Russian)

5. GOST 20-85 Rubber conveyor belts. Specifications. Moscow: Izdatelstvo standartov, 2004. (In Russian)

6. Spivakovskiy A.O., Dyachkov V.K. Transporting machines. Moscow, Mashinostroyeniye, 1983. 437 p. (In Russian)

7. GOST R 52776-2007 Rotating electrical machines. Nominal data and specifications. Moscow, Standartinform, 2008. (In Russian)

8. Goncharov K.A. Improving the calculation of traction of multi-drive belt conveyors taking into account the mechanical characteris-

tics of drives. *Podemno-transportnoe delo*, 2011, No. 4, pp. 2-5. (In Russian)

9. Goncharov K.A. Determination of relative immobile and sliding areas between carrying and tractive belts in using of belt conveyor intermediate drives. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 66-70. (In Russian)

Authors' information

Kirill A. Goncharov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, ptm_bstu@mail.ru.

Vladimir P. Dunaev – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, ptm_bstu@mail.ru.

Дата принятия к публикации
(Date of acceptance for publication)
10.06.2018

Дата публикации
(Date of publication):
25.06.2018

