

УДК 621.867

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТКАЗА ВЕДУЩИХ ПОДВЕСОК
КОНВЕЙЕРА С ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ПРИВОДОМ
ПРИ ЗАКЛИНИВАНИИ ХОЛОСТЫХ РОЛИКОВ

MATHEMATICAL MODEL OF FAILURE THE DRIVES SUSPENSIONS OF THE
CONVEYOR WITH SUSPENDED BELT AND DISTRIBUTED DRIVE AT JAMMING
NON-DRIVE ROLLERS

Толкачев Е.Н.
Tolkachev E.N.

Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)
Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. Статья посвящена актуальному вопросу, связанному с моделированием отказов приводных подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом. Разработана математическая модель отказа индивидуальных приводов подвесок вследствие заклинивания холостых роликов. Для базового варианта конвейера с подвесной лентой выполнено моделирование динамических характеристик.

Ключевые слова: конвейер ленточный, лента подвесная, модель математическая, отказ, подвеска, привод распределенный, заклинивание ролика.

Дата принятия к публикации: 11.09.2018
Дата публикации: 25.09.2018

Сведения об авторе:

Толкачев Евгений Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», tolkachev_en@mail.ru.
ORCID: 0000-0002-2567-6336

† **Abstract.** The article is devoted to the topical issue, which is related to simulation of the failures of drives suspensions of the conveyor with suspended belt and distributed drive. A mathematical model of the failure of individual drives of suspensions due to the jamming of the non-drive rollers has been developed. Dynamic characteristics of the basic version of a conveyor-feeder with suspended belt were simulated.

† **Keywords:** conveyor belt, distributed drive, failure, jamming roller, mathematical model, suspended belt, suspension.

† **Date of acceptance for publication:** 11.09.2018
† **Date of publication:** 25.09.2018

† **Author' information:**

† Evgeniy N. Tolkachev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department “Lifting and transport machines and equipment” at Bryansk State Technical University, tolkachev_en@mail.ru.
† ORCID: 0000-0002-2567-6336

Конвейеры с подвесной лентой и распределенным приводом (рис. 1) предназначены для бесперегрузочного транспортирования насыпных грузов по трассам произвольной конфигурации и неограниченной протяженности. Подробное описание конструкций и принципа действия таких транспортирующих установок приводится в широком ряде научных работ [1-5].

Отличительная конструктивная особенность конвейеров с подвесной лентой и распределенным приводом заключается в наличии большого количества приводных и не-приводных подвесок, закрепленных по бортам ленты с постоянным шагом вдоль трассы

конвейера. В тяжелых условиях эксплуатации, связанных с транспортированием насыпных грузов (в особенности пылевидных, агрессивных) под влиянием факторов окружающей среды, в совокупности с несвоевременным техническим обслуживанием и ремонтом, происходят отказы подвесок конвейера, проявляющиеся в заклинивании холостых роликов. Потенциально возможные специфические виды отказов, обусловленные конструктивными особенностями конвейеров с подвесной лентой и распределенным приводом, приведены в ряде публикаций [6-8]. Особенностью протекания рассматриваемых видов отказов является то, что

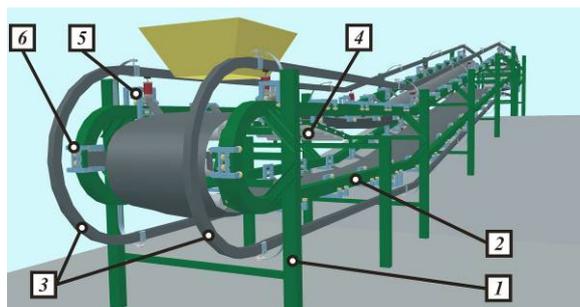


Рис. 1. Конвейер с подвесной лентой и распределенным приводом:

- 1 – став; 2 – направляющие качения;
- 3 – токоведущий тролейный шинопровод;
- 4 – стационарные роlikоопоры;
- 5 – приводные подвески; 6 – не приводные подвески;
- 7 – лента

единичные отказы практически не оказывают существенного влияния на основные характеристики конвейера. Основанием для остановки конвейера с целью проведения ремонтно-восстановительных мероприятий являются множественные отказы. Поэтому определенный научный интерес представляет количественный анализ степени влияния характера распределения и количества по длине трассы отказавших подвесок. Данная работа посвящена разработке математической модели и расчету динамических характеристик конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом при отказах ведущих подвесок вследствие заклинивания холостых роликов.

Моделирование динамических процессов, протекающих при отказе ведущих подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом вследствие заклинивания холостых роликов, предлагается осуществлять, используя следующую математическую модель.

Работоспособное состояние приводной подвески, подобно изложенному в работе [7], характеризуется величиной, представленной в общем виде в виде вектор-столбца, количество элементов которого соответствует количеству ведущих подвесок на одном контуре направляющих качения трассы конвейера:

$$N_{отк} = (n_{a,b}),$$

где n – показатель работоспособного состояния i -й ведущей подвески ($n=0$ – холостой ролик свободно вращается, $n=1$ – холостой ролик заклинил); a – количество строк матрицы, равное количеству приводных подвесок (n_n); b – количество столбцов матрицы, равное единице.

Проявление отказов во времени моделируется следующей зависимостью:

$$N_{отк}(t) = \begin{cases} k_{pc}, & \text{если } t \leq t_{отк}; \\ \text{иначе } N_{отк}, & \end{cases}$$

где $t_{отк}$ – время наступления отказа; $k_{pc} = (1_{a,b})$ – величина, характеризующая работоспособное состояние всех приводных подвесок.

Особенность моделирования отказов, связанных с заклиниванием холостых роликов ведущих подвесок, заключается в том, что в момент наступления отказа сопротивление движению от сил трения качения изменяется на сопротивление движению от сил трения скольжения. Таким образом, коэффициент сопротивления движению может быть записан в виде:

$$k_{сопр}(t) = N_{отк}(t) \cdot (f_{нр} + \mu_{нрo} r_o) + (1 - N_{отк}(t)) \cdot \mu_{нр} r_n,$$

где $f_{нр}$ – коэффициент трения качения холостого ролика ведущей подвески; $\mu_{нрo}$ – коэффициент трения скольжения в оси холостого ролика ведущей подвески; $\mu_{нр}$ – коэффициент трения скольжения холостого ролика ведущей подвески; r_n – наружный радиус холостого ролика ведущей подвески; r_o – наружный радиус холостого ролика ведущей подвески.

Ввиду принятого при разработке математических моделей динамики конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом ряда допущений о том, что конвейер моделируется системой дискретных масс, соединенных друг с другом упруго-вязкими связями, а также каждая дискретная масса характеризует подвеску с сопряженным с ней участком ленты и грузом и представлена роликом с приведенными к его центру силами и массами, изменение характера движе-

ния холостых роликов ведущей подвески с чистого качения на скольжение (юз) находит математическое отражение в формулах приведения сил элементов механической системы – холостых роликов ведущей подвески – звену приведения – приводному ролику.

Момент сопротивления движению холостых роликов ведущей подвески, приведенный к приводному ролику определяется по следующим зависимостям:

- на концевых поворотных и загрузочном участках, оборудованных стационарными роликотопорами:

$$M_{ni}^{np}(t) = (1 - k_{пол} \cdot \cos \alpha_i) \cdot \left\{ (T_i \sin \beta_i + G_{nc}) \cos \alpha_i - F_{np} \right\} + T_i \cos \beta_i \cdot k_{comp}^{хол}(t) \frac{r_{np}}{r_n} + k_{пол} \cos \alpha \cdot T_i \sin \beta_i (f_{po} + \mu_{po} r_{po}) \frac{r_{np}}{R_{po}} \cos \alpha_i;$$

- на грузовой и холостой ветви:

$$M_{ni}^{np}(t) = \left[(T_i \sin \beta_i + G_{nc}) \cos \alpha_i - F_{np} \right] \cdot k_{comp}^{хол}(t) \cdot \frac{r_{np}}{r_n},$$

где $T_i = T_i(x_i)$ – усилие, передаваемое через узел крепления к ленте подвеске со стороны ленты и транспортируемого груза; G_{nc} – сила тяжести несущей секции ведомой подвески; F_{np} – усилие со стороны прижимного устройства; $k_{пол}$ – коэффициент, учитывающий долю нагрузки от ленты с грузом, приходящуюся на стационарную роликотопору; f_{po} – коэффициент трения качения стационарной роликотопоры; μ_{np_o} – коэффициент трения скольжения в цапфе стационарной роликотопоры; r_{np} – наружный радиус приводного ролика ведущей подвески; R_{po} – наружный радиус обечайки стационарной роликотопоры; r_{po} – наружный радиус цапфы стационарной роликотопоры; r_o – наружный радиус холостого ролика ведущей подвески; $\alpha_i = \alpha_i(x_i)$ – угол поворота веду-

щей подвески в вертикальной плоскости; $\beta_i = \beta_i(x_i)$ – угол наклона к горизонту бортов ленты [9, 10].

Кроме того, для исключения самопроизвольного перемещения механической системы под действием сил сопротивлений в обратном направлении, в математической модели используется функция знака $\text{sgn}(x)$ [11-13]. Уравнения движения приводного и холостого роликов при моделировании отказа записываются в виде [7, 8].

Движение всех подвесок одного контура направляющей качения конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом согласно математической модели с учетом выше изложенных особенностей описывается системой дифференциальных уравнений первого порядка, количество которых определяется числом и типом подвесок [6-9, 14], а общий вид выглядит как

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dx_1}{d\tau} &= \dot{x}_1; \\
 \frac{d\dot{x}_1}{d\tau} &= \frac{1}{m_{n1}^{np}(x_1)} \left[F_{cu1} + (G_{n1} + T_1 \sin \beta_1) \cdot \sin \alpha_1 + c \cdot (x_n - 2x_1 + x_2 - L_{mp}) + k_1(\dot{x}_n - 2\dot{x}_1 + \dot{x}_2) \right]; \\
 \frac{d\varphi_1}{d\tau} &= \dot{\varphi}_1; \\
 \frac{d\dot{\varphi}_1}{d\tau} &= \frac{1}{J_{n1}^{np}} \left[M_{kp1} - F_{cu1} r_{np} - M_{n1}^{np}(t) \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) - f_{np} (G_{nc1} \cos \alpha_1 + F_{np}) \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) \right]; \\
 \frac{dx_2}{d\tau} &= \dot{x}_2; \\
 \frac{d\dot{x}_2}{d\tau} &= \frac{r_h}{J_{h2}^{np} + m_{h2}^{np} r_h^2} \left\{ -M_{h2}^{np} \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_2) + r_h \left[(G_{h2} + T_2 \sin \beta_2) \sin \gamma_2 + c(x_1 - 2x_2 + x_3) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + k_2(\dot{x}_1 - 2\dot{x}_2 + \dot{x}_3) \right] - (f_{hp} + \mu_{hp_o} r_o) (G_{h2} + T_2 \sin \beta_2) \cos \gamma_2 \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_2) \right\}; \\
 \frac{dx_3}{d\tau} &= \dot{x}_3; \\
 \frac{d\dot{x}_3}{d\tau} &= \frac{r_h}{J_{h3}^{np} + m_{h3}^{np} r_h^2} \left\{ -M_{h3}^{np} \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_3) + r_h \left[(G_{h3} + T_3 \sin \beta_3) \sin \gamma_3 + c(x_2 - 2x_3 + x_4) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + k_2(\dot{x}_2 - 2\dot{x}_3 + \dot{x}_4) \right] - (f_{hp} + \mu_{hp_o} r_o) (G_{h3} + T_3 \sin \beta_3) \cos \gamma_3 \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_3) \right\}; \\
 \dots \\
 \frac{dx_i}{d\tau} &= \dot{x}_i; \\
 \frac{d\dot{x}_i}{d\tau} &= \frac{1}{m_{hi}^{np}} \left[F_{cu_i} + (G_{ni} + T_i \sin \beta_i) \sin \alpha_i + c(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}) + k_i(\dot{x}_{i-1} - 2\dot{x}_i + \dot{x}_{i+1}) \right]; \\
 \frac{d\varphi_i}{d\tau} &= \dot{\varphi}_i; \\
 \frac{d\dot{\varphi}_i}{d\tau} &= \frac{1}{J_{ni}^{np}} \left[M_{kp_i} - F_{cu_i} r_{np} - M_{ni}^{np}(t) \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_i) - f_{np} (G_{nc_i} \cos \alpha_i + F_{np}) \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_i) \right]; \\
 \dots \\
 \frac{dx_n}{d\tau} &= \dot{x}_n; \\
 \frac{d\dot{x}_n}{d\tau} &= \frac{r_h}{J_{hn}^{np} + m_{hn}^{np} r_h^2} \left\{ -M_{hn}^{np} \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_n) + r_h \left[(G_{hn} + T_n \sin \beta_n) \sin \gamma_n + c(x_{n-1} - 2x_n + x_{n+1} + L_{mp}) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + k_n(\dot{x}_{n-1} - 2\dot{x}_n + \dot{x}_{n+1}) \right] - (f_{hp} + \mu_{hp_o} r_o) (G_{hn} + T_n \sin \beta_n) \cos \gamma_n \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_n) \right\}.
 \end{aligned} \right.$$

где

$$F_{cy}(x_1, x_2, x_n, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_n, \dot{\varphi}_1, t_1) = \begin{cases} \mu_{np}(G_{nc1} \cos \alpha_1 + F_{np}), & \text{если } \dot{\varphi}_1 r_{np} - \dot{x}_1 > 0; \\ -\mu_{np}(G_{nc1} \cos \alpha_1 + F_{np}), & \text{если } \dot{\varphi}_1 r_{np} - \dot{x}_1 < 0; \\ \frac{1}{J_{ni}^{np} + m_{ni}^{np} r_{np}^2} \left\{ m_{ni}^{np} r_{np} (M_{kp1} - M_{n1}^{np}(t) \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1) - N_{np1} f_{np} \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1)) - \right. \\ \left. - J_{n1}^{np} [(G_{n1} + T_1 \sin \beta_1) \sin \alpha_1 + c(x_n - 2x_1 + x_2 - L_{mp}) + k_1(\dot{x}_n - 2\dot{x}_1 + \dot{x}_2)] \right\}. \end{cases}$$

при начальных условиях

$$\begin{aligned} x_i(\tau = 0) &= -h_n(i-1); \\ \dot{x}_i(\tau = 0) &= 0; \\ \varphi_i(\tau = 0) &= 0; \\ \dot{\varphi}_i(\tau = 0) &= 0. \end{aligned}$$

Приведенная система дифференциальных уравнений решается численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

В качестве объекта для выполнения вычисления динамических характеристик и демонстрации результатов, полученных при использовании предложенной математической модели отказа ведущих подвесок при заклинивании холостых роликов, использован конвейер-питатель с подвесной лентой и распределенным приводом, схема трассы и основные технические характеристики которого приведены в работах [7, 8, 14].

Моделирование выполнялось в интервале времени от 0 до 65 с с шагом 0,01 с. В качестве отказавшей подвески принята ведущая подвеска №1. Время наступления отказа равно 30 с.

Полученные результаты расчета динамических характеристик приводных подвесок в стационарном режиме работы и при отказе ведущей подвески № 1 представлены на рис. 5-7.

Период времени от 0 до 30 с характеризуется работой конвейера в штатном режиме. Перемещение ведущей подвески № 1 и вращение ее приводного ролика осуществляются по линейным зависимостям (рис. 5). Вместе с тем, изменение линейной и угловой скоростей происходит с незначительной амплитудой колебаний – порядка 9...13 % и 6...13% от средних значений соответственно в зависимости от участка трассы (рис. 6).

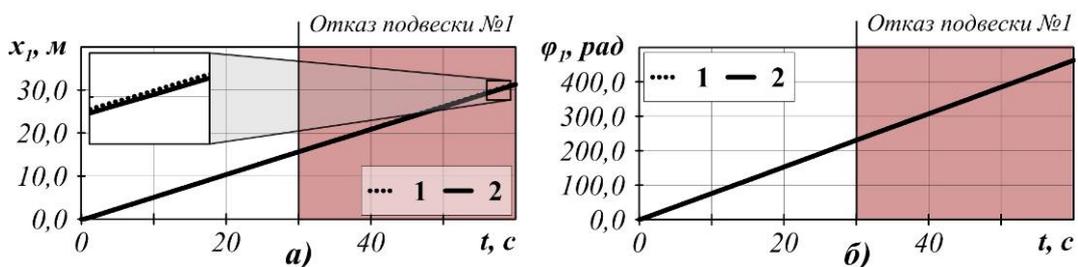


Рис. 5. Изменение динамических характеристик приводного ролика от времени при наступлении отказа ведущей подвески № 1: а – линейного перемещения; б – углового перемещения (1 – штатный режим работы; 2 – работа при наступлении отказа)

После наступления отказа ведущей подвески № 1 вследствие заклинивания холостых роликов параметры, характеризующие ее положение (рис. 5) и скорость (рис. 6), изменяются практически незначительно. Наибольшее изменение значений отмечается лишь у угловой скорости отказавшей ведущей подвески № 1 (рис. 6, а): в период дви-

жения по грузовой ветви (соответствует перемещению 15...22,5 м) средние значения угловой скорости сокращаются на 4 %.

Анализируя графики изменения коэффициента буксования (рис. 7) также можно отметить наиболее существенные изменения значений только у ведущей подвески № 1 в период движения по грузовой ветви (соот-

ветствует перемещению 15...22,5 м). Величина падения коэффициента составляет по-

рядка 16 % от среднего значения коэффициента при штатном режиме работы.

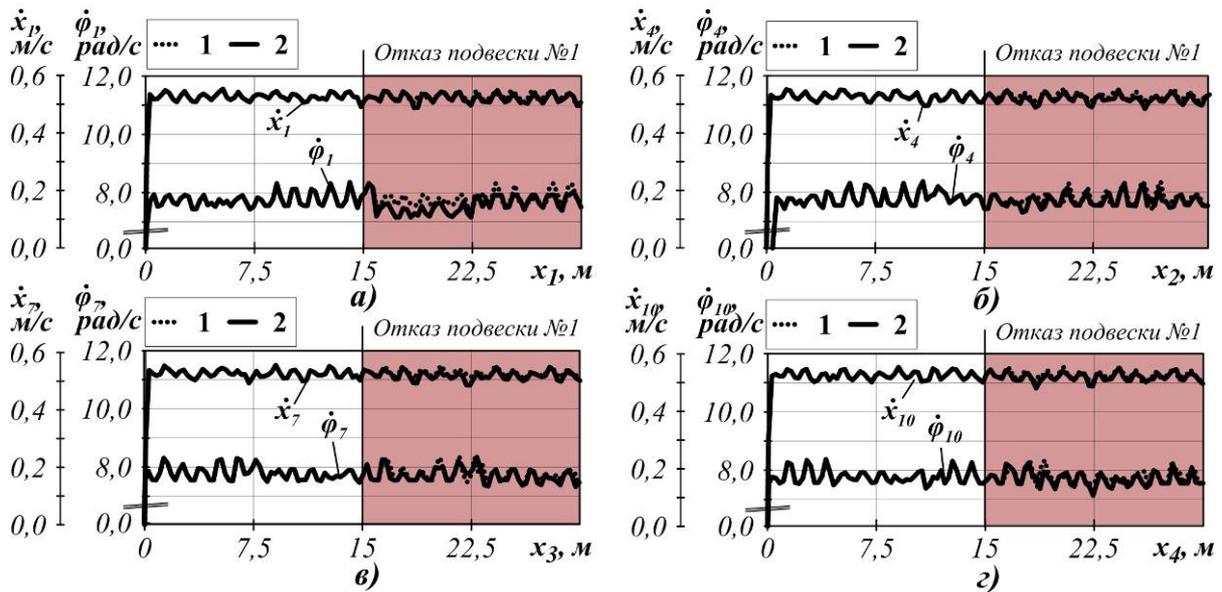


Рис. 6. Изменение динамических характеристик приводных роликов ведущих подвесок от перемещения при наступлении отказа ведущей подвески № 1: а – подвеска № 1; б – подвеска № 4; в – подвеска № 7; г – подвеска № 10 (1 – штатный режим работы; 2 – работа при наступлении отказа)

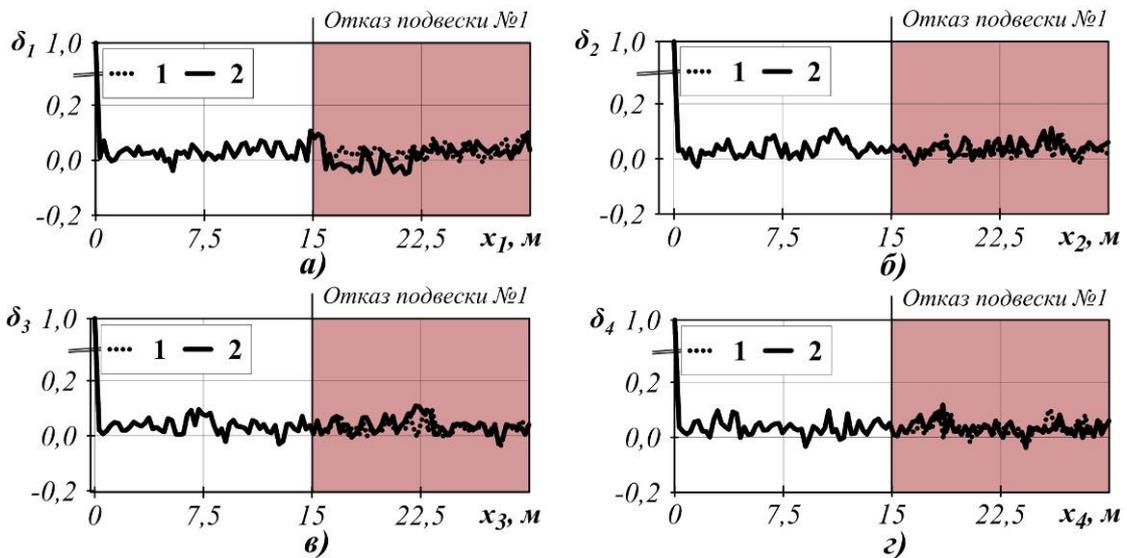


Рис. 7. Изменение коэффициентов буксования приводных роликов ведущих подвесок от перемещения при наступлении отказа ведущей подвески № 1: а – подвеска № 1; б – подвеска № 4; в – подвеска № 7; г – подвеска № 10 (1 – штатный режим работы; 2 – работа при наступлении отказа)

Таким образом, из комплексного анализа параметров, характеризующих положение и скорости подвесок приводных подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом, полученных при моделировании следует, что при отказе ведущей под-

вески вследствие заклинивания холостых роликов, происходит падение угловой скорости вращения ее приводного ролика. Однако вследствие того, что все подвески конвейера последовательно связаны между собой бесконечно замкнутой конвейерной лентой, то

отказ связанный с заклиниванием холостых роликов и повышением сопротивления движению одной ведущей подвески в данном случае не оказывает критического влияния на скорость транспортирования. Линейные скорости всех ведущих, в том числе и отказавшей, подвесок остаются практически неизменными. Следовательно, вышедшая из строя ведущая подвеска продолжает движение со скольжением (юзом) приводного ролика, что наиболее ярко выражено при движении по грузовой ветви, когда нагрузки со стороны ленты и транспортируемого груза принимают максимальные значения.

Полученные на основе разработанной математической модели результаты позволяют проанализировать физическую картину процесса транспортирования груза приводными

подвесками при возникновении отказа ведущей подвески вследствие заклинивания холостых роликов. Проведение комплексного качественного анализа и выполнение количественной оценки влияния различных конструктивных параметров элементов конвейера на основные технические характеристики будет выполнено на основе моделирования динамики протяженного конвейера со значительным количеством приводных и неприводных подвесок в последующих работах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ для научных проектов, выполняемых молодыми учеными (Мой первый грант) № 16-38-00058.

Список литературы

1. Лагереv, А.В. Исследование движения подвесок дискретного участка конвейера с подвесной лентой, распределенным приводом и вертикально замкнутой трассой с помощью одномассовой динамической модели / А.В. Лагереv, Е.Н. Толкачев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 4. – С. 33-40.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302214>

2. Лагереv, А.В. Конвейеры с подвесной грузонесущей лентой – инновационный вид машин непрерывного транспорта / А.В. Лагереv, В.П. Дунаев // Справочник. Инженерный журнал, 2009. – № 10. – С. 9-14.

3. Lagerev, A.V. Analyzing the Discreet Section Suspension Parameters in a Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive / A.V. Lagerev, E.N. Tolkachev, I.A. Lagerev // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2017. – Vol. 31. - № 10. – P. 4669-4678. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0913-7>

4. Lagerev, A.V. The Influence of Distributing the Conveyor Suspensions with Suspended Belt and Distributed Drive on Its Main Technical Characteristics / A.V. Lagerev, E.N. Tolkachev, I.A. Lagerev // International Review on Modelling and Simulations. – 2018. – Vol. 11. - № 3. – P. 176-186.

References

1. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. The study of the motion of suspensions of discrete section of a conveyor with suspended belt, distributed drive, and the vertically-closed track with the singlemass di-namic model. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.4, pp. 33–40.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302214>
(In Russian)

2. Lagerev A.V., Dunaev V.P. Conveyors with suspension carrying belt – new type of continuous transport mashines. *Inzhenerniy zhurnal. Spravochnik*, 2009, No.10, pp. 9-14. (In Russian)

3. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. Analyzing the Discreet Section Suspension Parameters in a Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017. Vol. 31, No. 10. pp. 4669-4678.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0913-7>

4. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. The Influence of Distributing the Conveyor Suspensions with Suspended Belt and Distributed Drive on Its Main Technical Characteristics. *International Review on Modelling and Simulations*. 2018. Vol. 11, No. 3. pp. 176-186.

DOI: <https://doi.org/10.15866/iremos.v11i3.12796>
5. Boslovyak P.V., Tolkachev E.N. Mathematical model of metal construction optimization of drive conveyor with the suspended belt

DOI: <https://doi.org/10.15866/iremos.v1i3.12796>

5. Бословяк, П.В. Математическая модель оптимизации приводной подвески конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом / П.В. Бословяк, Е.Н. Толкачев // Вестник СибАДИ. – 2018. – № 1. – С. 8-18.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-8-18>

6. Лагереv, А.В. Моделирование рабочих процессов и проектирование многоприводных ленточных конвейеров / А.В. Лагереv, Е.Н. Толкачев, К.А. Гончаров. – Брянск: РИО БГУ, 2017. – 384 с.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1196612>

7. Толкачев, Е.Н. Математическая модель отказа приводов ведущих подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом при разрыве электроцепи / Е.Н. Толкачев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – № 2. – С. 178-189. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-02-178-189>

8. Толкачев, Е.Н. Математическая модель отказа приводов ведущих подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом при заклинивании приводных роликов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – № 3. – С. 333-343. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-03-333-343>

9. Лагереv, А.В. Проектирование и исследования конвейеров с подвесной грузонесущей лентой / А.В. Лагереv, Е.Н. Толкачев, П.В. Бословяк. – Брянск: РИО БГУ, 2016. – 303 с.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1197308>

10. Толкачев, Е.Н. Особенности определения усилий, приложенных к подвескам конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом, в зависимости от их пространственной конфигурации на трассе / Е.Н. Толкачев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. – № 2. – С. 44-51. – Режим доступа: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2015-N2/2015-02-06.pdf>.

11. Дмитриева, В.В. Разработка математической модели ленточного конвейера

and distributed drive. *Vestnik SibADI*, 2018, No. 1, pp. 8-18. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-8-18>. (In Russian)

6. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Goncharov K.A. *Modelirovanie rabochih protsessov i proektirovanie mnogoprivodnyh lentochnyh konveyerov* [Modeling of work processes and the design of multi-drive belt conveyor]. Bryansk: RIO BGU, 2017. 384 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1196612> (In Russian)

7. Tolkachev E.N. Mathematical model of failure the drives suspensions of the conveyor with suspended belt and distributed drive at break in the electric chain. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No. 2, pp. 178-189. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-02-178-189> (In Russian)

8. Tolkachev E.N. Mathematical model of failure the drives suspensions of the conveyor with suspended belt and distributed drive at jamming rollers. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No. 3, pp. 333-343. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-03-333-343> (In Russian)

9. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Boslovjak P.V. *Proektirovanie i issledovaniya konveyerov s podvesnoy gruzonesushchey lentoy* [Design and research of the hanging ribbon]. Bryansk: RIO BGU, 2016. 303 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1197308> (In Russian)

10. Tolkachev E.N. Specifics of determining the forces are applied to the suspensions of conveyor with suspended belt and distributed drive, depending on their spatial configuration on the route. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 44-51. Available at: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2015-N2/2015-02-06.pdf> (In Russian)

11. Dmitrieva V.V., Gershun S.V. Development of a mathematical model of a belt conveyor with a two-motor drive. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2008, No. 8, pp. 295-303. (In Russian)

12. Dmitrieva V.V. Modeling of starting-brake modes of the belt conveyor. *Gornye nauki i tekhnologii*, 2014, No. 3, pp. 50-56. (In

с двухдвигательным приводом / В.В. Дмитриева, С.В. Гершун // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 8. – С. 295-303.

12. Дмитриева, В.В. Моделирование пуска-тормозных режимов ленточного конвейера / В.В. Дмитриева // Горные науки и технологии. – 2014. – № 3. – С. 50-56.

13. Никитин, С.В. Динамическая модель ленточного конвейера / С.В. Никитин // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2014. – № 4. – С.722-731.

14. Lagerev, A.V. Modelling of a Vertical Loop Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive / A.V. Lagerev, E.N. Tolkachev, I.A. Lagerev // International Review on Modelling and Simulations. – 2016. – Vol. 9. - № 4. – P. 271-279.

DOI: <https://doi.org/10.15866/iremos.v9i4.9808>

Russian)

13. Nikitin S.V. Dynamic model of belt conveyor. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2014, No. 4, pp. 722-731. (In Russian)

14. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. Modelling of a Vertical Loop Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive. *International Review on Modelling and Simulations*, 2016, Vol. 9, No. 4, pp. 271-279. DOI: <https://doi.org/10.15866/iremos.v9i4.9808>