

УДК (UDC) 621.86

## СИСТЕМА СОЧЕТАНИЙ ОТКЛОНЕНИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯГОВЫХ УСИЛИЙ В МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ПРИВОДАХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

## COMBINATION SYSTEM OF SLIDE VARIATIONS OF ELECTRIC MOTORS WHEN USING A PROBABILISTIC MODELLING APPROACH OF TRACTIVE EFFORT DISTRIBUTION IN MULTIMOTOR DRIVES OF MULTIDRIVE BELT CONVEYORS

Гончаров К.А.  
Goncharov K.A.Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)  
Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** Конкретизированы и обобщены общесистемные и внутренние отклонения скольжения электродвигателей в структурах многодвигательных приводов многоприводных ленточных конвейеров. В виде иерархической структуры сформулирован принцип учета указанных отклонений при построении вероятностной математической модели распределения тяговых усилий в многоприводном ленточном конвейере. Предложена система обязательных внутренних для многодвигательных приводов сочетаний отклонений скольжения электродвигателей. С учетом рекомендаций данной системы предложены зависимости, позволяющие оценить трудоемкость вероятностного моделирования и составить детальные качественные описания каждого расчетного случая.

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

**Дата принятия к публикации:** 15.03.2019  
**Дата публикации:** 25.09.2019

**Сведения об авторе:**

**Гончаров Кирилл Александрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», e-mail: [ptm\\_bstu@mail.ru](mailto:ptm_bstu@mail.ru).  
ORCID: 0000-0002-5895-1162

**Abstract.** The paper is aimed at specifying and summarizing system-wide and internal slide variations of electric motors in the structures of multimotor drives of multidrive belt conveyors. The accounting principle of the indicated variations is formulated in the form of the hierarchic structure when building a probabilistic mathematical model of tractive effort distribution in the multidrive belt conveyor. A system of the obligatory internal combinations of slide variations of electric motors in the multidrive belt conveyor is suggested. Taking into account the recommendations of the given system, the dependencies enabling one to estimate the labour coefficient of the probabilistic modelling and give detailed and qualitative descriptions of every design case are suggested.

**Keywords:** belt conveyor, drive system, probabilistic mathematical model, slide departure of engine, traction calculation.

**Date of acceptance for publication:** 15.03.2019  
**Date of publication:** 25.09.2019

**Author's information:**

**Kirill A. Goncharov** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Handling Machinery and Equipment" at Bryansk State Technical University, e-mail: [ptm\\_bstu@mail.ru](mailto:ptm_bstu@mail.ru).  
ORCID: 0000-0002-5895-1162

**1. Введение**

Применение многодвигательных приводов в структурах систем приводов многоприводных ленточных конвейеров является распространенным техническим решением [1, 2, 12, 13]. При необходимости реализации определенных приводов в системе высоких значений

мощностей каждый из отдельных приводов может комплектоваться различным количеством жестко соединенных друг с другом электродвигателей [1, 2, 10]. Наиболее распространенными вариантами, подтвержденными практической реализацией на конкретных конвейерах, являются исполнения, соответствующие кинематическим схемам с одним, двумя и че-

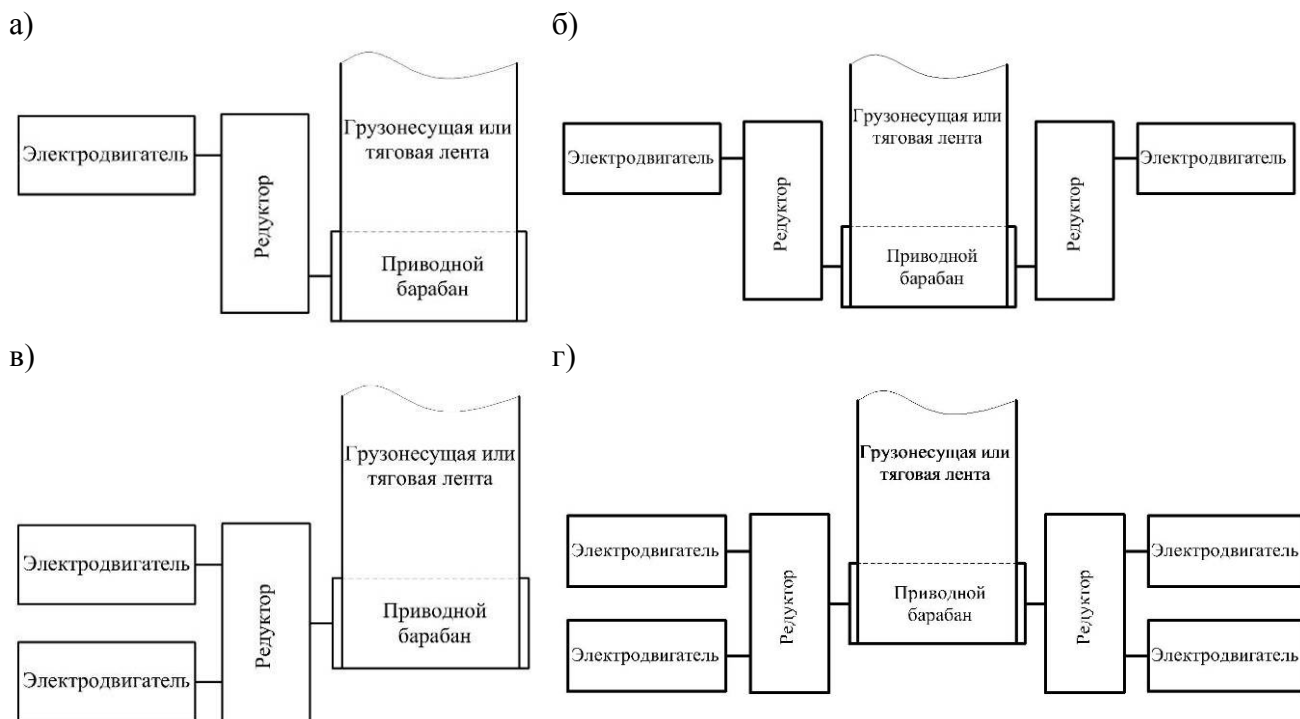


Рис. 1. Кинематические схемы многодвигательных приводов ленточных конвейеров: а – с одним электродвигателем; б – с двумя разнесенными от приводного барабана электродвигателями; в – с двумя электродвигателями по одну сторону от приводного барабана; г – с четырьмя электродвигателями

тырьмя электродвигателями, размещенными как с одной стороны приводного барабана, так и по разные стороны (рис. 1) [3].

Жесткая кинематическая связь электродвигателей друг с другом в структуре одного привода приводит к полной синхронизации частот вращения их роторов. При этом работа каждого двигателя может описываться набором разных механических характеристик с учетом возможных отклонений их скольжения. Таким образом, нагрузка, воспринимаемая каждым электродвигателем, может варьироваться в широких пределах. При работе на номинальных механических характеристиках данное обстоятельство может приводить к значительной перегрузке отдельных двигателей в каком-либо приводе, а также непосредственно влиять на значения натяжений тяговой и грузонесущей лент.

В источниках [4-6, 8-10] детально описана структура вероятностной математической модели распределения тяговых усилий в многоприводном ленточном конвейере, а также особенности её построения. При этом приведены в [5, 6] рекомендации и примеры затраги-

вают однодвигательные приводы в структурах систем приводов ленточных конвейеров.

## 2. Цель исследования

Целью данной работы является адаптация вероятностной математической модели распределения тяговых усилий в многоприводном ленточном конвейере к возможностям применения многодвигательных исполнений приводов, а также синтез рекомендаций по корректному моделированию в описанном контексте.

## 3. Теоретические исследования

В общем случае вид вероятностной математической модели распределения тяговых усилий для многоприводного ленточного конвейера, в состав которого входит несколько отдельных многодвигательных приводов, зависит от иерархической структуры системы приводов (базовая структура описана в [1, 2]). Для адекватного построения математической модели необходимо выделить ряд факторов, влияющих на отклонения механических характеристик от номинальных значений, и

встроить их в структуру указанной выше иерархии. К таким факторам можно отнести:

1) общесистемные приведенные отклонения механических характеристик приводов в целом по отношению друг к другу, обусловленные продольным растяжением грузонесущей и тяговых лент; отклонения данной группы воздействуют на каждый привод в системе без учета количества электродвигателей в структурах приводов;

2) общесистемные отклонения механических характеристик приводов в целом по отношению друг к другу, обусловленные спецификой работы системы управления (система управления абсолютно одинаково воздействует на отличающиеся механические характеристики всех электродвигателей какого-либо одного привода в системе);

3) внутренние отклонения скольжения каждого электродвигателя внутри какого-либо одного привода системы, связанные с конструкторско-технологическими факторами производства электродвигателей [4, 6];

4) внутренние отклонения скольжения каждого электродвигателя внутри какого-либо одного привода системы при непосредственном воздействии системы управления на механическую характеристику каждого электродвигателя [4].

Таким образом, учитывая приведенные факторы, воздействующие на отклонения ме-

ханических характеристик электродвигателей, часть вероятностной математической модели распределения тяговых усилий между многодвигательными приводами ленточного конвейера, касающуюся формирования вида уравнений механических характеристик электродвигателей, можно представить в виде иерархической структуры (рис. 2), привязанной к структуре системы приводов. Каждый привод в данной структуре описывается рядом уравнений механических характеристик в соответствии с количеством электродвигателей. Вид уравнения механической характеристики каждого электродвигателя формируется внутренними отклонениями внутри привода, в котором функционирует электродвигатель, и внешними отклонениями, одинаково воздействующими на все двигатели одного какого-либо привода. Общее количество возможных комбинаций механических характеристик для мощных конвейеров с сильно разветвленными структурами систем приводов при моделировании может быть значительным (например, для системы, состоящей из четырех приводов по четыре электродвигателя в каждом, при учете граничных и медианных функций механических характеристик общее число комбинаций составит 43046721), при этом подробному анализу при тяговом расчете необходимо будет подвергнуть лишь малую часть из них, что было показано в работе [6].

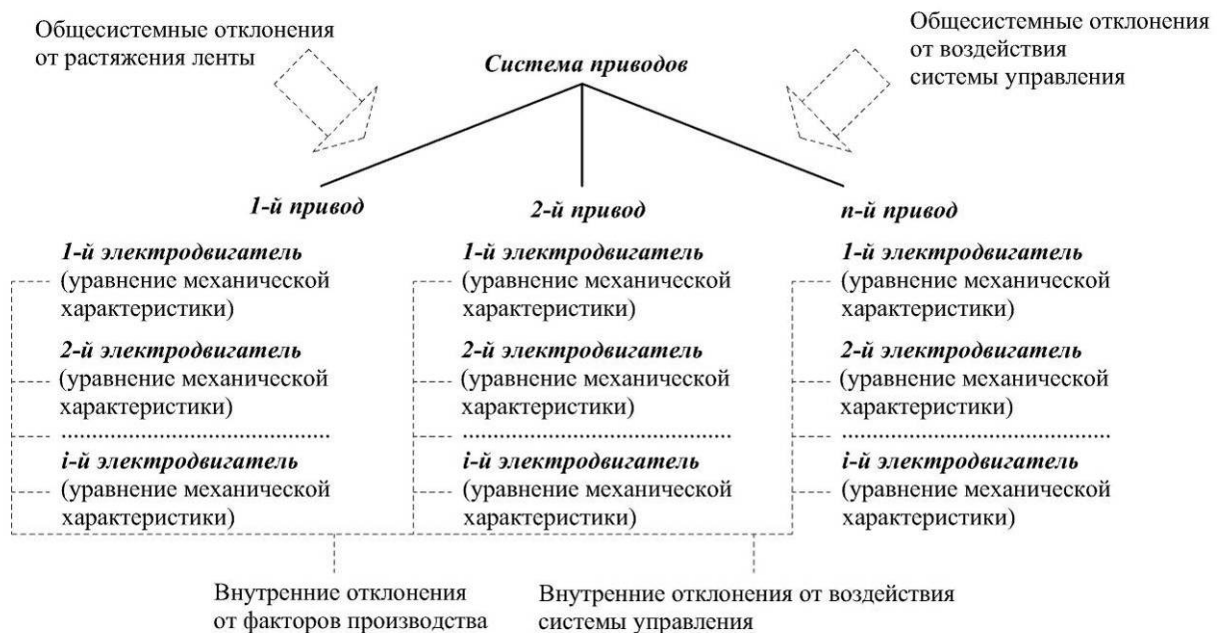


Рис. 2. Иерархическая структура системы приводов с действующими отклонениями

Предложенная на рис. 2 иерархическая структура является обобщенной для вероятностной математической модели распределения тяговых усилий в целом. Применение однодвигательных приводов является частным случаем реализации указанной иерархии.

Гибкость вероятностной математической модели распределения тяговых усилий в случае применения многодвигательных приводов целесообразно продемонстрировать на примере конвейера ЛСТ-1600 [3, 11] при оригинальной конфигурации двигателей.

Данный конвейер оснащен двумя барабанными приводами, взаимодействующими с грузонесущей лентой. Первый по ходу движения ленты от разгрузочного барабана привод оборудован двумя электродвигателями мощностью 1000 кВт каждый [3]. Второй привод является «подматывающим» и оборудован одним электродвигателем мощностью 1000 кВт [3].

В структуре системы, состоящей из двух приводов, общесистемные приведенные отклонения механических характеристик приводов в целом по отношению друг к другу, обусловленные продольным растяжением грузонесущей ленты, будут воздействовать только на какой-либо один привод. В работе [6] данное обстоятельство в целях упрощения примера было нивелировано, что не является критическим условием для моделирования, так как в этом случае дополнительно образуется несколько фиктивных сочетаний возможных отклонений скольжения электродвигателей. Фактически, именно общесистемное приведенное отклонение от растяжения ленты и должно создавать дифференциацию между тяговыми усилиями приводов, характерную для математических моделей, описанных в [1, 2].

Обозначим отклонение скольжения в сторону увеличения жесткости механической характеристики  $i$ -го электродвигателя  $\alpha_i$ , отклонение в сторону смягчения механической характеристики –  $\beta_i$ . Присваиваемый отклонению индекс соответствует порядковому номеру электродвигателя в структуре системы приводов. В случае конвейера ЛСТ-1600 для первого по ходу движения ленты двухдвигательного привода обозначим отклонения скольжения первого электродвигателя –  $\alpha_1$  и  $\beta_1$ , второго электродвигателя –  $\alpha_2$  и  $\beta_2$ . Отклонения скольжения электродвигателя следующего по ходу движения грузонесущей ленты «подматывающего» привода будут описываться параметрами  $\alpha_3$  и  $\beta_3$ . При моделировании распределения тяговых усилий не должны рассматриваться сочетания параметров  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  для всех трех электродвигателей в системе приводов с одновременным учетом в каждом компоненте, отвечающей за относительное удлинение ленты. При этом параметры  $\alpha_1, \beta_1$  и  $\alpha_2, \beta_2$  постоянно в процессе моделирования «работают в паре» и либо учитывают в каждом параметре отклонение от удлинения ленты, либо не учитывают его совсем.

В работе [6] при построении вероятностной математической модели было проанализировано 16 сочетаний параметров  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  для четырех приводов. Данная система сочетаний, как было описано выше, составлена с учетом упрощения и включает в себя фиктивные сочетания. Применительно к рассматриваемой ситуации на примере конвейера ЛСТ-1600 с учетом вариативности воздействия на какой-либо отдельный привод общесистемного приведенного отклонения скольжения от растяжения ленты можно сформировать систему сочетаний параметров  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ , представленную в табл. 1.

Таблица 1  
Система сочетаний отклонений скольжения электродвигателей приводов

Электродвигатель	Скольжение электродвигателя в рамках сочетания															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1-й электродвигатель	$\alpha_{1p}$	$\alpha_{1p}$	$\alpha_{1p}$	$\alpha_{1p}$	$\beta_{1p}$	$\beta_{1p}$	$\beta_{1p}$	$\beta_{1p}$	$\alpha_1$	$\alpha_1$	$\alpha_1$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_1$
2-й электродвигатель	$\alpha_{2p}$	$\alpha_{2p}$	$\beta_{2p}$	$\beta_{2p}$	$\alpha_{2p}$	$\alpha_{2p}$	$\beta_{2p}$	$\beta_{2p}$	$\alpha_2$	$\alpha_2$	$\beta_2$	$\beta_2$	$\alpha_2$	$\alpha_2$	$\beta_2$	$\beta_2$
3-й электродвигатель	$\alpha_3$	$\beta_3$	$\alpha_3$	$\beta_3$	$\alpha_3$	$\beta_3$	$\alpha_3$	$\beta_3$	$\alpha_{3p}$	$\beta_{3p}$	$\alpha_{3p}$	$\beta_{3p}$	$\alpha_{3p}$	$\beta_{3p}$	$\alpha_{3p}$	$\beta_{3p}$
Качественное описание сочетания	Отклонение скольжения от удлинения ленты в первом приводе (индекс $p$ )								Отклонение скольжения от удлинения ленты во втором приводе (индекс $p$ )							

При учете внутренних отклонений скольжения каждого электродвигателя внутри какого-либо одного привода системы, связанных с конструкторско-технологическими факторами их производства, параметры  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  всех трех двигателей системы изменят свои значения, что не отразится на количестве расчетных сочетаний, сформированных в табл. 1. Таким образом, общее число анализируемых сочетаний отклонений скольжения электродвигателей  $N$  при исследовании их тяговых способностей при работе в многодвигательной системе приводов случайной конфигурации можно определить по зависимости

$$N = k(\gamma)^n, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – общее количество граничных, медианных и промежуточных значений параметров  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  для одного двигателя в исследуемой системе;  $n$  – общее число электродвигателей в системе приводов;  $k$  – число приводов в системе.

Зависимость (1) составлена с учетом допущения, что наиболее опасным является отклонение от реализуемого тягового усилия какого-либо одного привода системы. Так, для системы приводов конвейера ЛСТ-1600, состоящей из трех электродвигателей, сгруппиро-

ванных в два привода, при учете только двух граничных значений параметров  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  для каждого электродвигателя необходимо проанализировать 16 сочетаний отклонений скольжения, что было показано выше в табл. 1.

При анализе особенностей построения вероятностной математической модели распределения тяговых усилий в многоприводном ленточном конвейере, описанных в [6], можно заметить, что наибольшую опасность при реальной работе конвейера представляет собой случай отклонения скольжения какого-либо одного электродвигателя в сторону увеличения жесткости механической характеристики (уменьшение параметра  $\alpha_i$ ). Если одинаковые двигатели кинематически жестко связаны в структуре одного привода, то не имеет значения – у какого именно из двигателей одного привода произойдет отклонение скольжения до величины  $\alpha_i$ . Исходя из этого, для кинематических схем многодвигательных приводов, представленных на рис. 1, можно предложить ряд обязательных сочетаний отклонений скольжения электродвигателей (внутренних для многодвигательных приводов) при моделировании и тяговом расчете (табл. 2).

Таблица 2

Обязательные внутренние сочетания отклонений скольжения электродвигателей для многодвигательных приводов

Номер сочетания	Тип привода по количеству электродвигателей (ЭД)		
	Привод с одним ЭД	Привод с двумя ЭД	Привод с четырьмя ЭД
Учитываемые значения параметров для сочетания			
1	$\alpha$	$\alpha_1$ и $\alpha_2$	$\alpha_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$
2	$\beta$	$\alpha_1$ и $\beta_2$	$\alpha_1, \alpha_2, \beta_3, \beta_4$
3	$s_{ном}$	$\beta_1$ и $\beta_2$	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_4$
4	–	$\alpha_1$ и $s_{ном2}$	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$
5	–	$\beta_1$ и $s_{ном2}$	$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$
6	–	$s_{ном1}$ и $s_{ном2}$	$\alpha_1, s_{ном2}, s_{ном3}, s_{ном4}$
7	–	–	$\beta_1, s_{ном2}, s_{ном3}, s_{ном4}$
8	–	–	$\alpha_1, s_{ном2}, \beta_3, \beta_4$
9	–	–	$\alpha_1, \alpha_2, s_{ном3}, \beta_4$
10	–	–	$s_{ном1}, s_{ном2}, s_{ном3}, s_{ном4}$
11	–	–	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, s_{ном4}$
12	–	–	$\beta_1, \beta_2, \beta_3, s_{ном4}$

В табл. 2  $s_{номi}$  – номинальное скольжение  $i$ -го электродвигателя.

С учетом данных, приведенных в табл. 2, можно сформулировать зависимость, отражающую относительный уровень трудоемкости математического моделирования и тя-

гового расчета многоприводного ленточного конвейера, выраженный в количестве сочетаний отклонений скольжения электродвигателей, обязательных для анализа:

$$N = \gamma_1^{n_1} \gamma_2^{n_2} \gamma_4^{n_4}, \quad (2)$$

где  $\gamma_1$  – число расчетных сочетаний отклонений скольжения единственного электродвигателя в приводе согласно табл. 2 ( $\gamma_1 = 3$ );  $\gamma_2$  – число расчетных сочетаний отклонений скольжения электродвигателей в приводе с двумя электродвигателями согласно табл. 2 ( $\gamma_2 = 6$ );  $\gamma_4$  – число расчетных сочетаний отклонений скольжения электродвигателей в приводе с четырьмя электродвигателями согласно табл. 2 ( $\gamma_4 = 12$ );  $n_1$  – число приводов с одним электродвигателем в структуре привода;  $n_2$  – число приводов с двумя электродвигателями в структуре привода;  $n_4$  – число приводов с четырьмя электродвигателями в структуре привода.

С учетом общесистемного приведенного отклонения механических характеристик приводов в целом по отношению друг к другу, обусловленного продольным растяжением грузонесущей ленты, совмещением выражений (1) и (2) можно получить общую зависимость, определяющую необходимое количество сочетаний отклонений скольжения электродвигателей при вероятностном моделировании и тяговом расчете для системы приводов случайной конфигурации, включающей многодвигательные приводы:

$$N = k(\gamma_1^{n_1} \gamma_2^{n_2} \gamma_4^{n_4}). \quad (3)$$

Детализацию по структуре каждого сочетания следует проводить с учетом данных табл. 1 и табл. 2.

#### 4. Результаты и их анализ

Согласно зависимости (2) количество расчетных сочетаний для вероятностного моделирования работы конвейера ЛСТ-1600 составит  $N = 18$ . Полное число сочетаний с учетом растяжения лент согласно выражению (3)  $N = 36$ . Без учета рекомендаций табл. 2 общее количество расчетных сочетаний определится по зависимости (1) и составит  $N = 54$ .

К примеру, для протяженного конвейера, описанного в [7], система приводов которого включает три последовательно расположенных барабанных привода, в каждом из которых барабан приводится двумя электродвигателями, согласно зависимости (3) полное количество расчетных сочетаний для вероятностного моделирования работы составит  $N =$

648. Без учета рекомендаций табл. 2 общее количество расчетных сочетаний определится по зависимости (1) и составит  $N = 2187$ .

В целом, можно утверждать, что проведенный в настоящей работе теоретический анализ учета отклонений скольжения электродвигателей для различных структур многодвигательных приводов и рекомендации, полученные на его основе, позволяют в среднем в 1,5...3 раза снизить трудоемкость построения вероятностной математической модели распределения тяговых усилий в многоприводном ленточном конвейере. С увеличением количества электродвигателей в системе данный параметр увеличивается.

#### 5. Заключение

С учетом результатов проведенных теоретических исследований можно сделать следующие общие выводы:

1) система приводов, включающая в свою структуру многодвигательные приводы случайной конфигурации, является наиболее сложным и трудоемким объектом для вероятностного моделирования распределения тяговых усилий между приводами, что обусловлено учетом не только общесистемных «внешних» отклонений скольжения электродвигателей от удлинения (растяжения) конвейерных лент и воздействия системы управления, но и внутренних «внутриприводных» отклонений скольжения электродвигателей при их жестком кинематическом взаимодействии внутри привода;

2) общесистемное приведенное отклонение механических характеристик приводов в целом по отношению друг к другу, обусловленное продольным растяжением грузонесущей и тяговых лент, увеличивает число расчетных сочетаний отклонений скольжения электродвигателей при моделировании кратно количеству приводов; данный вывод вытекает из допущения воздействия данного общесистемного отклонения только на какой-либо один привод системы, что соответствует результатам моделирования при использовании математических моделей, описанных в [1, 2];

3) представленные в табл. 2 данной работы обязательные внутренние для многодвигательных

тельных приводов сочетания отклонений скольжения электродвигателей позволяют систематизировать алгоритм построения вероятностной математической модели распределения тяговых усилий для любой случайной конфигурации системы приводов конвейера; полученные зависимости для определения расчетного числа сочетаний от-

клонений скольжения для типовых структур приводов с одним, двумя и четырьмя электродвигателями позволяют не только оценить трудоемкость построения вероятностных математических моделей, но и с учетом структур зависимостей определиться с детальным качественным описанием каждого расчетного случая.

### Список литературы

1. 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>

2. Гончаров, К.А. Обоснование выбора систем приводов протяженных ленточных конвейеров со сложной трассой: дис... канд. техн. наук: 05.05.04. – Брян. гос. техн. ун-т (БИТМ). Брянск, 2011. – 149 с.

3. Гончаров, К.А. Определение рационального варианта системы приводов ленточного конвейера ЛСТ-1600/ К.А. Гончаров // Вестник БГТУ, 2011. – №4. – С.33–38.

4. 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.

5. Гончаров, К.А. Комплексный подход к тяговому расчету ленточных конвейеров / К.А. Гончаров, В.П. Дунаев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2018. – №2. – С.144–151. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-02-144-151>

6. Гончаров, К.А. Особенности построения вероятностной математической модели распределения тяговых усилий в многоприводном ленточном конвейере / К.А. Гончаров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2018. – №4. – С.380–389. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-380-389>

7. Келлер, К. Проектирование и реализация транспортного соединения 40.10 / К. Келлер, Ш. Хупперт, Р. Флорек // Глюкауф.

### References

1. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Goncharov K.A. *Modelirovanie rabochnih 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)

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

3. Goncharov K.A. Opredeleniye racionalnogo varianta sistemy privodov lentochnogo konveyera LST-1600. *Vestnik BGTU*, 2011, No.4, pp. 33–38. (In Russian)

4. 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)

5. Goncharov K.A., Dunaev V.P. The integrated approach to traction calculation of belt conveyors. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No.2, pp. 144-151. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-02-144-151> (In Russian)

6. Goncharov K.A. Design features of probabilistic mathematical model of tractive effort distribution in multidrive belt conveyor. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No.4, pp. 380-389. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-380-389> (In Russian)

7. Keller K., Huppert S., Florek R. Proektirovanie i realizatsiya transportnogo soedineniya 40.10. *Glueckauf*, 2004, No.3, pp. 6-16. (In Russian)

8. Goncharov K.A. Determination of rela-

