

УДК (UDC) 621.86

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ПРИВОДОВ  
ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ПРИ НАЛИЧИИ СЛУЧАЙНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ  
СКОЛЬЖЕНИЯ ИХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙESTABLISHING PRINCIPLES OF JOINT OPERATION OF BELT CONVEYOR DRIVES  
IN CASE OF RANDOM SLIDE DEVIATIONS OF THEIR ELECTRIC MOTORSГончаров К.А.  
Goncharov K.A.Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)  
Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** Приведены результаты вероятностного математического моделирования совместной работы приводов многоприводного ленточного конвейера при его полной загрузке, а также при движении без груза. В результате моделирования показана необходимость дополнительного резервирования мощности приводов при проектировании многоприводных ленточных конвейеров. На основе проведенного моделирования установлены закономерности совместной работы приводов ленточного конвейера при наличии случайных отклонений скольжения их электродвигателей, отражающие как специфические условия распределения электродвигателей между приводами, так и особенности влияния их параметров на картину распределения натяжений грузонесущей и тяговых лент.

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

**Дата принятия к публикации:** 18.04.2020  
**Дата публикации:** 25.06.2020

**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 contains the results of the probabilistic modelling of joint operation of multidrive belt conveyors in case of their full load as well as without cargo. As a result, modelling demonstrates the need of additional reservation of drive power when designing multidrive belt conveyors. On the basis of the modelling, operational principles of joint operation of belt conveyors are established when there are random slide deviations of their engines. These deviations represent specific conditions of electric motors distribution between the drives as well as the influence features of their parameters on the distribution of the carrying and tractive belts.

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

**Date of acceptance for publication:** 18.04.2020  
**Date of publication:** 25.06.2020

**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

**Благодарности**

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8*

**Acknowledgements**

*The study was supported by President Grant for Government Support of Young Russian Scientists No. №MD-422.2020.8*

**1. Введение**

Отсутствие стабильности грузопотока при работе систем ленточных конвейеров не явля-

ется редкостью и напрямую может быть связано как с технологическими факторами производства, так и со сложившимися в конкретный момент времени экономическими интересами

осуществления производства (необходимость уменьшения–увеличения грузопотока в зависимости от покупательной способности заказчиков и т.п.). В случае применения небольших отдельных ленточных транспортеров или их систем экономические потери от изменения производительности (включая амортизационные затраты при изменении режимов эксплуатации конвейерного оборудования) не так велики по сравнению с ситуациями, в которых изменение производительности непосредственно касается тяжелых ленточных конвейеров с протяженной трассой и разветвленной системой приводов. В таких случаях все характеристические параметры конвейеров могут принимать случайные значения, величины которых складываются с учетом комбинации случайных

факторов (конкретного сочетания отклонения механических характеристик приводов, реальной жесткости применяемых конвейерных лент, интенсивности колебаний грузопотока).

При использовании вероятностной математической модели [1-5] широкий диапазон возможных сочетаний указанных параметров можно проанализировать и, как следствие, спрогнозировать поведение всей системы.

В работе [3] разобраны особенности построения вероятностной математической модели распределения тяговых усилий внутри системы приводов ленточного конвейера при холостом режиме работы.

Схема трассы исследуемого конвейера показана на рис. 1 (линейные размеры участков трассы указаны в метрах) [3].

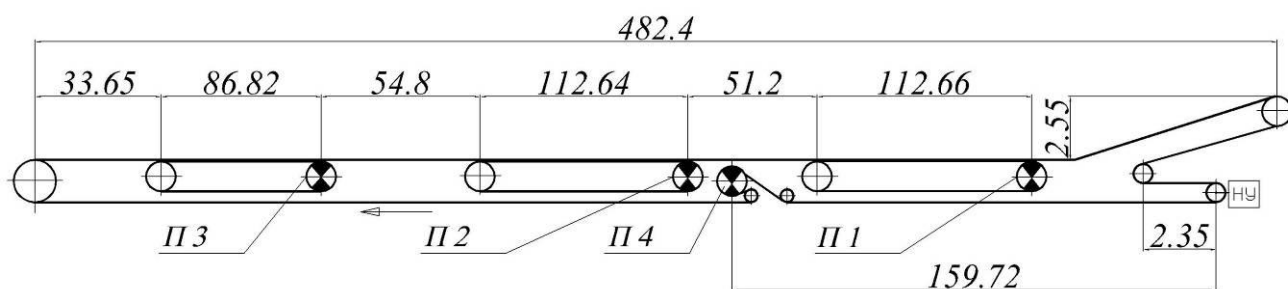


Рис. 1. Схема трассы многоприводного ленточного конвейера

Рассматриваемый конвейер оснащен одним барабанным и тремя ленточными приводами, оборудованными электродвигателями с фазным ротором мощностью  $N = 40$  кВт каждый с синхронной частотой вращения ротора 1500 об/мин [3]. Типоразмер грузонесущей и тяговой лент – РЛХ-120 с четырьмя прокладками [3]. Производительность конвейера 450 т/ч, транспортируемый груз – песчано-гравийная масса, скорость движения ленты 1,6 м/с [3]. Подобный конвейер был установлен на песчаном карьере строительства Рогунской ГЭС (1970 г.) [7].

В [3] моделирование производилось при искусственном ограничении мощности приводных электродвигателей значением 14 кВт для каждого. Данное ограничение обосновывается полным использованием суммарной мощности четырех приводов конвейера (56 кВт) при его полной загрузке без учета возможных отклонений механических характеристик. Применение указанного ограничения

позволило наглядно продемонстрировать необходимость учета отклонений механических характеристик приводов при проведении тягового расчета [3], так как даже при работе конвейера в холостом режиме были получены неработоспособные сочетания механических характеристик с превышением номинальных мощностей электродвигателей.

Дополнительно выбор указанного конвейера в качестве объекта для вероятностного математического моделирования может быть обусловлен рядом следующих обстоятельств:

- наличием в системе более трех распределенных по трассе конвейера приводов, что обеспечивает многовариантность моделирования;
- взаимодействием в единой системе как барабанных, так и промежуточных ленточных приводов;
- отличием длин тяговых контуров промежуточных ленточных приводов;

- применением в структуре приводов электродвигателей с фазным ротором, что увеличивает диапазоны возможных отклонений их механических характеристик;

- наличием в открытых источниках экспериментальных данных испытаний конвейера в различных режимах работы [3-6].

Все указанные факторы позволяют сделать вывод о возможности получения стабильных общих поведенческих закономерностей совместной работы приводов ленточного конвейера при наличии случайных отклонений скольжения их электродвигателей проведением сравнительного вероятностного моделирования работы описанного выше конвейера в загруженном и холостом режимах.

Целью данной статьи является установление закономерностей совместной работы приводов ленточного конвейера при наличии случайных отклонений скольжения их электродвигателей.

## 2. Теоретические исследования

Особенности построения вероятностной математической модели распределения тяговых усилий в структуре системы приводов

ленточного конвейера описаны в [3]. В настоящей работе указанная математическая модель адаптируется к изменению типоразмеров приводных электродвигателей (с увеличением мощности каждого до значения 40 кВт) и применяется для исследования работы конвейера в полностью загруженном и холостом режимах.

Увеличение мощности приводных электродвигателей приводит к изменению вида их механических характеристик в соответствии с системой сочетаний отклонений скольжения электродвигателей приводов [3]. Для системы, состоящей из 16 сочетаний [3], взаимодействие механических характеристик в каждом из сочетаний представлено в табл. 1 (без учета их приведения к обечайке барабанов радиусом  $R$  и передаточными числами приводов  $i$ ). В табл. 1:  $M$  – крутящий момент, развиваемый электродвигателем, Н·м;  $n$  – частота вращения вала электродвигателя, об/мин.

Результаты моделирования для сочетаний отклонений скольжения электродвигателей приводов (табл. 1) при работе конвейера в холостом режиме представлены в табл. 2.

Таблица 1

Взаимодействие механических характеристик в системе сочетаний отклонений скольжения электродвигателей приводов

Сочетание 1			Сочетание 2		
Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$	Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$
П4	$M = 42623 - 28,415 n$	$\alpha$	П4	$M = 42623 - 28,415 n$	$\alpha$
П1	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П1	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$
П2	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П2	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$
П3	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П3	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$
Сочетание 3			Сочетание 4		
Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$	Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$
П4	$M = 42623 - 28,415 n$	$\alpha$	П4	$M = 42623 - 28,415 n$	$\alpha$
П1	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П1	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$
П2	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$	П2	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$
П3	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П3	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$
Сочетание 5			Сочетание 6		
Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$	Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$
П4	$M = 7756 - 5,17 n$	$\beta$	П4	$M = 42623 - 28,415 n$	$\alpha$
П1	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П1	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$
П2	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П2	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$
П3	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П3	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$

Окончание табл. 1

Сочетание 7			Сочетание 8		
Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$	Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$
П4	$M = 42623 - 28,415 n$	$\alpha$	П4	$M = 7756 - 5,17 n$	$\beta$
П1	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$	П1	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$
П2	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$	П2	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$
П3	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П3	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$
Сочетание 9			Сочетание 10		
Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$	Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$
П4	$M = 42623 - 28,415 n$	$\alpha$	П4	$M = 7756 - 5,17 n$	$\beta$
П1	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$	П1	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$
П2	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П2	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$
П3	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$	П3	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$
Сочетание 11			Сочетание 12		
Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$	Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$
П4	$M = 7756 - 5,17 n$	$\beta$	П4	$M = 7756 - 5,17 n$	$\beta$
П1	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П1	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$
П2	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П2	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$
П3	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$	П3	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$
Сочетание 13			Сочетание 14		
Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$	Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$
П4	$M = 7756 - 5,17 n$	$\beta$	П4	$M = 7756 - 5,17 n$	$\beta$
П1	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$	П1	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$
П2	$M = 76870 - 51,247 n$	$\alpha$	П2	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$
П3	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$	П3	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$
Сочетание 15			Сочетание 16		
Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$	Привод	Уравнение	$[\alpha; \beta]$
П4	$M = 42623 - 28,415 n$	$\alpha$	П4	$M = 7756 - 5,17 n$	$\beta$
П1	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$	П1	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$
П2	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$	П2	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$
П3	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$	П3	$M = 7208 - 4,8 n$	$\beta$

Таблица 2

Сводная таблица результатов моделирования при работе конвейера в холостом режиме

Сочетание	Значение параметра									
	$W_1, H$	$W_2, H$	$W_3, H$	$W_4, H$	$W_{n1}, H$	$W_{n2}, H$	$W_{n3}, H$	$S_{max}, H$	$N_{\Sigma}, кВт$	$n, об/мин$
1	3126	3126	3126	1733	1543	1543	1824	5601	20,5	1499,3
2	4235	4235	397	2348	2549	2549	-693	7494	20,7	1499,2
3	4235	397	4235	2348	2549	-973	2830	5899	20,7	1499,2
4	401	4275	4275	2370	-970	2585	2865	6075	20,9	1499,2
5	3534	3534	3534	357	1919	1919	2200	5569	20,2	1499,3
6	6555	615	615	3635	4616	-773	-493	9110	21,1	1498,7
7	628	628	6698	3714	-761	-761	5024	7813	21,6	1498,7
8	492	5244	5244	530	-887	3448	3729	7841	21,3	1499
9	615	6555	615	3635	-773	4616	-493	7101	21,1	1498,7

Окончание табл. 2

10	5042	473	5042	509	3268	-904	3549	5455	20,4	1499
11	5042	5042	473	509	3268	3268	-623	7357	20,4	1499
12	–	–	–	–	–	–	X	–	–	–
13	836	8912	836	900	-570	6716	-289	8325	21,2	1498,3
14	8680	814	814	876	6509	-589	-309	8551	20,7	1498,3
15	1357	1357	1357	8024	-89	-89	193	12372	22,3	1497,2
16	2760	2760	2760	2970	1205	1205	1486	5849	20,7	1494,3

$S_{max}$  – максимальное натяжение грузонесущей ленты;  
 $N_{\Sigma}$  – суммарная мощность, развиваемая приводами;  
 $W_{n1}$  – полезное тяговое усилие, передаваемое приводом П1 грузонесущей ленте;  
 $W_{n2}$  – полезное тяговое усилие, передаваемое приводом П2 грузонесущей ленте;  
 $W_{n3}$  – полезное тяговое усилие, передаваемое приводом П3 грузонесущей ленте;  
 $W_1$  – общее тяговое усилие, развиваемое приводом П1;  
 $W_2$  – общее тяговое усилие, развиваемое приводом П2;  
 $W_3$  – общее тяговое усилие, развиваемое приводом П3;  
 $W_4$  – общее тяговое усилие, развиваемое приводом П4;  
 X – символ, характеризующий критические проблемы соответствующего привода (перегрузки по мощности, срыв сцепления тяговой и грузонесущей лент, оба явления в комплексе).

Картина распределения тяговых усилий (по результатам данных табл. 2) представлена между приводами исследуемого конвейера на рис. 2.

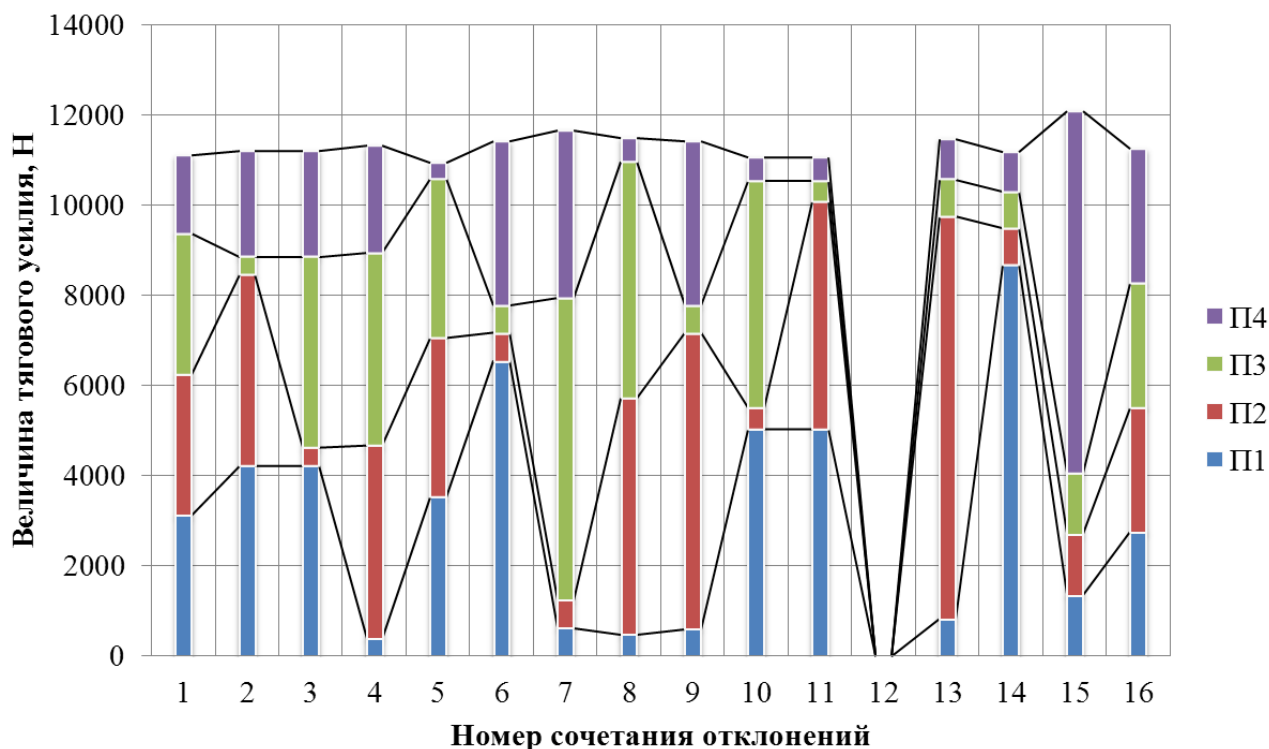


Рис. 2. Полные тяговые усилия, развиваемые приводами, полученные по результатам вероятностного моделирования распределения тяговых усилий в многоприводном ленточном конвейере (порожнее движение)

Наибольшее суммарное тяговое усилие, развиваемое приводами, соответствует 15-му сочетанию отклонений скольжения, в котором увеличение минимального натяжения

грузонесущей ленты для стабилизации тяговой способности привода П4, воспринимающей наибольшую нагрузку, приводит к увеличению составляющей общего сопротивления движению грузонесущей ленты, зависящей непосредственно от этого натяжения.

Графики максимальных натяжений грузонесущей ленты и полезных тяговых усилий промежуточных приводов, составленные по результатам моделирования (табл. 2), представлены на рис. 3 и 4.

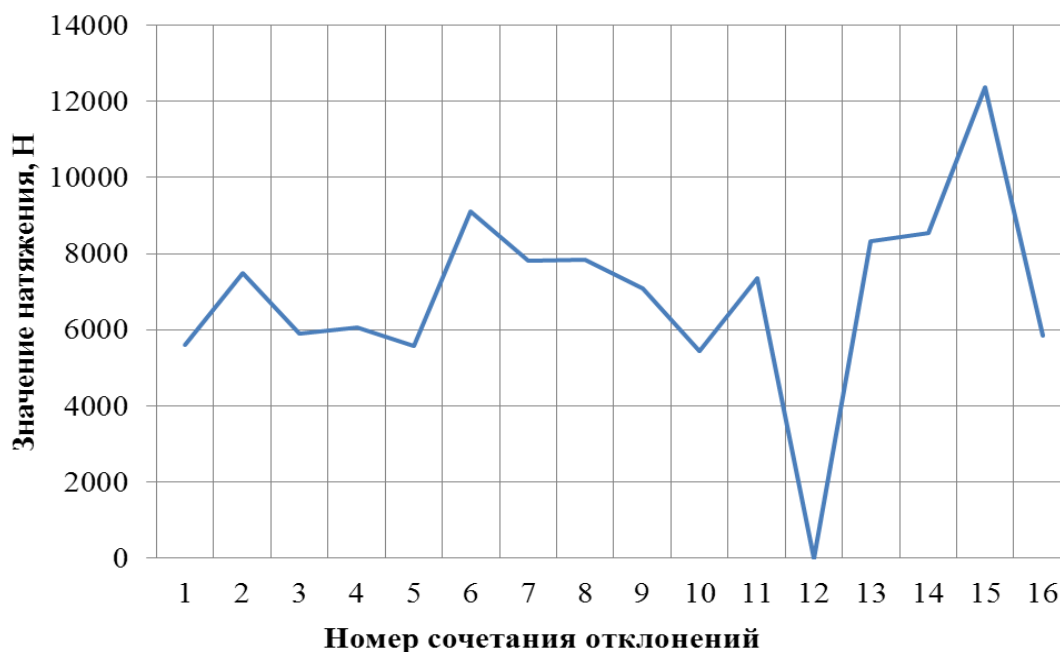


Рис. 3. Максимальные натяжения грузонесущей ленты, полученные по результатам вероятностного моделирования (порожное движение)

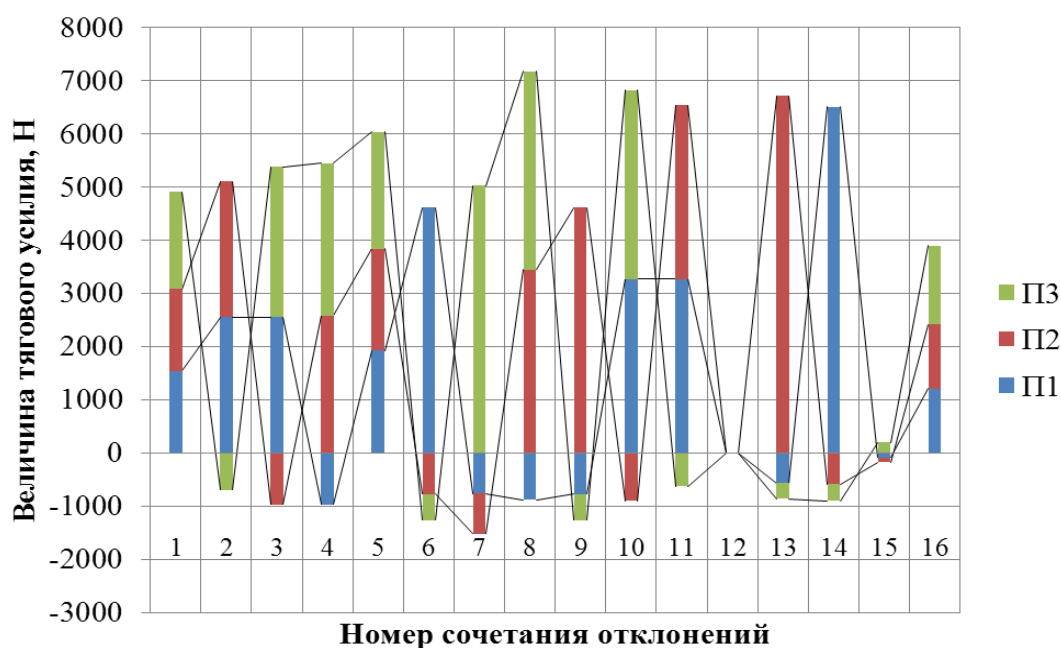


Рис. 4. Полезные тяговые усилия промежуточных приводов, полученные по результатам вероятностного моделирования (порожное движение)

При моделировании совместной работы приводов с ограничением мощности каждого электродвигателя значением 14 кВт [3] сочетания 12, 13, 14 и 15 оказываются неработоспособными. При увеличении мощности каждого электродвигателя до значения 40 кВт неработоспособным оказывается только сочетание 12 из-за срыва сцепления лент на участке привода ПЗ. Таким образом, можно сделать вывод, что выбор электродвигателей многоприводных ленточных конвейеров простым делением суммарной мощности, необходимой для преодоления всех сопротивлений движению, на количество устанавливаемых приво-

дов должен изначально сопровождаться повышенными значениями коэффициента запаса. В данном примере при работе конвейера в холостом режиме максимально возможная мощность, развиваемая одним электродвигателем привода, составляет 16,5 кВт, что в 1,18 раза больше равномерно распределенной мощности на один электродвигатель при работе конвейера с полной производительностью.

Результаты моделирования для сочетаний отклонений скольжения электродвигателей приводов (табл. 1) при работе конвейера в загруженном режиме с полной производительностью представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сводная таблица результатов моделирования при работе конвейера в загруженном режиме

Сочетание	Значение параметра									
	$W_{1,H}$	$W_{2,H}$	$W_{3,H}$	$W_{4,H}$	$W_{n1,H}$	$W_{n2,H}$	$W_{n3,H}$	$S_{max,H}$	$N_{\Sigma}$ , кВт	$n$ , об/мин
1	8368	8368	8368	4640	5057	5058	5640	20358	54,9	1498,4
2	11217	11217	1052	6220	7817	7817	-1447	24289	54,9	1497,8
3	11299	1060	11299	6265	7897	-2021	8480	20915	55,2	1497,8
4	1095	11672	11672	6472	-1988	8258	8841	25662	57,1	1497,8
5	9701	9701	9701	979	6349	6349	6931	24502	55,5	1498,1
6	17299	1623	1623	9592	13654	-1477	-894	28647	55,6	1496,6
7	1705	1705	18175	10078	-1398	-1397	15057	29072	58,4	1496,5
8	1333	14214	14214	1435	-1757	10720	11302	30309	57,6	1497,3
9	1650	17589	1650	9753	-1451	13923	-868	26172	56,5	1496,6
10	13683	1283	13683	1381	10206	-1805	10789	23836	55,4	1497,3
11	13683	13683	1283	1381	10206	10206	-1222	28822	55,4	1497,3
12	–	–	X	–	–	–	–	–	–	–
13	–	X	–	–	–	–	–	–	–	–
14	X	–	–	–	–	–	–	–	–	–
15	3514	3514	3514	20779	356	357	939	32297	57,6	1492,7
16	7333	7333	7333	7891	4055	4056	4638	19412	54,7	1484,8

В данном случае в результате моделирования определяются три неработоспособных сочетания отклонений скольжения электродвигателей приводов, обусловленные перегрузкой по мощности последовательно электродвигателей промежуточных ленточных приводов ПЗ, П2, П1 (более 40 кВт). При этом стоит отметить, что при работе только барабанного привода П4 на жесткой механической характеристике (приводы П1, П2 и ПЗ работают на мягкой характеристике, со-

четание 15) перегрузка его электродвигателя по мощности не происходит.

Картина распределения тяговых усилий между приводами исследуемого конвейера (по результатам данных табл. 3) представлена на рис. 5. Графики максимальных натяжений грузонесущей ленты и полезных тяговых усилий промежуточных приводов, составленные по результатам моделирования (табл. 3), представлены на рис. 6 и 7.

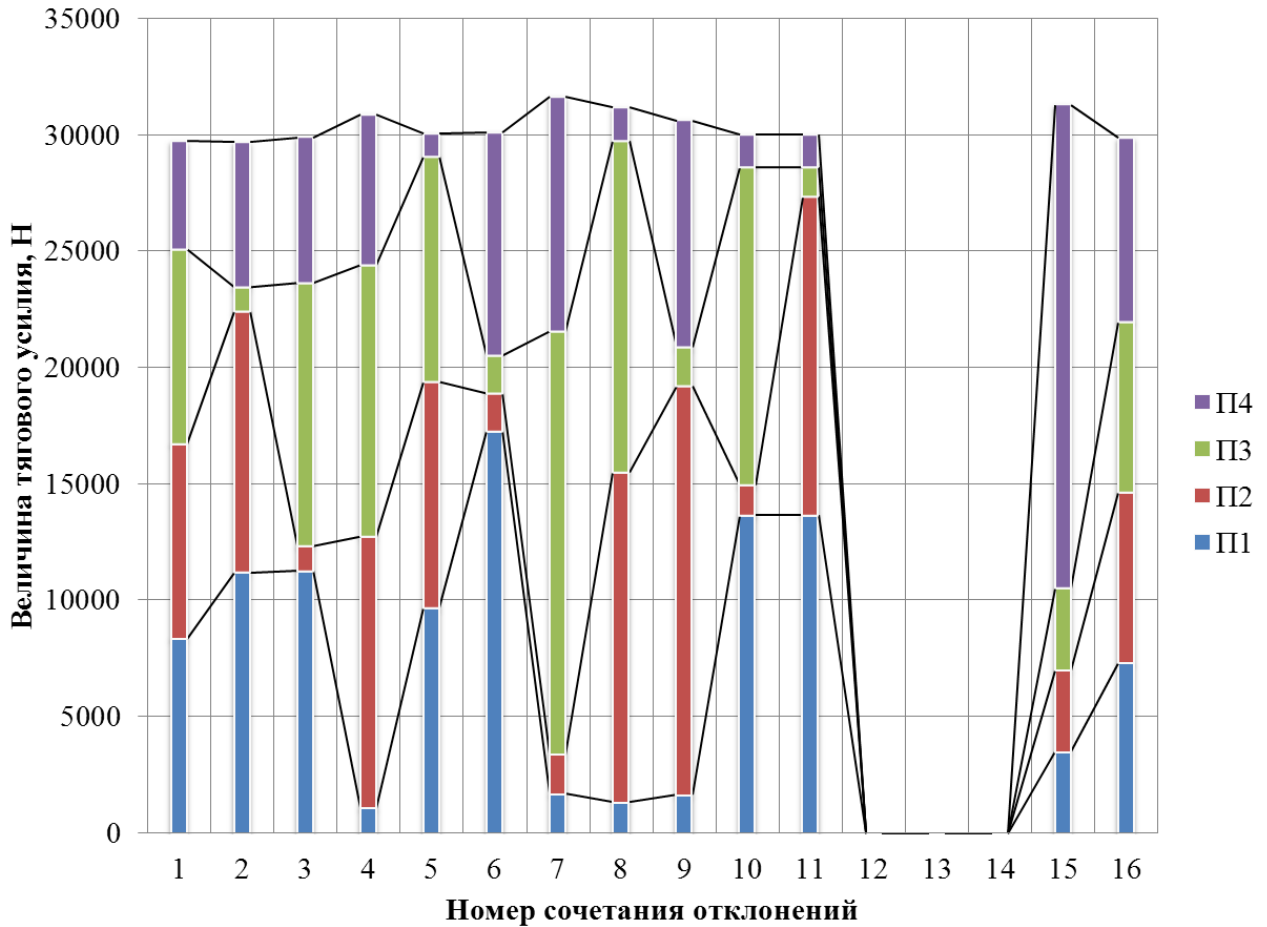


Рис. 5. Полные тяговые усилия, развиваемые приводами, полученные по результатам вероятностного моделирования распределения тяговых усилий в многоприводном ленточном конвейере (движение при полной загрузке)



Рис. 6. Максимальные натяжения грузонесущей ленты, полученные по результатам вероятностного моделирования (движение с полной загрузкой)



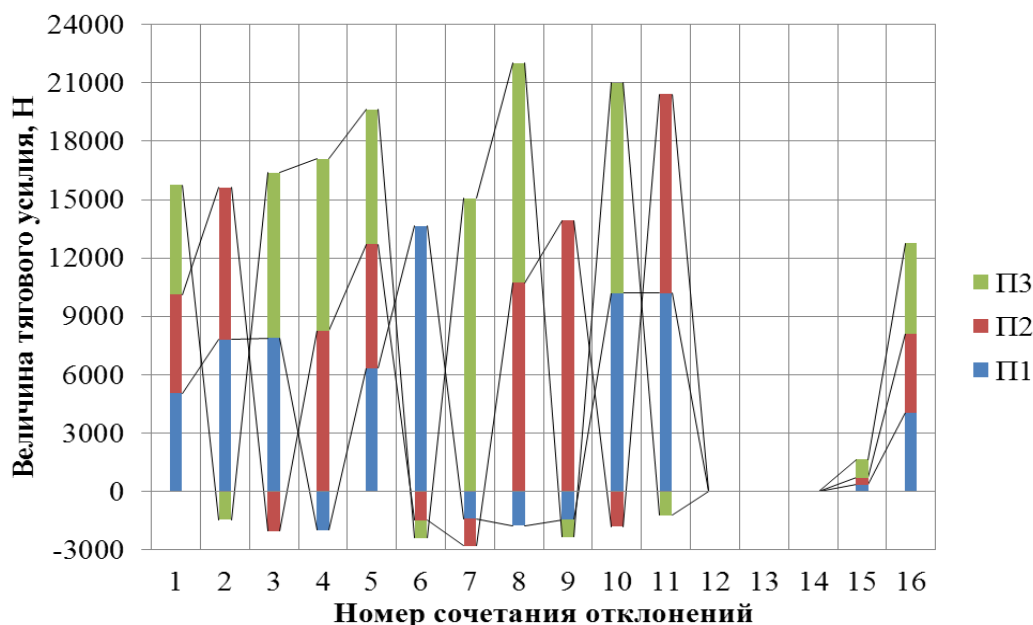


Рис. 7. Полезные тяговые усилия промежуточных приводов, полученные по результатам вероятностного моделирования (движение с полной загрузкой)

Наибольшее суммарное тяговое усилие, развиваемое приводами, соответствует 7-му сочетанию отклонений скольжения, в котором увеличение минимального натяжения грузонесущей ленты для устранения её провисания при сбегании с привода П3, приводит к увеличению составляющей общего сопротивления движению конвейера, зависящей непосредственно от этого натяжения. Графики максимальных натяжений грузонесущей ленты и полезных тяговых усилий промежуточных приводов, составленные по результатам моделирования (табл. 3), представлены на рис. 6 и 7.

### 3. Результаты и их анализ

Анализируя полученные в процессе моделирования данные (при движении как порожнего, так и загруженного конвейера) можно отметить следующие результаты, которые позволила выявить вероятностная математическая модель распределения тяговых усилий.

1. При учете возможного интервала отклонений скольжения электродвигателей приводов разброс развиваемой ими мощности при порожнем движении конвейера составляет 2,1 кВт или 9,4% по отношению к максимально развиваемой мощности (22,3

кВт). При движении конвейера в загруженном состоянии разброс значений развиваемой мощности составляет 3,7 кВт или 6,3% по отношению к максимально развиваемой мощности (58,4 кВт).

2. Разброс значений максимальных натяжений грузонесущей ленты при моделировании различных сочетаний отклонений скольжения электродвигателей в порожнем движении конвейера составляет 6917 Н или 55,9% по отношению к наибольшему из полученных значений максимального натяжения (12372 Н). При моделировании движения конвейера в загруженном состоянии разброс значений максимальных натяжений грузонесущей ленты составляет 12885 Н или 39,9% по отношению к наибольшему из полученных значений максимального натяжения (32297 Н).

3. При работе конвейера в порожнем режиме выявлено одно неработоспособное сочетание отклонений скольжения электродвигателей, причиной которого является срыв сцепления тяговой и грузонесущей лент на одном из промежуточных приводов, воспринимающем основную нагрузку. Данная проблема может быть решена увеличением длины данного промежуточного привода.

4. При работе конвейера в загруженном режиме выявлено три неработоспособных со-

четания отклонений скольжения электродвигателей, причиной которых стала перегрузка по мощности приводных электродвигателей. Данная проблема может быть решена как увеличением мощности устанавливаемых электродвигателей, так и усилением контроля их качества. Стоит отметить, что максимальная суммарная развиваемая мощность двигателей приводов конвейера при его движении с полной загрузкой – 58,4 кВт при общем резерве мощности 160 кВт, что составляет 36,5%. Фактически, остаток мощности (101,6 кВт или 63,5%) используется для резервирования возможных нештатных режимов работы (что в некоторых сочетаниях отклонений скольжения электродвигателей также является недостаточной мерой воздействия).

5. Детальное моделирование позволило выявить определенные работоспособные сочетания отклонений скольжения электродвигателей приводов, при которых промежуточные ленточные приводы работают в «дотационных» режимах, представляя собой дополнительное сопротивление для движения грузонесущей ленты. При движении порожнего конвейера из 16 анализируемых сочетаний 13 соответствуют данному описанию (81,3%). При движении полностью загруженного конвейера из 16 анализируемых сочетаний 12 соответствуют данному описанию (75%). Таким образом, задачей проектировщика является необходимость реализации такой расстановки двигателей в структуре системы приводов, которая позволит всей системе не попасть в число «дотационных» сочетаний.

#### **4. Закономерности совместной работы приводов ленточного конвейера при наличии случайных отклонений скольжения их электродвигателей**

В результате проведенного вероятностного моделирования можно установить ряд системных закономерностей, которым подчиняется любая случайная система приводов ленточного конвейера. Указанные закономерности можно представить в виде следующих положений.

1. Наилучшими с позиции распределения тяговых усилий являются сочетания с одина-

ковыми отклонениями всех приводов, причем общее «смягчение» механических характеристик приводит к более равномерному распределению тяговых усилий.

2. В случае наличия в системе одного двигателя со «смягченной» механической характеристикой его установка в структуру промежуточного ленточного привода может привести к работе последнего в режиме сопротивления движению грузонесущей ленте, так как при синхронизации скоростей контуров лент указанный привод будет развивать недостаточное тяговое усилие для преодоления сопротивлений движению собственного тягового контура («дотационный» режим работы).

3. При наличии в системе нескольких двигателей со «смягченными» механическими характеристиками и нескольких с «жесткими», а также реализации в структуре системы приводов как барабанных, так и промежуточных ленточных приводов наилучшее распределение тяговых усилий достигается в случае установки двигателей с «жесткими» характеристиками в структуры промежуточных ленточных приводов, что также можно сформулировать в виде следующего принципа: *чем большую нагрузку возьмут на себя промежуточные ленточные приводы, тем меньшее количество из них будет работать в дотационном режиме.*

4. Наибольшую опасность при эксплуатации конвейера представляют сочетания отклонений скольжения электродвигателей, внутри которых имеется только один двигатель с «жесткой» механической характеристикой – в этом случае он пытается воспринять основной спектр нагрузок при возможном снижении общей синхронизирующей скорости движения лент конвейера. Данное обстоятельство может привести к перегрузке двигателя по мощности и срыву сцепления лент на промежуточных ленточных приводах.

5. Грузонесущая лента работает в спектре максимальных значений собственного натяжения в случаях восприятия наименьшей нагрузки приводами любых типов, взаимодействующими с грузовой ветвью конвейера, что соответствует наличию у двигателей данных приводов «смягченных» механических характеристик по отношению к двигателям других

приводов. Наиболее опасный вид данная закономерность принимает в случае установки в структуре конвейера промежуточных ленточных приводов, взаимодействующих с грузонесущей лентой, т.к. данные приводы могут все вместе одновременно работать в «дотационном» режиме.

6. В случаях восприятия значительных нагрузок промежуточными ленточными приводами при работе их двигателей на «жестких» механических характеристиках общая работоспособность системы сохраняется за счет повышения натяжений соответствующих тяговых лент. Сохранить работоспособное состояние системы при первоначальных значениях всех входных параметров в рассматриваемых условиях невозможно.

7. В случае наличия в структуре системы примерно одинакового количества приводов с двигателями, работающими на «жестких» механических характеристиках, и приводов с двигателями, работающими на «мягких» механических характеристиках, наилучшими с позиции минимизации натяжений лент являются такие распределения приводов по трассе конвейера, при которых достигается последо-

вательное чередование приводов с «жесткими» и приводов с «мягкими» характеристиками при отсутствии возможности выравнивания их тяговых усилий с использованием систем управления.

## 5. Заключение

Установленные системные закономерности совместной работы приводов ленточных конвейеров при наличии случайных отклонений скольжения их электродвигателей обобщают возможные результаты анализа работы различных по конфигурации систем приводов и, фактически, являются точечными опорными тезисами, на которые в первую очередь следует обращать внимание при моделировании. При этом компоновка систем приводов с учетом описанных закономерностей на этапе, предшествующем вероятностному моделированию, способствует уменьшению трудоемкости моделирования за счет сокращения числа возможных конфигураций систем приводов с изначально заложенными худшими параметрами распределения тяговых усилий.

## Список литературы

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

2. Гончаров К.А., Дунаев В.П. Комплексный подход к тяговому расчету ленточных конвейеров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. №2. С.144–151.

3. Гончаров К.А. Особенности построения вероятностной математической модели распределения тяговых усилий в многоприводном ленточном конвейере // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. №4. С.380–389.

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

5. Барабанов В.Б. Результаты второго

## References

1. Goncharov K.A., The probabilistic approach to determining the slide departures of electric motors of belt conveyors. *Machine drives and parts*, 2016, No. 4-5, pp. 13–15. (In Russian)

2. Goncharov K.A., Dunaev V.P. The integrated approach to traction calculation of belt conveyors. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No.2, pp. 144-151. (In Russian)

3. Goncharov K.A. Design features of probabilistic mathematical model of tractive effort distribution in multidrive belt conveyor. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No.4, pp. 380-389. (In Russian)

4. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Goncharov K.A. *Modelirovanie rabochnik protsessov i proektirovanie mnogoprivodnykh lentochnykh konveyerov* [Modeling of work processes and design of multi-drive belt con-

этапа эксплуатационных испытаний промышленного образца многоприводного ленточного конвейера // Машины непрерывного транспорта: сб. науч. тр. М.: ВНИИПТМАШ, 1971. Вып. 2. № 11. С. 52–58.

6. Дьячков В.К. Результаты исследования линейных фрикционных приводов многоприводного ленточного конвейера // Машины непрерывного транспорта: сб. науч. тр. М.: ВНИИПТМАШ, 1971. Вып. 2. №11. С. 3–32.

7. Дьячков В.К. Наклонные многоприводные ленточные конвейеры для подъема руды из глубоких карьеров // Научные и экспериментальные исследования в области конвейеро- и роботостроения: сб. науч. тр. М.: ВНИИПТМАШ, 1987. С. 3–15.

veyors]. Bryansk, RIO BGU, 2017. 384 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1196612> (In Russian)

5. Barabanov V.B. Rezultaty vtorogo etapa ekspluatatsionnykh ispytaniy promyshlennogo obraztsa mnogoprivodnogo lentochnogo konveyera. *Sbornik nauchnykh trudov "Mashiny nepreryvnogo transporta"*. Moscow, VNIPTMASH, 1971, Vol.2, No.11, pp. 52–58 (In Russian)

6. Diachkov V.K. Rezultaty issledovaniy lineinykh friktsionnykh privodov mnogoprivodnogo lentochnogo konveyera. *Sbornik nauchnykh trudov "Mashiny nepreryvnogo transporta"*. Moscow, VNIPTMASH, 1971, Vol.2, No.11, pp. 3-32 (In Russian)

7. Diachkov V.K. *Naklonnyemnogoprivodnye lentochnye konveyery dlya podema rudy iz glubokih karierov. Sbornik nauchnykh trudov "Nauchnye i experimentalnye issledovania v oblasti konveyero- i robotostroeniya"*. Moscow, VNIPTMASH, 1987, pp. 3-15 (In Russian)