

УДК 62-5

Доманов Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент
заведующий кафедрой, доцент, кафедра "Электропривод и автоматизация
промышленных установок «Ульяновский государственный технический
университет» город Ульяновск.

Абрамов Сергей Иванович, магистрант, 1 курс заочно-вечерний факультет,
кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»,
«Ульяновский государственный технический университет» город Ульяновск.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО БАРАБАННОГО КОНВЕЙЕРА С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ ТЯГОВОГО ОРГАНА

В статье рассматривается актуальная проблема проектирования многодвигательных приводов ленточных конвейеров. Представлена разработка математической модели двухдвигательного привода, учитывающей упругие свойства тягового органа. Проведено исследование динамических процессов при пуске системы, выявлены значительные нагрузки из-за волновых явлений в ленте. Проанализировано рассогласование работы двигателей, обусловленное упругостью связи между ними. Предложены практические решения на основе частотных преобразователей с алгоритмами синхронизации. Расчеты подтвердили эффективность предлагаемых методов для снижения динамических нагрузок и обеспечения надежной эксплуатации конвейера.

The article discusses the actual problem of designing multi-motor belt conveyor drives. The development of a mathematical model of a two-motor drive, which takes into account the elastic properties of the traction organ, is presented. A study of dynamic processes during system startup has been carried out, significant loads due to wave phenomena in the tape have been identified. The misalignment of the engines due to the elasticity of the connection between them is analyzed. Practical solutions based on frequency converters with synchronization algorithms

are proposed. Calculations have confirmed the effectiveness of the proposed methods to reduce dynamic loads and ensure reliable operation of the conveyor.

Ключевые слова: ленточный конвейер, двухдвигательный привод, упругость ленты, динамические нагрузки, математическое моделирование, синхронизация двигателей, частотный преобразователь, пусковые характеристики.

Keywords: conveyor belt, twin-motor drive, belt elasticity, dynamic loads, mathematical modeling, motor synchronization, frequency converter, starting characteristics.

Введение. Ленточные конвейеры являются основным средством непрерывного транспортирования насыпных и штучных грузов в горнодобывающей, металлургической, строительной и других отраслях промышленности. Тенденция к увеличению производительности и длины конвейерных трасс обуславливает необходимость применения приводных станций большой мощности. Традиционные однодвигательные приводы при высоких мощностях сталкиваются с рядом проблем: значительные динамические нагрузки при пуске, сложность равномерного распределения мощности, повышенное проскальзывание ленты на приводном барабане.

Актуальность данной работы заключается в предложении решения этих проблем за счет использования двухдвигательного привода. Такой подход позволяет распределить механическую нагрузку между двумя агрегатами. Также, он дает возможность более гибкого управления процессом разгона и торможения, - а это критически важно для длинномерных конвейеров. Однако проектирование многодвигательных систем невозможно без учета волновых и динамических процессов в ленте. Это обусловлено ее упругими свойствами. Игнорирование этих факторов приводит к рассогласованию работы двигателей, возникновению значительных продольных колебаний. В итоге, ресурс ленты сокращается, элементы ее изнашиваются в ускоренном режиме.

Целью работы является исследование динамических процессов в двухдвигательном барабанном конвейере с учетом упругости ленты в целях оптимизации его пусковых характеристик.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать расчетную схему двухдвигательного привода, отражающую упругие свойства ленты;
- составить систему дифференциальных уравнений движения электроприводов и упругого тягового органа;
- провести расчет динамических нагрузок и параметров движения ленты при пуске системы;
- проанализировать влияние жесткости ленты на согласованность работы двигателей и динамические нагрузки в системе.

Объект исследования: приводная станция ленточного конвейера с двумя двигателями.

Предмет исследования: динамические процессы и нагрузки в системе «электропривод – упругая лента» при пуске двухдвигательного конвейера.

Основная часть. Рассмотрим математическую модель двухдвигательного привода. Для анализа динамических процессов в системе необходимо рассмотреть ее как совокупность взаимосвязанных масс, соединенных упругими связями¹. Расчетная схема двухдвигательного привода представлена на рисунке 1.

¹ Овсянников Д.С., Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И. Адаптивный регулятор выравнивания нагрузки скребкового конвейера // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnyy-regulyator-vyravnivaniya-nagruzki-skrebkovogo-konveyera> (дата обращения: 26.11.2025).

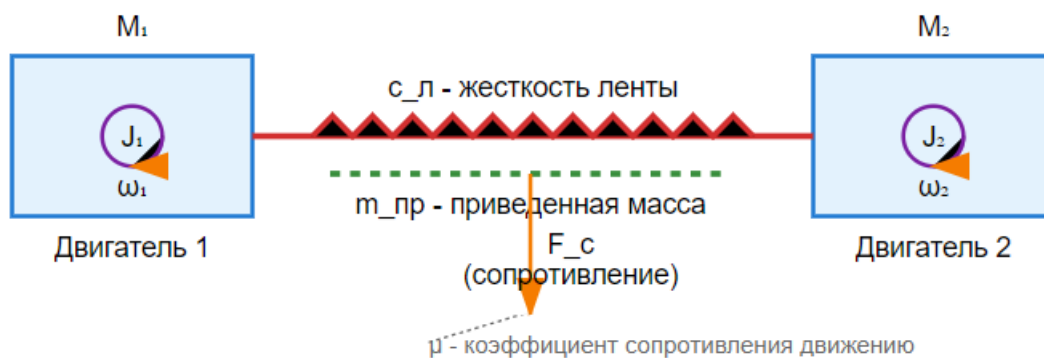


Рисунок 1 - Расчетная схема двухдвигательного привода

Обозначения:

1. M_1, M_2 – электродвигатели;
2. J_1, J_2 – приведенные моменты инерции роторов двигателей и барабанов;
3. $c_{л}$ – жесткость участка ленты между барабанами;
4. μ – коэффициент сопротивления движению;
5. $m_{пр}$ – приведенная масса движущихся частей конвейера;
6. $F_{с}$ – сила сопротивления движению;
7. ω_1, ω_2 – угловые скорости двигателей.

Система состоит из двух дисков (приводных барабанов с роторами двигателей), обладающих моментами инерции J_1 и J_2 , которые соединены между собой упругим элементом, моделирующим участок ленты между барабанами с жесткостью $c_{л}$. К первому диску приложен момент M_1 , ко второму – M_2 . Приведенная масса грузовой ленты $m_{пр}$ создает силу сопротивления движению.

Жесткость ленты $c_{л}$ является переменной величиной и зависит от длины конвейера и модуля упругости ленты:
 $c_{л} = (E \cdot A) / L_{уч}$, где:

- E – модуль упругости ленты, Н/мм²;
- A – площадь поперечного сечения каркаса ленты, мм²;
- $L_{уч}$ – длина упругого участка (расстояние между барабанами), м.

Для типовой ленты с прочностью 2500 Н/мм и шириной 1200 мм, площадь А составит примерно 1200 мм * 10 мм (толщина каркаса) = 12000 мм². При E =600Н/мм²иL_{уч}=50м:

$$c_{\text{л}}=(600*12000)/50=144000\text{Н/мм}=144*10^6\text{Н/м.}$$

Дифференциальные уравнения движения такой системы имеют вид:

$$J_1*d^2\varphi_1/dt^2=M_1-c_{\text{л}}*(\varphi_1-\varphi_2)*R-b_1*d\varphi_1/dt$$

$$J_2*d^2\varphi_2/dt^2=M_2+c_{\text{л}}*(\varphi_1-\varphi_2)*R-b_2*d\varphi_2/dt-F_{\text{с}}*R$$

где:

- φ_1, φ_2 – углы поворота барабанов;
- $d^2\varphi/dt^2$ – угловое ускорение;
- R – радиус приводного барабана;
- b_1, b_2 – коэффициенты вязкого трения в подшипниках;
- $F_{\text{с}}$ – сила сопротивления движению ленты.

Сила сопротивления $F_{\text{с}}$ рассчитывается по общеизвестной методике и включает в себя сопротивления от движения груза, трения в роlikоопорах, на загрузочном устройстве и т.д.

Проведём модельный расчет динамических нагрузок при пуске. Ключевым режимом работы конвейера является пуск. Резкое приложение момента приводит к возникновению волн упругой деформации, бегущих по ленте. Это вызывает колебания натяжения, которые могут в несколько раз превышать статические нагрузки².

Рассмотрим пуск конвейера с двумя асинхронными двигателями с фазным ротором, мощностью по 200 кВт каждый. Пуск осуществляется путем плавного вывода резисторов в роторных цепях.

Исходные данные для расчета:

1. мощность двигателя: $P_{\text{ном}}=200\text{кВт}$;

² Овсянников Д. С., Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И. Адаптивный регулятор выравнивания нагрузки скребкового конвейера // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnyy-regulyator-vyravnivaniya-nagruzki-skrebkovogo-konveyera> (дата обращения: 26.11.2025).

2. синхронная частота вращения: $n_c=1500$ об/мин;
3. номинальный момент
двигателя: $M_{ном}=9550 \cdot P_{ном} / n_{ном} \approx 9550 \cdot 200 / 1470 \approx 1300$ Н*м;
4. приведенный момент инерции первого барабана с ротором: $J_1=120$ кг*м²;
5. приведенный момент инерции второго барабана: $J_2=115$ кг*м²;
6. радиус барабана: $R=0.5$ м;
7. жесткость ленты: $c_l=144 \cdot 10^6$ Н/м;
8. приведенная масса ленты с грузом: $m_{пр}=20000$ кг;
9. сила статического сопротивления: $F_{c_ст}=18000$ Н.

Максимальное динамическое натяжение в лене ($S_{дин}$) можно оценить по формуле, учитывающей волновые процессы:

$$S_{дин} \approx v \cdot \sqrt{(E \cdot A \cdot \rho_l) + S_{ст}}, \text{ где:}$$

- v – скорость установившегося движения ленты, м/с;
- ρ_l – погонная плотность ленты с грузом, кг/м.

При скорости $v = 2.5$ м/с и погонной плотности $\rho_l = m_{пр} / L_{конв} = 20000 / 1000 = 20$ кг/м:

$$S_{дин} \approx 2.5 \cdot \sqrt{(144 \cdot 10^6 \cdot 20) + (F_{c_ст} / 2)} \approx 2.5 \cdot \sqrt{(2.88 \cdot 10^9) + 9000} \approx 2.5 \cdot \sqrt{2.88 \cdot 10^9 + 9000} \approx 2.5 \cdot \sqrt{2.88 \cdot 10^9} \approx 2.5 \cdot 53600 \approx 134000 + 9000 = 143000 \text{ Н.}$$

Это упрощенный расчет, но он показывает, что динамические нагрузки могут быть весьма значительными.

Для таких механизмов важна согласованность работы двигателей. Основной проблемой двухдвигательного привода является рассогласование моментов на валах двигателей из-за разброса механических характеристик и упругости ленты³. Это приводит к неравномерной загрузке двигателей: один может быть перегружен, а второй, - работать в недогруженном режиме.

³ Овсянников Д. С., Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И. Возможность применения синхронного двигателя с постоянными магнитами для участкового ленточного конвейера // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnost-primeneniya-sinhronnogo-dvigatelya-s-postoyannymi-magnitami-dlya-uchastkovogo-lentochного-konveyera> (дата обращения: 26.11.2025).

Для анализа смоделируем процесс пуска с помощью системы дифференциальных уравнений, представленной в разделе 1. Примем, что момент двигателей нарастает по линейному закону от 0 до номинального значения за время $t_{п} = 5$ с.

Результаты моделирования (угловые скорости и момент на упругой связи) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры динамического процесса при пуске

Время, с	Угловая скорость двигателя 1, рад/с	Угловая скорость двигателя 2, рад/с	Момент на упругой связи, Н*м	Примечание
0.5	4.1	3.9	12 500	Начало разгона, возникает упругий момент
1.0	8.5	8.1	25 800	Рост упругого момента, скорость Дв1 > Дв2
2.0	17.8	17.5	18 200	Прохождение резонансной зоны, колебания
3.0	27.0	26.9	10 100	Выравнивание скоростей, момент снижается
4.0	36.2	36.2	1 500	Скорости выровнились, система стабилизируется
5.0 (конец пуска)	45.0	45.0	0	Установившийся режим, моменты уравновешены

В таблице 1 представлены результаты численного моделирования пуска двухдвигательного конвейера. Анализ данных показывает, что в начальный момент пуска из-за упругости ленты возникает значительный момент на связи между барабанами (до 25 800 Н*м), что превышает номинальный момент одного двигателя. Наблюдается рассогласование угловых скоростей:

двигатель 1 опережает двигатель 2. В промежуточный момент времени (~2 с) система проходит через зону резонансных колебаний, что видно по изменению знака и величины момента. К концу пускового процесса скорости двигателей выравниваются, а упругий момент затухает⁴. Это свидетельствует о переходе к установившемуся движению.

Как видно из таблицы, без системы синхронизации в начальный момент пуска вся нагрузка может прийти на один двигатель, в то время как второй будет «проскальзывать». Это недопустимо.

Поэтому, для обеспечения надежной и долговечной работы двухдвигательного привода необходима система управления, компенсирующая упругие колебания и обеспечивающая равномерное распределение нагрузки.

Возможные меры:

1. использование частотных преобразователей (ЧП). Это наиболее современный и эффективный способ. ЧП позволяют реализовать плавный закон изменения момента во времени (S-образную или параболическую характеристику). Это резко снижает динамические ударные нагрузки.
2. алгоритм главный-ведомый (Master-Slave). В данной схеме один привод (Master) работает в режиме поддержания скорости, а второй (Slave), - в режиме поддержания момента, который задается пропорционально моменту первого двигателя. Это позволяет «заставить» оба двигателя работать синхронно, даже при наличии упругой связи.
3. прямое распределение нагрузки (Torque Sharing). Оба преобразователя получают одинаковое задание на момент, но в контур управления вводится сигнал коррекции, основанный на измерении токов двигателей. Если ток

⁴ Овсянников Д. С., Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И. Возможность применения синхронного двигателя с постоянными магнитами для участкового ленточного конвейера // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnost-primeneniya-sinhronnogo-dvigatelya-s-postoyannymi-magnitami-dlya-uchastkovogo-lentochnogo-konveyera> (дата обращения: 26.11.2025).

одного двигателя становится больше, его момент немного снижается, а у второго, - увеличивается.

Расчет требуемого времени пуска для ограничения динамического усилия можно провести по формуле:

$$t_{\text{пmin}} \geq (v \cdot \sqrt{(E \cdot A \cdot \rho_{\text{л}})}) / (k \cdot [S] \cdot v) = (\sqrt{(E \cdot A \cdot \rho_{\text{л}})}) / (k \cdot [S]), \text{ где:}$$

- [S] – допустимое натяжение ленты, Н;
- k – коэффициент, зависящий от закона изменения ускорения (для линейного ~ 1).

При [S]=160000 Н:

$$t_{\text{пmin}} \geq \sqrt{(144 \cdot 10^6 \cdot 20)} / (1 \cdot 160000) \approx 53600 / 160000 \approx 0.34 \text{ с.}$$

Безусловно, это теоретические наработки⁵⁶. На практике время пуска выбирают больше (3-10 с) для обеспечения комфортного разгона и снижения токовой нагрузки на электросеть.

Заключение. В ходе проведенного исследования была разработана математическая модель двухдвигательного привода ленточного конвейера, которая учитывает упругие свойства тягового органа. Модель позволяет анализировать динамические процессы, возникающие в системе при пуске.

Расчеты показали, что упругость ленты является ключевым фактором, приводящим к возникновению значительных динамических нагрузок и рассогласованию работы двигателей. Было установлено, что в начальной стадии пуска момент на упругой связи может вдвое превышать номинальный момент двигателя, что создает риск перегрузки и выхода из строя одного из приводов.

⁵ Гончаров К. А. Концептуальные решения систем управления дифференциальными натяжными устройствами ленточных конвейеров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnye-resheniya-sistem-upravleniya-differentsialnymi-natyazhnyimi-ustroystvami-lentochnyh-konveyerov> (дата обращения: 26.11.2025).

⁶ Гончаров К. А. Концептуальные решения систем управления дифференциальными натяжными устройствами ленточных конвейеров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnye-resheniya-sistem-upravleniya-differentsialnymi-natyazhnyimi-ustroystvami-lentochnyh-konveyerov> (дата обращения: 26.11.2025).

Для устранения выявленных негативных явлений предложено применять систему управления на основе частотных преобразователей с алгоритмом «главный-ведомый» или прямым распределением нагрузки. Такой подход позволяет обеспечить плавный разгон и синхронную работу двигателей, существенно снижая динамические нагрузки и повышая надежность и долговечность всей конвейерной системы.

Дальнейшие исследования автора будут направлены на создание адаптивной системы управления, которая могла бы в реальном времени корректировать параметры работы приводов в зависимости от изменения жесткости ленты (например, при изменении длины трассы или степени ее загрузки). Для этого необходимо использовать специальное программное обеспечение⁷.

Список литературы:

1. Гончаров К. А. Концептуальные решения систем управления дифференциальными натяжными устройствами ленточных конвейеров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnye-resheniya-sistem-upravleniya-differentsialnymi-natyazhnymi-ustroystvami-lentochnyh-konveyerov> (дата обращения: 26.11.2025).

2. Овсянников Д. С., Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И. Адаптивный регулятор выравнивания нагрузки скребкового конвейера // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnyu-regulyator-vyravnivaniya-nagruzki-skrebkovogo-konveyera> (дата обращения: 26.11.2025).

3. Овсянников Д. С., Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И. Возможность применения синхронного двигателя с постоянными магнитами для участкового ленточного конвейера // Известия ТулГУ. Технические науки.

⁷ Шпрехер Д. М., Овсянников Д.С. Разработка модели двухдвигательного скребкового конвейера в программном пакете SIMSCAPE // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-dvuhdvigatel'nogo-skrebkovogo-konveyera-v-programmnom-pakete-simscape> (дата обращения: 26.11.2025).

2024. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnost-primeneniya-sinhronnogo-dvigatelya-s-postoyannymi-magnitami-dlya-uchastkovogo-lentochnogo-konveyera> (дата обращения: 26.11.2025).

4. Шпрекхер Д. М., Овсянников Д.С. Разработка модели двухдвигательного скребкового конвейера в программном пакете SIMSCAPE // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-dvukhdvigatel'nogo-skrebkovogo-konveyera-v-programmnom-pakete-simscape> (дата обращения: 26.11.2025).

Literature

1. Goncharov K. A. Kontseptual'nye resheniya sistem upravleniya differentsial'nymi natyazhnymi ustroystvami lentochnykh konveyerov [Conceptual solutions for control systems of differential tensioning devices for belt conveyors]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University], 2021, no. 4. Available at: (accessed: 26.11.2025).
2. Ovsyannikov D. S., Shprekher D. M., Babokin G. I. Adaptivnyy regulyator vyravnivaniya nagruzki skrebkovogo konveyera [Adaptive load-balancing regulator for a scraper conveyor]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], 2024, no. 5. Available at: (accessed: 26.11.2025).
3. Ovsyannikov D. S., Shprekher D. M., Babokin G. I. Vozmozhnost' primeneniya sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami dlya uchastkovogo lentochnogo konveyera [Feasibility of using a permanent-magnet synchronous motor for a sectional belt conveyor]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], 2024, no. 12. Available at: (accessed: 26.11.2025).
4. Shprekher D. M., Ovsyannikov D. S. Razrabotka modeli dvukhdvigatel'nogo skrebkovogo konveyera v programmnom pakete SIMSCAPE [Development of a two-motor scraper conveyor model in the SIMSCAPE software package]. *Izvestiya*

TulGU. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], 2021, no. 9. Available at: (accessed: 26.11.2025).