ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(6):77-92
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.313.334 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_77

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВНОГО ПУСКА ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

**В.В. Дмитриева[1], А.А. Собянин[1], П.Е. Сизин[2]**

[1] Российский университет Нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия
[2] ИБО НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: mstranger@list.ru

***Аннотация:*** Цель работы — обосновать необходимость плавного пуска конвейерной ленты. Прямой запуск загруженного конвейера влечет за собой увеличение сил инерции, перегрузку тяговых цепей и привода. Из-за увеличенного пускового момента существует опасность проскальзывания между лентой и приводным барабаном, возникновения колебательного процесса в порожней ветви ленты, пробуксовки привода. Это приводит к износу ленты и поломкам оборудования. Для исследования процессов в ленточном конвейере использовалась конечномерная модель, реализованная в пространстве состояний. Представлено моделирование в программах SimPowerToolbox и Simulink прямого пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя конвейера и двигателя с тиристорным регулятором напряжения, полученные результаты позволяют сравнивать два вида пуска. Устройство плавного пуска уменьшает пусковые токи; устраняет рывки в механических передачах; позволяет экономить электроэнергию и защищать оборудование. При плавном запуске разгон конвейера длится дольше, но движение сосредоточенных масс более последовательное, менее колебательное, усилия в ленте изменяются плавно, тяговый фактор стабилизируется без перерегулирования. Разработанная модель позволяет исследовать динамические режимы работы двигателя и механической части конвейера, анализировать усилия, возникающие в ленте, оценивать скольжение ленты и величину коэффициента тяги. Результаты работы должны лечь в основу системы контроля натяжения ленты и поддержания коэффициента тяги в пуско-тормозных режимах, что обеспечит отсутствие пробуксовки привода и проскальзывания ленты, если необходимо регулировать скорость ленты в зависимости от объема случайного грузового потока, поступающего на конвейер.

***Ключевые слова:*** ленточный конвейер, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, комплексная математическая модель «ленточный конвейер–асинхронный двигатель», прямой пуск, устройство плавного пуска, тиристорный преобразователь, система импульсно-фазного управления, динамические усилия в ленте, тяговый фактор конвейера.

***Для цитирования:*** *Дмитриева В. В., Собянин А. А., Сизин П. Е.* Моделирование плавного пуска для асинхронного двигателя ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 77–92. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_77.

## Modeling soft start of belt conveyor induction motor

**V.V. Dmitrieva[1], A.A. Sobyanin[1], P.E. Sizin[2]**

[1] Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia
[2] Institute of Basic Education, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru

© В.В. Дмитриева, А.А. Собянин, П.Е. Сизин. 2022.

***Abstract:*** The study aims at justification of soft start of conveyor belt. A straightforward start of a loaded conveyor entails the increased inertia and overload of pull chains and drives. The excessive takeaway moment can induce slipping between the belt and driving drum, vibrations of the empty belt branch and frictional sliding of drive. This results in the belt wear and failure of the equipment. The belt conveyor studies used a finite-dimensional model in the problem space. This article describes the SimPowerToolbox and Simulink modeling of soft start of a short-circuited induction motor and a thyristor-motor drive. The modeling results allow comparing the two types of the belt start. The soft start reduces in-rush current, eliminates jerks in power transmission, saves power and protects the equipment. The soft start involves a longer running-in of the conveyor but the concentrated masses move smoother and with a little vibration, the forces in the belt change gently, and pulling gets stabilized without readjustment. The developed model enables analyzing the dynamic behavior of the motor and mechanisms of the conveyor, forces in the belt, the belt sliding and pulling ratio. The results of this research can be used in the belt tension and pulling control in the starting and breaking conditions, to avoid frictional sliding of the motor and slipping of the belt when adjusting the belt velocity subject to the volume of random load flow on the conveyor.

***Key words:*** belt conveyor, induction motor with short-circuited rotor, integrated mathematical belt conveyor–induction motor model, straightforward start, soft start device, thyristor converter, discrete phase control, dynamic forces in belt, conveyor pulling ratio.

***For citation:*** Dmitrieva V. V., Sobyanin A. A., Sizin P. E. Modeling soft start of belt conveyor induction motor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6):77-92. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_77.

## Введение. Обоснование необходимости плавного пуска ленточного конвейера

Для инерционного технологического оборудования, каковым является ленточный конвейер, принципиально важно, чтобы пуск был плавный, без рывков и ударов [1—3]. Ленточные конвейеры являются механизмами непрерывного транспорта, они представляют собой упругую механическую систему, поэтому в динамических режимах в ленточных конвейерах происходит распространение упругих волн вдоль ленты [4]. Лента является наиболее дорогой частью конвейера, а нежелательные колебания, возникающие при пуске, сокращают срок ее службы, поэтому одним из основных требований к системам управления конвейером является плавность пуска с ограниченным ускорением и ограниченным пусковым током двигателя. Еще большие сложности влечет пуск конвейера с загруженной ходовой частью: увеличение инерционных усилий, перегрузка тяговых цепей и привода. Поэтому желательно без особой надобности не останавливать загруженный конвейер, особенно это важно для конвейеров большой протяженности, у которых существует опасность пробуксовки и опасность возникновения колебательного переходного процесса сбегающей ветви ленты. При пуске прямой подачей напряжения существует большой риск проскальзывания между лентой и приводным барабаном из-за повышенного стартового крутящего момента. Это приводит к значительному износу и поломкам, что требует больших затрат на

ремонт. При пуске ленточных конвейеров большой протяженности в силу упругой податливости ленты трогание с места сбегающей ветви может начаться после того, как двигатель, приводной барабан и набегающая ветвь достигли установившейся скорости. При этом в порожней ветви начинаются продольные колебания скорости, что приводит к преждевременному износу ленты и даже ее порыву.

Наибольшее распространение в современной горной промышленности получили асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Главным преимуществом асинхронных двигателей перед остальными является дешевизна и простота конструкции, что сильно упрощает их реализацию. Однако то, что является достоинством, также является и недостатком. Из-за особенности выполнения короткозамкнутого ротора такой двигатель имеет специфичный пусковой режим: отсутствие обмотки ротора означает отсутствие наводимой в момент включения обмоток статора противоЭДС индукции и возникновение высоких пусковых токов. Такой режим имеет ряд недостатков:

- при выборе и отстройке защит оборудования необходимо учитывать токи пускового режима двигателя;
- снижается срок службы двигателя;
- происходит перегрузка подстанций и просадки напряжения в сети;
- возникают тяжелые динамические режимы работы приводимых механизмов.

При прямом пуске асинхронного двигателя (АД) пусковой ток, в 5 — 8 раз превышающий номинальный, создает ударные механические нагрузки, передаваемые через редуктор на конвейер. Ударные нагрузки могут привести к пробою изоляции и повреждению обмоток статора двигателя, а также к разрушению соединительных валов и муфт, редукторов и другим поломкам. Кроме того, пусковой ток снижает напряжение питающей сети, а это отрицательно влияет на устойчивость работы всех потребителей данной сети, особенно в случае их электроснабжения от сетей ограниченной мощности.

В связи с описанными проблемами требуется, чтобы привод и система управления обеспечивали жесткое ограничение величины ускорения при пуске конвейера [5]. Иногда для снижения стартового крутящего момента используются гидравлические демпферы, однако эти устройства весьма дороги и нуждаются в сложном техническом обслуживании.

### Моделирование совместного движения асинхронного двигателя и ленты конвейера

Для анализа переходных процессов, возникающих при запуске конвейерной установки, используем компьютерное моделирование [6, 7]. Чтобы наглядно убедиться в негативном воздействии прямого пуска асинхронного двигателя ленточного конвейера, промоделируем пуск установки с помощью программной среды Matlab (Simulink, SimPower System). Для моделирования привода используем готовые блоки асинхронной машины из библиотеки SimPowerSystem, для чего необходимо провести перевод паспортных данных двигателя в параметры Т-образной схемы замещения.

Выберем двигатель RA200LB2, его паспортные данные представлены в таб-

***Паспортные данные двигателя RA200LB2***
***Specifications of RA200LB2 motor***

| $P_н$, кВт | масса, $m$, кг | $n_{ном}$, об/мин | КПД, $\eta$, % | $\cos\varphi$ | $I_н$, А | $I_{пуск}/I_н$ | $M_{пуск}/M_н$ | $M_{max}/M_н$ | $J$, кг·м$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 37 | 230 | 2950 | 92 | 0,89 | 68 | 7,5 | 2,4 | 3 | 0,1326 |

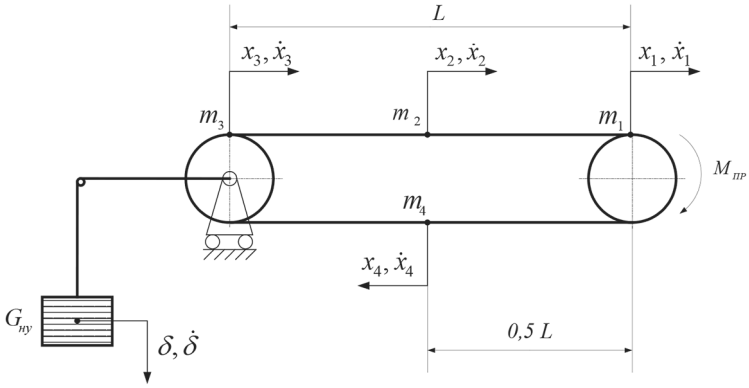


*Рис. 1. Расчетная схема конвейера с пятью сосредоточенными массами*
*Fig. 1. Analytical model of conveyor with five concentrated masses*

лице. В библиотеке Simscape выберем элемент Asynchronous Machine pu Units. Модель имеет 4 входа, на три подается трехфазное напряжение, на четвертый — момент сопротивления [8, 9]. Далее опишем, как формируется этот сигнал, связывающий двигатель и ленточный конвейер.

Для перевода паспортных данных в параметры схемы замещения написана программа в Control System Toolbox по известным формулам [10] с учетом предварительного выбора конструктивного коэффициента $c_1$.

В качестве рабочего механизма мы рассматриваем ленточный конвейер, представляющий собой сложную электромеханическую систему с распределенными параметрами. Происходящие в нем движения передаются от одного элемента к другому и описываются уравнениями в частных производных. Примерами подобных систем являются трубопроводы, ленточные конвейеры, стрелы экскаваторов, колонны буровых установок. Аналитическое решение систем таких уравнений оказывается трудоемким и сложным, поэтому для упрощения расчетов используют приближенные методы, которые подробно изложены в работах [11–13]. Наиболее удобным оказывается метод кусочно-линейной аппроксимации: замкнутый контур ленты разбивается на некоторое число участков, в границах каждого из которых закон изменения скорости деформации по длине предполагается линейным. Далее, после принятия определенных допущений, позволяющих упростить разрабатываемую модель, применяются уравнения Лагранжа второго рода.

Используем при описании 4 сосредоточенные массы на ленте $m_1$, $m_2$, $m_3$, $m_4$ и натяжное устройство $G_{ну}$. В качестве обобщенных переменных примем их перемещения $x_i$, $\delta$ и скорости $\dot{x}_i, \dot{\delta}$. Управляющее воздействие — момент, развиваемый приводом $M_{пр}$. Расчетная схема конвейера представлена на рис. 1.

Для удобства моделирования в Simulink модель следует привести к канонической матричной форме. Модель движения ленты конвейера в пространстве состояний, в которой координатами $X = (x_1, x_2, \ldots, x_{10})^T$ являются перемещения и скорости сосредоточенных масс, представляется в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка с несколькими управляющими сигналами. Обратим внимание на то, что силы сопротивления движению сосредоточенных масс входят в уравнение модели нелинейно, а элемент State Spase, имитирующий внутреннюю модель

динамической системы, линеен. Ввиду этого авторы вынуждены вводить силы сопротивления движению отдельным внешним сигналом:

$$\dot{X} = \tilde{A}X + \tilde{B}_1 \operatorname{sgn}(x_c - x_6) M_{пр} + \\ + \tilde{B}_2 \operatorname{sgn} X + \tilde{B}_3 G_{ну} \quad (1)$$

где первое управляющее воздействие $U_1 = M_{пр}$ — это движущий момент, создаваемый приводом, второе управляющее воздействие $U_2 = \operatorname{sgn} X$ — силы сопротивления движению сосредоточенных масс ленты, третье управляющее воздействие $U_3 = G_{ну}$ — вес натяжного устройства. Матрица состояния системы $\tilde{A}$ представляет собой блочную матрицу, матрицы управления $\tilde{B}_1, \tilde{B}_2, \tilde{B}_3$ также блочные.

Для изучения динамических процессов проведем компьютерное моделирование конвейерной установки. Используя типовые блоки Simulink, соберем структурную схему системы, включающую в себя контур ленты и привод конвейера.

Лента конвейера представлена своей внутренней моделью:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx + Du. \end{aligned},$$

для чего используется блок State-Space с именем Модель ленточного конвейера, в которую вводятся матрицы $\tilde{A}$ и $\tilde{B} = [\tilde{B}_1 \vdots \tilde{B}_2 \vdots \tilde{B}_3]$. Блок Мультиплексор (MUX) используется для формирования единого управляющего сигнала. Он объединяет, согласно (3), три сигнала в вектор. Далее вычисляется момент нагрузки, приведенный к валу двигателя, который определяется через силы сопротивления (в схеме блок Момент сопротивления и Силы сопротивления) движению конвейерной ленты. В качестве управляющего сигнала в модель ленты подается сигнал Движущий момент, пропорциональный движущему моменту привода $M_{пр}$, а в качестве задающего сигнала — сигнал, пропорциональный скорости вращения ротора $\omega$.

Второй частью данной системы является АД, модель которого, Асинхронный двигатель, есть в библиотеке Sim PowerSystem. Для установки и настройки питающей сети выберем блок Three-Phase Source и последовательно с ним подключим Three-Phase V-I Measurement. Источник питания, блок с именем Трехфазный источник питания подключен по схеме «звезда с нулевым проводом»,

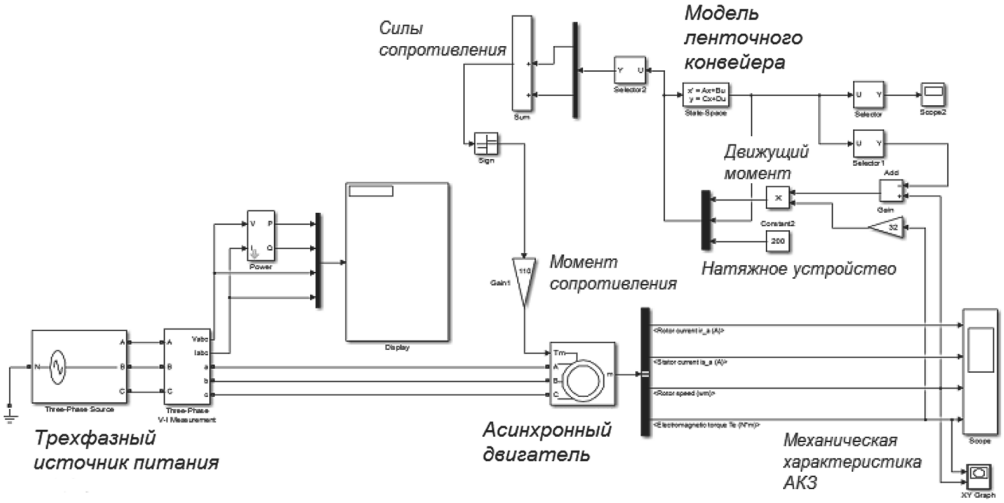


*Рис. 2. Модель конвейерной установки в Simulink*
*Fig. 2. Conveyor model in Simulink*

поэтому вывод заземлен. Измеритель необходим для сбора входных параметров обмотки статора. Осуществим вывод токов, напряжений и мощностей с помощью блоков Power, Mux, Display. В модели привода выполнен переход от моделирования в условном времени к моделированию в реальном времени для согласования параметров моделирования двух подсистем.

Теперь можно объединить модели, как это представлено на рис. 2.

Результатами компьютерного моделирования явились переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства, переходные процессы в двигателе, механическая характеристика двигателя. Результаты исследований представлены на рис. 3–5.

Самой главной особенностью механической характеристики двигателя является ее схожесть с существующей идеальной характеристикой пуска асинхронного двигателя. Пусковой участок на данной схеме имеет сильную колебательность в первый момент времени. Это объясняется большой инерционно-

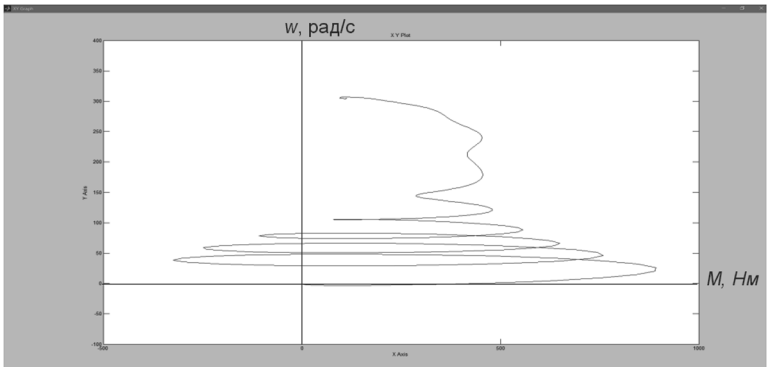


*Рис. 3. Механическая характеристика АД при прямом нереверсивном пуске*
*Fig. 3. Mechanical characteristics of induction motor in nonreversible start*

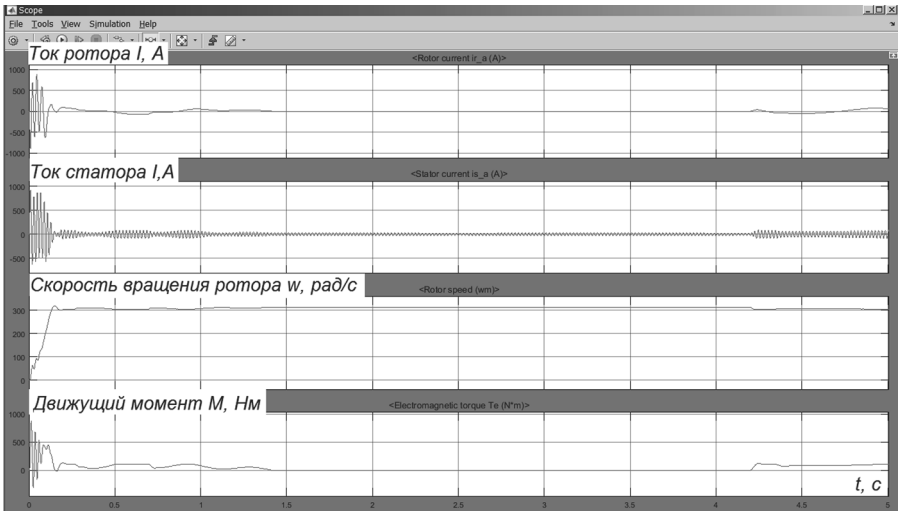


*Рис. 4. Токи статора и ротора, изменение скорости вращения ротора и движущего момента привода при прямом пуске*
*Fig. 4. Currents in stator and rotor, rotor speeds and drive moments in straightforward start of motor*

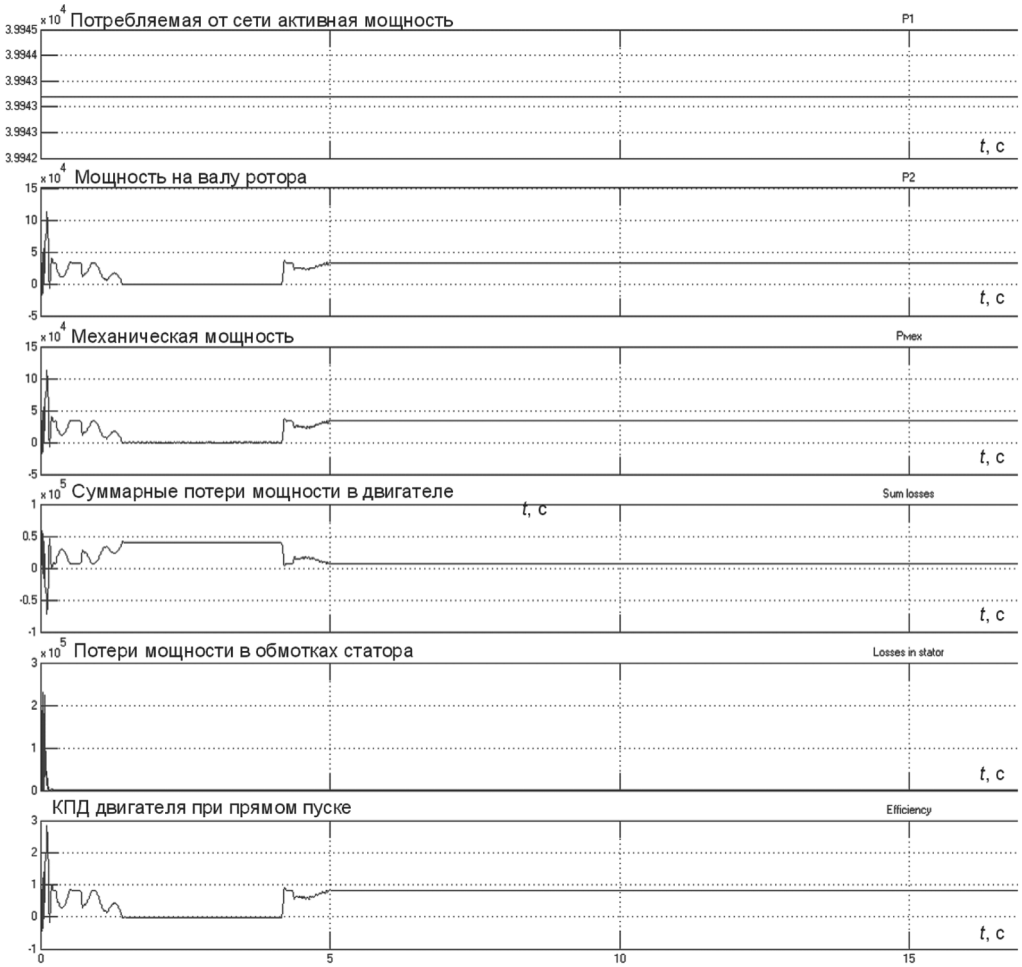


*Рис. 5. Осциллограммы мощностей, потерь мощности, КПД двигателя при прямом пуске*
*Fig. 5. Oscillograms of capacities, power loss and efficiency of motor in straightforward start*

стью двигателя выбранной мощности. В первые доли секунды пуска величины крутящего момента не хватает, чтобы преодолеть момент сопротивления на валу, и поэтому происходят броски момента. На участке критического момента машина не сразу переходит на рабочий участок. Это связано с тем, что на валу ротора уже достигнут номинальный крутящий момент, однако скорость вращения ротора еще не достигла своей номинальной величины. На рабочем участке машина находится в устойчивом положении, а на валу ротора получены номинальные значения: скорость вращения 314 рад/с и момент в 110 Н·м.

Следующими рассматриваемыми параметрами будут значения токов ротора и статора, а также скорость и момент на валу ротора с течением времени (рис. 4). Здесь видно, что пуск машины прошел успешно и составил 0,2 с. Установившиеся значения после переходных процессов были достигнуты за 0,3 с после реализации пуска двигателя. Кроме того, прекрасно видны большие пусковые токи, а также броски по моменту в процессе пуска электродвигателя. Для

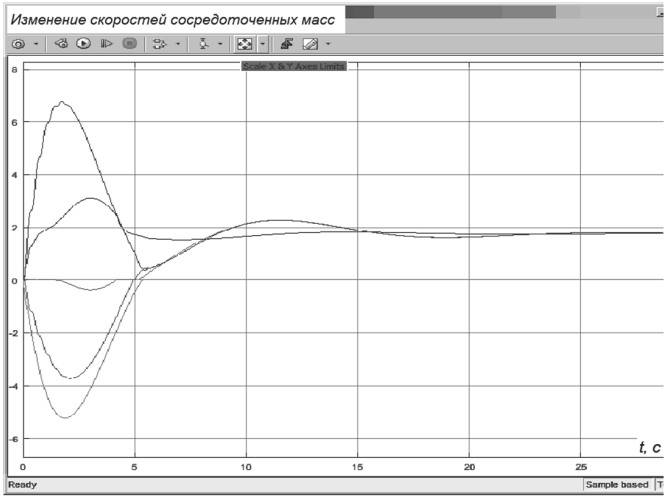


*Рис. 6. Изменение скоростей сосредоточенных масс при прямом пуске*
*Fig. 6. Change in velocities of concentrated masses in straightforward start*

устранения таких больших значений далее будет рассмотрено устройство плавного пуска АКЗ.

Еще рассмотрим, как изменяются в процессе пуска двигателя потребление активной мощности из сети, мощности на выходе асинхронного двигателя, механическая мощность, суммарные потери мощности в двигателе и КПД асинхронного двигателя. Для этого в схему моделирования добавим измерительный блок для определения мощностей.

Анализ полученных осциллограмм (см. рис. 5) позволяет установить следующее:

- машина потребляет из сети 40 кВт активной мощности с учетом того, что номинальная мощность данного двигателя составляет 37 кВт;
- максимальная мощность на валу ротора в момент пуска составляет 112,5 кВт;
- максимальная механическая мощность АД в момент пуска составляет 113 кВт;
- суммарные потери мощности в пике могут достигать 58 кВт, в среднем при пуске суммарные потери составляют 40 кВт;
- потери мощности в обмотках статора в пике составляют 250 кВт в первые доли секунды запуска, после того, как был создан пусковой момент, данные потери практически сравнялись с нулем;
- КПД машины в первые доли секунды имеет необоснованно высокие показатели, что обусловлено тонкостями расчета в Simulink. Они связаны с большими скачками полезной мощности в момент трогания машины. В остальном значения КПД имеют вполне реальные значения.

Теперь рассмотрим процесс запуска конвейера. На рис. 6 показаны результаты моделирования пуска под нагрузкой конвейера длиной 1000 м с грузовым натяжным устройством, со скоростью движения ленты 1,6 м/с и производительностью 400 т/ч, приводимого в движение двигателем RA200LB2 мощностью 37 кВт.

Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс конвейера отличаются довольно высокой колебательностью и длительным временем регулирования $t_{рег}$ = 20 с. В движении массы $m_3$, расположенной на хвостовом барабане в момент включения конвейера наб-

людается перемещение в сторону, противоположную основному движению конвейера, что связано с работой регулятора натяжения, отводящего хвостовой барабан назад для того, чтобы выбрать слабину ленты на сбегающей ветви приводного барабана.

Как уже говорилось выше, конвейер представляет собой электромеханическую систему с распределенными параметрами. По длине ленты распределены не только массы самого полотна ленты и перемещаемого груза, но и усилия сопротивления движению [5]. Сопротивления движению на прямолинейных участках трассы действуют вдоль каждого участка по его длине, сопротивления на поворотных пунктах, на которых тяговый орган огибает барабан конвейера, являются сосредоточенными. Предлагаемая модель конвейера, разработанная [13] позволяет не вычислять, а измерять возникающие натяжения $S_i$ в любой точке расчетной схемы, используя для вычислений деформации, то есть растяжения грузовой и порожней ветвей ленты.

Выразим натяжение в точке набегания ленты на приводной барабан через натяжение в точке сбегания (см. рис. 1):

$$S_4 = K_б(S_1 + W_{21}) + W_{43}, \qquad (2)$$

где $S_4$ — натяжение в точке набегания ленты на приводной барабан; $S_1$ — натяжение в точке сбегания; $K_б$ — коэффициент, учитывающий возрастание натяжения в ленте при обходе отклоняющего барабана, $K_б$ = 1,05; $W_{21}$, $W_{43}$ — сопротивление движению грузовой и порожней ветвей конвейера.

Дополним данное уравнение уравнением Эйлера

$$S_4 = S_1 E^{\mu\alpha}, \qquad (3)$$

где $\alpha$ — угол обхвата барабана лентой; $\mu$ — коэффициент сцепления ленты с барабаном.

Таким образом, величина начального натяжения может быть определена по формуле

$$S_1 = \frac{K_б W_{21} + W_{43}}{E^{\mu\alpha} - K_б}. \qquad (4)$$

Привод ленточного конвейера с определенными натяжениями $S_4$, $S_1$ в набегающей и сбегающей ветвях, установленными при помощи натяжного устройства с требуемым весом $G_{ну}$, не будет допускать пробуксовки при постоянной скорости движения ленты. Однако при пуске конвейера в ленте возникают дополнительные текущие динамические натяжения и результирующие натяжения во всех характерных точках конвейера изменяются. Дополнительное динамическое натяжение $S_{дин}^{наб}$ в точке набегания положительное, а $S_{дин}^{сб}$ в точке сбегания — отрицательное. Это приводит к уменьшению натяжения $S_1$ и увеличению натяжения $S_4$. В этом случае необходимая величина тягового фактора возрастает до значения:

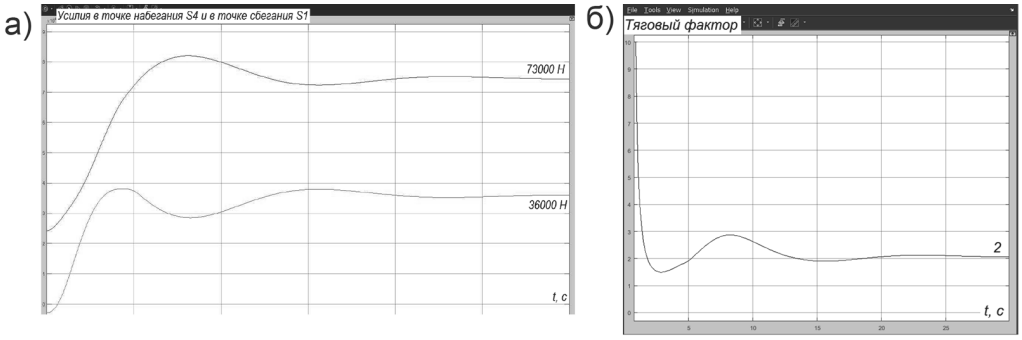


*Рис. 7. Изменение усилий в ленте конвейера (а) и тягового фактора (б) при прямом пуске*
*Fig. 7. Variation in belt forces (a) and pulling ratio (b) in straightforward start*

$$E^{\text{ма}}(t)=\frac{S_{ст}^{наб}+S_{дин}^{наб}}{S_{ст}^{сб}-S_{дин}^{сб}}>E^{\text{ма}},$$

что приводит к возникновению пробуксовки ленты на приводном барабане и недопустимому увеличению нагрузок в звеньях механизма. Изменение усилий в ленте и тягового фактора при прямом пуске показаны на рис. 7.

На представленных графиках видны колебания величин $S_1$ и $S_4$, вызванные пуском конвейера. На рисунках видны возникающие при изменении скорости движения конвейера «скачки» величин деформаций, вызванные появляющимися в переходном режиме динамическими добавками усилий.

Колебательные явления в ленте приводят к сокращению срока ее службы, особенно опасны они при запуске загруженного конвейера [5]. В виду этого конвейеры, даже оснащенные системами регулирования натяжения, следует запускать плавно, ограничивая динамические нагрузки. Для ограничения нагрузок и предотвращения проскальзывания ленты при пуске конвейеров, оснащенных АД, в современной практике используются устройства плавного пуска (УПП) на основе тиристорных преобразователей напряжения (ТПН).

### Устройство плавного пуска асинхронного двигателя — конструкция, моделирование и применение

В неответственных приводах малой мощности для управления АД используется УПП. Данное устройство объединяет в себе ряд функций: плавный пуск и торможение, защиту приводимых механизмов и самих электродвигателей [14, 15].

Для реализации УПП в Matlab рассмотрим структурную схему управляемого привода (рис. 8).

Тиристорный преобразователь (далее ТП) для трехфазного электродвигателя представляет собой три пары встречно-параллельных тиристоров, включенных в разрыв каждой из фаз. Регулируя угол их открытия, можно регулировать подаваемое на АД напряжение. ТП является основой УПП, поэтому их выбору уделяется особое внимание. Установка системы фазово-импульсного управления (СИФУ) необходима для управления углом и частотой открытия установленных тиристоров. Для рассматриваемого привода будем реализовывать вертикальный принцип управления, который заключается в сравнении управляющего постоянного напряжения с переменным опорным напряжением пилы. В момент их равенства формируется серия прямоугольных импульсов, с помощью которых осуществляется управление работой тиристорного преобразователя.

Все рассмотренные блоки соберем в схему плавного асинхронного короткозамкнутого двигателя ленточного конвейера. Схема моделирования приведена на рис. 9. Теперь перейдем к анализу результатов моделирования плавного пуска двигателя.

Механическая характеристика данного способа пуска (рис. 10) является

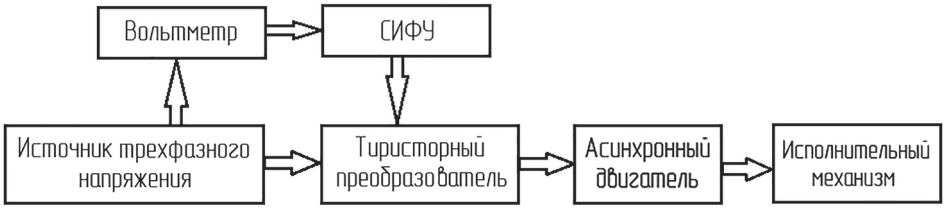


*Рис. 8. Структурная схема привода АД КЗ с УПП*
*Fig. 8. Structure flow chart of short-circuited induction motor with soft starter*

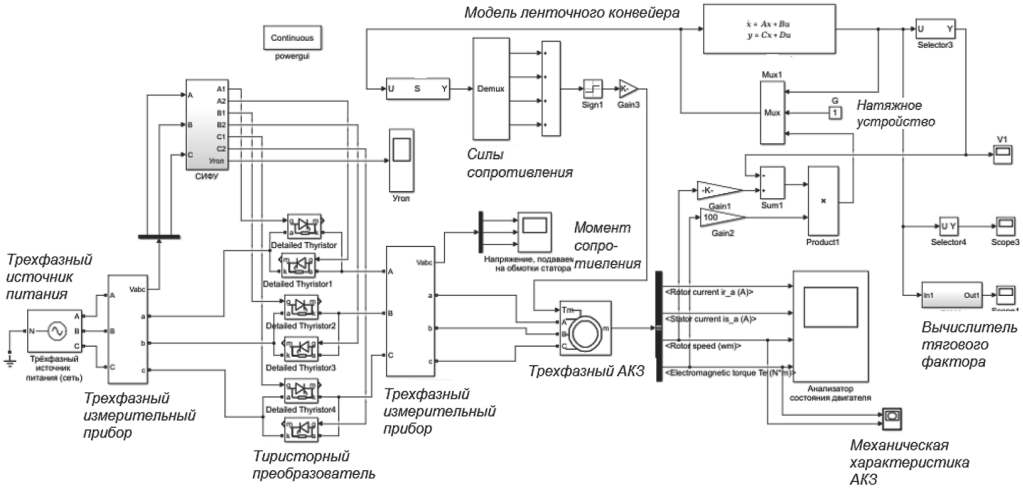


*Рис. 9. Схема моделирование плавного пуска асинхронного двигателя ленточного конвейера*
*Fig. 9. Modeling chart of soft start of belt conveyor induction motor*

наиболее близкой к реальной характеристике асинхронного двигателя, на ней есть участок критического момента в сравнении с характеристикой, приведенной на рис. 4. Однако данная характеристика имеет большую частоту колебаний момента при пуске. Это объясняется тем, что в этом опыте подача напряжения осуществляется в зависимости от угла открытия тиристоров.

По характеристикам, представленным на рис. 11, можно сделать вывод об успешной реализации плавного пуска — пусковые токи ограничены (кратность около 4,5 номинальных против 7,5 при прямом пуске), пусковой момент также снижен, разгон двигателя осуществляется плавно и пуск происходит практически за 1,2 с (регулируется путем изменения управляющего напряжения). Что же касается изменения мощностей при плавном пуске [7, 16, 17], то графики приведены на рис. 12.

Анализ полученных осциллограмм (см. рис. 12) позволяет определить следующее:

- машина потребляет из сети 40 кВт активной мощности с учетом того, что номинальная мощность данного двигателя составляет 37 кВт;

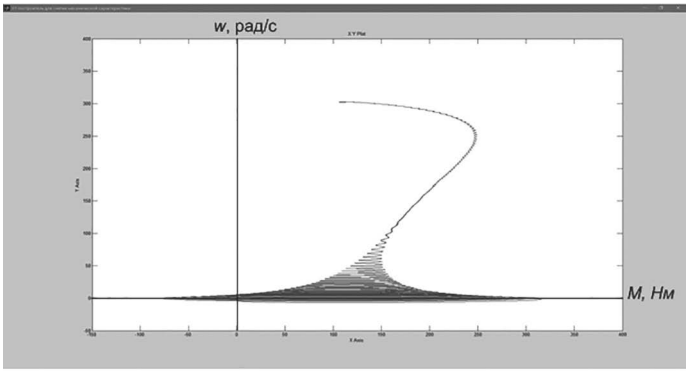


*Рис. 10. Механическая характеристика АКЗ с УПП*
*Fig. 10. Speed–torque characteristics of short-circuited induction motor with soft starter*

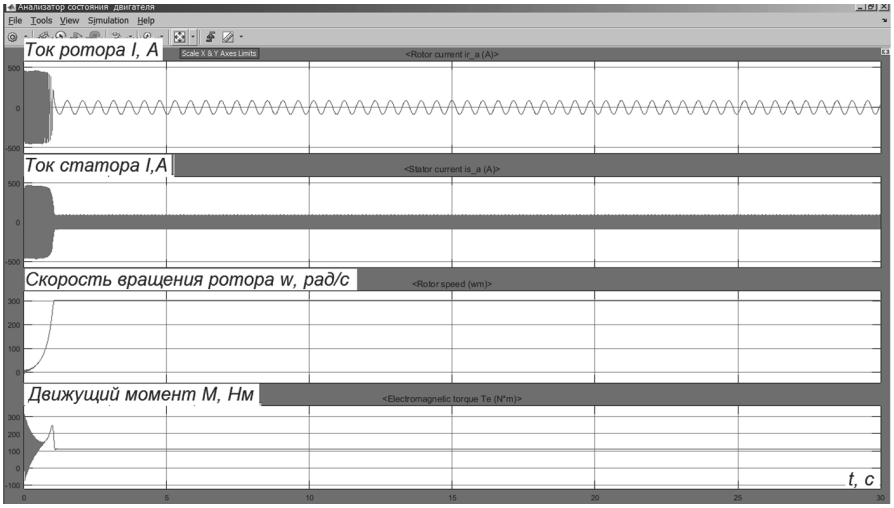


*Рис. 11. Токи в обмотках ротора и статора, скорость вращения и момент на валу ротора с устройством плавного пуска АД*

*Fig. 11. Rotor and starter winding currents, rotor shaft rpm and moment in induction motor with soft starter*

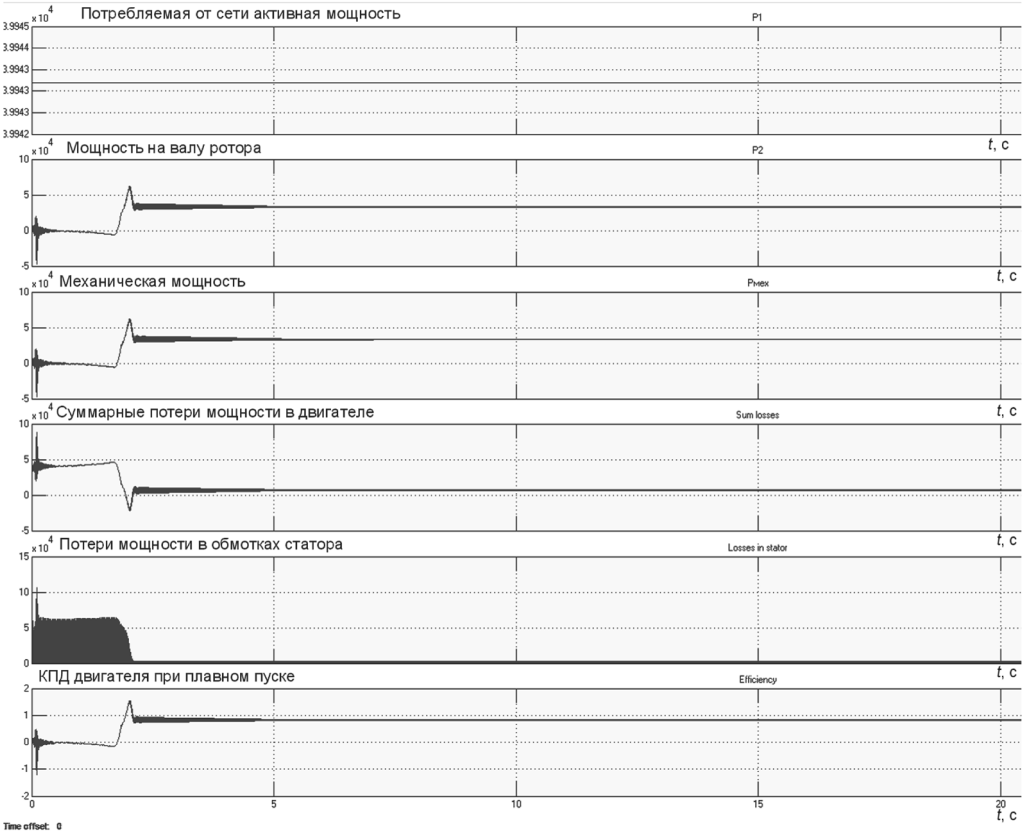


*Рис. 12. Осциллограммы мощностей, потерь мощности, КПД АД при плавном пуске*

*Fig. 12. Oscillograms of capacities, power loss and efficiency of motor in soft start*

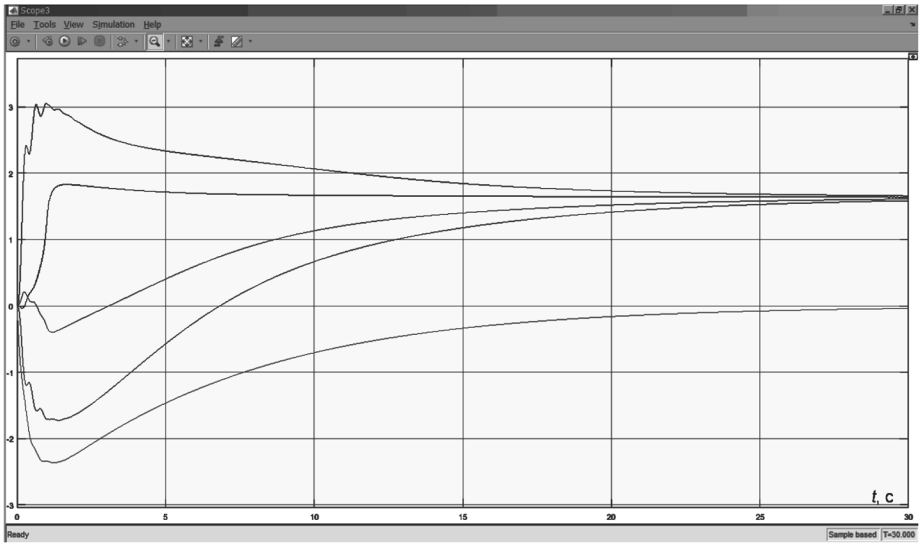


*Рис. 13. Изменение скоростей сосредоточенных масс при плавном пуске*
*Fig. 13. Change in velocities of concentrated masses in soft start*

- максимальная мощность на валу ротора во момент пуска составляет 60 кВт;
- максимальная механическая мощность АД в момент пуска составляет 61 кВт;
- суммарные потери мощности в пике могут достигать 88 кВт, в среднем при пуске суммарные потери составляют 40 кВт;
- потери мощности в обмотках статора в пике составляют 105 кВт в первые доли секунды запуска, после того, как был создан пусковой момент, данные потери практически сравнялись с нулем;
- КПД машины имеет более стабильные значения на протяжении всего времени запуска двигателя.

Теперь рассмотрим зависимости переходных процессов в конвейерной ленте (рис. 13 и 14). Первое, что следует отметить при анализе переходных процессов по скоростям сосредоточенных масс, это практически неколебательный их характер. Это косвенно свидетельствует о плавном нарастании усилий в лен-

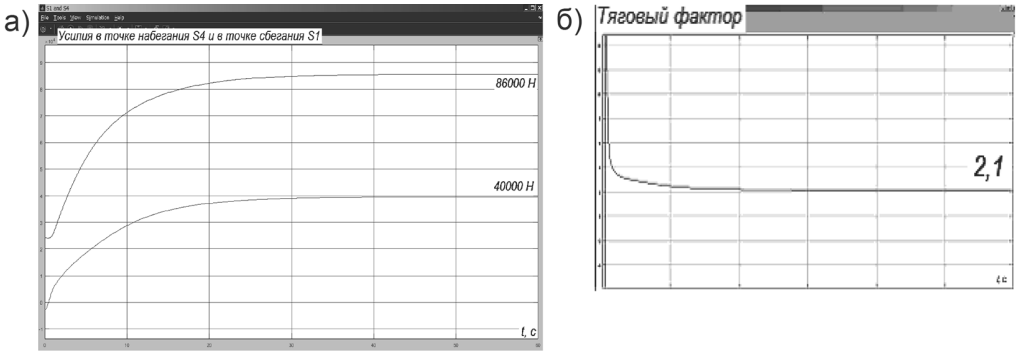


*Рис. 14. Изменение усилий в ленте конвейера (а) и тягового фактора (б) при плавном пуске*
*Fig. 14. Variation in belt forces (a) and pulling ratio (b) in soft start*

те, что подтверждается данными, приведенными на рис. 13. Движение масс совместное, плавное.

Величина тягового фактора $E^{\mu\alpha}$ стабилизируется за время, практически в 3 раза меньшее, чем при прямом пуске, что говорит об отсутствии пробуксовки ленты во время разгона конвейера.

**Выводы**

Разработанная авторами компьютерная модель «асинхронный двигатель–ленточный конвейер» позволяет получать количественные оценки переходных процессов технологического процесса. В статье представлены результаты моделирования прямого пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя конвейера и двигателя с тиристорным регулятором напряжения. Моделирование проводилось в программах SimPowerToolbox и Simulink, полученные результаты позволяют сравнивать два вида пуска. Устройство плавного пуска асинхронного двигателя уменьшает пусковые токи более чем в два раза; устраняет рывки в механических передачах; позволяет экономить электроэнергию и защищать оборудование. При плавном запуске разгон конвейера длится дольше, но движение сосредоточенных масс более последовательное, менее колебательное, усилия в ленте изменяются плавно, тяговый фактор стабилизируется без перерегулирования. Также при плавном запуске снижаются потери энергии в двигателе.

Путем компьютерного моделирования показано: для ограничения динамических усилий в ветвях ленты, исключения проскальзывания ленты на приводном барабане и, как следствие, ее преждевременного износа в неуправляемых приводах следует применять УПП. Результаты этой работы должны лечь в основу системы контроля натяжения ленты и поддержания коэффициента тяги в пуско-тормозных режимах. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы при разработке системы регулирования скорости ленты в зависимости от объема случайного грузового потока, поступающего на конвейер.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Bebic V., Ristic L.* Speed controlled belt conveyors: drives and mechanical considerations // Advancts in Electrical and Computer Engineering. 2018, vol. 18, no. 1, pp. 51—60. DOI: 10.4316/AECE.2018.01007.

2. *Kassay P., Homišin J., Urbansky M., Grega R.* Transient torsional analysis of a belt conveyor drive with pneumatic flexible shaft coupling // Acta Mechanica et Avtomatica. 2017, vol. 11, no. 1, pp. 69—72. DOI: 10.1515/ama-2017-0011.

3. *Лустенков М. Е., Скарыно Б. Б., Лустенкова Е. С.* Выбор асинхронного двигателя для привода ленточного конвейера с параллельным валом редуктора // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2019. — № 2. — С. 3—10. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-2-3-10.

4. *Дмитриев В. Г., Шахмейстер Л. Г.* Теория и расчет ленточных конвейеров. — М.: Машиностроение, 1987. — 336 с.

5. *Метельков В. П., Либерман Я. Л.* К вопросу о выборе режима пуска ленточного конвейера // Электротехнические системы и комплексы. — 2019. — № 2(43). — С. 54—59. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-54-59.

6. *Xiaojian Lui, Shanguo Yang, Meijuan Shi* Simulation on the starting of belt conveyor / Computer Applications in the Mineral Industries. CRC Press, 2020, pp. 423—426. DOI: 10.1201/9781003078661-85.

7. *Павлов В. Е.* Сравнение двух вариантов пуска электропривода ленточного конвейера // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2020. — Т. 24. — № 5. — С. 1069—1079. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-5-1069-1079.

8. *Греман-Галкин С. Г.* Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. — СПб.: Корона-Век, 2011. — 368 с.

9. *Терехин В. Б.*, *Дементьев Ю. Н.* Компьютерное моделирование систем электропривода в Simulink. — М.: Юрайт, 2018. — 306 с.

10. *Пантель О. В.* Методика расчета параметров асинхронного двигателя для моделирования режимов его работы в Matlab/Simulink // Academy. — 2015. — № 2(2). — С. 7—11.

11. *Запенин И. В.*, *Бельфор В. Е.*, *Селищев Ю. А.* Моделирование переходных процессов ленточных конвейеров. — М.: Недра, 1969. — 56 с.

12. *Дмитриева В. В.*, *Сизин П. Е.* Анализ моделей ленточного конвейера при различном числе аппроксимирующих масс // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 34—46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_34.

13. *Дмитриева В. В.*, *Гершун С. В.* Автоматическая стабилизация величины тягового фактора магистрального ленточного конвейера с двухдвигательным приводом // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 3. — С. 246—255.

14. *Соколов И. А.* Особенности моделирования силовых ключей в устройствах плавного пуска асинхронного электродвигателя // Вестник КузГТУ. — 2016. — № 4. — С. 89—94.

15. *Ситников А.* Тиристорное устройство плавного пуска асинхронного двигателя // Современная электроника. — 2008. — № 9. — С. 50—53.

16. *Sarathbabu N. V.*, *Murthy C. S. N.*, *Aruna M.* Minimization of specific energy of a belt conveyor drive system using space vector modulated direct torque control // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019, vol. 8, no. 4. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-2-3-10.

17. *Dmitrieva V. V.*, *Sizin P. E.*, *Sobyanin A. A.* Application of the soft starter for the asynchronous motor of the belt conveyor // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 942, no. 1, article 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012003. ГИАБ

## REFERENCES

1. Bebic V., Ristic L. Speed controlled belt conveyors: drives and mechanical considerations. *Advancts in Electrical and Computer Engineering*. 2018, vol. 18, no. 1, pp. 51—60. DOI: 10.4316/AECE.2018.01007.

2. Kassay P., Homišin J., Urbansky M., Grega R. Transient torsional analysis of a belt conveyor drive with pneumatic flexible shaft coupling. *Acta Mechanica et Avtomatica*. 2017, vol. 11, no. 1, pp. 69—72. DOI: 10.1515/ama-2017-0011.

3. Lustenkov M. E., Skaryno B. B., Lustenkova E. S. The choice of an asynchronous motor for driving a conveyor belt with a parallel gearbox shaft. *Proceedings of Higher educational institutions. Machine building*. 2019, no. 2, pp. 3—10. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-2-3-10.

4. Dmitriev V. G., Shakhmeyster L. G. *Teoriya i raschet lentochnykh konveyerov* [Theory and calculation of belt conveyors], Moscow, Mashinostroenie, 1987, 336 p.

5. Metel'kov V. P., Liebermann J. L. The question of choosing the trigger mode of belt conveyor. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2019, no. 2(43), pp. 54—59. [In Russ]. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-54-59.

6. Xiaojian Lui, Shanguo Yang, Meijuan Shi Simulation on the starting of belt conveyor. *Computer Applications in the Mineral Industries*. CRC Press, 2020, pp. 423—426. DOI: 10.1201/9781003078661-85.

7. Pavlov V. E. Comparison of two starting options for conveyor belt electric driv. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020, vol. 24, no. 5, pp. 1069—1079. [In Russ]. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-5-1069-1079.

8. Greman-Galkin S. G. *Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK* [Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC], Saint-Petersburg, Korona-Vek, 2011, 368 p.

9. Terekhin V. B., Dement'ev Yu. N. *Komp'yuternoe modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink* [Computer modeling of electric drive systems in Simulink], Moscow, Yurayt, 2018, 306 p.

10. Pantel O. V. Methodology for calculating parameters of an asynchronous motor for modeling its operating modes in Matlab/Simulink. *Academy*. 2015, no. 2(2), pp. 7—11. [In Russ].

11. Zapenin I. V., Bel'for V. E., Selishchev Yu. A. *Modelirovanie perekhodnykh protsessov lentochnykh konveyerov* [Modeling of transient processes of belt conveyors], Moscow, Nedra, 1969, 56 p.

12. Dmitrieva V. V., Sizin P. E. The analysis of belt conveyor models at different number of approximating masses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 34—46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_34.

13. Dmitrieva V. V., Gershun S. V. Automatic stabilization of the traction factor of the main belt conveyor with a two-motor drive. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 3, pp. 246—255. [In Russ].

14. Sokolov I. A. Features of modeling power switches in soft-start devices of an asynchronous electric motor. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016, no. 4, pp. 89—94. [In Russ].

15. Sitnikov A. Thyristor device for smooth start of an asynchronous motor. *Sovremennaya elektronika*. 2008, no. 9, pp. 50—53. [In Russ].

16. Sarathbabu N. V., Murthy C. S. N., Aruna M. Minimization of specific energy of a belt conveyor drive system using space vector modulated direct torque control. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019, vol. 8, no. 4. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-2-3-10.

17. Dmitrieva V. V., Sizin P. E., Sobyanin A. A. Application of the soft starter for the asynchronous motor of the belt conveyor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 942, no. 1, article 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012003.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Дмитриева Валерия Валерьевна*[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
*Собянин Алексей Андреевич*[1] — магистрант,
e-mail: sobyanin99@yandex.ru,
*Сизин Павел Евгеньевич* — канд. физ.-мат. наук,
доцент, e-mail: mstranger@list.ru, ИБО НИТУ «МИСиС»,
[1] Российский университет Нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.
**Для контактов**: Сизин П.Е., e-mail: mstranger@list.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.V. Dmitrieva*[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
*A.A. Sobyanin*[1], Master's Degree Student,
e-mail: sobyanin99@yandex.ru,
*P.E. Sizin*, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor,
e-mail: mstranger@list.ru, Institute of Basic Education,
National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia,
[1] Gubkin Russian State University of Oil and Gas
(National Research University), 119991, Moscow, Russia.
**Corresponding author**: P.E. Sizin, e-mail: mstranger@list.ru.

Получена редакцией 01.12.2021; получена после рецензии 05.04.2022; принята к печати 10.05.2022.
Received by the editors 01.12.2021; received after the review 05.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.