

Научная статья

УДК 621.316

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-24-32

Котин Денис Алексеевич, Сухинин Степан Евгеньевич*

Новосибирский государственный технический университет

*E-mail: s.suxinin@corp.nstu.ru

СПОСОБЫ МИНИМИЗАЦИИ ТЯГОВОГО ФАКТОРА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА**Информация о статье**

Поступила:

07 ноября 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 февраля 2023 г.

Принята к печати:

15 февраля 2023 г.

Опубликована:

09 марта 2023 г.

Ключевые слова:

ленточный конвейер, асинхронный электропривод, преобразователь частоты, математическое моделирование, натяжение ленты, приводной барабан, сосредоточенные параметры, SimInTech

Аннотация.

В работе рассматривается работа ленточного конвейера с двумя приводными барабанами. Механическая часть конвейера представляет собой систему с сосредоточенными параметрами, построенную по модели Фохта, состоящую из пяти сосредоточенных масс. Электропривод приводных барабанов состоит из асинхронного двигателя и преобразователя частоты на каждый барабан. Рассматриваются процессы, влияющие на пуск конвейера. Было установлено, что для обеспечения гарантированного беспробуксовочного пуска конвейера необходимо минимизировать колебания тягового фактора. Для реализации системы управления, обеспечивающей минимизацию тягового фактора, были выведены передаточные функции сосредоточенных масс конвейера как объектов управления для приводных барабанов. Ввиду высокого порядка полученных передаточных функций процесс синтеза системы управления представляется собой сложную задачу. Для упрощения синтеза часть передаточных функций была упрощена до функций второго порядка, что позволило использовать классические методы синтеза и расчета коэффициентов регулятора. Обоснованность такого упрощения подтверждается эффективностью работы конвейера с синтезированной системой управления. Предложенная система управления позволила в три раза сократить пиковое значение колебаний тягового фактора, а также снизить перерегулирование и время переходного процесса пуска конвейера. Моделирование выполнено в среде математического моделирования SimInTech.

Для цитирования: Котин Д.А., Сухинин С.Е. Способы минимизации тягового фактора ленточного конвейера // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 1 (165). С. 24-32. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-24-32

Введение

Конвейер представляет собой сложную электромеханическую систему. При работе конвейера, а особенно при пуске происходит растяжение грузонесущей части ленты и провисание холостой части ленты. Это приводит к колебанию значения тягового фактора, который вычисляется в общем случае как соотношение натяжения участка ленты, набегающей на приводной барабан, к натяжению ленты, сбегающей с приводного барабана.

В работе [1] при расчете тягового фактора используется коэффициент, учитывающий натяжение ленты на отклоняющем барабане. Приведены решения о том, как снизить колебания фактора, при

этом модель конвейера рассматривается в упрощенном виде.

Авторами [2,3,4] представлена полная модель конвейера на основе модели Фохта для анализа энергоэффективного пуска двигателей. Вопрос влияния такого пуска на тяговый фактор конвейера в приведенной работе не затрагивается.

В работе [5] также рассматривается полная модель конвейера для определения оптимальной формы сигнала датчика скорости для уменьшения колебаний скорости двигателя и его механического момента. Это способствует уменьшению колебаний конвейерной ленты и тягового фактора, но более подробно данный аспект в статье не приводится.

Таким образом, в настоящее время слабое внимание уделяется комплексному рассмотрению конвейера как электромеханического комплекса, в котором бы учитывалось влияние пуска двигателей на конвейерную ленту. Комплексное исследование позволит минимизировать колебание тягового фактора, а следовательно, и динамический момент сопротивления конвейера.

Математическая модель конвейера

Конвейер можно представить как систему с распределенными или сосредоточенными параметрами. При описании системы конвейера как системы с сосредоточенными параметрами лента разбивается на несколько участков одинаковой длины [6,7,8]. Чем больше количество участков, тем точнее математическая модель, но выше порядок системы.

Для исследования процесса пуска необходимо знать скорости сосредоточенных масс, помимо этого, необходимо знать величину тягового фактора, являющегося основным показателем качества пуска конвейера. Тяговый фактор вычисляется по следующей формуле [9]:

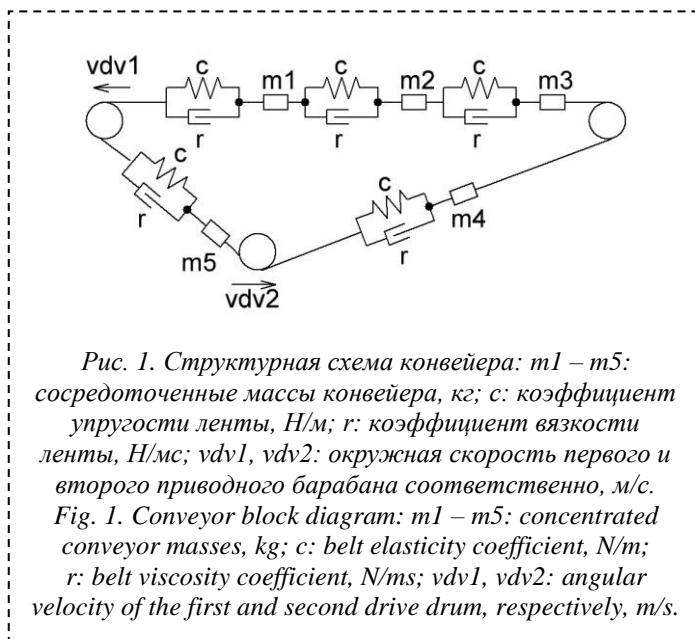


Рис. 1. Структурная схема конвейера: $m1 - m5$: сосредоточенные массы конвейера, кг; c : коэффициент упругости ленты, Н/м; r : коэффициент вязкости ленты, Н/мс; $vdv1, vdv2$: окружная скорость первого и второго приводного барабана соответственно, м/с.
Fig. 1. Conveyor block diagram: $m1 - m5$: concentrated conveyor masses, kg; c : belt elasticity coefficient, N/m; r : belt viscosity coefficient, N/ms; $vdv1, vdv2$: angular velocity of the first and second drive drum, respectively, m/s.

$$e^{\mu(\alpha_1 + \alpha_2)} \geq \frac{S_{1s} + c(x_i - x_{i-1})}{S_{2s} + c(x_i - x_{i-1})} \quad (1)$$

Таблица 1. Передаточные функции конвейера
Table 1. Transfer functions of conveyor

$W_{11} = \frac{0.3075 p^3 + 0.4756 p^2 + 0.2279 p + 0.1424}{p^4 + 0.7602 p^3 + 1.064 p^2 + 0.2849 p + 0.1781}$	(2)
$W_{12} = \frac{0.03528}{p^4 + 0.7602 p^3 + 1.064 p^2 + 0.2849 p + 0.1781}$	(3)
$W_{21} = \frac{0.48 p^2 + 1.2 p + 0.7499}{p^4 + 4.102 p^3 + 5.928 p^2 + 2.001 p + 1.251}$	(4)
$W_{22} = \frac{0.381 p^3 + 1.429 p^2 + 1.786 p + 0.7441}{p^6 + 5.294 p^5 + 12.31 p^4 + 15.18 p^3 + 12.47 p^2 + 4.472 p + 1.863}$	(5)
$W_{31} = \frac{0.1774 p^3 + 0.6653 p^2 + 0.8316 p + 0.3465}{p^6 + 4.657 p^5 + 8.897 p^4 + 8.135 p^3 + 6.472 p^2 + 2.082 p + 0.8673}$	(6)
$W_{32} = \frac{0.1477 p^2 + 0.3691 p + 0.2307}{p^4 + 1.397 p^3 + 1.992 p^2 + 0.6121 p + 0.3826}$	(7)
$W_{41} = \frac{0.03528}{p^4 + 0.7602 p^3 + 1.064 p^2 + 0.2849 p + 0.1781}$	(8)
$W_{42} = \frac{0.5929 p^3 + 0.9367 p^2 + 0.4891 p + 0.3057}{p^4 + 1.397 p^3 + 1.992 p^2 + 0.6121 p + 0.3826}$	(9)
$W_{51} = \frac{3.077 p + 3.846}{p^2 + 6.154 p + 7.693}$	(10)
$W_{52} = \frac{3.077 p + 3.846}{p^2 + 6.154 p + 7.693}$	(11)
$W_{61} = \frac{0.12 p^7 + 0.54 p^6 + 0.63 p^5 - 1 p^4 - 3 p^3 - 3.14 p^2 - 2.02 p - 0.63}{p^9 + 5.8 p^8 + 15.94 p^7 + 25.7 p^6 + 29.4 p^5 + 22 p^4 + 13 p^3 + 4.1 p^2 + 1.3 p - 8.3e^{-17}}$	(12)
$W_{62} = \frac{1.2 p^7 + 6.96 p^6 + 16.84 p^5 + 20.7 p^4 + 16.2 p^3 + 8.64 p^2 + 2.02 p + 0.63}{p^9 + 5.8 p^8 + 15.94 p^7 + 25.7 p^6 + 29.4 p^5 + 22 p^4 + 13 p^3 + 4.1 p^2 + 1.3 p - 8.3e^{-17}}$	(13)

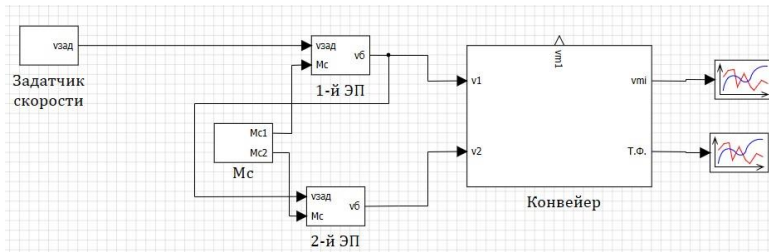


Рис. 2. Функциональная схема конвейера
Fig. 2. Functional diagram of the conveyor

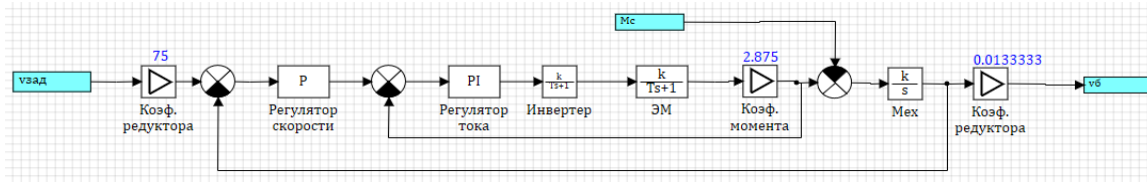


Рис. 3. Система электропривода
Fig. 3. Electric drive system

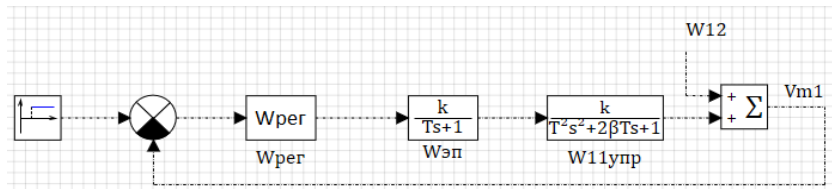


Рис. 4. Структурная схема контура для расчета регулятора скорости
Fig. 4. Block diagram of the circuit for calculating the speed controller

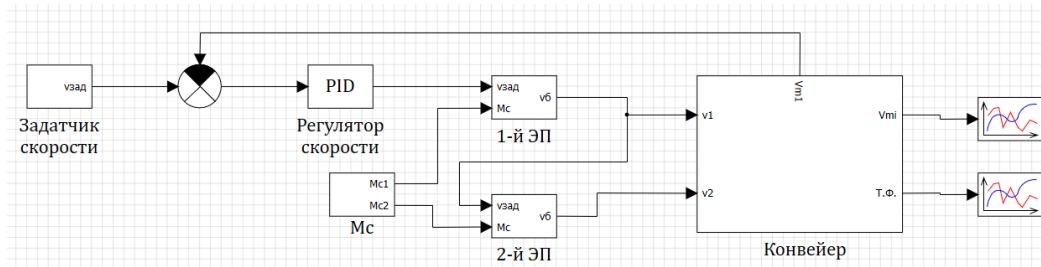


Рис. 5. Структурная схема конвейера с регулятором скорости
Fig. 5. Block diagram of a conveyor with a speed controller

где, μ – коэффициент сцепления ленты с приводным барабаном; α_i – угол обхвата лентой каждого из приводных барабанов; S_{1s} – статическое натяжение набегающего участка ленты на первый приводной барабан, Н; S_{2s} – статическое натяжение сбегющего участка ленты со второго приводного барабана, Н. Чем меньше будет величина колебания тягового фактора при пуске, тем меньше будут колебания динамического момента сопротивления ленты.

В данной работе рассматривается конвейер с двумя приводными барабанами, расположенными на отдалении друг от друга, из-за чего валы двигателей приводных барабанов связаны между собой гибкой кинематической связью, затрудняющей синхронизацию их скоростей. На Рис. 1 представлена структурная схема рассматриваемого конвейера, состоящего из пяти сосредоточенных масс, связанных между собой вязкоупругой связью на основе модели Фохта [10,11]. Масса первого электропривода и приводного барабана относится к

первой массе конвейера, а масса второго электропривода и приводного барабана – к пятой массе конвейера. Рассматриваемый конвейер представляет собой систему с двумя входными параметрами (скорость приводных барабанов) и шестью выходными параметрами (скорость пяти сосредоточенных масс и значение тягового фактора). Система содержит двенадцать передаточных функций, по две передаточных функции для каждого выходного параметра от каждого входного. Передаточные функции вида $W_{ij}(p)$ представлены в таблице 1, где i – i -й выходной параметр, j – j -й входной параметр.

Передаточные функции конвейера представлены в Таблице 1.

Так как приводные барабаны находятся на расстоянии друг от друга, то между валами двигателей нет механической связи, а только кинематическая связь, что делает невозможной синхронизацию скоростей двигателей без специальных устройств. Наиболее предпочтительным на данный момент является использование преобразователя частоты

для каждого двигателя. Преобразователи частоты подключаются в режиме ведущий/ведомый, таким образом, первый двигатель разгоняется в соответствии с задатчиком скорости, а второй двигатель синхронизирует свою скорость со скоростью первого двигателя.

Функциональная схема конвейера представлена на Рис. 2. Схема состоит из пяти блоков: блок «конвейер», состоящий из передаточных функций, описанных выше; блок «Мс», включающий в себя статический и динамический момент сопротивления конвейера; блок «задатчик скорости», формирующий кривую разгона в соответствии с технологическим процессом; блоки «1-й ЭП» и «2-й ЭП», включающие в себя асинхронный двигатель с преобразователем частоты.

В первом электроприводе используется трехфазный асинхронный короткозамкнутый электропривод А200L4 мощностью 45 кВт, во втором электроприводе используется машина А180М4 мощностью 30 кВт. Характеристики двигателей, рассчитанные по методике, изложенной в работе [12], представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Характеристики двигателей

Table 2. Motors characteristics

Характеристики	A200L4	A180M4
n_0 , об/мин	1500	1500
$\cos\varphi$	0.87	0.88
η , %	92.5	91.5
M_{Π}/M_H	2.2	2.4
M_{\max}/M_H	3.2	3.0
I_{Π}/I_H	7	7
R_1' , Ом	0.037	0.056
R_2'' , Ом	0.06	0.091
L_m , Гн	0.023	0.04
L_1 , Гн	0.024	0.041
L_2 , Гн	0.024	0.041
J , кг·м ²	0.35	0.24

Синхронный пуск двигателей позволяет снизить колебания участков ленты до 10-20% от номинальной скорости конвейера, а соответственно, и колебания тягового фактора.

При этом, как видно из формулы (1), регулирование скоростей участков ленты с целью снижения их колебаний позволило снизить тяговый фактор. В рассматриваемом конвейере снизить колебания ленты возможно за счет обратной связи по скорости первого участка ленты, расположенного в условном центре первой сосредоточенной массы конвейера.

Наличие обратной связи предполагает необходимость регулятора скорости, коэффициенты которого необходимо рассчитать. Для расчета регулятора необходимо упростить передаточные функции электропривода и конвейера, так как его синтез при степени передаточной функции объекта управления выше второй является затруднительным.

Для расчета регулятора асинхронный электродвигатель представлен в упрощенной форме, состоящей из двух частей: электромагнитной и механической. Передаточные функции соответствующих частей представлены ниже:

$$W_{EM} = \frac{1/R_e}{T_e \cdot p + 1} \quad (14)$$

$$W_M = J/p \quad (15)$$

где, R_e – эквивалентное сопротивление цепи статора, T_e – эквивалентная электромагнитная постоянная времени цепи статора, J – момент инерции двигателя [13,14].

Система регулируемого электропривода с контурами регулирования тока и скорости, рассчитанные методом подчиненного регулирования [15] с настройкой на модульный оптимум, представлены на Рис. 3.

В результате расчета всех контуров общая передаточная функция электропривода может быть упрощена до апериодического звена без значительного влияния на качество переходного процесса [16,17]. Упрощенная модель электропривода выглядит следующим образом:

$$W_{ED} = \frac{k_m}{\tau_m \cdot p + 1} = \frac{1}{0.1 \cdot p + 1} \quad (16)$$

Для расчета коэффициентов регулятора скорости ленты необходимо упростить лишь ту передаточную функцию, которая вносит наибольшее влияние в скорость первой сосредоточенной массы конвейера. При регулировании скорости первого приводного барабана такой передаточной функцией будет W_{11} .

Для упрощения передаточной функции для начала приведем ее к виду, в котором ее полиномы разложены на элементарные множители:

$$W_{11} = \frac{0.33 \cdot (p + 1.25) \cdot (p^2 + 0.3p + 0.37) \cdot (p^2 + 1.2p + 1.5) \cdot (p^2 + 3.7p + 0.47)}{(p^2 + 0.21p + 0.26) \cdot (p^2 + 0.5p + 0.7) \cdot (p^2 + 3.9p + 4.9) \cdot (p^2 + 1.2 + 1.5)} \quad (17)$$

Следующим шагом является нахождение полюсов и нулей передаточной функции, они сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Полюса и нули передаточной функции W_{11}

Table 3. Poles and zeros of the transfer function W_{11}

№	Полюса	Нули
1	-1.95 + j1.04	-1.87 + j1.09
2	-1.95 - j1.04	-1.87 - j1.09
3	-0.6 + j1.06	-1.25 + j0
4	-0.6 - j1.06	-0.57 + j1.05
5	-0.28 + j0.78	-0.57 - j1.05
6	-0.28 - j0.78	-0.148 + j0.59
7	-0.1 + j0.5	0.148 - j0.59
8	-0.1 - j0.5	

Для упрощения передаточной функции необходимо отбросить нули и полюса, которые находятся близко друг другу. Для данного случая убираем все полюса, кроме 5 и 6 и все нули кроме 3. Тогда упрощенная передаточная функция будет иметь следующий вид:

$$W_{11s} = \frac{0.33 \cdot (p + 1.25)}{(p^2 + 0.5p + 0.7)} \quad (18)$$

Для синтеза регулятора приведем передаточную функцию к каноническому виду колебательного звена, отбросив в числителе $(p+1.25)$. В результате получим:

$$W_{11s} = \frac{0.48}{1.2^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0.335 \cdot p} \quad (19)$$

Где, $k_{11}=0.48$ – коэффициент усиления; $T_{11}=1.2$ – постоянная времени; $\beta_{11}=0.335$ – коэффициент демпфирования.

Для расчета коэффициентов регулятора тягового фактора необходимо упростить передаточную функцию W_{62} . Упрощение происходит аналогичным способом, как и для функции W_{11} .

$$W_{62s} = \frac{k_{61}}{b_2 \cdot p^2 + b_1 \cdot p + b_0} = \frac{1.2}{p^2 + 0.8p - 5.2 \cdot 10} \quad (20)$$

Синтез регуляторов

Для расчета регулятора скорости с обратной связью по скорости конвейерной ленты в контуре первого приводного барабана обнулим влияние на скорость первой сосредоточенной массы передаточной функции W_{12} . Тогда структурная схема для настройки регулятора на модульный оптимум принимает вид, представленный на Рис. 4.

В разомкнутом состоянии система, настроенная на модульный оптимум, имеет вид:

$$W_{Mo}^o = \frac{1}{a \cdot \tau_\mu \cdot p \cdot (\tau_\mu \cdot p + 1)} \quad (21)$$

где, a – настроечный параметр, τ_μ – малая некомпенсируемая постоянная времени объекта управления. В данном случае τ_m является этой некомпенсируемой постоянной времени.

Для нахождения передаточной функции регулятора необходимо приравнять передаточную функцию системы в разомкнутом состоянии (разорвав обратную связь по скорости V_{m1}) к передаточной функции системы, настроенной на модульный оптимум:

$$W_o = W_{reg} \cdot \frac{1}{\tau_m \cdot p + 1} \cdot W_{11s} = W_{Mo}^o = \frac{1}{a \cdot \tau_\mu \cdot p \cdot (\tau_\mu \cdot p + 1)} \quad (22)$$

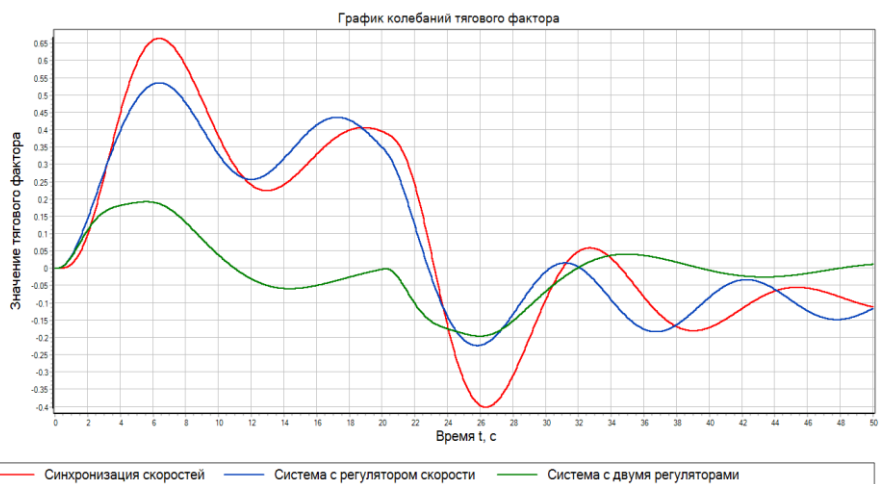


Рис. 6. График колебаний тягового фактора
Fig. 6. Graph of traction factor fluctuations

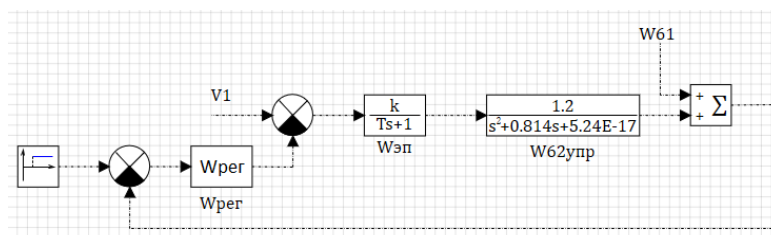


Рис. 7. Структурная схема контура для настройки регулятора тягового фактора
Fig. 7. Block diagram of the circuit for the adjustment of the traction factor regulator

При условии равенства $\tau_\mu = \tau_m$ следует, что

$$W_{Mo}^o = \frac{T_{11}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \beta \cdot T_{11} \cdot p + 1}{a \cdot \tau_m \cdot p \cdot k_{11}} \quad (23)$$

Из передаточной функции регулятора видно, что она соответствует пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) регулятору со следующими коэффициентами при настроечном коэффициенте $a=30$:

$$K_p = \frac{2 \cdot \beta \cdot T_{11}}{a \cdot \tau_m \cdot k_{11}} = 0.55 \quad (24)$$

$$K_I = \frac{1}{a \cdot \tau_m \cdot p \cdot k_{11}} = \frac{0.69}{p} \quad (25)$$

$$K_D = \frac{T_{11}^2 \cdot p}{a \cdot \tau_m \cdot k_{11}} = 1 \cdot p \quad (26)$$

Подставив полученный регулятор в полную систему управления конвейером, получим структурную схему, представленную на Рис. 5.

Данная система управления позволяет снизить тяговый фактор по сравнению с простым синхронным пуском. График колебаний тягового фактора при двух вариантах пуска представлен на Рис. 6. Из графика видно, что предложенный способ позволяет снизить первый положительный пик тягового фактора на 18%, а первый отрицательный пик почти на 50%, что дополнительно облегчает пуск конвейера.

В описанной выше системе управления была осуществлена косвенная регулировка тягового фактора за счет снижения колебания участка ленты. Но возможен еще один вариант системы управления, в котором будет производиться минимизация тягового фактора за счет обратной связи по его значению.

Данная система управления включает в себя описанную выше схему, но в цепь сигнала скорости первого двигателя, являющегося задающим для второго двигателя, введен сигнал с регулятора тягового фактора. Регулятор вырабатывает сигнал, вызывающий принудительную рассинхронизацию скоростей приводных барабанов таким образом, чтобы минимизировать тяговый фактор.

Для расчета коэффициентов регулятора и настройки контура на модульный оптимум используется упрощенная передаточная функция объекта управления W_{62s} , рассмотренная выше.

Как и для расчета регулятора скорости, обнуляются все возмущающие воздействия, в данном случае их два: скорость первого приводного барабана (V_1) и влияние первого приводного барабана на

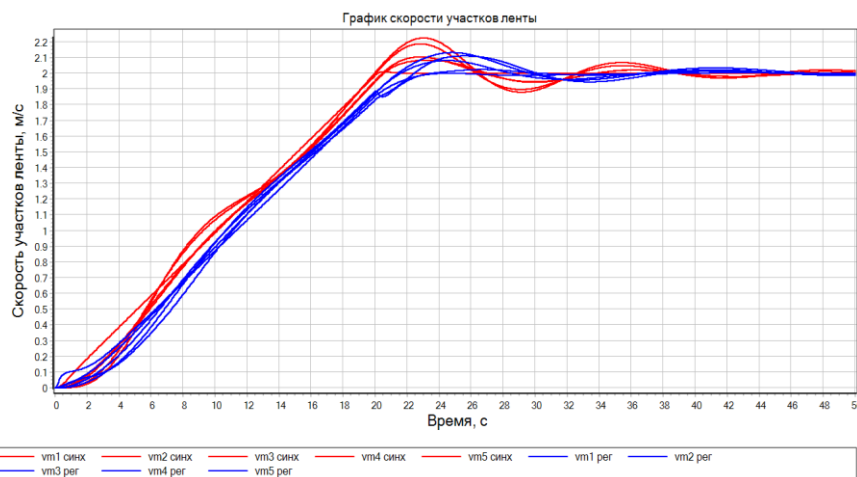


Рис. 8. График скоростей участков ленты
Fig. 8. Graph of the speeds of belt sections

Из графика видно, что при синхронном пуске двигателя без регуляторов колебания имеют максимальную величину и превышают 2,2 м/с. Пуск конвейера с регуляторами по скорости и по тяговому фактору обеспечивает значительное снижение величины тягового фактора, колебания скоростей участков ленты конвейера при этом не превышают 2,14 м/с.

Время переходного процесса для синхронного пуска без регуляторов составляет 31 с, для пуска с минимизацией тягового фактора – 27 с.

Данные по всем видам пуска сведены в Табли-

Таблица 4. Параметры различных видов пуска
Table 4. Parameters of various types of start-up

Параметр/ тип пуска	Синхронизация	Регулятор скорости	Регулятор тягового фактора
Время переходного процесса, с	31	23	27
Перерегулирование скорости ленты, %	12	4,5	7,5
Положительный пик тягового фактора	0,72	0,62	0,23
Отрицательный пик тягового фактора	-0,32	-0,15	-0,23

тяговый фактор (W_{61}).

Структурная схема для настройки регулятора на модульный оптимум представлена на Рис. 7.

В результате описанных выше действий получим коэффициенты регулятора тягового фактора при значении настроечного коэффициента a , равно- го 12:

$$K_p = \frac{b_1}{a \cdot \tau_m \cdot k_{62}} = -0.56 \quad (27)$$

$$K_p = \frac{b_0}{a \cdot \tau_m \cdot p \cdot k_{62}} = \frac{3.67 \cdot 10^{-17}}{p} \quad (28)$$

$$K_p = \frac{b_2 \cdot p}{a \cdot \tau_m \cdot k_{62}} = -0.69 \cdot p \quad (29)$$

Из графика, представленного на Рис. 6, видно, что использование системы управления с обратной связью по тяговому фактору позволяет значительно снизить его колебания по сравнению с рассмотренными выше системами, значение тягового фактора по модулю не превышает 0,2.

На Рис. 8 представлен график сосредоточенных масс конвейера при всех рассмотренных видах пуска.

цу 4.

Выводы

В данной работе был рассмотрен двухдвигательный конвейер как система с сосредоточенными параметрами, составлены передаточные функции для каждого выходного параметра от каждого входного воздействия. Был произведен синтез регуляторов скорости и тягового фактора. Для упрощения синтеза передаточные функции конвейера были упрощены до функций второй степени. На основании полученных передаточных функций и коэффициентов регуляторов были исследованы три вида пуска: пуск с синхронизацией скоростей приводных барабанов; пуск с синхронизацией скоростей приводных барабанов с регулятором по обратной связи по скорости ленты; пуск с регулятором скорости и регулятором по тяговому фактору, обеспечивающий принудительную рассинхронизацию скоростей приводных барабанов. Пуск с регулятором по скорости ленты обеспечивает снижение колебания участков ленты и незначительное снижение тягового фактора. Пуск с регулятором по

тяговому фактору обеспечивает значительное снижение тягового фактора и незначительное снижение колебаний скоростей участков ленты.

Таким образом, использование регулятора по тяговому фактору обеспечивает наиболее благоприятные условия для пуска конвейера за счет снижения динамического момента сопротивления и снижения вероятности проскальзывания ленты. Все это позволяет повысить надежность работы конвейера и уменьшить износ оборудования. Эффективность работы системы с рассчитанными регуляторами позволяет сделать вывод, что упрощение передаточных функций конвейера до второй степени обоснован.

Предложенный метод построения регулируемого электропривода позволяет использовать его как при проектировании новых конвейеров, так и при модернизации уже существующих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Djouema N., Belhamra A. Simulation and optimization of realized traction factor of belt conveyor // Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie. 2018. Т. 37. С. 170-182.
2. Bao Z., Zeng D. Research on Frequency Conversion Starting Characteristics of Belt Conveyor Motor Based on Simulation // 2020 IEEE 3rd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE). IEEE, 2020. С. 680-683.
3. Voronin V. A., Nepsha F. S. Modelling and Simulation of Scraper Face Conveyor Electric Drive // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). IEEE, 2020. С. 63-67. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281202.
4. Xiao D., Li X., He K. Power balance of starting process for pipe belt conveyor based on master-slave control // IEEE Access. 2018. Т. 6. С. 16924-16931. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2810258.
5. Гончаров К. А. Система сочетаний отклонений скольжения электродвигателей при вероятностном моделировании распределения тяговых усилий в многодвигательных приводах ленточных конвейеров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 3. С. 288-295.
6. Дмитриев В. Г., Чередник П. Н. Программный комплекс для тягового расчета и анализа пусковых и тормозных режимов ленточных конвейеров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 2. С. 25-35.
7. Yao Y., Zhang B. Influence of the elastic modulus of a conveyor belt on the power allocation of multi-drive conveyors // PLoS One. 2020. Т. 15. № 7. С. e0235768. DOI: 10.1371/journal.pone.0235768
8. Wang X., Mu D. Dynamic model research and Intelligent system development of belt conveyor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. Т. 493. № 1. С. 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/493/1/012101
9. Romanchev I. O. The mathematical model of the belt conveyor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. Т. 560. № 1. С. 012035.
10. Ещин Е. К. Моделирование и управление динамическим состоянием скребковых конвейеров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 2 (108). С. 118-122.
11. Kulinowski P. Simulation method of designing and selecting tensioning systems for mining belt conveyors // Archives of Mining Sciences. 2014. № 1.
12. Осипов В. С. Аналитический метод расчета параметров схемы замещения трехфазных асинхронных двигателей серии АИР // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2017. № 2 (54). С. 108-120.
13. Мещеряков В. Н., Данилов В. В. Ограничение колебаний электромагнитного момента асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 3. С. 88-97.
14. Душинова Е. В., Потапенко Е. М. Расширение возможностей упрощенных моделей асинхронного электропривода с робастным векторным управлением // Electrotechnic and Computer Systems. 2011. № 3 (79). С. 52-53.
15. Diab A. A. Z. et al. Cascade model predictive vector control of induction motor drive // 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). IEEE, 2014. С. 669-674.
16. Кабиров В. А., Семенов В. Д. Двухконтурная система подчиненного регулирования // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2019. Т. 1. № 1-1. С. 173-177.
17. Адарченко А. В., Розкаряка П. И. Сравнительный анализ системы управления с модальным регулятором и трехконтурной системы подчиненного регулирования // Инновационные перспективы Донбасса. 2019. С. 159-165.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Об авторах:

Котин Денис Алексеевич, кандидат техн. наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20)

Сухинин Степан Евгеньевич, аспирант, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), s.suxinin@corp.nstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Котин Денис Алексеевич – постановка задачи, анализ результатов исследования, оформление статьи.

Сухинин Степан Евгеньевич – проведение исследования, написание статьи, работа со списком литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-24-32

Denis A. Kotim, Stepan E. Sukhinin*

Novosibirsk State Technical University

E-mail: s.suxinin@corp.nstu.ru

WAYS TO MINIMIZE THE TRACTION FACTOR OF A BELT CONVEYOR



Article info

Received:

07 November 2022

Accepted for publication:

01 February 2023

Accepted:

15 February 2023

Published:

09 March 2023

Keywords: conveyor belt, asynchronous electric drive, frequency converter, mathematical modeling, belt tension, drive drum, concentrated parameters, SimInTech.

Abstract.

The paper considers the operation of a conveyor belt with two drive drums. The mechanical part of the conveyor is a system with concentrated parameters, built according to the Focht model, consisting of five concentrated masses. The electric drive of the drive drums consists of an asynchronous motor and a frequency converter for each drum. The processes affecting the start of the conveyor are considered. It was found that in order to ensure a guaranteed slip-free start of the conveyor, it is necessary to minimize the fluctuations of the traction factor. To implement a control system that minimizes the traction factor, transfer functions of concentrated conveyor masses as control objects for drive drums were derived. In view of the high order of the transfer functions obtained, the process of control system synthesis is a complex task. To simplify the synthesis, part of the transfer functions was simplified to second-order functions, which made it possible to use classical methods of synthesis and calculation of the regulator coefficients. The validity of this simplification is confirmed by the efficiency of the conveyor with a synthesized control system. The proposed control system made it possible to reduce the peak value of the traction factor fluctuations by three times, as well as to reduce overshoot and the time of the conveyor start-up transition process. The simulation was performed in the SimInTech mathematical modeling environment.

For citation: Kotim D.A., Sukhinin S.E. Ways to minimize the traction factor of a belt conveyor. Mining Equipment and Electromechanics, 2023; 1(165):24-32 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-24-32

REFERENCES

1. Djouema N., Belhamra A. Simulation and optimization of realized traction factor of belt conveyor. *Synthese: Revue des Sciences et de la Technologie*. 2018; 37:170-182.

2. Bao Z., Zeng D. Research on Frequency Conversion Starting Characteristics of Belt Conveyor Motor Based on Simulation. *2020 IEEE 3rd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE)*. IEEE, 2020. Pp. 680-683.

3. Voronin V. A., Nepsha F. S. Modelling and Simulation of Scraper Face Conveyor Electric Drive. *2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*. IEEE, 2020. Pp. 63-67. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281202.

4. Xiao D., Li X., He K. Power balance of starting process for pipe belt conveyor based on master-slave

control. *IEEE Access*. 2018; 6:16924-16931. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2810258.

5. Goncharov K.A. System of combinations of sliding deviations of electric motors in probabilistic modeling of the distribution of traction forces in multi-motor drives of belt conveyors. *Scientific and Technical Journal of Bryansk State University*. 2019; 3:288-295.

6. Dmitriev V.G., Cherednik P.N. Software package for traction calculation and analysis of starting and braking modes of belt conveyors. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; 2:25-35.

7. Yao Y., Zhang B. Influence of the elastic modulus of a conveyor belt on the power allocation of multi-drive conveyors. *PLoS One*. 2020; 15(7):e0235768. DOI: 10.1371/journal.pone.0235768

8. Wang X., Mu D. Dynamic model research and Intelligent system development of belt conveyor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019; 493(1):012101. DOI: 10.1088/1757-899X/493/1/012101

9. Romanchev I.O. The mathematical model of the belt conveyor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019; 560:012035.

10. Eshchin E.K. Modeling and control of the dynamic state of scraper conveyors. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015; 2(108):118-122.

11. Kulinowski P. Simulation method of designing and selecting tensioning systems for mining belt conveyors. *Archives of Mining Sciences*. 2014; 1.

12. Osipov V.S. Analytical method for calculating the parameters of the substitution circuit of three-phase asynchronous motors of the AIR series. *Vestnik of Samara State Technical University*. Series: Technical Sciences. 2017; 2(54):108-120.

13. Meshcheryakov V.N., Danilov V.V. Limitation of oscillations of the electromagnetic moment of an asynchronous motor with scalar frequency control. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*. 2018; 18(3):88-97.

14. Dushinova E.V., Potapenko E.M. Expanding the capabilities of simplified models of asynchronous electric drive with robust vector control. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2011; 3(79):52-53.

15. Diab A.A.Z. et al. Cascade model predictive vector control of induction motor drive. *2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. IEEE, 2014. Pp. 669-674.

16. Kabirov V.A., Semenov V.D. Two-circuit system of subordinate regulation. *Collection of selected articles of the scientific session of the TU-SUR*. 2019; 1(1-1):173-177.

17. Adarchenko A.V., Rozkaryaka P.I. Comparative analysis of a control system with a modal regulator and a three-circuit system of subordinate regulation. *Innovative perspectives of Donbass*. 2019. Pp. 159-165

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

Denis A. Kotim, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, (630073, Russia, Novosibirsk, Prospekt K. Marksa 20)

Stepan E. Sukhinin, graduate student, Novosibirsk State Technical University, (630073, Russia, Novosibirsk, Prospekt K. Marksa 20), s.suxinin@corp.nstu.ru

Contribution of the authors:

Denis A. Kotin - statement of the problem, analysis of the results of the study, design of the article.

Stepan E. Sukhinin - conducting research, writing an article, working with a list of references.

Author have read and approved the final manuscript.

