

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 621.313.333: 621.867.2

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-3-13

Дзюин Дмитрий Владленович*, Дмитриева Валерия Валерьевна

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

* для корреспонденции: dzyuin.d@gubkin.ru

СИСТЕМА ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА С ПРЯМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОМЕНТОМ



Информация о статье

Поступила:

03 марта 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

30 апреля 2025 г.

Принята к печати:

20 июня 2025 г.

Опубликована:

05 июня 2025 г.

Ключевые слова:

ленточный конвейер, частотно-регулируемый привод, многодвигательный электропривод, прямое управление моментом, система автоматического управления, регулирование скорости, синусоидальный профиль, моделирование

Аннотация.

Статья посвящена разработке и внедрению частотно-регулируемого электропривода с прямым управлением моментом в систему многодвигательного асинхронного привода шахтного ленточного конвейера 2Л100У-01. Актуальность работы обусловлена значительной неравномерностью грузопотоков шахтных ленточных конвейеров, для которых внедрение системы регулирования скорости позволит обеспечить постоянство погонной загрузки конвейера и момента сопротивления привода. Цель работы заключается в реализации частотного регулирования скорости многодвигательного электропривода конвейера с допустимым качеством переходных процессов по скорости и моменту. Прямое управление моментом методом пространственно-векторной модуляции применяется по причине меньших пульсаций электромагнитного момента. Для минимизации рывков и пробуксовок ленты выбран и рассчитан синусоидальный профиль изменения скорости и ускорения. Компьютерное моделирование разработанной системы с многоинверторным преобразователем частоты выполнено в MATLAB/Simulink. Результаты моделирования подтверждают преимущества системы регулирования скорости по синусоидальному закону над линейным законом управления. По результатам работы сделаны выводы о способности разработанной системы обеспечить пуск и регулирование скорости конвейера с допустимым уровнем нагрузки без пробуксовок ленты. Авторами поставлены дальнейшие задачи выравнивания величин нагрузок между приводными двигателями конвейера в статических и динамических режимах работы.

Для цитирования: Дзюин Д.В., Дмитриева В.В. Система частотно-регулируемого многодвигательного электропривода шахтного ленточного конвейера с прямым управлением моментом // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 3 (179). С. 3-13. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-3-13, EDN: AXFXLS

Введение

Современные исследования эффективности работы ленточных конвейеров горнотранспортных систем [1, 2] показывают, что ленточные конвейеры при постоянной скорости движения имеют 30...70% номинальной производительности в течение 60...70% всего времени [2]. Такая низкая эффективность работы конвейерных установок обус-

ловлена тем, что поступающие на ленту потоки горной массы от горных машин, особенно на угольных шахтах, являются крайне неравномерными, зависящими от чередующихся в течение смены периодов поступления груза или его отсутствия, со случайной продолжительностью каждого интервала [3]. Непостоянный коэффициент загрузки конвейера приводит к переменному статическому моменту

сопротивления привода, что влияет на величины потребляемой мощности и электромагнитного момента приводного электродвигателя, а следовательно, на расход электроэнергии, прочность и износ тягового органа, нормальное функционирование устройств загрузки и разгрузки. Как следствие, при работе конвейера со случайно изменяющимся грузопотоком уменьшается технологическая и энергетическая эффективность всей установки, что подрывает суммарную эффективность технологического процесса [4].

Отечественные авторы [1, 5, 6, 7, 8] и зарубежные [9, 10, 11] едины во мнениях, что задача повышения эффективности конвейерной установки может быть решена внедрением системы регулирования скорости движения конвейерной ленты. Целесообразность регулирования потребляемой мощности конвейера в соответствии с величиной нагрузки привода обоснована проведением уточненного тягового расчета конвейера и корреляционного анализа случайного грузопотока, определяемого массой транспортируемого в единицу времени груза [3, 5]. Зарубежные исследователи Hiltermann, Jęftenic, L. Ristic, D. He, Y. Pang и G. Lodewijks [9] проводили полевые испытания по снижению скорости ленты частично заполненного конвейера, повышая тем самым его коэффициент заполнения. В результате регулирование скорости, реализованное посредством частотно-регулируемого привода (ЧРП), привело к снижению общего энергопотребления от 20 до 38% по сравнению с нерегулируемым электроприводом при данных условиях эксплуатации. В [2] указано, что максимальная доля экономии электроэнергии при регулировании скорости конвейерной установки составляет 57%. Результаты исследований J. Ji, C. Miao, X. Li [10] показывают, что экономия энергии конвейерной системы с регулируемым приводом зависит от ее производительности Q : при отсутствии грузопотока доля сэкономленной энергии составит 62,3%, при $Q = 500$ т/ч эта же доля равна 47,5%, а при $Q = 1000$ т/ч она составит уже 27,5% и далее будет только снижаться с увеличением производительности конвейера. По этой причине регулирование скорости не рекомендуется для магистральных конвейеров с практически постоянными грузопотоками величиной в десятки тысяч т/ч, но для шахтных конвейеров со значительной неравномерностью грузопотоков, исчисляемых сотнями т/ч, внедрение системы регулирования скорости представляет особую актуальность, поскольку наибольший энергосберегающий эффект будет достигнут именно в данных условиях. Во многих странах обеспечение энергоэффективности конвейеров достигается способом регулирования скорости ленты в функции грузопотока, в частности, данное положение закреплено в национальном стандарте Германии DIN 22101-2011 [11].

Как отмечено в отечественных [8, 12, 13] и зарубежных [14] публикациях, конвейерная установка с несколькими приводными барабанами и многодвигательным электроприводом в условиях эксплуатации с переменной нагрузкой имеет ряд дополнительных проблем: неравномерное распре-

деление мощности между отдельными приводными двигателями, механические перегрузки, проскальзывание или чрезмерное натяжение ленты на приводных барабанах, что может привести к перегреву электропривода. Перечисленные недостатки нерегулируемого многодвигательного электропривода ленточного конвейера были экспериментально зафиксированы авторами настоящей статьи методом компьютерного моделирования системы в работе [15]. На основании проведенных ранее исследований для внедряемой системы регулируемого многодвигательного электропривода ленточного конвейера были сформулированы требования, напрямую перетекающие в задачи работы:

1) обеспечивать достаточные и допустимые значения величин тягового усилия, механического момента и ускорения привода в статических и переходных режимах работы конвейера;

2) реализовывать управление скоростью движения ленты для поддержания постоянной производительности конвейера;

3) поддерживать рациональное распределение нагрузки между отдельными приводными барабанами;

4) исключить проскальзывание (пробуксовку) ленты на приводных барабанах.

Методы исследования

Замкнутая система автоматического управления (САУ) скоростью конвейера изменяет текущую скорость движения ленты прямо пропорционально отношению текущей и номинальной производительности конвейера, чтобы обеспечить практически постоянный коэффициент его погонной загрузки. При этом поступающий на ленту грузопоток должен измеряться непрерывно. Для достижения заданной скорости ленты при определенном объеме загрузки конвейера необходим надлежащий профиль ускорения привода, который позволяет избежать резких механических толчков и пробуксовок. При этом необходимо, чтобы время отклика системы соответствовало скорости подачи материала. Авторы [9, 11] предлагают в качестве оптимального закона изменения ускорения $a(t)$ синусоидальный профиль, выраженный через (1):

$$a(t) = \frac{\pi}{2} \frac{v_{\text{зад}} - v_0}{T_a} \sin\left(\frac{\pi(t - t_0)}{T_a}\right), \quad (1)$$

где $v_{\text{зад}}$, v_0 (м/с) – заданное и начальное значение скорости; t_0 (с) – время начала ускорения (замедления); T_a (с) – требуемое время ускорения (замедления), при котором не будет наблюдаться проскальзывание ленты.

Тогда закон изменения скорости $v(t)$, соответствующий профилю ускорения (1), принимает вид (2):

$$v(t) = v_0 + \frac{v_{\text{зад}} - v_0}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi(t - t_0)}{T_a}\right)\right). \quad (2)$$

Требуемое время ускорения (замедления) T_a можно найти по формуле (3):

$$T_a = \frac{\pi(v_{\text{зад}} - v_0)}{2a_{\text{max}}}, \quad (3)$$

где a_{max} (м/с²) – максимальное допустимое ускорение привода, при котором не будут происходить чрезмерные растяжения и пробуксовки ленты.

Соответствующий выражениям (1)–(3) синусоидальный профиль изменения скорости и ускорения ленты конвейера приведен на Рис. 1.

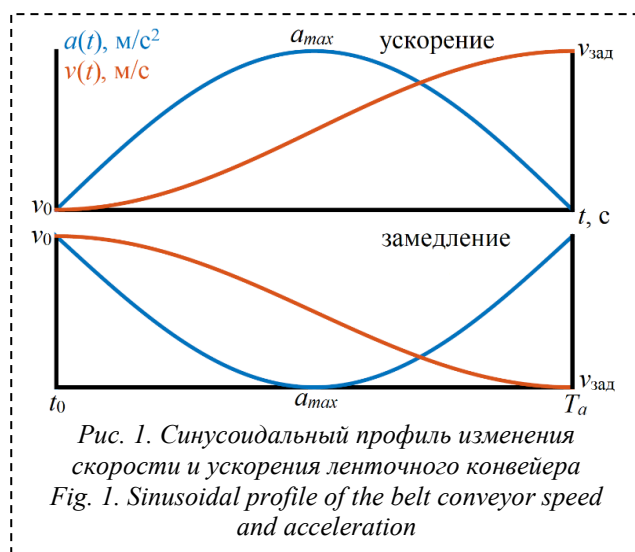


Рис. 1. Синусоидальный профиль изменения скорости и ускорения ленточного конвейера
Fig. 1. Sinusoidal profile of the belt conveyor speed and acceleration

В работе [9] установлено, что непрерывное регулирование скорости ЛК по синусоидальному закону (2) обеспечивает наименьшие возможные динамические усилия в ленте и приводе, сокращает потери мощности на 29,4%, а общая энергоэффективность достигает 27%. Замкнутая САУ способствует устранению статической ошибки регулирования и не требует поддержания скорости на 10...15% выше заданной. При непрерывном регулировании коэффициент загрузки конвейера составляет 95%, а с учетом того, что изменение грузопотока происходит намного медленнее релаксационных процессов в ленте, качество регулирования оказывается еще выше, и загрузка достигает 98,5% [3]. Согласно [11], данный закон изменения скорости может быть применен для каждого асинхронного двигателя (АД) в многодвигательном ЧРП для режимов плавного пуска и перехода конвейера на другой скоростной режим, и, кроме того, функцию регулирования момента АД в зависимости от нагрузки в системе управления ЧРП можно объединить с функцией выравнивания скоростей приводных барабанов, как в [12, 13]. На основании вышеизложенного непрерывное регулирование скорости посредством ЧРП представляется наиболее предпочтительным и перспективным на данный момент способом управления конвейерной установкой.

Как показывают источники [12, 13, 14], самым подходящим алгоритмом управления каждым автономным инвертором напряжения (АИН) в системе многодвигательного ЧРП конвейера является прямое управление моментом (англ. Direct Torque Control, DTC). Преимущества DTC перед классическим полеориентированным управлением указаны в [12] и заключаются в меньшем объеме требуемых измерений и вычислений, в возможности регулировать

величину момента каждого АД напрямую, а не косвенно.

Прямое управление моментом ЧРП с таблицей переключения ключей применяется для однодвигательного привода шахтного ленточного конвейера в зарубежных исследованиях L. Wang, H. Li [16] и для многодвигательного электропривода ленточного конвейера в работе M. Bebic, L. Ristic [17]. Данный метод имеет переменную частоту коммутации ключей АИН, поскольку коммутация происходит только в те моменты, когда значение момента или потокосцепления выходит из зоны гистерезиса релейного регулятора. Данный метод наиболее прост в реализации, но по причине гистерезиса релейных элементов характеризуется наибольшими пульсациями момента (минимум 14% от номинального). Для снижения износа механической части конвейерной установки следует свести к минимуму пульсации момента, приводящие к колебаниям величин зазоров в механических передачах и к чрезмерной деформации участка ленты между приводными барабанами.

Авторы работ [12, 13, 14] рекомендуют применять ЧРП с прямым управлением моментом методом пространственно-векторной модуляции (ПВМ, англ. Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) с целью улучшения динамических характеристик режима пуска загруженного конвейера. Сравнение двух алгоритмов DTC [18] показывает, что метод ПВМ способен обеспечить практически полную ликвидацию пульсаций момента в статическом режиме работы электродвигателя и десятикратное снижение пульсаций момента в переходных режимах регулирования момента. Доработка алгоритма ПВМ, как, например, в [19], позволяет существенно уменьшить объем вычислений в блоках управления и частоту коммутации ключей инвертора. В то же время, чем реже происходит коммутация ключей, тем сильнее искажается форма кривой напряжения и тока на выходе инвертора, что снижает уровень электромагнитной совместимости электропривода и ускоряет износ АД. Поэтому отдается предпочтение традиционному методу ПВМ на основе опорного вектора напряжения с усреднением управляющих импульсов для внедримой системы ЧРП.

Расчет параметров профиля изменения скорости конвейера

Разработка САУ скоростью конвейера требует расчета указанных в формулах (1)–(3) параметров для рассматриваемого объекта исследования – горизонтального шахтного ленточного конвейера 2Л100У-01, описанного и смоделированного ранее в работе [15]. Разработанная в [15] математическая модель системы включает 7 дифференциальных уравнений, что соответствует числу сосредоточенных масс ленты конвейера. С целью перехода от громоздкой явной формы записи к удобной и компактной матричной форме модель [15] приводится к виду «вход-выход» (4), как представлено в работах [3, 9]:

$$M\ddot{Q} + N\dot{Q} + CQ = F, \quad (4)$$

где M – матрица коэффициентов масс; N – матрица коэффициентов демпфирования; C – матрица коэффициентов жесткости; $Q, \dot{Q}, \ddot{Q}$ – вектора соответственно перемещений, скоростей и ускорений обобщенных координат сосредоточенных масс ленты; F – вектор обобщенных сил, действующих на систему, куда входят силы сопротивления движению ленты, движущие силы приводных барабанов и сила натяжного устройства.

Расчет требуемого ускорения привода ведется для конвейера 2Л100У-01, схема которого с диаграммой натяжений ленты S_1 – S_5 и приложенными силами сопротивлений загрузочного W_{zag} , очистного W_{och} и натяжного F_{nu} устройств представлена на Рис. 2. Необходимые для расчета исходные данные, полученные из справочной литературы и вычисленные в ходе тягового расчета [15], приведены в Таблице 1.

Используется методика расчета, предложенная в работе [9], согласно которой ускорение ленты зависит от максимально допустимой движущей силы

привода $F_{d.max}$ (5). Данная сила определяется как минимальное значение из трех максимально допустимых сил: сила натяжения ленты $F_{t.max}$, сила трения для недопущения проскальзывания ленты $F_{slip.max}$ и развиваемая сила привода для недопущения перегрева двигателя $F_{heat.max}$:

$$F_{d.max} = \min(F_{t.max}, F_{slip.max}, F_{heat.max}). \quad (5)$$

Максимальная сила натяжения ленты $F_{t.max}$ определяется из диаграммы:

$$F_{t.max} = S_5 - S_1 = 1,048 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Максимальная сила $F_{slip.max}$, при которой не происходит пробуксовки ленты, зависит от натяжения в сбегающей ветви ленты и тягового фактора:

$$F_{t.max} = (0,5 \cdot F_{nu} - p_p w'_p L)(e^{\mu \alpha} - 1) = 1,222 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Максимальная допустимая сила привода $F_{heat.max}$, не допускающая перегрева АД, рассчитывается через суммарный критический момент трех электродвигателей ВА280S4, приведенный к радиусу приводных барабанов:

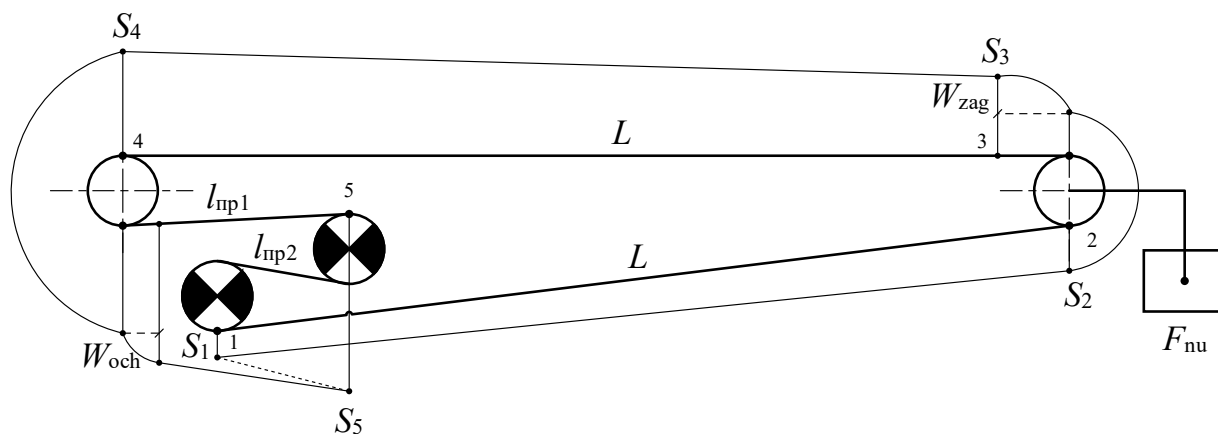


Рис. 2. Диаграмма натяжений конвейера 2Л100У-01
Fig. 2. Tension diagram of the 2L100U-01 belt conveyor

Таблица 1. Параметры ленточного конвейера 2Л100У-01
Table 1. Parameters of the 2L100U-01 belt conveyor

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение, единицы измерения	Значение
1	Погонный вес грузной ветви ленты с роликами	p_g , Н/м	1400
2	Погонный вес порожней ветви ленты с роликами	p_p , Н/м	352,1
3	Коэффициент сопротивления движению грузной ветви ленты	w'_g	0,026
4	Коэффициент сопротивления движению порожней ветви ленты	w'_p	0,013
5	Длина основной ветви ленты	L , м	1500
6	Длина первой промежуточной ветви ленты	l_{pr1} , м	5,2
7	Длина второй промежуточной ветви ленты	l_{pr2} , м	2,5
8	Суммарный тяговый фактор	$e^{\mu \alpha}$	5,342
9	Статическое натяжение в набегающей ветви	S_5 , Н	$1,354 \cdot 10^5$
10	Статическое натяжение в сбегающей ветви	S_1 , Н	$3,055 \cdot 10^4$
11	Сила натяжного устройства	F_{nu} , Н	$7 \cdot 10^4$
12	Радиус приводного барабана	R_b , м	0,315
13	Номинальный момент приводного двигателя	M_n , Н·м	707
14	Кратность критического момента двигателя	m_k	2,2
15	Передаточное отношение редуктора	i_{red}	20
16	Коэффициент полезного действия редуктора	η_{red}	0,95

$$F_{heat.max} = \frac{3 \cdot i_{red} \eta_{red} m_k M_n}{R_b} = 2,815 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Исходя из расчетов, согласно (5), $F_{d.max} = 1,048 \cdot 10^5 \text{ Н}$.

$$a_{max} = \frac{F_{d.max} - F_f}{m} = \frac{F_{d.max} - C_f w'_g (p_g L + p_p (L + l_{pr1}))}{\frac{p_g}{g} L + \frac{p_p}{g} (L + l_{pr1})} = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \quad (6)$$

Максимально допустимое ускорение ленты a_{max} определяется по второму закону Ньютона (6) как отношение развиваемой силы движения ленты $F_{d.max}$ за вычетом сил трения F_f к ее массе m :

где $C_f = 1,09$ – усредненный коэффициент сопротивления движению конвейера, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Для рассчитанного по (6) ускорения ленты $a_{max} = 0,1 \text{ м/с}^2$ при пуске конвейера от $v_0 = 0 \text{ м/с}$ до номинальной скорости $v_{зад} = 2,5 \text{ м/с}$ максимальное время разгона составит $T_a = 40 \text{ с}$ по формуле (3).

Полученное расчетное время пуска на $\pi/2$ с больше, чем при линейном законе регулирования скорости с постоянным ускорением $a_{max} = 0,1 \text{ м/с}^2$, при котором время пуска конвейера до номинальной скорости составит 25 с. Метод компьютерного моделирования позволяет протестировать работу системы регулирования скорости для обоих законов управления.

Компьютерная модель конвейерной установки с многодвигательным частотно-регулируемым электроприводом

Компьютерное моделирование рассматриваемого объекта выполняется в программе MATLAB с графической средой Simulink и библиотекой «Specialized Power Systems» для элементов электротехнической системы. Это позволяет внедрить преобразователи частоты (ПЧ) с САУ скоростью в систему электропривода конвейерной установки и исследовать электромеханические переходные процессы в различных режимах ее работы при условии отсутствия доступа к реальному горно-шахтному оборудованию.

Компьютерная модель системы ЧРП конвейера 2Л100У-01, представленная на Рис. 3, получена путем дополнения модели нерегулируемого приво-

да [15] блоками индивидуальных двухуровневых инверторов напряжения «Two-Level Converter», подключенными к каждому АД ВА280S4 через кабельную линию. Данная топология электрической

схемы соответствует многоинверторному ПЧ, при которой все автономные инверторы питаются от общего звена постоянного напряжения.

Преимущества выбора топологии многоинверторного ПЧ заключаются в возможности реализации индивидуального регулирования скорости и момента каждого АД методом векторного управления с ДТС и ПВМ. Для уменьшения суммарного количества преобразовательных устройств в электрической системе применяется общая шина постоянного тока, получающая питание от общего управляемого выпрямителя. С целью сокращения объема компьютерных вычислений в разработанной модели функцию выпрямителя выполняет источник постоянного напряжения «DC Voltage Source».

На Рис. 4 приведена структурная схема системы прямого управления моментом ЧРП, которая размещена в подсистеме «Direct Torque Control System» в количестве 3 шт. для каждого приводного АД. На входы данной схемы подаются заданные значения скорости ленты v_{ref} и потокосцепления электродвигателя Ψ_{ref} , измеряемые текущие значения величин угловой скорости ω_{AD} , трехфазного напряжения U_{abc} и тока I_{abc} на зажимах АД, а также значение постоянного напряжения питания инвертора U_{dc} для нормирования опорного вектора напряжения $U_{dq0.ref}$. Требуемые для регулирования текущие значения величин электромагнитного момента M_{calc} , потокосцепления Ψ_{calc} и угла θ вращающейся системы координат dq рассчитываются в блоке вычислителя момента и потокосцепления на основе параметров схемы замещения АД ВА280S4. Величина задания угловой скорости двигателя ω_{ref} выводится через коэффициент пропорциональности $K_\omega = i_{red} / R_b$. Сигнал задания электромагнитного момента M_{ref} формируется ПИ-регулятором скорости с ограничением выходной величины, не пре-

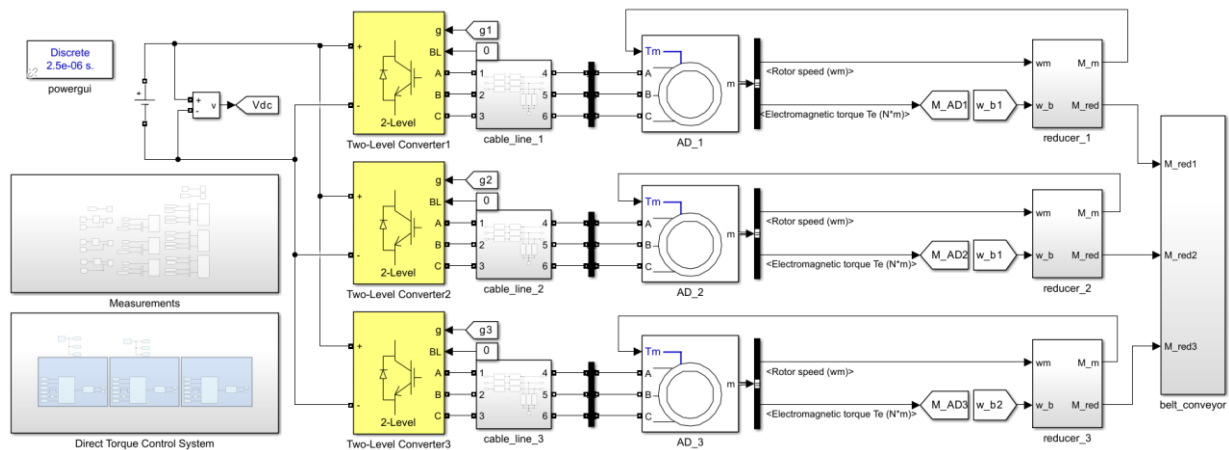


Рис. 3. Модель системы ЧРП ленточного конвейера 2Л100У-01 в Simulink

Fig. 3. Simulink model of the 2L100U-01 belt conveyor variable frequency drive

вышающим $2 \cdot M_n$. Продольная $U_{d.ref}$ и поперечная $U_{q.ref}$ составляющие опорного вектора напряжения $U_{dq0.ref}$ формируются ПИ-регуляторами потокосцепления и момента на основе разности опорных и вычисленных значений потокосцепления и момента АД. На основе преобразованного в трехфазную систему координат abc опорного вектора напряжения $U_{abc.ref}$ блок пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции «SV-PWM» с частот-

кального максимума и не может измениться скачком в силу непрерывности регулирования. Возникновение пробуксовок также может быть обусловлено наличием в системе рывков – скачкообразных изменений ускорения от 0 до $0,1 \text{ м/с}^2$ в моменты изменения угла наклона графика скорости. Это подтверждают результаты моделирования на Рис. 7, где проскальзывание ленты отсутствует, а изменение величин угловой скорости и ускорения вы-

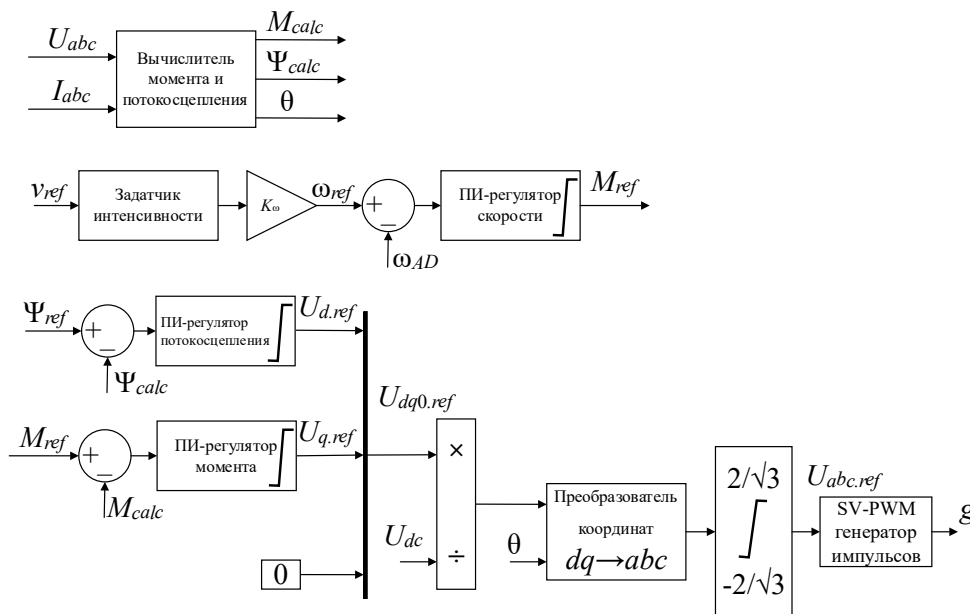


Рис. 4. Структурная схема системы прямого управления моментом с ПВМ
Fig. 4. Block diagram of the direct torque control system with space vector pulse width modulation

той коммутации 5 кГц формирует на выходе САУ искомым вектор g управляющих импульсов инвертора, который обеспечивает переключение ключей инвертора для реализации метода прямого управления моментом АД.

Результаты компьютерного моделирования и их обсуждение

Моделируется режим пуска конвейерной установки с частотно-регулируемым электроприводом до достижения номинальной скорости $2,5 \text{ м/с}$ и последующее снижение до $1,5 \text{ м/с}$ для двух случаев. В первом случае задатчик интенсивности реализует изменение во времени заданной скорости ленты по линейному закону, а во втором – по синусоидальному (2).

Осциллограммы угловой скорости одного из приводных барабанов ω_b и расположенной на нем соответствующей точки ленты ω_n , а также момента одного приводного АД M_{AD} и его нагрузки M_{load} показаны на Рис. 5 для линейного изменения скорости и на Рис. 7 для синусоидального. Графики изменения угловых скоростей идентичны для обоих приводных барабанов. На них не наблюдается явление пробуксовки практически в течение всего времени моделирования, что выражается в совпадении кривых скоростей барабана и ленты. Проскальзывание ленты относительно барабана фиксируется только для случая линейного изменения скорости в моменты времени 12 с и 62 с, когда динамический момент приводного АД достигает ло-

полнено по синусоидальному закону без рывков.

Еще одним неоспоримым преимуществом регулирования скорости по синусоидальному закону (2) является более высокое качество регулирования момента. Сравнение осциллограмм M_{load} показывает, что график момента нагрузки на Рис. 7 имеет меньшие пульсации момента и сглаженную линию в переходных режимах, в отличие от ломаной линии графика M_{load} на Рис. 5. При синусоидальном профиле изменения скорости переходный процесс по моменту сохраняет ломаный вид только в период разгона и характеризуется меньшей амплитудой колебаний. Кроме того, плавное изменение скорости и ускорения конвейера без рывков не позволяет величине момента оказаться в отрицательной области значений, предотвращая возможные механические повреждения.

В обоих случаях регулирования скорости кривая момента нагрузки и соответствующая ей кривая момента АД имеет колебательный характер с периодом 16 с как в переходном, так и в установившемся режиме. Данное явление объясняется вязкоупругими свойствами ленты и также сказывается на характере переходных процессов по скоростям сосредоточенных масс ленты.

Представленные на Рис. 6, Рис. 8 временные диаграммы линейных скоростей сосредоточенных масс ленты $\dot{q}_1-\dot{q}_6$ и натяжного устройства $\dot{q}_7$ иллюстрируют динамику значений скоростей обобщенных координат модели (4). По сравнению с нерегу-

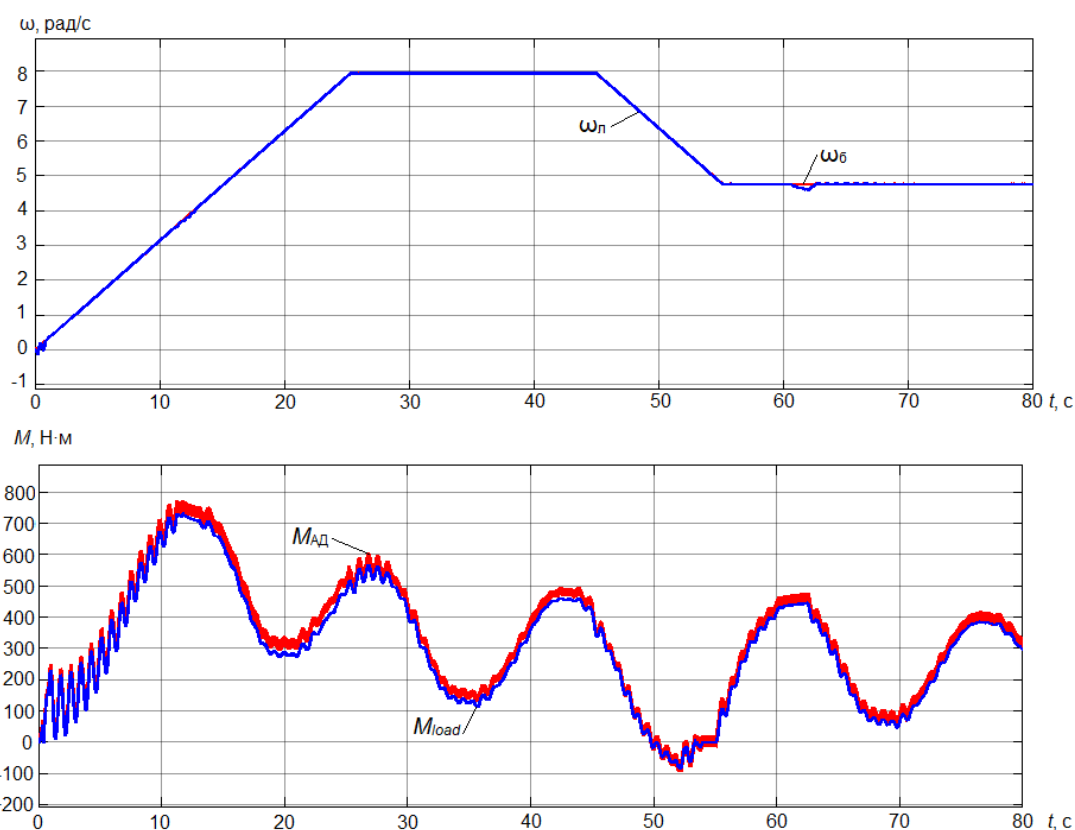


Рис. 5. Осциллограммы угловой скорости и момента привода и нагрузки при линейном изменении скорости
Fig. 5. Oscillograms of angular velocity and torque of the drive and load with linear velocity change

лируемым приводом, рассмотренным ранее в работе [15], время пуска системы ЧРП увеличилось, и для линейного нарастания скорости (Рис. 6) приводные барабаны с лентой $\dot{q}_5$ – $\dot{q}_6$ разгоняются от 0 до номинального значения 2,5 м/с за рассчитанное время 25 с. Соответственно, регулирование скорости вниз на 1 м/с занимает 10 с. Положительный эффект частотного пуска заключается в плавном и постепенном вовлечении в процесс разгона с ми-

нимально возможными рывками всех сосредоточенных масс ленты конвейера. Наибольшее запаздывание имеют наиболее удаленные от приводных барабанов координаты ленты $\dot{q}_2$ – $\dot{q}_4$, которые в установившемся режиме колеблются около заданного значения скорости с амплитудой 0,5 м/с и периодом 16 с. На Рис. 8 при регулировании скорости по синусоидальному профилю время разгона привода возрастает и достигает вычисленных 40 с, что

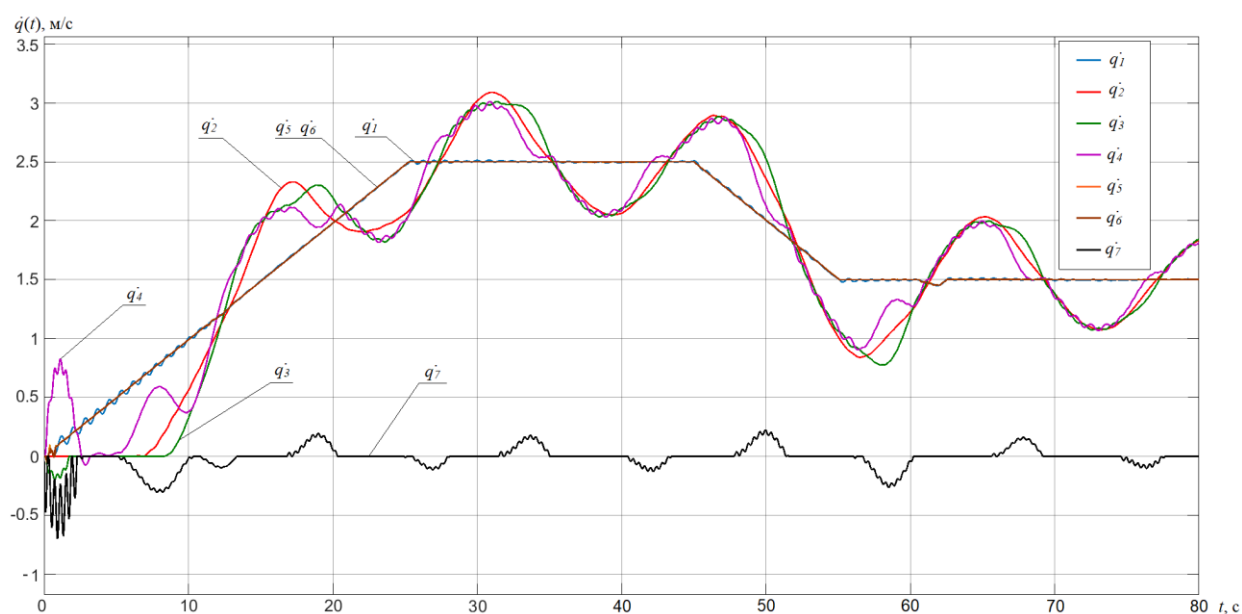


Рис. 6. Осциллограмма скоростей масс ленты при линейном изменении скорости
Fig. 6. Oscillogram of the belt masses' speeds with linear velocity change

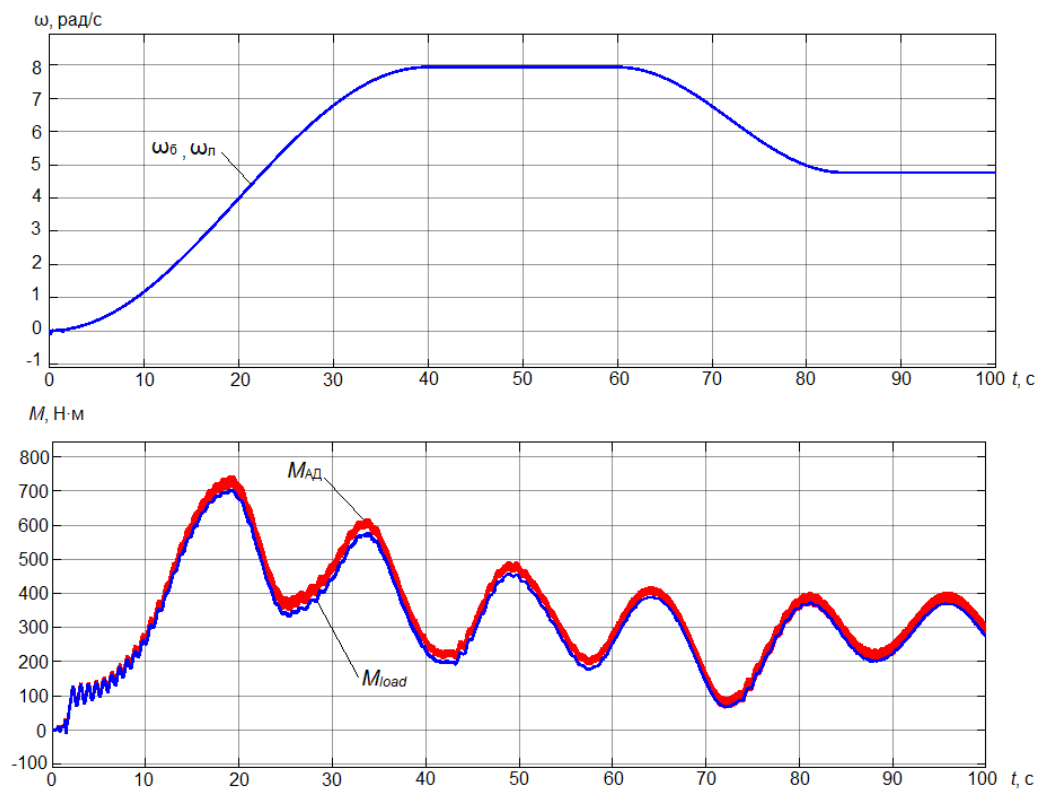


Рис. 7. Осциллограммы угловой скорости и момента привода и нагрузки при синусоидальном изменении скорости

Fig. 7. Oscillograms of angular velocity and torque of the drive and load with sinusoidal velocity change

позволяет практически полностью устранить колебания скорости координаты ленты $\dot{q}_1$ на отклоняющем головном барабане. Также уменьшается амплитуда колебаний скоростей масс $\dot{q}_2-\dot{q}_4$, которые успевают достичь синфазности. Меньшая амплитуда колебаний и отсутствие дискретных изменений ускорения приводит к меньшему числу отклонений от положения равновесия натяжного устройства $\dot{q}_7$.

Таким образом, изображенные на Рис. 7 и Рис.

8. временные диаграммы изменения параметров ленточного конвейера 2Л100У-01 с синусоидальным изменением скорости отличаются более высоким качеством переходных процессов, чем в системе ЧРП с линейным законом управления. В дополнение к вышеизложенному разработанная и смоделированная система ЧРП устраняет отмеченные в [15] недостатки системы нерегулируемого привода: статическую ошибку по скорости, чрезмерные

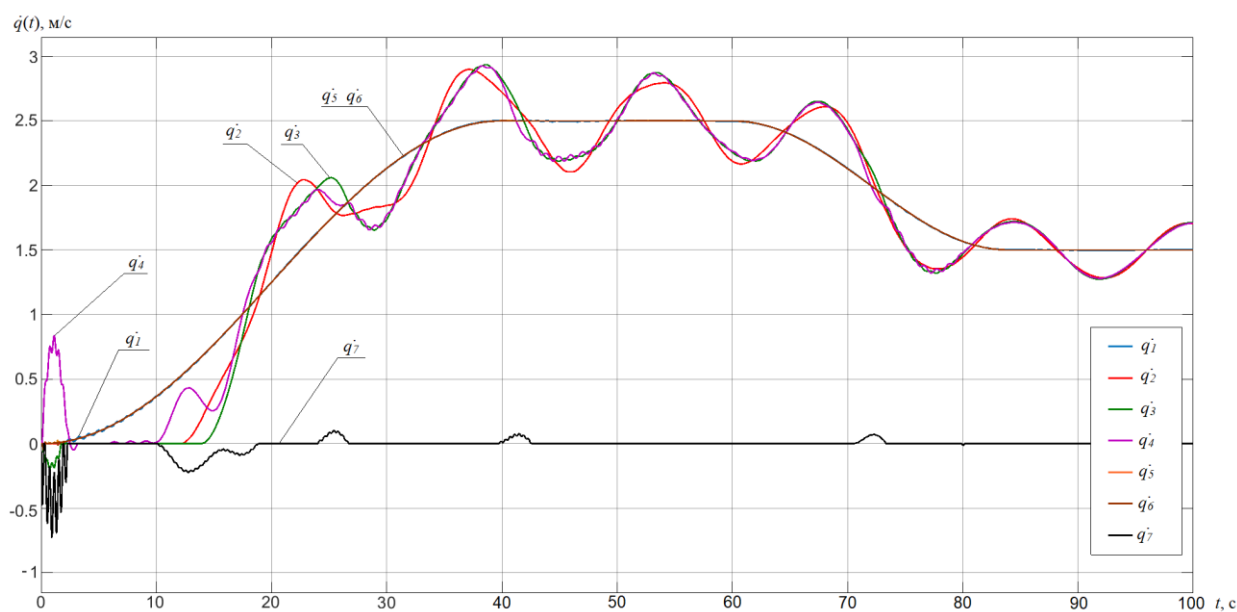


Рис. 8. Осциллограмма скоростей масс ленты при синусоидальном изменении скорости

Fig. 8. Oscillogram of the belt masses' speeds with sinusoidal velocity change

пульсации электромагнитного момента, проскальзывание ленты. Измеренные в ходе моделирования значения механических и электрических величин близки к каталожным данным и теоретически полученным результатам, следовательно, разработанная модель может считаться адекватной.

Выводы

Представленная в настоящей работе модель системы многодвигательного асинхронного ЧРП шахтного ленточного конвейера 2Л100У-01 с прямым управлением моментом и регулированием скорости по синусоидальному профилю показала себя способной решить задачи обеспечения плавного пуска и регулирования скорости ленты конвейера при переменном грузопотоке, поддержания на допустимом уровне механических нагрузок на приводные двигатели, устранения пробуксовки ленты на приводных барабанах.

Следует отметить, что ввиду идентичных характеристик всех приводных двигателей задания одинакового значения скорости на входе САУ каждым АД необходимо и достаточно, чтобы исключить возникновение динамического перераспределения момента нагрузки между двумя приводными барабанами и между двумя двигателями на одном приводном барабане. Недостижимое на практике полное совпадение заводских параметров нескольких АД в многодвигательной системе влечет за собой многократное перераспределение суммарной мощности привода между отдельными агрегатами. Для выравнивания нагрузок многодвигательного электропривода конвейера в статических и динамических режимах работы авторами ставится задача в дальнейших исследованиях реализовать САУ ЧРП с синхронизацией скоростей и индивидуальными корректирующими сигналами по моменту.

Также в настоящее время авторы видят потенциал исследования спектрального состава гармонических искажений, вносимых ЧРП в систему электроснабжения. Применимым способом обеспечения регламентированных показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости ЧРП с питающей сетью представляется внедрение управляемого активного выпрямителя в топологию многоинверторного ПЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борзенков А. Н. Исследование эффективности работы конвейеров горнотранспортных систем горнодобывающих комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 12-1. С. 165–177. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_165
2. Эшмуродов З. О. Исследование факторов, влияющих на эффективность работы ленточных конвейеров горнотранспортных систем // Journal of Advances in Engineering Technology. 2024. №. 3. С. 42–49.
3. Дмитриева В. В., Сизин П. Е. Управление скоростью ленты конвейера в зависимости от случайного грузопотока. Москва : Горная книга, 2020. 72 с.
4. Войтюк И. Н., Коптева А. В., Кривенко А. В. Электротехнический комплекс для обеспечения энергоэффективности работы электропривода ленточного конвейера // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 10. С. 562–569.
5. Корнеев С. В., Зотов В. А., Доброногова В. Ю., Долгих В. П. Система автоматического регулирования скорости шахтных ленточных конвейеров с упреждением // Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2020. № 21(64). С. 61–67.
6. Котин Д. А., Сухинин С. Е., Иванов И. А. Синтез регуляторов системы управления скоростью ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 10-1. С. 5–21. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_5.
7. Котин Д. А., Сухинин С. Е. Расчет коэффициентов регулятора скорости ленточного конвейера на основе его физических параметров // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 5 (175). С. 3–11. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-3-11.
8. Дмитриев В. Г., Вержанский А. П. Основы теории ленточных конвейеров. М. : Горная книга, 2017. 572 с.
9. He D., Pang Y., Lodewijks G., Liu X. Healthy speed control of belt conveyors on conveying bulk materials // Powder technology. 2018. Т. 327. С. 408–419. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.01.002.
10. Ji J., Miao C., Li X. Research on the energy-saving control strategy of a belt conveyor with variable belt speed based on the material flow rate // Plos one. 2020. Т. 15. № 1. С. e0227992. DOI: 10.1371/journal.pone.0227992.
11. Vasić M., Miloradović N., Blagojević M. Speed control of high power multiple drive belt conveyors // Research and Development in Heavy Machinery. 2021. Т. 27. № 1. С. 9–15. DOI: 10.5937/IMK2101009V.
12. Шпрехер Д. М., Овсянников Д. С. Разработка и исследование систем управления многодвигательным электроприводом шахтного скребкового конвейера // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 524–531.
13. Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И., Колесников Е. Б., Овсянников Д. С. Разработка стратегии управления плавным пуском двухприводного лавного скребкового конвейера // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 2. С. 568–576.
14. Zhou Q., Gong H., Du G., Zhang Y., He H. Distributed Permanent Magnet Direct-Drive Belt Conveyor System and Its Control Strategy // Energies. 2022. Т. 15. № 22. С. 8699. DOI: 10.3390/en15228699.
15. Дмитриева В. В., Дзюин Д. В. Математическая и компьютерная модель многомассовой системы многодвигательного электропривода ленточного конвейера // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 2 (172). С. 3–12. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-3-12.
16. Wang L., Li H., Huang J., Zeng J., Tang L., Wu W., Luo Y. Research on and Design of an Electric Drive Automatic Control System for Mine Belt Conveyors // Processes. 2023. Т. 11. № 6. С. 1762. DOI: 10.3390/pr11061762.
17. Bebić M. Z., Ristić L. B. Speed controlled belt conveyors: drives and mechanical considerations // Advances in electrical and computer engineering. 2018. Т. 18. №. 1. С. 51–60. DOI: 10.4316/AECE.2018.01007.
18. Васильев Б. Ю., Козярук А. Е. Повышение эффективности асинхронных электроприводов с прямым управлением моментом // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2013. № 2. С. 75–84.
19. Peter A. K., Haneesh K. M., Hrudhya K. C. A Space Vector Modulated Direct Torque Control of Induction Motor with Improved Transient Performance and Reduced Parameters Dependency // 2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET). IEEE, 2023. С. 1–6. DOI: 10.1109/SeFeT57834.2023.10245340.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Дзюин Дмитрий Владленович, аспирант, ассистент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (19991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0411-9948>, e-mail: dzyuin.d@gubkin.ru

Дмитриева Валерия Валерьевна, доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (19991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1), к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8740-9380>, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Дзюин Дмитрий Владленович – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, математическое и компьютерное моделирование, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Дмитриева Валерия Валерьевна – научный менеджмент, подбор соответствующей литературы, концептуализация исследования, выводы, вычитка и корректировка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-3-13

Dmitry V. Dzyuin, Valeria V. Dmitrieva

National University of Oil and Gas “Gubkin University”

* for correspondence: dzyuin.d@gubkin.ru

DIRECT TORQUE CONTROL SYSTEM OF A VARIABLE FREQUENCY MULTI-MOTOR ELECTRIC DRIVE FOR A MINE BELT CONVEYOR



Article info

Received:

05 March 2025

Accepted for publication:

30 April 2025

Accepted:

20 June 2025

Published:

26 June 2025

Keywords: belt conveyor, variable frequency drive, multi-motor electric drive, direct torque control, automatic control system, speed control, sinusoidal profile, simulation.

Abstract.

The article is devoted to the development and implementation of a variable frequency electric drive with direct torque control in a multi-motor asynchronous drive system for a 2L100U-01 mine belt conveyor. The relevance of this work stems from the significant unevenness in cargo flow at mine belt conveyors, which necessitates the introduction of a speed control system to ensure constancy in conveyor linear loading and drive load torque. The purpose of this work is to implement a frequency speed control system for a multi-motor electric conveyor drive, with an acceptable level of transient performance in terms of both speed and torque. Direct torque control by the method of space-vector pulse width modulation is used because of the lower pulsations of the electromagnetic torque. To minimize the jerks and slips of the belt, a sinusoidal profile of speed and acceleration changes is selected and calculated. The developed system with a multi-inverter frequency converter is simulated in MATLAB/Simulink. The simulation results confirm the advantages of a sinusoidal speed control system compared to a linear control profile. Based on the results of the work, conclusions were drawn about the ability of the developed system to ensure conveyor start and speed control with an acceptable level of load without belt slip. The authors set further tasks to equalize the load values between conveyor drive motors in static and dynamic operation modes.

For citation: Dzyuin D.V., Dmitrieva V.V. Direct Torque Control System of a Variable Frequency Multi-Motor Electric Drive for a Mine Belt Conveyor. Mining Equipment and Electromechanics, 2025; 3(179):3-13 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-3-13, EDN: AXFXLS

REFERENCES

1. Borzenkov A.N. Efficiency of conveyors in mining and transport systems in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*

2024; 12–1:165–177. [In Russ].
DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_165.

2. Eshmurodov Z.O. Investigation of factors influencing the efficiency of mining conveyor belts. *Journal of Advances in Engineering Technology*. 2024; 3:42–49. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Dmitrieva V.V., Sizin P.E. Conveyor belt speed control depending on random cargo flow. Moscow: Gornaya kniga; 2020. 72 p. (In Russ.)

4. Voytyuk I.N., Kopteva A.V., Krivenko A.V. Electrical system to ensure efficiency of the electric drive of belt conveyor. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = News of the Tula State University. Technical Sciences. 2019; 10:562–569. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Korneev S.V., Zotov V.A., Dobronogova V.Yu., Dolgikh V.P. Automatic Rate-Predictive Control System for Mine Belt Conveyors. *Naukoemkie tekhnologii i oborudovanie v promyshlennosti i stroitel'stve* = Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2020; 21(64):61–67. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Kotin D.A., Sukhinin S.E., Ivanov I.A. Synthesis of regulators of the belt conveyor speed control system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023; 10–1:5–21. [In Russ.]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_5.

7. Kotin D.A., Sukhinin S.E. Calculation of the coefficients of the speed controller of the conveyor belt based on its physical parameters. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2024; 5(175):3–11. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-3-11.

8. Dmitriev V.G., Verzhansky A.P. Fundamentals of the theory of belt conveyors. Moscow: Gornaya kniga; 2017. 572 p. (In Russ.)

9. He D., Pang Y., Lodewijks G., Liu X. Healthy speed control of belt conveyors on conveying bulk materials. *Powder technology*. 2018; 327:408–419. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.powtec.2018.01.002.

10. Ji J., Miao C., Li X. Research on the energy-saving control strategy of a belt conveyor with variable belt speed based on the material flow rate. *Plos one*. 2020; 15(1):e0227992. (In Eng.) DOI: 10.1371/journal.pone.0227992.

11. Vasić M., Miloradović N., Blagojevic M. Speed control of high power multiple drive belt conveyors. *Research and Development in Heavy Machinery*. 2021; 27(1):9–15. (In Eng.) DOI: 10.5937/IMK2101009V.

12. Shprekher D.M., Ovsyannikov D.S. Development and Research of Control Systems for a Multi-Motor Electric Drive of a Mine Scraper Conveyor. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = News of the Tula State University. Technical Sciences. 2022; 9:524–531. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Shprekher D.M., Babokin G.I., Kolesnikov E.B., Ovsyannikov D.S. Development of a strategy control for soft start-up of a two-drive lead scraper conveyor. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = News of the Tula State University. Technical Sciences. 2023; 2:568–576. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Zhou Q., Gong H., Du G., Zhang Y., He H. Distributed Permanent Magnet Direct-Drive Belt Conveyor System and Its Control Strategy. *Energies*. 2022; 15(22):8699. (In Eng.) DOI: 10.3390/en15228699.

15. Dmitrieva V.V., Dzyuin D.V. Mathematical and computer model of a multi-mass multi-motor electric drive system of a belt conveyor. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2024; 2(172):3–12. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-3-12.

16. Wang L., Li H., Huang J., Zeng J., Tang L., Wu W., Luo Y. Research on and Design of an Electric Drive Automatic Control System for Mine Belt Conveyors. *Processes*. 2023; 11(6):1762. (In Eng.) DOI: 10.3390/pr11061762.

17. Bebic M.Z., Ristic L.B. Speed controlled belt conveyors: drives and mechanical considerations. *Advances in electrical and computer engineering*. 2018; 18(1):51–60. (In Eng.) DOI: 10.4316/AECE.2018.01007.

18. Vasilev B.Y., Kozyaruk A.E. Increase of Efficiency Induction Motor with Direct Torque Control. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* = Bulletin of the South Ural state university. Series: Power engineering. 2013; (2):75–84. (In Russ., abstract in Eng.)

19. Peter A.K., Haneesh K.M., Hrudhya K.C. A Space Vector Modulated Direct Torque Control of Induction Motor with Improved Transient Performance and Reduced Parameters Dependency. *2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*. IEEE; 2023. Pp. 1–6. (In Eng.) DOI: 10.1109/SeFeT57834.2023.10245340

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Dmitry V. Dzyuin, Post-Graduate, Assistant, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, (119991, Russian Federation, Moscow, 65 Leninsky Prospekt, building 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0411-9948>, e-mail: dzyuin.d@gubkin.ru

Valeria V. Dmitrieva, Associate Professor, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, (119991, Russian Federation, Moscow, 65 Leninsky Prospekt, building 1), C. Sc. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8740-9380>, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru

Contribution of the authors:

Dmitry V. Dzyuin – research problem statement; reviewing the relevant literature; mathematical and computer modelling; data collection; data analysis; drawing the conclusions; writing the text.

Valeria V. Dmitrieva – scientific management, selection of the relevant literature; conceptualization of research, drawing the conclusions, reading and correcting the text.

The claimed contribution of the authors:

Authors have read and approved the final manuscript.

