

Научная статья

УДК 621.34:621.867.2

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-83-93

Дзюин Дмитрий Владленович*, Дмитриева Валерия Валерьевна

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

* для корреспонденции: dzyuin.d@gubkin.ru

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА С ФУНКЦИЕЙ ВЫРАВНИВАНИЯ НАГРУЗОК**Информация о статье**

Поступила:

19 декабря 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 мая 2026 г.

Принята к печати:

15 июня 2026 г.

Ключевые слова:

ленточный конвейер, частотно-регулируемый привод, многодвигательный электропривод, система автоматического управления, распределение нагрузки, регулирование момента, синхронизация скоростей электродвигателей, компьютерное моделирование

Аннотация.

Данная статья посвящена решению задачи выравнивания нагрузок в системе многодвигательного многобарабанного асинхронного электропривода шахтного ленточного конвейера. Актуальность работы состоит в необходимости повышения технологической и энергетической эффективности конвейера 2Л100У-01 с частотно-регулируемым электроприводом и системой автоматического управления скоростью ленты в зависимости от величины ее фактической загрузки. Рассматриваемый электропривод в реальных условиях отклонения внутренних параметров от каталожных данных в диапазоне $\pm 5\%$ работает с перегрузкой и недогрузкой отдельных двигателей и приводных барабанов, что приводит к ненормальным режимам работы и к преждевременному износу оборудования. Цель настоящей работы заключается в разработке системы автоматического управления многодвигательным частотно-регулируемым электроприводом с прямым управлением моментом, которая позволит индивидуально корректировать величину развиваемого момента и мощности каждого приводного двигателя. Предложенная схема системы автоматического регулирования реализует выравнивание нагрузок методом синхронизации двигателей в зависимости от относительной величины суммарного отклонения скорости и момента. В MATLAB/Simulink выполнено компьютерное моделирование разработанной системы, полученные результаты подтверждают равенство угловых скоростей и моментов приводных барабанов, а также равномерное распределение мощности между электроприводными агрегатами. Авторами выделены достоинства разработанной системы управления частотно-регулируемым приводом ленточного конвейера и поставлены задачи дальнейшей модернизации конвейерной установки 2Л100У-01.

Для цитирования: Дзюин Д.В., Дмитриева В.В. Система автоматического управления многодвигательным частотно-регулируемым электроприводом ленточного конвейера с функцией выравнивания нагрузок // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 3 (185). С. 83-93. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-83-93, EDN: UOJLLW

Введение

В технологическом процессе угледобычи немаловажную роль играют шахтные ленточные конвейеры, осуществляющие транспортировку дробленой горной массы из шахты на поверхность. Привод данных установок очень часто выполняется многодвигательным и многобарабанным, тем самым обеспечивается повышение суммарной установленной мощности конвейера и одновременное уменьшение максимальных нагрузок приводного оборудования и ленты до допустимых пределов. Особое внимание заслуживают такие характеристики подземных участков ленточных конвейе-

ров, как максимальная производительность порядка нескольких сотен т/ч, длина до 1500 м включительно, а также значительная неравномерность загрузки, в отличие от наземных магистральных ленточных конвейеров с производительностью до нескольких десятков тысяч т/ч, длиной свыше 1 км и более равномерным грузопотоком. Неравномерность грузопотока шахтных ленточных конвейеров обусловлена особенностями технологического процесса добычи и перегрузки горной массы в подготовительных и очистных выработках: скорость и направление подачи выемочных машин зависит от сложности горно-геологических условий; также

величина грузопотока изменяется несколько раз при перегрузке со штрекового перегружателя или скребкового конвейера на ленточный конвейер [1, 2]. По этой причине в целях энерго- и ресурсосбережения на шахтных ленточных конвейерах как отечественными авторами [2, 3, 4] так и зарубежными [1, 5, 6, 7] обосновано внедрение регулирования скорости движения ленты посредством частотно-регулируемого привода (ЧРП) с системой автоматического управления, изменяющей величину скорости ленты для обеспечения постоянства ее погонной загрузки.

Российские исследования [2, 8, 9, 10, 11, 12] и мировой опыт [5, 13, 14, 15] свидетельствуют о том, что эксплуатация многодвигательного и в том числе многобарабанного электропривода шахтного ленточного конвейера характеризуется проблемой неравномерного распределения нагрузки между отдельными приводными агрегатами в статических и динамических режимах. Причины этого явления заключаются как в статической асимметрии параметров оборудования, так и в различных во времени значениях величин динамических возмущений [2, 8, 10]. Несовпадение жесткостей механических характеристик двух асинхронных двигателей (АД) одинаковой марки из одной партии вызвано отклонениями реальных значений сопротивлений обмоток АД от паспортных данных. Допустимый диапазон разброса параметров электродвигателей, сопротивлений кабельных линий, передаточных чисел редукторов может достигать 10%, так как большинство стандартов допускают отклонение 5% вверх и вниз от данных, предоставленных заводом-изготовителем [8]. В переходных режимах работы конвейера при изменении скорости во всем диапазоне от нуля до максимально допустимой различия коэффициентов загрузки каждого двигателя обусловлены как скачкообразными изменениями поступающего на ленту груза (момента нагрузки привода), так и различной инерционностью механической части [8]. Даже в установившемся режиме работы многобарабанного привода на постоянной скорости сохраняется неравномерное нагружение приводных барабанов: большую часть нагрузки берет на себя первый по ходу движения ленты барабан, отчего суммарная установленная мощность привода недоиспользуется на 30...50% [3, 8]. Также неkoordinированная работа двух приводных барабанов может привести к проскальзыванию ленты на одном из них [3]. Другие негативные эффекты от неравномерной загрузки включают перегрев и ускоренный износ перегруженных АД, низкие КПД и коэффициент мощности недогруженных АД, увеличение натяжения и перекос конвейерной ленты, деформацию валопроводов [2]. Кроме того, когда один из сопряженных АД работает в двигательном режиме, то второй под действием приложенного к нему избыточного вращающего момента может перейти в генераторный режим [8]. Необходимость устранения всех недостатков электроприводной системы в целях повышения технологической и энергетической эффективности конвейерной установки придает особую актуальность задаче выравнивания

нагрузок между несколькими двигателями и приводными барабанами многодвигательного электропривода ленточного конвейера, решению которой и посвящена настоящая статья.

Методы выравнивания нагрузок электроприводов

Как отечественные авторы [2, 8, 9, 10, 11, 12, 16], так и зарубежные исследователи [5, 13, 14, 15] подтверждают, что наилучшим решением поставленной задачи выравнивания нагрузок многодвигательного привода является разработка системы автоматического управления (САУ) ЧРП. Иные методы, такие как непосредственная жесткая связь двигателей общим валом, индивидуальная коррекция питающего напряжения, электрический вал АД с фазным ротором – все позволяет регулировать только один из параметров (скорость холостого хода или жесткость) механической характеристики, причем максимальная эффективность наблюдается только в статических режимах [10]. САУ ЧРП в полной мере способна устранить возникающие отклонения в параметрах в любом из каналов привода в динамическом режиме работы [2, 10, 12].

Наименее затратным способом регулирования скорости многодвигательного электропривода представляется использование одного общего преобразователя частоты (ПЧ) на группу АД, при этом управление ЧРП может быть только скалярным. Данный способ не позволяет устранить индивидуальные отклонения каждого АД по скорости и моменту, соответственно, поставленная задача остается нерешенной. Как отмечено в [3], для поддержания заданного значения тягового фактора многобарабанного привода конвейера требуется индивидуально корректировать мощность и момент каждого АД, поэтому потребуется применение векторного управления каждым ПЧ. Для электропривода конвейера в [15] предложено полеориентированное управление, в то время как в работах [2, 4, 14, 16] проиллюстрирована эффективность способа прямого управления моментом (англ. Direct Torque Control – DTC), которому и отдается предпочтение в данной статье.

Структурная схема системы управления взаимосвязанными АД с ЧРП зависит в том числе от их взаимного расположения и от свойств связей между агрегатами. В работе [8] предложена САУ для механической системы, в которой два АД жестко связаны друг с другом и с рабочим органом, поэтому регулирование каждым АД осуществляется только по току. Несмотря на то, что представленное техническое решение отличается достаточной эффективностью и точностью поддержания токораспределения 2...3% в противовес изначальным 25...30% [8], принятие в модели системы такого допущения, как абсолютная жесткость, может неблагоприятно сказаться на величинах зазоров в передачах и деформаций валопроводов. Кроме того, работа каждого ПЧ в режиме автономного инвертора тока (АИТ) потребует применения индивидуальных комплектов выпрямителей и оборудования звеньев постоянного тока, отчего возрастут капитальные затраты и массогабаритные характеристики систе-

мы. Работа каждого ПЧ в режиме автономного инвертора напряжения (АИН) позволит использовать одно общее звено постоянного напряжения (ЗПН) с одним выпрямительным устройством (многоинверторный ПЧ), сократив тем самым число комплектов выпрямителей.

Сравнительный анализ схем САУ многодвигательных электроприводов с обзором их основных преимуществ и недостатков представлен в работах [17, 18]. Рассмотрены метод «ведущий-ведомый» (англ. Master-Command, Master-Slave), метод введения перекрестных связей (англ. Cross-Coupling), стратегия относительной синхронизации (англ. Relative-Coupling), синхронизация в зависимости от величин отклонений (англ. Deviation-Coupling) [19], а также метод использования виртуального электронного вала (англ. Virtual Shaft). Для случаев выравнивания нагрузок на головном и хвостовом приводных барабанах конвейера, соединенных протяженной вязкоупругой связью (лентой), схема САУ ЧРП по принципу «ведущий-ведомый» применяется в работах [2, 9, 14]. Данный метод синхронизации скоростей и моментов нескольких АД заключается в регулировании только одного «ведущего» АД по величине угловой скорости, под величину которой «подстраиваются» все остальные «ведомые» АД, управляемые по моменту. Однако, как отмечено в [17, 18, 20], схема «ведущий-ведомый» неустойчива к колебаниям нагрузок в связующем звене между АД, примером которого как раз может выступать вязкоупругая ветвь ленты конвейера.

На основе работ [16, 17, 18, 19] авторами настоящей статьи сделан выбор в пользу регулирования многодвигательного привода ленточного конвейера комбинированным способом, представляющим собой комбинацию методов «Master-Command» и «Relative-Coupling» в зави-

сисимости от суммарного отклонения относительных величин скорости и момента на каждом АД. Описанное в [3] сокращение деформаций промежуточной ветви ленты в переходных режимах, заключающееся в поддержании незначительной разницы скоростей двух приводных барабанов во время ускорения и замедления конвейера, потребует управления каждым АД по скорости, а в режиме

поддержания постоянной скорости – наоборот, по моменту.

Объект экспериментального исследования

На Рис. 1 приведена функциональная схема объекта экспериментального исследования – трехдвигательного двухбарабанного частотно-регулируемого электропривода шахтного ленточного конвейера марки 2Л100У-01. Многоинверторный ПЧ представлен тремя трехфазными двухуровневыми автономными инверторами напряжения (АИН1, АИН2, АИН3), питающимися от общего звена постоянного напряжения ЗПН. Исполнение АИН взрывозащищенное, диапазон выходной частоты 0,5...400 Гц, точность поддержания частоты до 0,5%. Выбор данной электроприводной установки в качестве объекта исследования обусловлен тем, что задача управления многодвигательным многобарабанным приводом в данном случае включает совместную работу АД как на одном приводном барабане (АД1 и АД2 с редукторами РЕД1 и РЕД2 соответственно), так и на нескольких приводных барабанах (АД3 с редуктором РЕД3 по отношению к остальным). Каталожные параметры приводных АД марки ВА280S4 и конвейера 2Л100У-01 приведены в [4].

Также в [4] показана компьютерная модель электропривода конвейера 2Л100У-01 с прямым управлением моментом ЧРП в MATLAB/Simulink и результаты моделирования системы автоматического регулирования скорости. Каждый АД регулируется индивидуально по скорости и моменту,

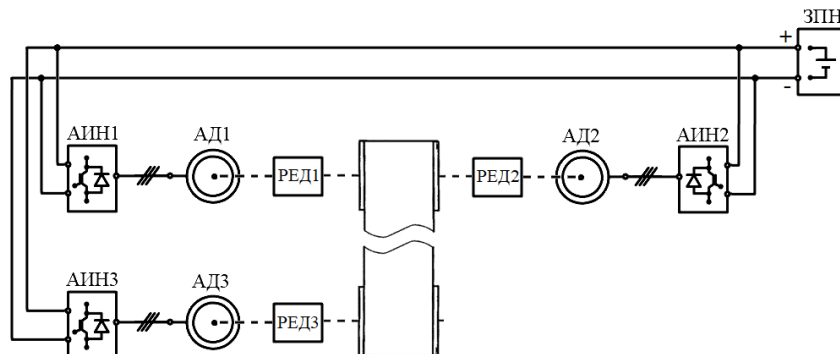


Рис. 1. Функциональная схема ЧРП ленточного конвейера 2Л100У-01
Fig. 1. Functional diagram of the 2L100U-01 belt conveyor with a variable frequency drive

отрабатывая одинаковый по величине сигнал задания скорости с синусоидальным профилем ускорения, а система выравнивания нагрузки между агрегатами отсутствует. Полученные в [4] положительные результаты подтверждают эффективность предложенного технического решения только для АД и редукторов с абсолютно идентичными параметрами, что, как было упомянуто ранее, для реального оборудования практически недостижимо.

Для более точного приближения разработанной модели к реальным технологическим условиям с применением программного комплекса [21] был осуществлен расчет параметров схемы замещения каждого из трех АД по отдельности, чтобы допустимые отклонения значений контрольных точек (номинального момента, КПД, пускового тока и момента, перегрузочной способности, коэффициента мощности) составили $\pm 5\%$ от каталожных данных. Построенные по результатам расчета естественные механические характеристики трих АД марки ВА280S4 номинальной мощностью $P_{ном} = 110$ кВт представлены на Рис. 2.

то, что АД2 в течение всего периода моделирования работает в режиме асинхронного генератора, в то время как АД1 и АД3 перегружены до двукратного значения электромагнитного момента M_{AD} , равного 1400 Н·м. Данный момент нагрузки АД приводит к двукратной перегрузке по току, равной 400 А при номинальном токе 200 А. Длительная работа электропривода в таком режиме недопустима и должна вызвать срабатывание защиты от перегрева, поэтому внедрение системы выравнивания моментов всех АД становится необходимым условием обеспечения длительной устойчивой работы ленточного конвейера.

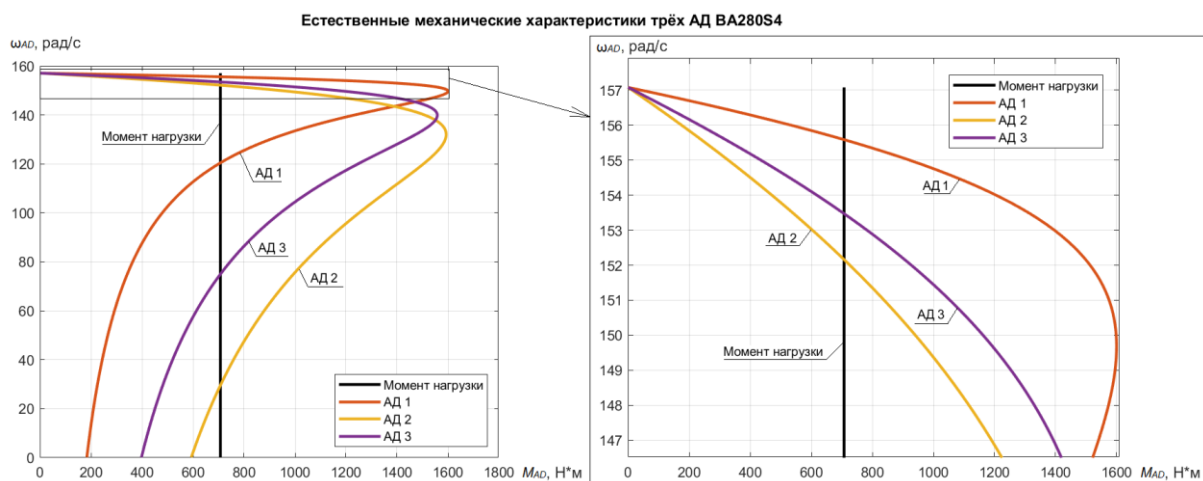


Рис. 2. Естественные механические характеристики трёх АД ВА280S4 с отклонением параметров $\pm 5\%$
 Fig. 2. Natural mechanical characteristics of the three BA280S4 asynchronous machines with a parameter deviation of $\pm 5\%$

Анализ характеристик на Рис. 2 показывает, что при номинальной нагрузке привода, когда каждый двигатель должен быть нагружен на номинальный момент $M_{ном} = 700$ Н·м, разность угловых скоростей двигателей ω_{AD} может достигать до $3,5$ рад/с для АД1 и АД2. При заданном номинальном значении угловой скорости $\omega_{AD} = 155$ рад/с разброс значений моментов нагрузки АД1 и АД2 на одном валу будет составлять от 325 до 900 Н·м, что приведет не только к низким энергетическим характеристикам каждого АД, но и к избыточным крутильным деформациям валопровода.

В целях экспериментальной фиксации негативных эффектов в системе электропривода с неодинаковыми параметрами в MATLAB/Simulink выполнено компьютерное моделирование схемы ЧРП с прямым управлением моментом и регулированием скорости без функции выравнивания нагрузок. Приведенные на Рис. 3 осциллограммы результатов моделирования иллюстрируют отработку всеми двигателями заданного профиля угловой скорости со статической ошибкой, не превышающей 5% и обусловленной соответствующим отклонением значений передаточных чисел редукторов от номинального $i_{ред.ном} = 20$. К недостаткам системы относится

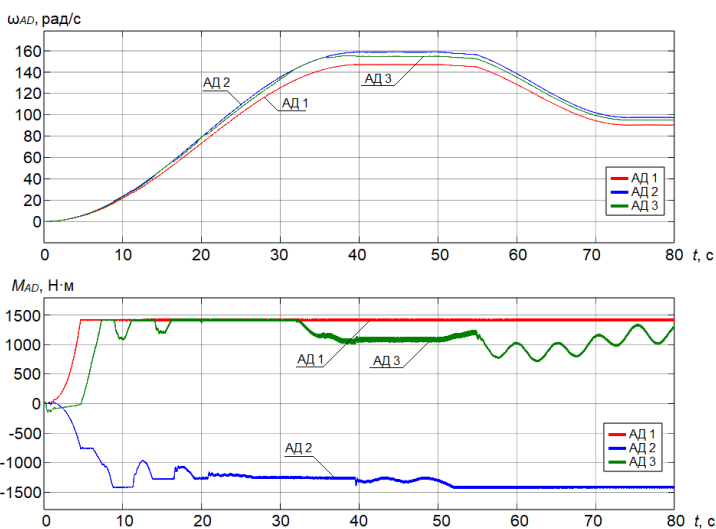


Рис. 3. Осциллограммы угловых скоростей и электромагнитных моментов АД в системе ЧРП без выравнивания нагрузок
 Fig. 3. Oscillograms of angular velocities and electromagnetic torques of the asynchronous motors in a variable frequency drive system without load balancing

Разработка САУ многодвигательным ЧРП

На Рис. 4 изображена структурная схема разработанной САУ распределением нагрузок ЧРП ленточного конвейера. В данной схеме ПИ-регулятор угловой скорости PI_{ω} с пропорциональным и интегральными коэффициентами $K_p = 60$ и $K_i = 600$ вырабатывает усредненный сигнал задания момента

привода M_{ref} на основе разности сигнала задания угловой скорости ω_{ref} , поступающего с синусоидального задатчика интенсивности ЗИ [4], и приведенного к ведущему валу среднего значения угловой скорости всех трех ведомых валов редукторов ω_{red1} , ω_{red2} , ω_{red3} . Сигнал M_{ref} поступает на каждую систему прямого управления моментом DTC1, DTC2, DTC3, внутренняя структура которой представлена ранее в [4]. Дополнительно в каждый канал управления моментом АД включен интегральный регулятор с коэффициентом усиления 100, осуществляющий выработку корректирующего сигнала по моменту ΔM_1 , ΔM_2 , ΔM_3 в зависимости от относительных величин ошибки угловой скорости $\epsilon_{\omega 1}$, $\epsilon_{\omega 2}$, $\epsilon_{\omega 3}$ и ошибки момента ϵ_{M1} , ϵ_{M2} , ϵ_{M3} .

Сигналы задания момента M_{refAD1} , M_{refAD2} , M_{refAD3} соответственно для АД1, АД2, АД3, сформированные согласно схеме на Рис. 4, выражаются следующим образом:

$$\begin{cases} M_{refAD1} = M_{ref} + \Delta M_1 - \Delta M_3 \\ M_{refAD2} = M_{ref} + \Delta M_2 - \Delta M_3 \\ M_{refAD3} = M_{ref} + \Delta M_3 \end{cases} \quad (1)$$

При разработке САУ принято, что заданные моменты АД1 и АД2 будут отличаться от приведенной к валу АД величины момента на соответствующем редукторе M_{red}^* на величину ΔM :

$$\begin{cases} M_{refAD1} = M_{red1}^* + \Delta M_1 \\ M_{refAD2} = M_{red2}^* + \Delta M_2 \end{cases} \quad (2)$$

где $M_{red}^* = M_{red} / 20$ – приведенное к валу АД значение момента редуктора.

При вычислении в системе приведенных вели-

чин передаточное отношение принимается равным номинальному $i_{red.nom} = 20$, без учета неизвестной величины отклонения, компенсация которой осуществляется введением ΔM .

На первом приводном барабане должно быть выполнено условие равенства приведенных механических моментов $M_{red1}^* = M_{red2}^*$, при котором приведенные угловые скорости тихоходных валов редукторов $\omega_{red1}^* = \omega_{red2}^*$ равны, и деформаций валапровода АД1–АД2 не возникает.

Для случая двухбарабанного привода, как указано в [3], синхронизация одних только скоростей приводных барабанов $\omega_{b1} = \omega_{b2}$ не обеспечивает равенства отмеченных на Рис. 4 перемещений соответствующих точек ленты x_1 , x_2 , расположенных на ободах этих барабанов, по причине деформации участка ленты между этими точками. Поэтому вводится понятие коэффициента распределения тяговых усилий K_y между двумя приводными барабанами:

$$K_y = \frac{(M_{red1} + M_{red2})\omega_{b1}x_2}{M_{red3}\omega_{b2}x_1} \quad (3)$$

При равенстве нагрузок приводных барабанов и отсутствии деформации ленты при $x_1 = x_2$ должно соблюдаться равенство $K_y = 2$, отсюда из (1), (2) и (3) получено требуемое значение приведенного момента третьего редуктора:

$$\begin{aligned} M_{red3}^* &= \frac{M_{red1}^* + M_{red2}^*}{2} = \\ &= \frac{M_{refAD1} - \Delta M_1 + M_{refAD2} - \Delta M_2}{2} = \end{aligned}$$

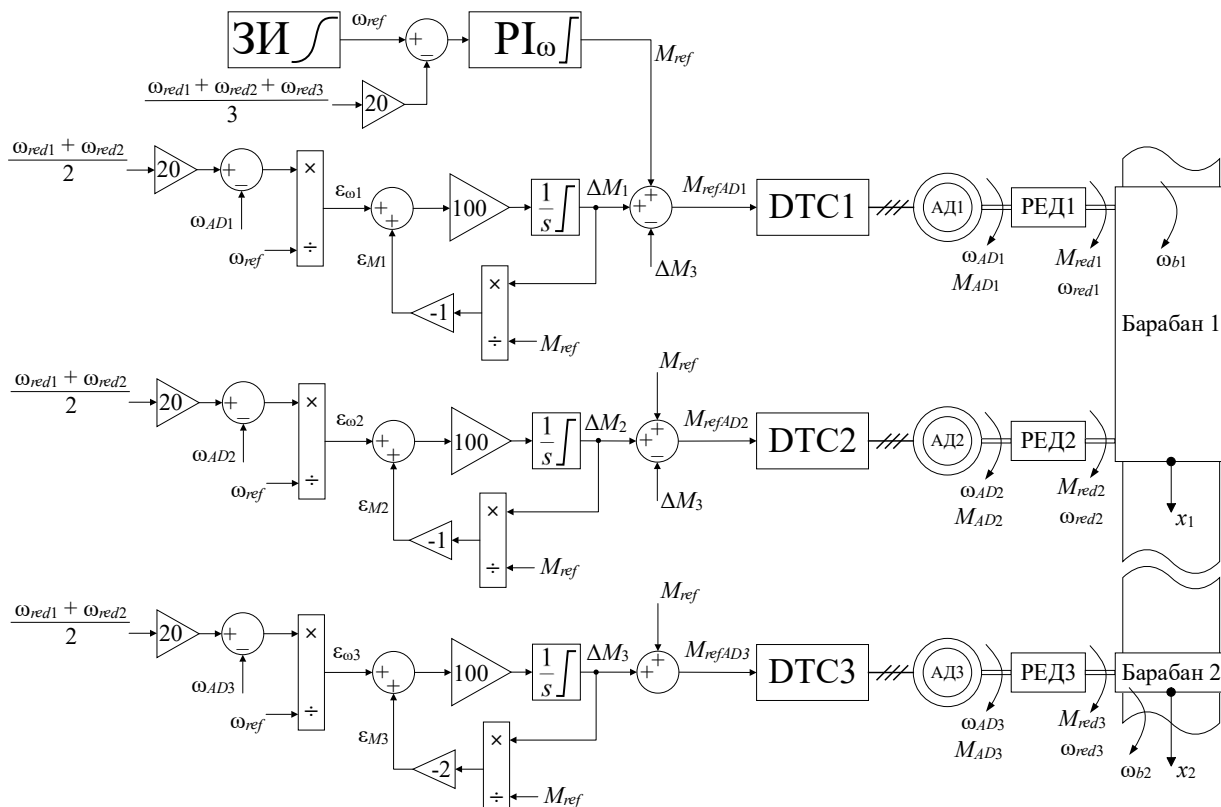


Рис. 4. Структурная схема САУ распределением нагрузок ЧРП ленточного конвейера с DTC
Fig. 4. Structural diagram of a load distribution automatic control system for a variable frequency belt conveyor drive with DTC

$$= \frac{2M_{ref} - 2\Delta M_3}{2} = M_{ref} - \Delta M_3.$$

Относительные величины статических ошибок по скорости и моменту каждого АД вместе с коэффициентами обратных связей регуляторов величин ΔM в схеме на Рис. 4 определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\omega 1} &= \frac{0,5(\omega_{red1*} + \omega_{red2*}) - \omega_{AD1}}{\omega_{ref}}; \\ \varepsilon_{\omega 2} &= \frac{0,5(\omega_{red1*} + \omega_{red2*}) - \omega_{AD2}}{\omega_{ref}}; \\ \varepsilon_{\omega 3} &= \frac{0,5(\omega_{red1*} + \omega_{red2*}) - \omega_{AD3}}{\omega_{ref}}; \\ \varepsilon_{M1} &= \frac{M_{red1*} - M_{refAD1}}{M_{ref}} = \\ &= \frac{M_{refAD1} - \Delta M_1 - M_{refAD1}}{M_{ref}} = -1 \cdot \frac{\Delta M_1}{M_{ref}}; \\ \varepsilon_{M2} &= \frac{M_{red2*} - M_{refAD2}}{M_{ref}} = \\ &= \frac{M_{refAD2} - \Delta M_2 - M_{refAD2}}{M_{ref}} = -1 \cdot \frac{\Delta M_2}{M_{ref}}; \\ \varepsilon_{M3} &= \frac{M_{red3*} - M_{refAD3}}{M_{ref}} = \\ &= \frac{M_{ref} - \Delta M_3 - M_{ref} - \Delta M_3}{M_{ref}} = -2 \cdot \frac{\Delta M_3}{M_{ref}}, \end{aligned}$$

где $\omega_{red}^* = 20 \cdot \omega_{red}$ – приведенное к валу АД значение угловой скорости тихоходного вала редуктора.

Действительное передаточное отношение редукторов i_{red} связывает угловые скорости ведущего вала редуктора на стороне АД ω_{AD} и ведомого вала редуктора ω_{red} , а также моменты на валу АД M_{mehAD} и на валу нагрузки M_{red} :

$$i_{red} = \frac{\omega_{AD}}{\omega_{red}} = \frac{M_{red}}{M_{mehAD} \cdot \eta_{red}} = \frac{20 \cdot M_{red}^*}{M_{mehAD} \cdot \eta_{red}}, \quad (4)$$

где η_{red} – КПД редуктора, для упрощения принимаемый для всех редукторов равным 95%.

Приравнявая $M_{red1}^* = M_{red2}^* = M_{red3}^*$ с подстановкой выражения (4), получаем условие (5) равенства нагрузок всех трех АД:

$$\frac{M_{mehAD1} \omega_{AD1}}{\omega_{red1}} = \frac{M_{mehAD2} \omega_{AD2}}{\omega_{red2}} = \frac{M_{mehAD3} \omega_{AD3}}{\omega_{red3}}. \quad (5)$$

Принимая, что при успешной работе САУ угловые скорости тихоходных валов редукторов равны угловым скоростям барабанов, а также между собой, т. е. $\omega_{red1} = \omega_{red2} = \omega_{red3}$, из (5) получено выражение (6):

$$P_{meh1} = P_{meh2} = P_{meh3}, \quad (6)$$

где $P_{meh} = M_{mehAD} \cdot \omega_{AD}$ – механическая мощность на валу АД.

Таким образом, согласно равенству (6), при успешном выравнивании нагрузок в многодвигательном электроприводе конвейера должно быть обеспечено равенство коэффициентов загрузки по механической мощности каждого приводного АД, что проверяется экспериментально методом компьютерного моделирования разработанной САУ в MATLAB/Simulink.

Результаты моделирования и их обсуждение

Моделирование было проведено для динамического режима пуска конвейера (изменение скорости

ленты $v(t)$ от 0 до 2,5 м/с в период от 0 до 40 с), установившегося режима работы ($v(t) = 2,5$ м/с в период от 40 до 50 с), снижения загрузки и одновременного замедления конвейера (изменение скорости от 2,5 м/с до 1,5 м/с в период от 50 до 65,7 с по синусоидальному закону) и режима работы на пониженной скорости $v(t) = 1,5$ м/с. Разработанная САУ скоростью привода обеспечивает обработку задания скорости ленты с заданным профилем ускорения, с отсутствием статической ошибки, перерегулирования и пробуксовок, что подтверждается осциллограммой скоростей точек ленты на приводных барабанах на Рис. 5.

Соответствующие осциллограммы угловой скорости ω_{AD} , электромагнитного момента M_{AD} и момента нагрузки M_{mehAD} приводных асинхронных двигателей АД1, АД2, АД3 представлены на Рис. 6. Измеренные в установившемся режиме работы значения величин заданной ω_{ref} и текущей угловой скорости АД ω_{AD} , приведенной угловой скорости тихоходных валов редукторов ω_{red}^* , вычисленные по (7) значения относительной погрешности угловой скорости $\delta\omega_{AD}$, а также передаточные числа редукторов i_{red} и их отклонения δi_{red} от номиналь-

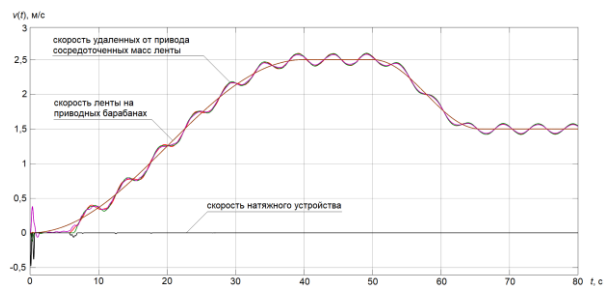


Рис. 5. Линейные скорости (м/с) точек конвейерной ленты и натяжного устройства
Fig. 5. Linear speeds (m/s) of the conveyor belt points and tensioner

ного $i_{red.nom} = 20$ приведены в Таблице 1. Представленные результаты моделирования подтверждают равенство относительных отклонений угловой скорости каждого АД соответствующему отклонению передаточного числа редуктора, а также обеспечение равенства угловых скоростей всех тихоходных валов заданному значению ω_{ref} с нулевой статической ошибкой.

$$\delta\omega_{AD} = \frac{\omega_{AD} - \omega_{red}^*}{\omega_{red}^*} \cdot 100\% \quad (7)$$

Анализ осциллограмм электромагнитного момента M_{AD} и механического момента M_{mehAD} на Рис. 6, а также осциллограмм относительной механической мощности $P_{meh} = M_{mehAD} \cdot \omega_{AD} / P_{nom}$ на Рис. 7 подтверждает выполнение условий (5), (6) равенства механических нагрузок на валу каждого из асинхронных двигателей АД1, АД2, АД3. В условиях отклонений передаточных чисел редукторов моменты АД распределяются обратно пропорционально соотношению угловых скоростей тихоходных валов редукторов. Максимальная относительная погрешность распределения мощности привода между агрегатами вычисляется по формуле (8) и составляет $\delta P_{meh} = 2,5\%$ для АД2 и АД3.

Как показывает график коэффициента распределения тяговых усилий K_y на Рис. 8, практически в течение всего времени моделирования во всех режимах работы, кроме начальных секунд пуска при близкой к нулю скорости, обеспечено требуемое значение выражения (3) $K_y = 2$, что исключает провис или избыточное натяжение ленты между двумя приводными барабанами. Также к положительным характеристикам системы относится максимальное значение тока статора АД $I = 197$ А, достигаемое при пуске конвейера, что примерно равно номинальному току АД $I_{nom} = 200$ А и, следовательно,

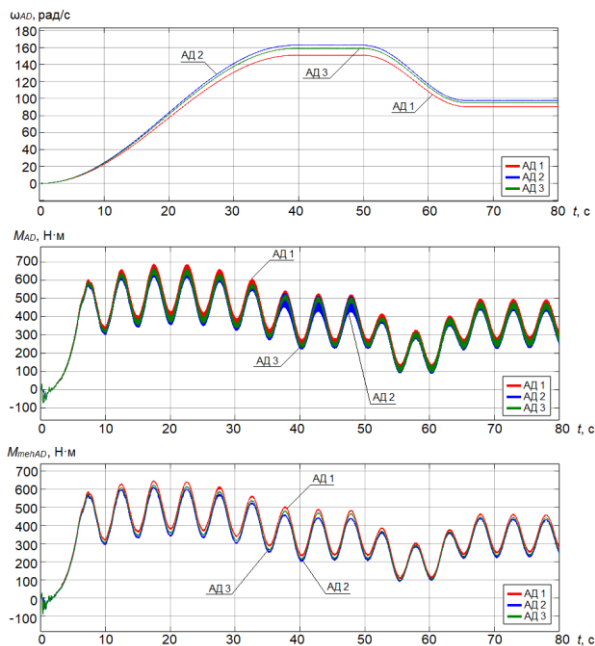


Рис. 6. Осциллограммы угловой скорости ω_{AD} (рад/с), электромагнитного момента M_{AD} (Н·м) и момента нагрузки M_{mehAD} (Н·м) асинхронных двигателей АД1, АД2, АД3
Fig. 6. Oscillograms of angular velocity ω_{AD} (rad/s), electromagnetic torque M_{AD} (Nm) and load torque M_{mehAD} (Nm) of AD1, AD2, AD3 asynchronous motors

позволяет полностью исключить токовые перегрузки в электротехнической системе. В отличие от Рис. 3, в разработанной системе также отсутствуют перегрузки по моменту привода, так как значения механического момента АД достигают максимума в режиме ускорения конвейера и минимума в режиме замедления, но не выходят за диапазон от 0

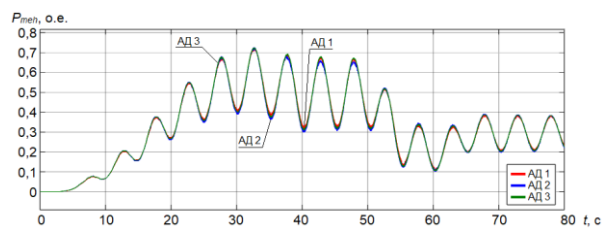


Рис. 7. Значения механической мощности P_{meh} (о.е.) асинхронных двигателей АД1, АД2, АД3
Fig. 7. Mechanical power P_{meh} values (p.u.) of AD1, AD2, AD3 asynchronous motors

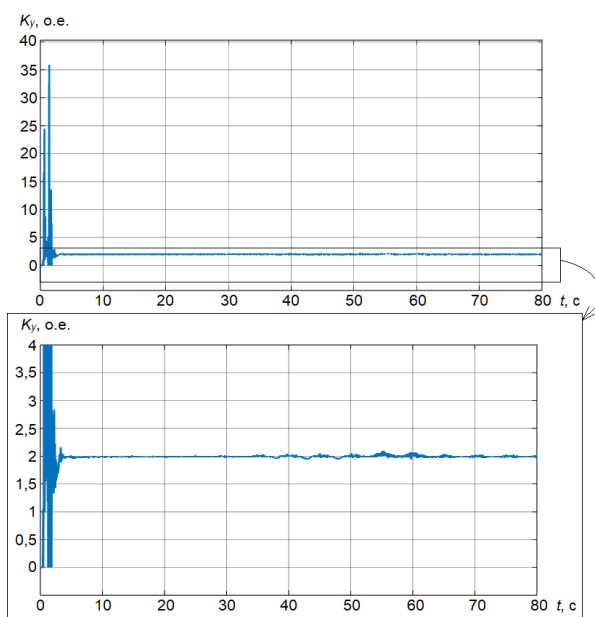


Рис. 8. Значение коэффициента распределения тяговых усилий K_y (о.е.)
Fig. 8. Value of traction forces distribution coefficient K_y (p.u.)

до номинального момента $M_{nom} = 700$ Н·м, а диапазон пульсаций момента составляет от 20 Н·м на низких скоростях до 60 Н·м на максимальной скорости.

Выводы

Разработанная и представленная в настоящей статье компьютерная модель системы автоматического управления многодвигательным электроприводом ленточного конвейера с прямым управлением моментом представляет собой решение задачи выравнивания нагрузок в многодвигательном асинхронном приводе при частотном регулировании

Таблица 1. Результаты моделирования САУ скоростью электропривода в установившемся режиме работы при скорости ленты 2,5 м/с

Table 1. Simulation results of the electric drive speed automatic control system in steady-state operation at a belt speed of 2.5 m/s

	ω_{ref} , рад/с	ω_{AD} , рад/с	ω_{red*} , рад/с	$\delta\omega_{AD}$, %	i_{red} , о.е.	δi_{red} , %
АД1, РЕД1	158,7	150,8	158,7	-5,0	19,0	-5,0
АД2, РЕД2	158,7	162,7	158,7	2,5	20,5	2,5
АД3, РЕД3	158,7	158,7	158,7	0	20,0	0

$$\delta P_{meh} = \max \left(\frac{|P_{meh1} - P_{meh2}|}{P_{nom}}, \frac{|P_{meh2} - P_{meh3}|}{P_{nom}}, \frac{|P_{meh1} - P_{meh3}|}{P_{nom}} \right) \cdot 100\% \quad (8)$$

скорости. САУ поддерживает равенство механических мощностей каждого приводного электродвигателя с точностью 2,5% в статических и переходных режимах работы конвейера, при этом система электропривода работает без токовых и механических перегрузок оборудования, без отклонений текущего значения величины скорости ленты от заданного. САУ с синхронизацией скоростей приводных барабанов и индивидуальной корректировкой механических моментов двигателей показывает способность обеспечить устойчивую работу ленточного конвейера без наступления ненормальных режимов работы, что позволяет избежать значительного износа оборудования.

Реализация предложенной в настоящей работе схемы САУ потребует установки датчиков угловой скорости как на тихоходный вал каждого редуктора, так и на вал каждого двигателя, поэтому для системы из трех АД общее количество применяемых тахогенераторов составляет 6 штук. В целях снижения общего числа датчиков система прямого управления моментом каждого АД может быть спроектирована бездатчиковой с наблюдателем состояния, разработка и моделирование которого является одним из возможных направлений дальнейших исследований.

Также перспективным направлением исследования выступает повышение энергетической эффективности многодвигательного ЧРП, питающегося от общего звена постоянного напряжения. При снижении нагрузки и торможении конвейера момент привода может снизиться до отрицательных значений, поэтому необходимо реализовать возможность двунаправленного обмена энергией между ЧРП и питающей сетью. Разработка САУ активным выпрямителем напряжения позволит обеспечить рекуперацию энергии в сеть и формирование на стороне сети заданного коэффициента мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jurdziak L., Bajda M. Balancing Load and Speed: A New Approach to Reducing Energy Use in Coal Conveyor Systems // *Energies*. 2025. Т. 18. № 17. С. 4716. DOI: 10.3390/en18174716.
2. 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.
3. Дмитриев В. Г., Вержанский А. П. Основы теории ленточных конвейеров. М. : Горная книга, 2017. 572 с.
4. 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.
5. Bebic M. Z., Ristic L. B. Speed controlled belt conveyors: drives and mechanical considerations // *Advances in electrical and computer engineering*.

2018. Т. 18. № 1. Pp. 51–60. DOI: 10.4316/AECE.2018.01007.

6. 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.

7. Wheatley G., Rubel R. I. Analysis of conveyor drive power requirements in the mining industry // *Acta Logistica*. 2021. Т. 8. С. 37–43. DOI: 10.22306/al.v8i1.200.

8. Бабокин Г. И. Двухдвигательный электропривод конвейера с системой выравнивания нагрузок // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2010. № 3–2. С. 230–234.

9. Алиев С. Б., Брейдо И. В., Данияров Н. А., Келисбеков А. К. Управление распределением нагрузок между электроприводами многодвигательного пластинчатого конвейера при безперегрузочной доставке угля в условиях открытых горных работ // *Уголь*. 2020. № 9 (1134). С. 14–17. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-14-17.

10. Волков Д. В. Автоматическое выравнивание нагрузки в многодвигательном электроприводе // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 9 (105). С. 1–10.

11. Ибрагимов С. Д. Разработка системы автоматического управления многодвигательным электроприводом магистрального конвейера САУ МЭМК // *Актуальные исследования*. 2023. № 21 (151). Ч. I. С. 22–30.

12. Сальников В. С., Шадский Г. В. Многодвигательный привод технологических машин // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 4. С. 7–15. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-4-7-15.

13. Bostan A., Stroia M. D., Hațiegan C. Solution for Synchronizing two Belt Conveyers using Motors with different Speeds Drive // *International conference Knowledge-Based Organization*. 2021. Т. 27. № 3. С. 1–6. DOI: 10.2478/kbo-2021-0081.

14. 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.

15. Yang C., Liu J., Li H., Zhou L. Energy modeling and parameter identification of dual-motor-driven belt conveyors without speed sensors // *Energies*. 2018. Т. 11. № 12. Art. 3313. DOI: 10.3390/en11123313.

16. Овсянников Д. С., Шпрехер Д. М. Согласованное управление многодвигательным электроприводом скребкового конвейера // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2025. Т. 68. № 1. С. 49–57. DOI: 10.17213/0136-3360-2025-1-49-57.

17. Niu F., Sun K., Huang S., Hu Y., Liang D., Fang Y. A review on multimotor synchronous control methods // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2022. Т. 9. № 1. С. 22–33. DOI: 10.1109/TTE.2022.3168647.

18. Zhang X., Hu H., Wang H., Wang Z. Overview of position synchronous control technology for multimotor system // *Systems Science & Control Engineer-*

ing. 2024. Т. 12. № 1. Art. 2427074.
DOI: 10.1080/21642583.2024.2427074.

19. Mu Y., Qi L., Sun M., Han W. An Improved Deviation Coupling Control Method for Speed Synchronization of Multi-Motor Systems // Applied Sciences. 2024. Т. 14. № 12. Art. 5300. DOI: 10.3390/app14125300.

20. Lucian P., Gheorghe S. Optimizing the way kinematical feed chains with great distance between slides are chosen for CNC machine tools // IOP Con-

ference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2017. Т. 227. № 1. Art. 012076. DOI: 10.1088/1757-899X/227/1/012076.

21. Дзюин Д. В., Дмитриева В. В. Разработка программы расчета параметров схемы замещения трехфазного асинхронного электродвигателя // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. № 3. С. 84–92. DOI: 10.30987/2658-6436-2024-3-84-92.

© 2026 Авторы. 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:

Дзюин Дмитрий Владленович, аспирант, ассистент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1), ORCID: 0009-0007-0411-9948, e-mail: dzyuin.d@gubkin.ru

Дмитриева Валерия Валерьевна, доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1), к.т.н., доцент, ORCID: 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 корректура текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-83-93

Dmitry V. Dzyuin, Valeria V. Dmitrieva

National University of Oil and Gas “Gubkin University”

* for correspondence: dzyuin.d@gubkin.ru

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH LOAD BALANCING FOR A MULTI-MOTOR VARIABLE FREQUENCY ELECTRIC DRIVE OF A BELT CONVEYOR



Article info

Received:

19 December 2025

Accepted for publication:

15 May 2026

Accepted:

15 June 2026

Keywords: multiphysical modeling, tuning capacitor (trimmer), electromagnetic exciter, low-frequency oscillations, resonant

Abstract.

This paper explores multiphysical modeling of a key power supply circuit element – a tuning capacitor (trimmer) integrated into a series resonant circuit of an electromagnetic exciter of low-frequency mechanical oscillations (EMF LFO). The study focuses on the targeted optimization of the electrical mode of the EMF LFO to achieve an ideal (artificial) mechanical characteristic. This paper introduces for the first time the key concepts of artificial (ideal circle) and natural (oval/ellipse) mechanical characteristics, defined as the locus of points of the total traction force (F_{Σ}) as a function of the air gap (δ). It is substantiated that the transition to the optimal shape of the characteristic is achieved by fine-tuning the electrical capacitance of the circuit. A detailed mathematical and physical description of the tuning capacitor is provided within the framework of a multiphysical model. Modeling has demonstrated a direct relationship between the electrical parameters, mechanical characteristic, and the EMF state vector diagram. An optimality condition was established and confirmed: the F_{Σ} trajectory approaches a perfect circle as closely as possible when the angle between the velocity vector and the traction vector is close to 30° . This

circuit, voltage resonance, mechanical characteristic, vector diagram

mode is achieved at a specific rotation angle (α) of the tuning capacitor, corresponding to the optimal capacitance (C_{opt}). A key practical result is the precise determination of the $C(\Delta)$ dependence. This proves the fundamental feasibility of automated control of the system's electrical mode: mechanical adjustment of the trimmer's rotation angle allows for precise adjustment of the electrical capacitance, ensuring voltage resonance. Thus, the simulation results confirm the feasibility of remote, automated control of the EME LFO operating mode. To ensure reliability, the simulation process includes all stages—from geometry creation to post-processing and visualization of dynamic processes. Successful verification of the methodology allowed for the creation of a standalone application with a user interface, significantly increasing design efficiency and the applicability of this methodology to other EME LFO modifications.

For citation: Dzyuin D.V., Dmitrieva V.V. Automatic Control System with Load Balancing for a Multi-Motor Variable Frequency Electric Drive of a Belt Conveyor. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2026; 3(185):83-93 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-83-93, EDN: UOJLLW

REFERENCES

1. Jurdziak L., Bajda M. Balancing Load and Speed: A New Approach to Reducing Energy Use in Coal Conveyor Systems. *Energies*. 2025; 18(17):4716. (In Eng.) DOI: 10.3390/en18174716.
2. 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.)
3. Dmitriev V.G., Verzhansky A.P. Fundamentals of the theory of belt conveyors. Moscow: Gornaya kniga; 2017. 572 p. (In Russ.)
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Wheatley G., Rubel R.I. Analysis of conveyor drive power requirements in the mining industry. *Acta Logistica*. 2021; 8:37–43. (In Eng.) DOI: 10.22306/al.v8i1.200.
8. Babokin G.I. The two-impellent electric drive of the conveyor with system of alignment of loadings. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = News of the Tula State University. Technical Sciences. 2010; 3(2):230–234. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Aliev S.B., Breido J.V., Daniyarov N.A., Kelisbekov A.K. Control of load distribution between electric drives of a multi-motor plate conveyor for non-overloading coal delivery in surface mining conditions. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2020; 9(1134):14–17. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-14-17.
10. Volkov D.V. The automatic equalization of loads in multi motor electric drives. *Inženernyj vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2023; 9(105):1–10. (In Russ.)
11. Ibragimov S.D. Development of an automatic control system for a multi-motor electric drive of the main conveyor ACS MEMC. *Aktual'nye issledovaniya = Current Research*. 2023; 21(151):22–30. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Salnikov V.S., Shadsky G.V. Multi-motor drive of technological machines. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = News of the Tula State University. Technical Sciences. 2022; 4:7–15. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.24412/2071-6168-2022-4-7-15.
13. Bostan A., Stroia M.D., Hatjegan C. Solution for Synchronizing two Belt Conveyers using Motors with different Speeds Drive. *International conference Knowledge-Based Organization*. 2021; 27(3):1–6. (In Eng.) DOI: 10.2478/kbo-2021-0081.
14. 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. (In Eng.) DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2810258.
15. Yang C., Liu J., Li H., Zhou L. Energy modeling and parameter identification of dual-motor-driven belt conveyors without speed sensors. *Energies*. 2018; 11(12):3313. (In Eng.) DOI: 10.3390/en11123313.
16. Ovsyannikov D.S., Shprekher D.M. Coordinated Control of a Multi-Motor Electric Drive of a Scraper Conveyor. *Russian Electromechanics*. 2025; 68(1):49–57. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.17213/0136-3360-2025-1-49-57.
17. Niu F., Sun K., Huang S., Hu Y., Liang D., Fang Y. A review on multimotor synchronous control methods. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2022; 9(1):22–33. (In Eng.) DOI: 10.1109/TTE.2022.3168647.
18. Zhang X., Hu H., Wang H., Wang Z. Overview of position synchronous control technology for multi-

motor system. *Systems Science & Control Engineering*. 2024; 12(1):2427074. (In Eng.) DOI: 10.1080/21642583.2024.2427074.

19. Mu Y., Qi L., Sun M., Han W. An Improved Deviation Coupling Control Method for Speed Synchronization of Multi-Motor Systems. *Applied Sciences*. 2024; 14(12):5300. (In Eng.) DOI: 10.3390/app14125300.

20. Lucian P., Gheorghe S. Optimizing the way kinematical feed chains with great distance between

slides are chosen for CNC machine tools. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing/ 2017; 227(1):012076. (In Eng.) DOI: 10.1088/1757-899X/227/1/012076.

21. Dzyuin D.V., Dmitrieva V.V. Developing a Program for Calculating the Equivalent Circuit Parameters of a Three-Phase Asynchronous Electric Motor. *Automation and modeling in design and management*. 2024; 3(25):84–92. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.30987/2658-6436-2024-3-84-92.

© 2026 The Authors. 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: 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: 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 modeling; 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.

Authors have read and approved the final manuscript.

