

На правах рукописи



Каунг Пьей Аунг

**Разработка и исследование системы автоматической
стабилизации тягового фактора двухприводного
ленточного конвейера**

Специальность 05.13.06

«Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)»

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва 2018

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Кубрин Сергей Сергеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Колосов Олег Сергеевич,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ», кафедра Управления и
информатики, профессор;

кандидат технических наук
Бабаков Сергей Евгеньевич,
АО Научно-исследовательский институт вычислительных
комплексов "НИИВК" им. М.А. Карцева", главный специалист

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет» (ФГБОУ ВО «УГГУ»), г.Екатеринбург

Защита диссертации состоится «30» мая 2018 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.13 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте www.misis.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент



Лычев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень проработанности темы исследования.

Повышение эффективности горнодобывающих предприятий, обеспечение безопасности проведения горных работ, рост длин очистных участков угольных шахт требуют увеличения нагрузки на системы транспортирования полезных ископаемых, что влечет необходимость применения высокопроизводительных конвейерных установок большой мощности.

Большой объем и неравномерность загрузки являются основными причинами проскальзывания ленты на приводных барабанах конвейера, что увеличивает износ и число отказов транспортной магистрали. Поэтому создание автоматической системы стабилизации тягового фактора – соотношения между натяжениями в набегающей и сбегающей ветвях конвейерной ленты конвейерных установок большой мощности с двумя приводами - актуально для угольных предприятий Российской Федерации и Республики Союза Мьянма.

Вопросам стабилизации тягового фактора ленточных конвейерных установок посвящены работы многих ученых. Александр Онисимович Спиваковский (1888—1986), член-корреспондент Академии наук СССР, поставил задачу регулирования тягового фактора. В конце 60-х годов прошлого столетия Солод Г.И., Шахмейстер Л.Г., Мерцалов Р.В. сформулировали задачу создания системы автоматической стабилизации нагрузки на ленте конвейера. Над поставленными вопросами работали Бишеле И.В., Папоян Р.Л., Пономаренко В.А., Зарецкий О.М., Лобачева А.К., Певзнер Л.Д., Дмитриев В.Г., Назаренко В.М., Мамалыга В.М., Сокотнюк Ю.А., Дмитриева В.В., A. Butko, Zhan Zhang, Guomundur Amar, Gretarsson. Ими получены существенные результаты, внедренные в промышленность. Однако, с развитием мощной конвейерной техники на горных предприятиях задача стабилизации тягового фактора не только не потеряла своей актуальности, но и приобрела необходимость развития, особенно для двухприводных ленточных конвейеров.

Целью диссертации является разработка системы автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера, эксплуатируемого в шахтных условиях неравномерной загруженности.

Основная **идея работы** состоит в том, что регулирование тягового фактора двухприводного ленточного конвейера осуществляется с помощью автоматически управляемого устройства натяжения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выполнить научно-технический анализ литературных источников по проблеме повышения эффективности эксплуатации магистральных ленточных конвейеров;
- разработать и исследовать математическую модель движения ленты двухприводного ленточного конвейера с учетом работы механических натяжителей;
- разработать алгоритм автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки;
- разработать автоматическую систему управления движением ленты двухприводного конвейера со стабилизацией натяжения ленты в условиях неравномерной нагрузки;
- использование результатов диссертационного исследования на угольных шахтах Российской Федерации и на шахте «Калева» Республики Союз Мьянма.

Научные положения, разработанные соискателем, и их новизна:

- разработанная математическая модель ленточного конвейера отличается тем, что учитывает использования двух приводов и работу натяжного устройства, адекватно описывает динамические процессы движения ленты конвейера, что позволяет рассматривать эту модель как объект системы управления;
- предложенный алгоритм регулирования тягового фактора двухприводного конвейера позволяет стабилизировать его значение на расчетном уровне при штатных и нештатных режимах движения ленты;
- разработанная система автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного конвейера отличается возможностью регулировать натяжение ленты, исключаяющей ее пробуксовку на приводных барабанах конвейера в шахтных условиях неравномерной загруженности.

Научное значение диссертации заключается в разработке и обосновании алгоритма стабилизации соотношения между натяжениями в набегающей и сбегаящей ветвях конвейерной ленты конвейерных установок большой мощности, с двумя приводами в условиях неравномерной загрузки для минимизации проскальзывания ленты на приводных барабанах конвейера с целью снижения её износа и опасности возгорания.

Практическая полезность работы состоит в том, что система стабилизации тягового фактора приводит к снижению износа движущегося полотна ленточного конвейера за счет поддержания требуемого соотношения между натяжениями в набегающей и сбегаящей ветвях конвейерной ленты, и повышает эффективность эксплуатации, приводит к экономии энергоресурсов.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается корректным применением известных методов конечномерного математического моделирования динамических систем с распределенными параметрами для составления модели движения ленты конвейера, структурно близкой с известными и ранее апробированными моделями. Достоверность моделирования подтверждена достаточным на уровне 90% соответствия результатов с осциллограммами процессов движения реального ленточного конвейера и практическими наблюдениями в шахте.

Методы исследования. В работе использовались общенаучные методы анализа о параметрах и характеристиках работы конвейерных установок, теоретические методы построения математических моделей, принцип наименьшего действия, уравнение Лагранжа, методы статистики и теории вероятности, системный анализ.

Реализация полученных результатов исследования. Разработанная автоматическая система управления движением ленты двухприводного конвейера со стабилизацией натяжения ленты в условиях неравномерной нагрузки внедрена на шахте «Калева» Республики Союз Мьянма, разработанный алгоритм автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки принят к использованию на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» Российской Федерации.

Апробации работы. Основные положения и результаты работы докладывались на международной научно-практической конференции «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли» (ИПКОН РАН, 2017 г.); на 13 международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (ИПКОН РАН, 2016 г.); на международном симпозиуме «Неделя горняка» (2015 – 2018 гг.); на семинарах кафедры «Автоматизация» и кафедры «Автоматизированных систем управления» НИТУ МИСиС; на семинаре «Микроэлектроника и информатика. 2015» (НИУ МИЭТ, 2015 г.); на международной конференции «Third International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering – MAE. 2015», Rome, Italy; на международной конференции «International Academic Conference on Engineering, Technology and Innovations (IACETI-2016) », Beijing, China; на международной конференции «2017 international conference on Geo-spatial technologies and Earth resources (GTER 2017) », Hanoi, Vietnam.

Публикации. По теме исследования опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 в журнале из перечня, установленного ВАК Минобрнауки РФ, подана заявка на свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы из 146 наименований, содержит 26 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задачи повышения эффективности эксплуатации мощных ленточных конвейеров, сформулирована цель работы, изложены основные научные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна и практическая ценность работы, указаны сведения об апробации работы.

В первой главе выполнен анализ исследований по вопросам повышения эффективности эксплуатации ленточного конвейерного транспорта, определены перспективные направления исследований, результаты которых при внедрении, значительно снизят износ и опасность возгорания ленты, по вопросам повышения эффективности эксплуатации

мощных конвейерных установок. Проанализированы результаты работ, связанных с автоматическим управлением движения ленты конвейера, обоснована актуальность задачи стабилизации тягового фактора как средство повышения эффективности эксплуатации конвейера, рассмотрены различные подходы к решению задачи стабилизации величины тягового фактора ленточного конвейера.

На месторождении Калева республики Союз Мьянма большинство компаний осуществляют добычу открытым способом, постепенно переходя к добыче полезных ископаемых подземным способом. Шахта «Калева», одно из перспективных горных предприятий, расположенных на месторождении Калева, осуществляет добычу угля подземным способом с использованием ленточных конвейеров для транспортировки угля. В настоящее время вопросы повышения экономической и технической эффективности конвейерной доставки для шахты «Калева» является актуальными.

Неэффективное использование конвейерных линий связано с тем, что грузопотоки, поступающие от горных машин, обладают значительной неравномерностью во времени и наличием большого числа интервалов отсутствия груза. Существенная неравномерность загрузки полотна является основной причиной износа ленты шахтного конвейера. Анализ реального грузопотока (рис. 1) шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс» выявил, что ежедневно наблюдается один, два, иногда больше пиковых нагрузок, превышающих в 40-50 раз среднюю величину потока. Такие импульсные броски нагрузки приводят к проскальзыванию ленты на приводных барабанах конвейера.

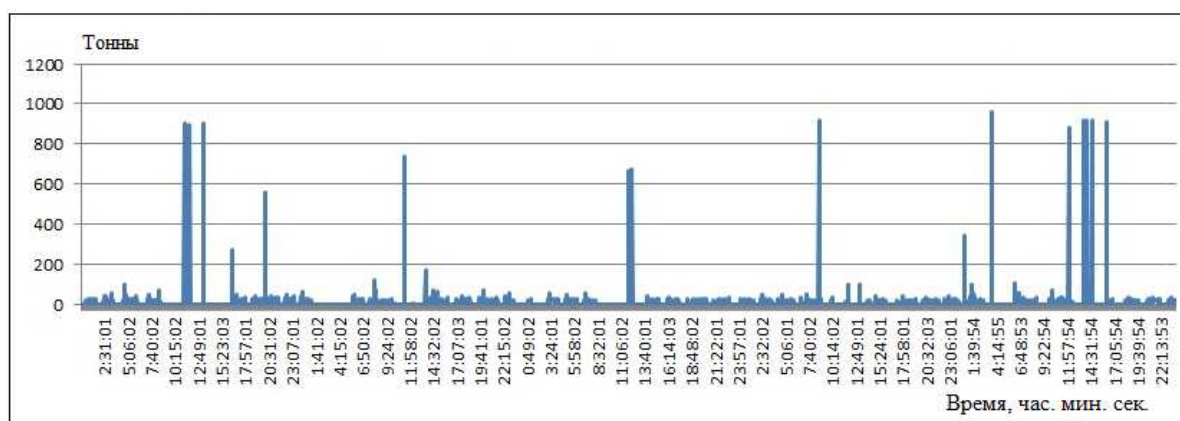


Рисунок 1. Реальный поток угля, поступающего на ленточный конвейер

Повышение эффективности эксплуатации ленточного конвейера возможно только с помощью автоматической стабилизации натяжения ленты конвейера, использующей адекватную математическую модель ленточной конвейерной установки с двумя приводами.

Во второй главе на основе принципа наименьшего действия Лагранжа разработана математическая модель ленточной конвейерной установки с двумя приводами. Ленточный конвейер является системой с распределенными параметрами, поэтому для составления математической модели ее движения принята идея кусочно-линейной аппроксимации непрерывной ленты в виде системы сосредоточенных масс, предложенная И.В. Запениным. В расчетную схему модели (рис. 2) входят сосредоточенные массы, расположенные на грузовой и порожней ветвях ленты конвейера, которые дополняются моделью управляемых электроприводов ленточного конвейера и моделью натяжного устройства.

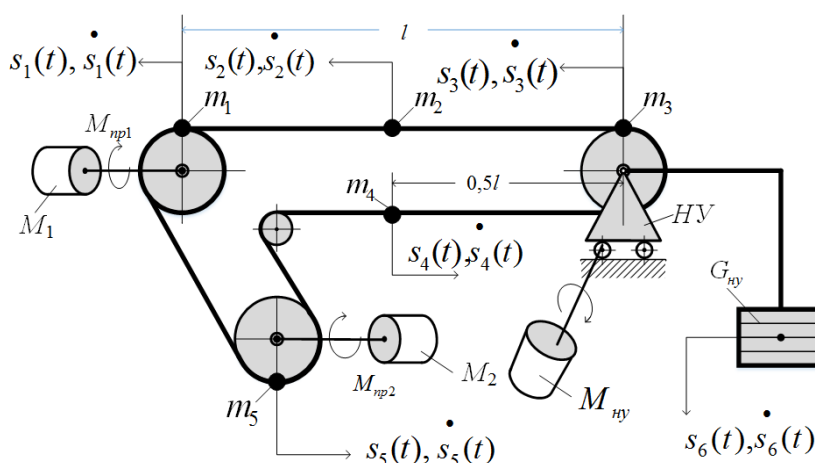


Рисунок 2. Расчетная схема ленточного конвейера с двумя приводами

В диссертации составлена расчетная схема ленточного конвейера с двумя приводами и натяжным устройством в хвостовой части на основе модели конвейера с шестью сосредоточенными массами, три из которых m_1, m_2, m_3 расположены на грузовой ветви, две m_4, m_5 – на порожней, а m_6 – представляет собой массу натяжного устройства. В качестве переменных приняты координаты положения этих масс и их скоростей: $s_i(t), \dot{s}_i(t)$, $i = \overline{1, 6}$, в том числе s_6, \dot{s}_6 – положение и скорость перемещения натяжного груза. Кинетическая энергия системы является

функцией только обобщенных скоростей, поэтому использованы уравнения Лагранжа в виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}_i} T(\dot{x}_i) \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \Pi(x_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} A(x_i) = 0, \quad i = \overline{1, 6}. \quad (1)$$

Составлена система шести дифференциальных уравнений второго порядка, в которой $T(\dot{x}_i)$, $\Pi(x_i)$ – кинетическая и потенциальная энергия i – го участка ленты, $A(x_i)$ – работа внешних сил на этом участке. Кинетическая энергия ленты и груза, равномерно распределенного на соответствующем участке между точками i и j , представлена выражением

$$T(\dot{x}_i, \dot{x}_j) = \frac{G_{ij}}{6g} (\dot{x}_i^2 + \dot{x}_i \dot{x}_j + \dot{x}_j^2), \quad (2)$$

где G_{ij} – вес ленты, роlikоопор и груза на участке между точками i и j , l_{ij} – длина участка, g – ускорение свободного падения.

Потенциальная энергия ij участка длиной l_{ij} складывается из энергии упругих деформаций и потенциальной энергии замкнутого контура ленты с распределенной массой

$$\Pi_{ij}(x_i, x_j) = c_{ij} \frac{(x_i - x_j)^2}{2} + G_{ij} l_{ij} \frac{x_i + x_j}{2} \sin \beta, \quad (3)$$

где c_{ij} – жесткость участка, β – угол наклона конвейера к горизонту.

Работа внешних сил на ij участке определяется суммой сил сопротивления движению и движущей силы привода:

$$A_{ij}(x_i, x_j) = G_{ij} l_{ij} \mu \frac{x_i + x_j}{2} \cos \beta, \quad A_{np} = -\frac{M_{np1}}{R_{\delta 1}} x_1 - \frac{M_{np2}}{R_{\delta 2}} x_5, \quad (4)$$

где μ – коэффициент сопротивления движению, M_{np1} и M_{np2} – движущие моменты приводов, приведенные к радиусам $R_{\delta 1}, R_{\delta 2}$ приводных барабанов. Работа сил внутреннего трения на участке ij определяется из предположения, что силы внутреннего трения пропорциональны скоростям деформации:

$$A_{ij}(x_i, \dot{x}_i) = 0,5\eta((\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})(x_i - x_{i+1}) + (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})(x_i - x_{i-1})), \quad (5)$$

где η – коэффициент вязкости ленты.

После соответствующих преобразований математическая модель движения загруженной ленты конвейера с двумя приводами и натяжным устройством представляется системой шести обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений.

$$\begin{aligned}
1. \quad & (2m_e + 2m_m + m_{np})\ddot{x}_1 + m_e\ddot{x}_2 + m_n\ddot{x}_3 + 2\eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_3 + 2Cx_1 - Cx_2 - Cx_3 + \\
& + 0.5(G_e l + G_n l_m)\mu \operatorname{sgn} \dot{x}_1 = \frac{M_{np1}}{R_0} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1), \\
2. \quad & m_e\ddot{x}_1 + 4m_e\ddot{x}_2 + m_e\ddot{x}_3 - \eta\dot{x}_1 + 2\eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_3 - Cx_1 + 2Cx_2 - Cx_3 + G_e l \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_2 = 0, \\
3. \quad & m_e\ddot{x}_2 + (2m_e + 2m_n)\ddot{x}_3 + m_n\ddot{x}_4 - \eta\dot{x}_2 + 2\eta\dot{x}_3 - \eta\dot{x}_4 - Cx_2 + (2C + 0.25C_k)x_3 - \\
& - (C + 0.25C_k)x_4 - 0.5C_k x_6 + 0.5(G_e + G_n)l \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_3 = 0 \\
4. \quad & m_n\ddot{x}_3 + 4m_n\ddot{x}_4 + m_n\ddot{x}_5 - \eta\dot{x}_3 + 2\eta\dot{x}_4 - \eta\dot{x}_5 - (C + 0.25C_k)x_3 + (2C + 0.25C_k)x_4 - Cx_5 + \\
& + G_n l \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_4 = 0 \\
5. \quad & m_m\ddot{x}_1 + m_n\ddot{x}_4 + (2m_n + 2m_m + m_{np2})\ddot{x}_5 - \eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_4 + 2\eta\dot{x}_5 - Cx_1 - Cx_4 + 2Cx_5 + \\
& + 0.5(G_n l + G_n l_m)\mu \operatorname{sgn} \dot{x}_5 = \frac{M_{np2}}{R_0} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5) \\
6. \quad & \frac{G_{ny}}{g} \ddot{x}_6 - 0.5C_k x_3 + 0.5C_k x_4 + C_k x_6 + G_{ny} + G_{ny} f \operatorname{sgn} \dot{x}_6 = 0.
\end{aligned} \tag{6}$$

Конечномерная математическая модель движения ленты конвейера с грузом описывается двенадцатью координатами состояния $(X(t), \dot{X}(t))^T = (x_i(t), \dot{x}_i(t))^T$, $i = \overline{1, 6}$. Относительно этого вектора состояния составлено матричное представление:

$$M\ddot{X} + N\dot{X} + CX + S \operatorname{sgn} \dot{X} + VG_{ny} = P_1 \operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_1)M_{np1} + P_2 \operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_5)M_{np2}, \tag{7}$$

в котором

$$M = \begin{bmatrix} 2m_e + 2m_m + m_{np1} & m_e & 0 & 0 & m_m & 0 \\ m_e & 4m_e & m_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_e & 2m_e + 2m_n & m_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_n & 4m_n & m_n & 0 \\ m_m & 0 & 0 & m_n & 2m_n + 2m_m + m_{np2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{G_{ny}}{g} \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} 2\eta & -\eta & 0 & 0 & -\eta & 0 \\ -\eta & 2\eta & -\eta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\eta & 2\eta & -\eta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\eta & 2\eta & -\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\eta & 2\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 2C & -C & 0 & 0 & -C & 0 \\ -C & 2C & -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C & 2C+0.25C_k & -C-0.25C_k & 0 & -0.5C_k \\ 0 & 0 & -C-0.25C_k & 2C+0.25C_k & -C & 0.5C_k \\ -C & 0 & 0 & -C & 2C & 0 \\ 0 & 0 & -0.5C_k & 0.5C_k & 0 & C_k \end{bmatrix},$$

$$S = \text{diag}[0.5(G_z l + G_n l_m) \mu \quad G_z l \mu \quad 0.5(G_z + G_n) l \mu \quad G_n l \mu \quad 0.5(G_n l + G_n l_m) \mu \quad G_{ny} f],$$

$$P_1 = [R_\phi^{-1} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad P_2 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad R_\phi^{-1} \quad 0]^T, \quad V = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T,$$

где l – длина конвейера, G_{ny} – вес натяжного устройства, M_{np1}, M_{np2} – движущие моменты приводов и барабанов, M_{ny} – движущий момент привода натяжного устройства, η – коэффициент вязкости ленты, C – коэффициент жесткости ленты, μ – коэффициент сопротивления движению, C_k – коэффициент жесткости каната, R_ϕ – радиусы приводных барабанов, l_m – длина каната натяжного устройства.

Для синтеза системы управления и упрощения процедуры моделирования выполнено представление модели движения конвейерной ленты в пространстве состояний согласно каноническому правилу Коши в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\dot{X} = -M^{-1}((N + C)X + S \text{sgn } X + V G_{ny} + P_1 \text{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1) M_{np1} + P_2 \text{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_5) M_{np2}).$$

В модели внешними воздействиями являются движущие моменты, развиваемые двумя приводами $u_1(t) = M_{np1}(t)$, $u_2(t) = M_{np2}(t)$, силы сопротивления движению конвейерной ленты $u_3(t) = \text{sgn } \dot{x}(t)$ и вес натяжного устройства $u_4(t) = G_{ny}(t)$. Матрица $-M^{-1}(N + C) = A$ является матрицей состояния системы, а матрицы $M^{-1}P_1 = B_1$, $M^{-1}P_2 = B_2$, $M^{-1}S = B_3$, $M^{-1}V = B_4$ – составляющие матрицы управления. Тогда, матричное представление математической модели движения ленточного конвейера принимает вид

$$\dot{X} = AX + B_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1)u_1 + B_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_5)u_2 + B_3 u_3 + B_4 u_4, \quad (8)$$

в которой

$$A = \begin{pmatrix} 0_{6 \times 6} & E_{6 \times 6} \\ -M^{-1}C_{6 \times 6} & -MN_{6 \times 6} \end{pmatrix}_{12 \times 12}, \quad B_1 = \begin{pmatrix} 0_{6 \times 1} \\ -M^{-1}P_{1(6 \times 1)} \end{pmatrix}_{12 \times 1},$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 0_{6 \times 1} \\ -M^{-1}P_{2(6 \times 1)} \end{pmatrix}_{12 \times 1}, \quad B_3 = \begin{pmatrix} 0_{6 \times 1} \\ -M^{-1}S_{6 \times 1} \end{pmatrix}, \quad B_4 = \begin{pmatrix} 0_{6 \times 1} \\ -M^{-1}V_{6 \times 1} \end{pmatrix}.$$

Исследование составленной математической модели движения ленты двухприводного конвейера с целью проверки ее адекватности проводилось для конвейера 2Л100У методом компьютерного моделирования (рис. 3) с параметрами:

$$l = 1500 \text{ м}, m_2 = 1518 \text{ кг}, m_n = 352 \text{ кг},$$

$$m_{np1} = 3000 \text{ кг}, m_{np2} = 2000 \text{ кг}, M_{np1} = 20900 \text{ Н·м}, M_{np2} = 20900 \text{ Н·м}, R_0 = 0.5 \text{ м},$$

$$\mu = 0.03, \quad \mu = 0.03, f = 0.3, C = 10000 \text{ Н/м}, C_k = 10^{10} \text{ Н/м}, G_{Hy} = 52000 \text{ кг}.$$

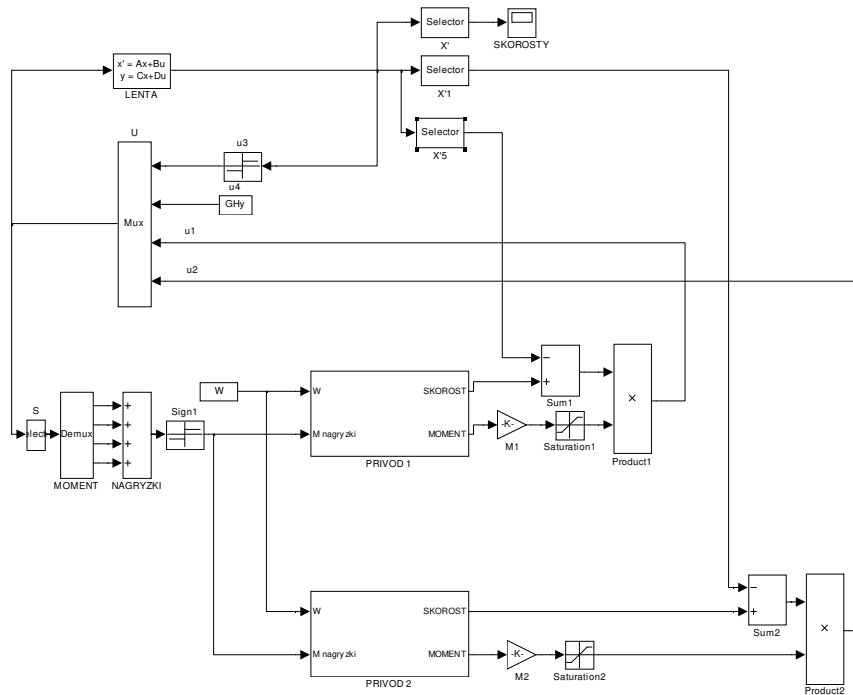


Рисунок 3. Схема моделирования движения ленты двухприводного конвейера

В результате компьютерного моделирования определены переходные процессы по скоростям обобщенных координат движения ленты и перемещения натяжного устройства (рис. 4). Графики соответствуют режиму разгона и режиму работы конвейера с постоянной скоростью. Полученные кривые сравнивались с переходными процессами пуска и равномерного движения реального конвейера того же класса. Величина отличия определялась как интегральный квадрат разности этих

кривых на достаточно длительном интервале времени, и не превысила 8-10%, что подтверждает заключение об адекватности разработанной модели движения ленты двухприводного конвейера.

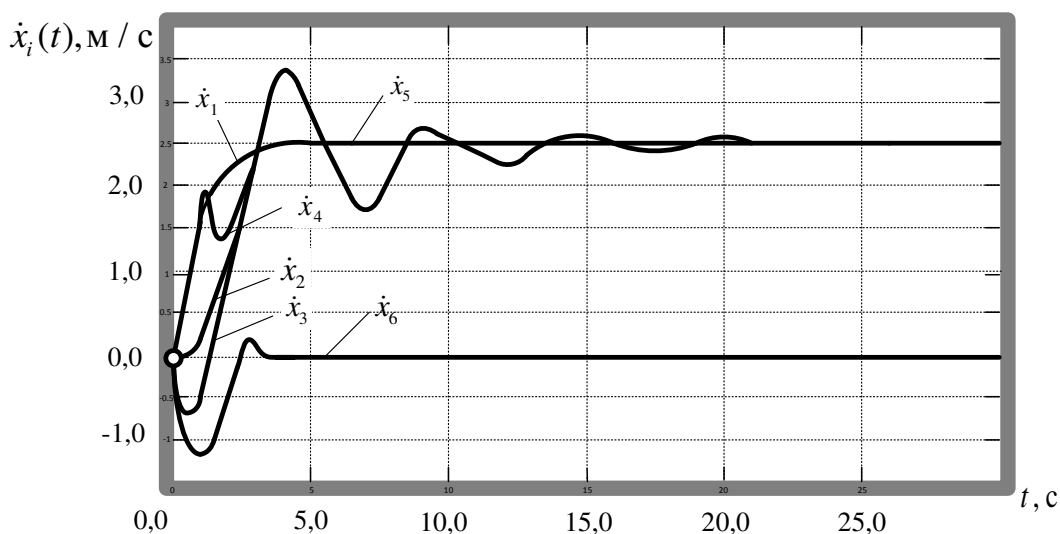


Рисунок 4. Переходные процессы по скоростям обобщенных координат при пуске

Разработанная модель движения ленты позволяет определять значения скорости движения и натяжения ленты в характерных точках конвейера, что дает возможность использовать эти координаты при разработке системы автоматического управления скоростью движения конвейерной ленты для исключения пробуксовки на приводных барабанах и равномерного распределения нагрузки на ленте при любой скорости движения конвейера.

Таким образом, подтверждено первое научное положение – *разработанная математическая модель ленточного конвейера отличается тем, что учитывает использования двух приводов и работу натяжного устройства, адекватно описывает динамические процессы движения ленты конвейера, что позволяет рассматривать эту модель как объект системы управления.*

В третьей главе разработана структурная схема (рис. 5) системы автоматической стабилизации тягового фактора ленточного конвейера и алгоритм, обеспечивающий стабилизацию тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки двухприводного ленточного конвейера, который позволяет регулировать натяжение ленты, исключая её пробуксовку на приводных барабанах при неравномерной загрузки. Структурная схема

системы автоматической стабилизации тягового фактора ленточного конвейера содержит два контура: контур регулирования скорости движения ленты и контур регулирования натяжения ленты.

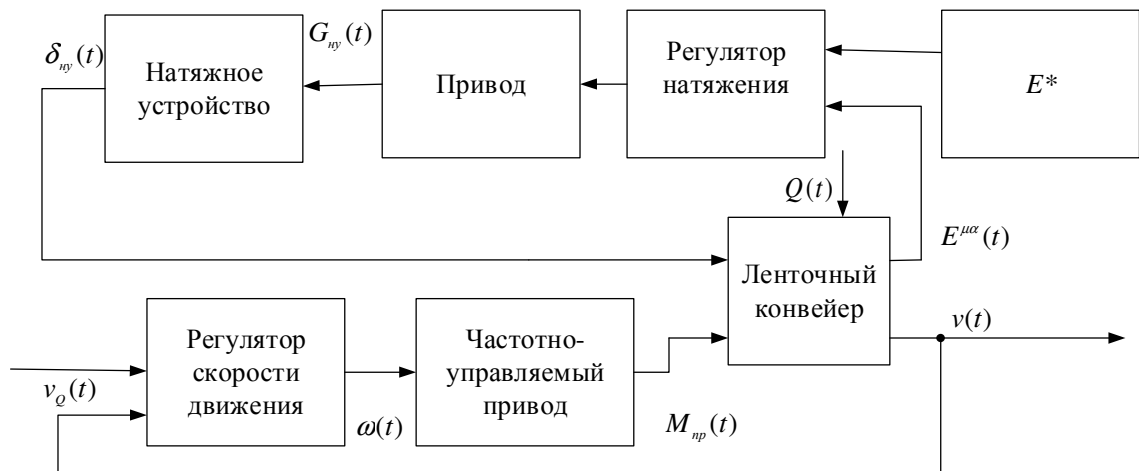


Рисунок 5. Структурная схема системы автоматической стабилизации тягового фактора: $M_{np}(t)$ – движущий момент приводов; $v(t)$ – текущая скорость движения ленты; $\omega(t)$ – частота вращения ротора привода; $G_{ny}(t)$ – текущее значение натяжения, создаваемое весом натяжного устройства; $E^{\mu\alpha}(t)$ – текущее значение тягового фактора; $E_0^{\mu\alpha}$ – заданное значение тягового фактора; $\delta_{ny}(t)$ – ход натяжного устройства

Для регулирования тягового фактора необходимо иметь возможность определять натяжения в характерных точках конвейера в текущий момент времени. Разработанная модель конвейера позволяет измерять возникающие натяжения S_i в любой точке расчетной схемы, а предлагаемый метод синтеза регулятора натяжения дает возможность стабилизировать тяговую способность привода конвейера, как при работе с постоянной скоростью, так и при переводе конвейера с одной скорости движения ленты на другую.

На конвейере 2Л100У используется натяжное устройство, которое установлено на хвостовой части, как показано на рис. 6. Предварительное натяжение ленты производится с помощью лебедки, последующее управление натяжным устройством осуществляется электроприводом. При загрузке конвейера натяжение грузовой ветви увеличивается и, как следствие, требуемое значение тягового фактора нарушается.

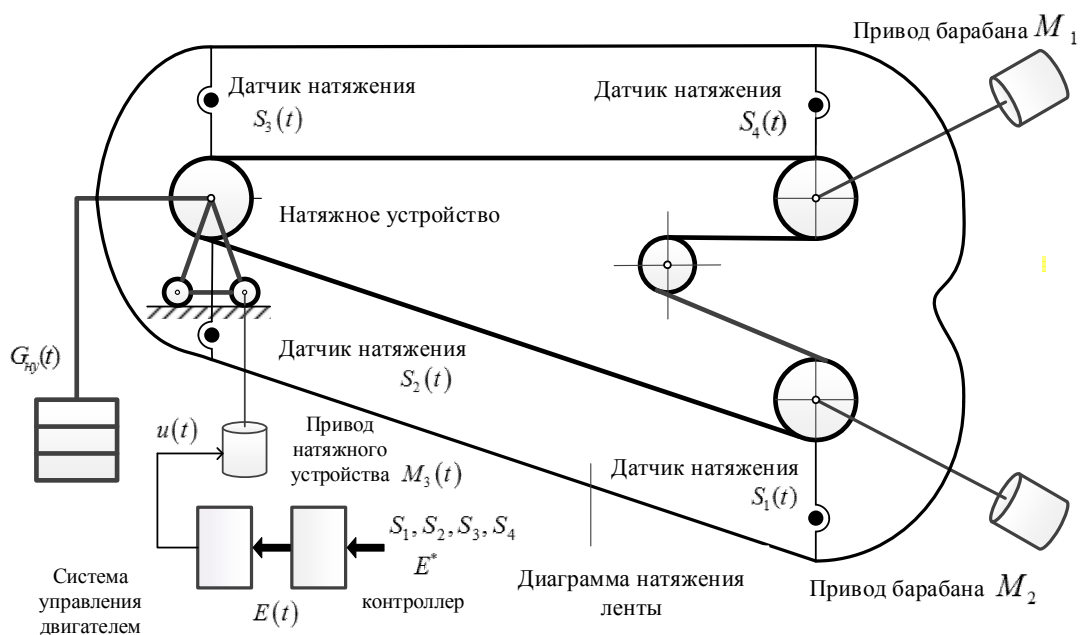


Рисунок 6. Схема системы управления положением каретки натяжного устройства

Реле давления в цепи управления электропривода включают электродвигатель, когда натяжение в ленте становится меньше минимального, и выключает электродвигатель лебедки при натяжении, достигающем максимального значения, поддерживая, таким образом, близкое к требуемому натяжению ленты.

Величина текущего значения тягового фактора определяется отношением

$$E^{\mu\alpha}(t) = \frac{S_4(t)}{S_1(t)}, \quad (9)$$

в котором $S_4(t)$ – текущее значение натяжения в набегающей ветви, $S_1(t)$ – текущее значение натяжения в сбегающей ветви.

Для разработки алгоритма системы стабилизации тягового фактора используется функциональная связь между значением тягового фактора и усилием, которое создает натяжное устройство конвейера. Согласно соотношению (9) для получения текущего значения тягового фактора, необходимо знать текущее натяжение в сбегающей ветви $S_1(t)$ и натяжение в набегающей ветви $S_4(t)$. При изменении скорости движения конвейера изменяются растяжения участков ленты. Пусть $\Delta_1 = x_4(t) - x_5(t)$ – растяжение порожней ветви и $\Delta_4 = x_1(t) - x_2(t)$ – растяжение грузовой ветви.

При изменении усилия натяжного устройства изменяются деформации $\Delta_1(t)$ и $\Delta_4(t)$, а также значения натяжений $S_1(t)$ и $S_4(t)$,

которые зависят от этих деформаций. С другой стороны, вычислить натяжения можно, используя соотношения

$$\begin{aligned} S_1(t) &= 0,5G_{ny} - W_{2,1}, \\ S_4(t) &= 0,5G_{ny} + W_{4,3}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $W_{2,1}(t)$ – сопротивление движению на порожней ветви, $W_{4,3}(t)$ – сопротивление движению на грузовой ветви.

Для определения функциональной зависимости натяжения ленты от ее деформации были использованы данные экспериментальных исследований, суть которых заключалась в изменении веса натяжного устройства G_{ny} и в одновременном расчете по формуле (10) натяжений, снятии данных о деформациях ленты. На основании этих экспериментальных данных методом наименьших квадратов получены линейные зависимости натяжений от деформаций

$$\begin{aligned} S_1(t)(\Delta_1) &= 72990\Delta_1 + 47525; \\ S_4(t)(\Delta_4) &= 73138\Delta_4 + 76004. \end{aligned} \quad (11)$$

Найденные текущие значения натяжения, пусть недостаточно точные в силу линейной аппроксимации, позволяют получить значения тягового фактора, как функции времени $E^{\mu\alpha}(t)$, вычисляя натяжения по формулам (11), а затем величину тягового фактора по формуле (9).

Для реализации идеи регулирования тягового фактора определена зависимость между текущим значением тягового фактора и усилием, которое создает натяжное устройство. Эта зависимость составляет основу алгоритма разрабатываемой системы стабилизации: усилие, создаваемое натяжным устройством, должно быть следствием изменения скорости движения ленты. Зависимость $E^{\mu\alpha}(G_{ny})$ и обратная к ней $G_{ny}(E^{\mu\alpha})$ найдены методом наименьших квадратов

$$G_{ny}(E^{\mu\alpha}) = 250(E^{\mu\alpha})^2 - 9980E^{\mu\alpha} + 113380. \quad (12)$$

Соотношение (13) позволяет вычислить разницу между желаемым значением тягового фактора и фактическим и, как следствие, вычислить величину ошибки перемещения каретки натяжного устройства

$$s_6(G_{ny}) = -1,61 \cdot 10^{-5} G_{ny} - 0,663, \quad (13)$$

устранение которой приведет к компенсации тягового фактора.

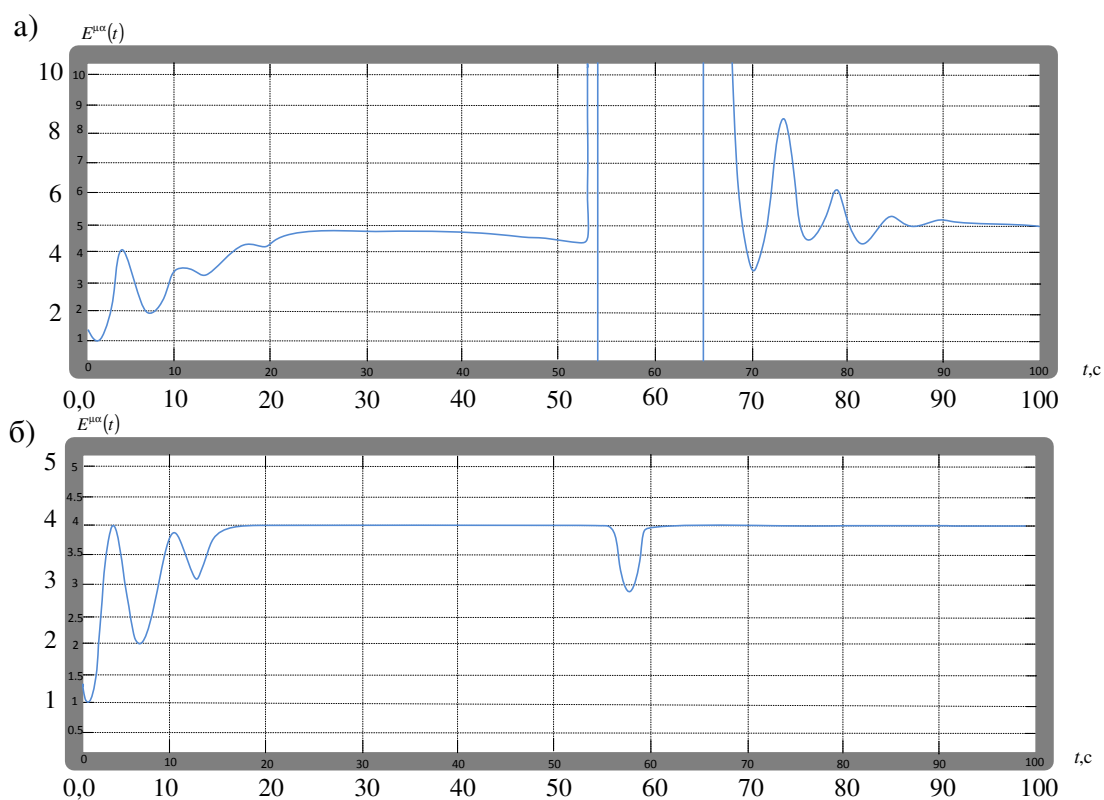


Рисунок 8. Динамика изменения тягового фактора без применения регулирования (а) и при осуществлении автоматической стабилизации тягового фактора (б)

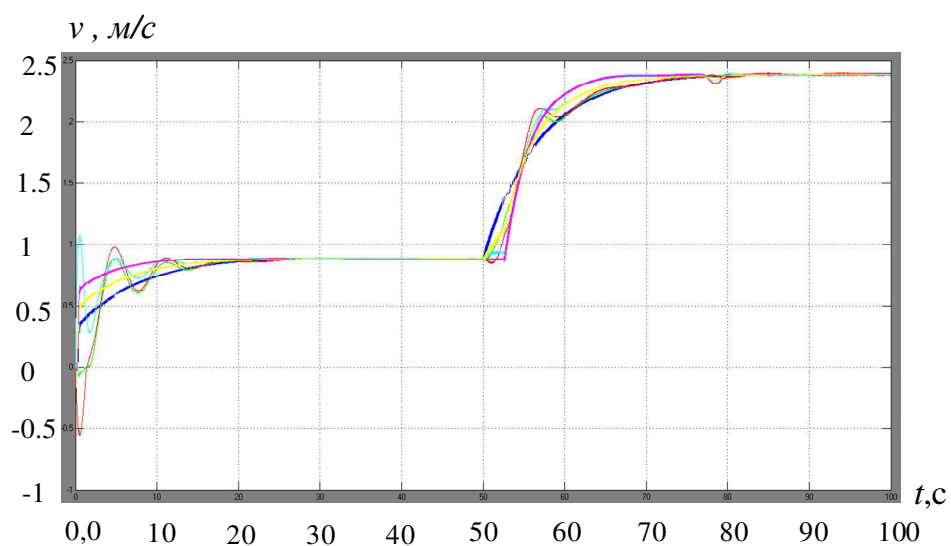


Рисунок 9. Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты конвейера при осуществлении регулирования

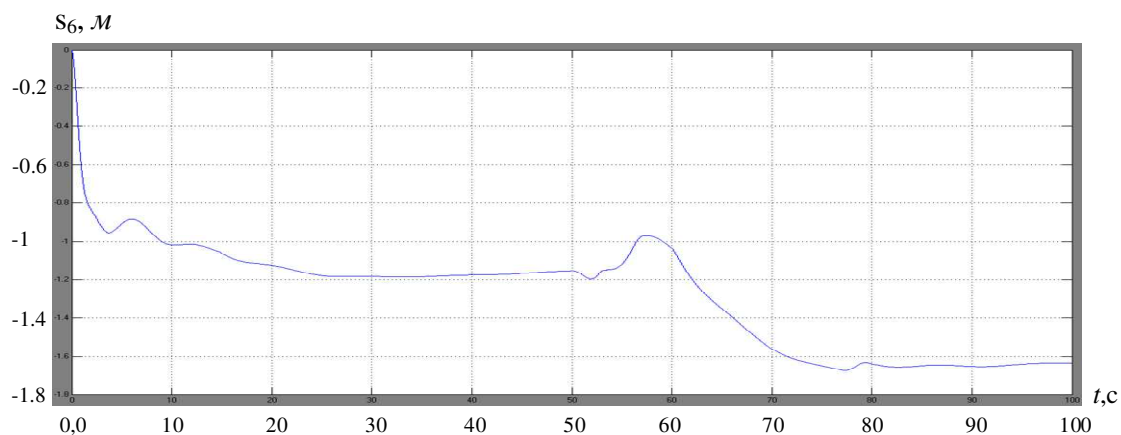


Рисунок 10. Перемещение натяжного устройства при осуществлении регулирования

Результаты моделирования позволили сформулировать научное положение, что *предложенный алгоритм регулирования тягового фактора двухприводного конвейера позволяет стабилизировать его значение на расчетном уровне при штатных и нештатных режимах движения ленты.*

В четвертой главе диссертации приведены материалы по реализации системы автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного конвейера (рис. 11).

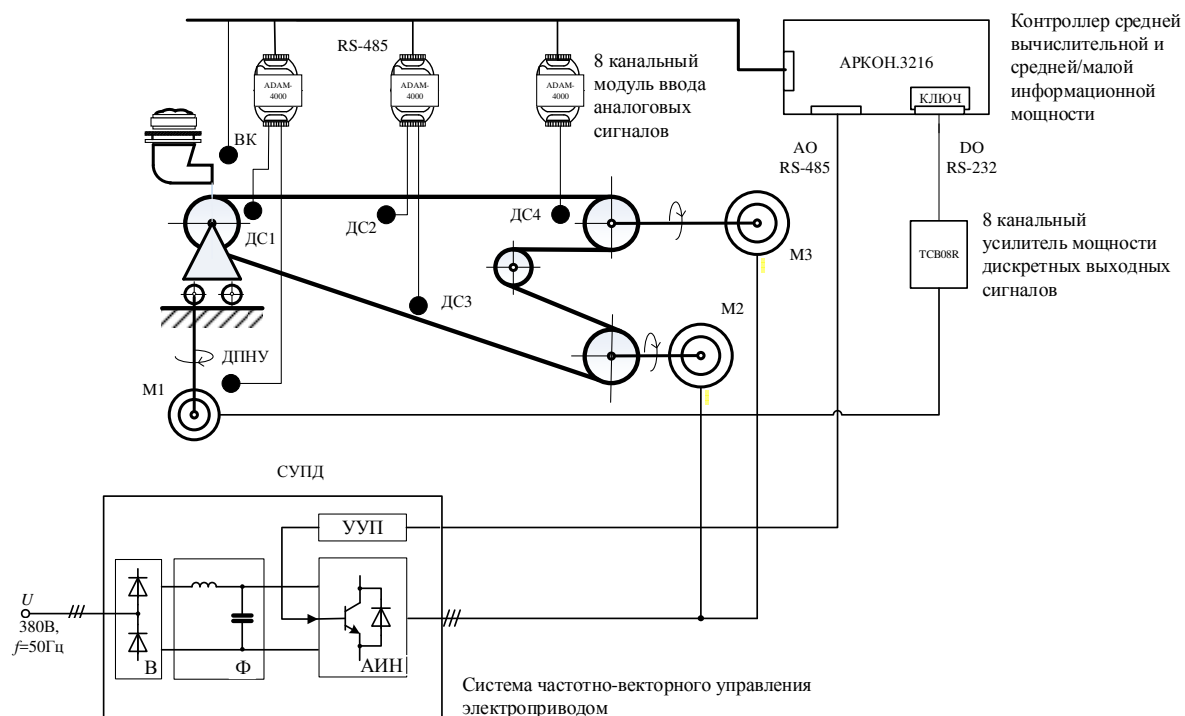


Рисунок 11. Принципиальная схема системы автоматической стабилизации тягового фактора, где ДС₁... ДС₄ – тахометрические датчики скорости; ВК – весы конвейерные; АИ – аналоговый входной сигнал; АО – аналоговый выходной сигнал; DO – дискретный выходной сигнал; В – выпрямитель; Ф – фильтр; АИН – автономный инвертор напряжения; УУП – микропроцессорное устройство управления преобразователем частоты; ДПНУ – датчик положения натяжного устройства

Система автоматической стабилизации тягового фактора конвейера является распределенной, поэтому для обеспечения работы необходимо определять скорости движения ленты конвейера в разных точках с помощью тахометрических датчиков.

Текущий контроль объемов поступающего груза на ленты производится с помощью конвейерных весов. Общая загрузка конвейера определяется с учетом скорости его движения интегрированием получаемых данных с конвейерных весов по длине конвейера. Для обеспечения связи с датчиками в системе используются интеллектуальные модули серии ADAM-4000. Все модули имеют гальваническую развязку по цепям питания и интерфейса RS-485, позволяют осуществить программную установку параметров, обладают командным протоколом. Питание модулей осуществляется нестабилизированным напряжением 10...30В постоянного тока. Диапазон рабочих температур эксплуатации от -10 до +70⁰С. В приводе натяжного устройства используется частотно управляемый асинхронный двигатель, преобразователь частоты, два блока фильтров, пульт местного управления, контроллер Simatic S7-300 и интерфейс RS-232.

Использование системы автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки позволяет снизить износ конвейерной ленты, уменьшить опасности её возгорания при проскальзывании на барабанах и ведет к экономии энергоресурсов. Результаты исследования рекомендуются к внедрению на угольных шахтах Российской Федерации и шахте «Калева» Республики Союз Мьянма.

Таким образом, подтверждено третье научное положение - *разработанная система автоматической стабилизации тягового фактора двухприводного конвейера отличается возможностью регулировать натяжение ленты, исключаяющей ее пробуксовку на приводных барабанах конвейера в шахтных условиях неравномерной загруженности.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследований в диссертационной работе дано новое решение актуальной задачи разработки и исследования системы автоматической стабилизации величины тягового фактора двухприводного ленточного конвейера, что позволяет снизить износ движущегося полотна ленточного конвейера и уменьшить вероятность возникновения пробуксовки на каждом приводном барабане.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором:

1. Создана математическая модель движения ленты магистрального конвейера с двумя приводами и устройством натяжения ленты, обладающая достаточной адекватностью (сумма квадратов отклонений модельных и реальных параметров при переходных процессах на достаточно длительном интервале времени не превышают 10%), может быть использована как объект системы управления движением конвейера.

2. Разработана структура и алгоритм системы автоматической стабилизации тягового фактора, которые обеспечивают требуемое при эксплуатации натяжение ленты, исключаящее ее проскальзывание на приводных барабанах.

3. Создана структура комплекса технических средств, позволяющая автоматизировать процесс корректировки натяжения конвейерной ленты в зависимости от загрузки для стабилизации тягового фактора конвейера.

4. Выполнены исследования путем математического моделирования системы регулирования тягового фактора в режимах пуска, экстренной остановки, штатной работы и торможения, показавшие достаточную работоспособность системы.

5. Разработанный алгоритм автоматической стабилизации тягового фактора в условиях неравномерной нагрузки, используемый в Едином диспетчерском аналитическом центре АО «СУЭК-Кузбасс», показал востребованность полученных теоретических результатов в горной промышленности.

6. Создана и внедрена на шахте «Калева» Республики Союз Мьянма система автоматической стабилизации тягового фактора, предотвращающая проскальзывание ленты на приводных барабанах конвейера в шахтных условиях неравномерной загруженности.

Основанные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В научных журналах, рецензируемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. Каунг Пьей, Дмитриева В.В., Поддержание величины тягового фактора ленточного конвейера с двухдвигательным приводом. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. - № 6. – С. 189-198.
2. Каунг Пьей Аунг, Кубрин С.С., Певзнер Л.Д., Буй Чунг Кьен, Система автоматической стабилизации тягового фактора ленточного конвейера в условиях неравномерной загрузки. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2017, - № 12. Специальный выпуск 31. – С.3-8
3. Буй Ч. К., Кубрин С. С., Каунг П. А. Влияние преобразователя частоты на энергетические параметры работы электрической сети шахты. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. - № 2. – С. 20-26.

В других изданиях:

1. Каунг Пьей Аунг, Дмитриева В.В., Синтез регулятора скорости движения ленточного конвейера. // Журнал «Перспективы развития информационных технологий». – 2014. - № 22. ISBN: 978-5-00068-214-2 . - С. 78-81.
2. Каунг П.А. Синтез подсистемы управления скоростью движения конвейера. //В сборнике научных трудов Международной научной конференции «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине. Национальный Исследовательский Томский политехнический университет. - 2014. - С. 85-87.
3. Kaung Pyae Aung, Dmitrieva V.V, Maintaining traction factor value of belt conveyor with two-engine drive. Third International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE 2015 , Rome, Italy, ISBN: 978-1-63248-080-4 doi: 10.15224/ 978-1-63248-080-4-73 Page(s): 45 – 48.
4. Kaung Pyae Aung, Dmitrieva V.V, Pevzner L.D, Development of a mathematical model of belt conveyor with twin-engine drive. International Academic Conference on Engineering, Technology and Innovations (IACETI-2016), Beijing, China. ISBN: 978-93-86291-05-9 Page(s): 5-8.

5. Каунг Пьей Аунг, Дмитриева В.В., Электромеханическая модель «управляемый электропривод — движение ленты конвейера с грузом». //В сборнике 6-й Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов «Актуальные проблемы информатизации в науке, образовании и экономике – 2013» МИЭТ. – 2013. – С. 87
6. Каунг Пьей Аунг, Дмитриева В.В., Исследование движения конвейера с автоматическим натяжным устройством. //В сборнике «21-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2014» МИЭТ. – 2014. - С.152
7. Каунг Пьей Аунг, Дмитриева В.В., Поддержание величины тягового фактора ленточного конвейера с двухдвигательным приводом. //В сборнике «22-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2015» МИЭТ. – 2015. - С.224
8. Kaung Pyae Aung, Kubrin S.S, Simulation of the conveyor lines with asynchronous drive. International conference on Geo-spatial technologies and Earth resources – (GTER 2017), Hanoi, Vietnam. ISBN: 978-604-913-618-4 Page(s): 399-402.
9. Каунг Пьей Аунг, Кубрин С.С., Моделирование двухприводного ленточного конвейера с устройством натяжения. //В сборнике международной научно-практической конференции «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли» ИПКОН РАН. - 2017. - С. 351-353.

Патенты и свидетельства:

1. Заявка от 19.01.2018 г. О государственной регистрации программы для ЭВМ «Автоматическая стабилизация тягового фактора ленточного конвейера» / Каунг Пьей Аунг, Кубрин Сергей Сергеевич, Собеневский Андрей Геннадьевич; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН). – 37,7 Кб.