

Методы теоретических исследований электропривода ленточного конвейера: подходы, моделирование и оценка

¹***КУЛИКОВ Анатолий Петрович**, магистр, системный архитектор,
anatoliy.kulikov1990@gmail.com,

²**ЗЮЗЕВ Анатолий Михайлович**, д.т.н., профессор, a.m.zyuzev@urfu.ru,

¹ТОО «С-NRG», пр. Достык, 232, Алматы, Казахстан,

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, Екатеринбург, Россия,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Рассматриваются методы теоретических исследований электропривода ленточного конвейера на основе математического моделирования. Основой анализа стала разработка модели в программной среде Matlab Simulink, позволяющей исследовать динамические и энергетические характеристики системы в различных режимах работы. Особое внимание уделено процессу калибровки модели с использованием экспериментальных данных и проверке её адекватности с применением статистического метода Фишера. Приведены результаты моделирования переходных процессов, стационарных режимов и аварийных ситуаций, что позволяет сделать вывод о высокой точности модели и её применимости для оптимизации систем управления ленточными конвейерами. Дополнительно исследовано влияние внешних условий на работу системы, таких как изменение нагрузки и скорости. Проанализированы методы повышения энергоэффективности электропривода за счет оптимизации параметров управления. Сделан вывод о возможности использования разработанной модели для совершенствования систем управления в промышленных условиях.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, моделирование, частотный преобразователь, электропривод, энергоэффективность.

Введение

Электропривод ленточного конвейера является ключевым элементом в системах транспортировки материалов, обеспечивающим устойчивую работу оборудования в различных условиях эксплуатации. Успешное проектирование и эксплуатация таких систем зависят от точности математического моделирования. Современные программные средства, такие как Matlab Simulink, позволяют проводить детальное исследование динамических процессов, обеспечивая инженерные расчеты высокой точности.

В данной статье рассмотрен процесс построения математической модели электропривода ленточного конвейера и её применение для анализа рабочих режимов. Для достижения высокой точности моделирования использовались данные экспериментальных исследований, проведенных на реальном оборудовании, что позволило калибровать параметры модели и проверить её адекватность.

Теоретические исследования электропривода ленточного конвейера

Теоретические исследования электропривода ленточного конвейера базируются на использовании математического моделирования для изучения характеристик системы в различных режимах работы. В данной работе для моделирования процессов управления и функционирования электропривода использовалась программная среда Matlab Simulink. Основной целью теоретических исследований является создание адекватной модели, которая точно воспроизводит дина-

мические и энергетические процессы электропривода, и позволяет проводить анализ его работы при различных нагрузках и режимах эксплуатации.

Основу теоретических исследований составляет математическая модель электропривода, которая учитывает его основные элементы: двигатель, систему управления, механическую часть конвейера (лента, барабаны, ролики, натяжение). Модель строилась с использованием уравнений электрических цепей для описания работы двигателя и уравнений движения для механической части конвейера.

В Matlab Simulink модель была представлена в виде блок-схемы, где каждый блок соответствует конкретному компоненту системы. Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором использовалась классическая модель с учетом индуктивных свойств, сопротивления обмоток, электромагнитного момента и крутящего момента нагрузки. Введение системы управления дало возможность моделировать работу электропривода в разных режимах запуска, торможения и регулирования скорости. Структурная блок-схема исследуемого объекта представлена на рисунке 1. Расчет параметров имитационной модели основывается на исследованиях [1-5]. Подробное описание построения имитационной модели приведено в [6].

Для точного воспроизведения работы реального привода в математическую модель были введены параметры, полученные из технической документации и данных экспе-

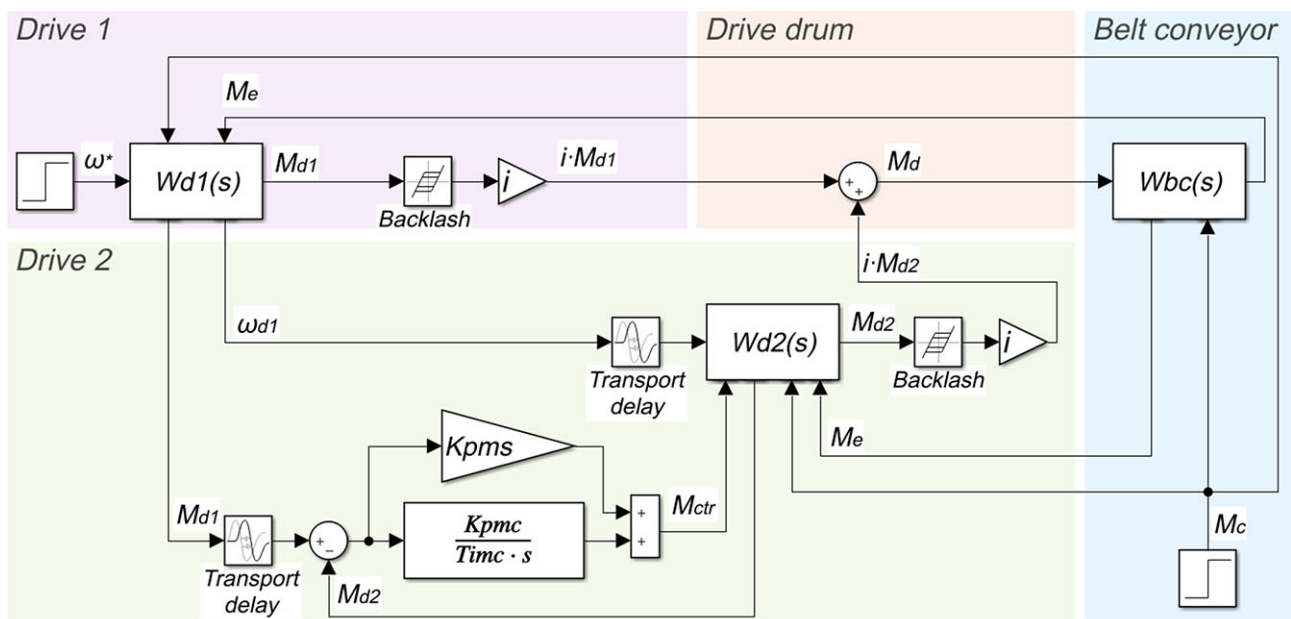


Рисунок 1 – Структурная блок-схема исследуемого объекта

риментальных исследований. К таким параметрам относятся:

- номинальная мощность и момент двигателя;
- инерционные характеристики механической системы;
- коэффициенты передачи системы управления;
- характеристики конвейерной ленты (масса, длина, коэффициент трения).

В блок-схеме исследуемого объекта приняты следующие обозначения:

- ω^* – задающее воздействие;
- $\omega d1$ – угловая скорость Master;
- $\omega d2$ – угловая скорость Slave;
- $Md1$ – электромагнитный момент Master;
- $Md2$ – электромагнитный момент Slave;
- Md – момент на приводном барабане;
- $Mctr$ – управляющее воздействие регулятора момента;
- Me – момент упругих сил ленточного конвейера;
- Ms – момент статического сопротивления;
- i – передаточное число редукторов;
- $Wd1(s)$ – передаточная функция первого электропривода;
- $Wd2(s)$ – передаточная функция второго электропривода;
- $Wbc(s)$ – передаточная функция механической части магистрального ленточного конвейера;
- $Kpms$ – коэффициент пропорциональной части регулятора момента;
- $Tims$ – постоянная времени передаточной функции регулятора момента.

Все параметры были тщательно откалиброваны, чтобы модель могла корректно описывать реальные процессы. Особое внимание уделялось параметрам, определяющим переходные процессы, таким как время отклика системы и время выхода на установившийся режим.

Модели в Simulink позволили наглядно проследить изменения скорости и момента двигателя в динамике. Это дало возможность изучить влияние изменений внешних условий и параметров системы на работу электропривода.

В ходе проверки были проведены расчеты с наборами исходных данных. После этого рассчитанные значения сравнивались с данными, полученными в результате экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования электропривода ленточного конвейера

Для получения достоверных результатов по исследованию работы электропривода ленточного конвейера необходимо разработать и реализовать комплекс экспериментальных методик. Эти методы направлены

на оценку характеристик работы привода, его энергетических показателей и надежности в различных режимах эксплуатации. Особое внимание уделяется выбору оборудования для проведения экспериментов и корректности получаемых данных.

В качестве экспериментальных исследований данной работы приняты исследования, проведенные на реально существующем технологическом объекте горнодобывающего предприятия.

Для проведения экспериментальных исследований разработан натурный испытательный стенд, в состав которого входит инженерная станция, соединенная с контроллером частотного преобразователя посредством соединительного кабеля mini-USB.

Частотный преобразователь измеряет необходимые величины: ток, напряжение, электромагнитный момент, частота вращения. Применяется также регистрация данных с возможностью последующего анализа в специальном программном обеспечении. Программное обеспечение «FR-Configurator2», установленное на инженерную станцию, позволяет реализовать следующие функции:

- программирование контроллера;
- параметрирование частотного преобразователя;
- снятие осциллограмм основных параметров переходного процесса.

Экспериментальные исследования были организованы с использованием методов планирования эксперимента, что позволяет минимизировать количество испытаний при сохранении необходимой точности получаемых данных. Для каждого набора параметров исследуемого электропривода проводились испытания в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации. Это позволило учесть различные режимы работы конвейера – от холостого хода до работы при номинальной нагрузке.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили оценить работоспособность и эффективность электропривода ленточного конвейера в различных режимах эксплуатации. Разработанные методы испытаний и обработки данных обеспечили высокую точность и достоверность результатов, что важно для дальнейшего совершенствования систем автоматизации и управления ленточными конвейерами.

Оценка адекватности полученной имитационной модели

Современные методы моделирования электроприводов позволяют значительно повысить эффективность проектирования

и эксплуатации промышленных систем. В частности, моделирование двухдвигательных асинхронных электроприводов ленточных конвейеров является важным этапом при разработке систем управления, так как позволяет исследовать поведение системы в различных режимах работы. Однако для того, чтобы результаты моделирования могли быть использованы на практике, необходимо убедиться в адекватности имитационной модели, что требует проведения соответствующих статистических проверок. В данной работе для оценки адекватности модели используется критерий Фишера, который позволяет сравнивать дисперсии реальных и модельных данных, выявляя возможные расхождения.

Критерий Фишера, также известный как F-критерий, представляет собой статистический метод, используемый для сравнения дисперсий двух выборок данных. В контексте моделирования этот критерий применяется для оценки того, насколько близко результаты имитации соответствуют реальным данным. Основная гипотеза при использовании данного критерия заключается в предположении о равенстве дисперсий двух выборок – реальных данных и данных, полученных из модели [7].

На рисунке 2 показана совмещенная ос-

циллограмма электромагнитных моментов двигателей реального объекта и полученных путем имитационного моделирования.

Выражение для вычисления значения F-критерия следующее [8]:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{реал}}^2}{S_{\text{мод}}^2}, \quad (1)$$

где $S_{\text{реал}}^2$ – выборочная дисперсия реальных данных (2);

$S_{\text{мод}}^2$ – выборочная дисперсия данных, полученных с помощью имитационной модели (3).

$$S_{\text{реал}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{i,\text{мод}})^2}{n - m - 1}, \quad (2)$$

$$S_{\text{реал}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,\text{мод}} - \overline{y_{\text{мод}}})^2}{n - 1}, \quad (3)$$

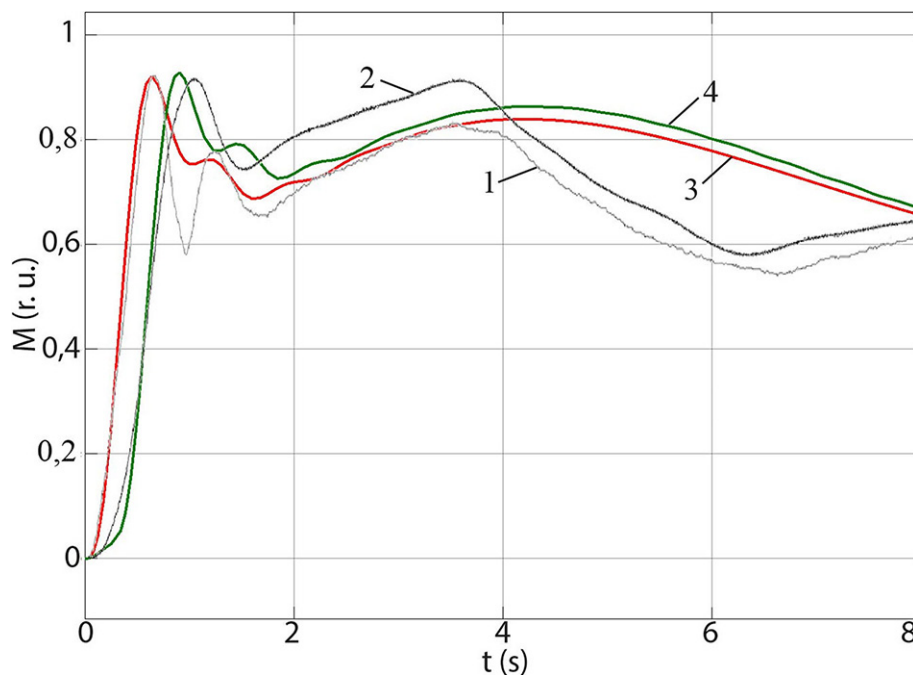
где m – количество факторов, влияющих на результирующий показатель оцениваемого параметра (электромагнитного момента двигателя);

n – количество исходных наблюдений;

y_i – i -е значение реальных данных;

$y_{i,\text{мод}}$ – i -е значение данных, полученных при моделировании;

$\overline{y_{\text{мод}}}$ – среднее значение функции откли-



1 – электромагнитный момент Md1 реального объекта; 2 – электромагнитный момент Md2 реального объекта; 3 – электромагнитный момент Md1, полученный при моделировании; 4 – электромагнитный момент Md2, полученный при моделировании

Рисунок 2 – Совмещенная осциллограмма электромагнитных моментов двигателей привода магистрального ленточного конвейера

ка.

$$\overline{y_{\text{мод}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{i,\text{мод}}. \quad (4)$$

Для того чтобы сделать вывод об адекватности модели, рассчитанное значение $F_{\text{расч}}$ сравнивается с критическим значением $F_{\text{кр}}$, которое определяется на основе выбранного уровня значимости α и степеней свободы обеих выборок. Если $F_{\text{расч}} < F_{\text{кр}}$, гипотеза о равенстве дисперсий принимается, что свидетельствует о том, что модель может считаться адекватной.

В рамках исследования была разработана имитационная модель двухдвигательного асинхронного электропривода ленточного конвейера. Для оценки её адекватности использовались экспериментальные данные, полученные с реального конвейера, и данные, сгенерированные моделью при идентичных условиях работы.

Рассмотрим оценку адекватности модели на основе данных об электромагнитном моменте двигателя №1 (ведущего). Выборочная дисперсия реальных данных составила 0,0131, а дисперсия данных модели – 0,0361. F-статистика, рассчитанная по формуле, показала значение $F_{\text{расч}} = 0,36$, что при заданном уровне значимости указывает на отсутствие статистически значимых различий между выборками. Критическое значение для выбранного уровня значимости составило 4,04, что значительно превышает полученное значение $F_{\text{расч}}$ и позволяет заключить, что модель адекватно воспроизводит реальные данные.

Оценим адекватность модели на основе данных о электромагнитном моменте двигателя №2 (ведомого). Экспериментальные данные дали выборочную дисперсию 0,0115, а модельные данные – 0,0518. Расчёт F-статистики показал значение $F_{\text{расч}} = 0,22$. Для двух выборок с числом опытов 50 и средним

значением функции отклика 1 критическое значение составило 4,04 при уровне значимости 5%. Поскольку $F_{\text{расч}} < F_{\text{кр}}$, модель можно считать адекватной для этого параметра.

Проведённая оценка с использованием критерия Фишера продемонстрировала, что разработанная имитационная модель двухдвигательного асинхронного электропривода ленточного конвейера может быть признана адекватной для анализа большинства эксплуатационных режимов. Модель удовлетворяет критерию Фишера, что подтверждается отсутствием статистически значимых различий между дисперсиями реальных и модельных данных. Это позволяет рекомендовать её для дальнейшего использования в задачах проектирования и оптимизации систем управления ленточными конвейерами. Полученная имитационная модель обеспечивает точность, достаточную для инженерных расчётов.

Выводы

Построенная в Matlab Simulink математическая модель электропривода ленточного конвейера демонстрирует высокую точность в воспроизведении реальных процессов.

Проведенные исследования показали возможность её использования для анализа динамических и энергетических характеристик системы в различных эксплуатационных режимах.

Проверка адекватности модели с использованием критерия Фишера подтвердила её достоверность.

Модель может быть рекомендована для дальнейшего применения в задачах проектирования и оптимизации систем управления ленточными конвейерами.

Разработанная методология открывает возможности для дальнейших исследований, направленных на совершенствование систем автоматизации и энергосбережения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhou Q. et al. Distributed Permanent Magnet Direct-Drive Belt Conveyor System and Its Control Strategy // Energies. – 2022. – Vol. 15. – Pp. 8699-1-8699-19.
2. Dmitrieva V.V. et al. Development of a Mathematical Model of Belt Conveyor with Twin-Engine Drive // International Journal of Mechanical and Production Engineering. – 2016. – Vol. 4, Issue 12. – Pp. 107-110.
3. Tsyapkina V.V., Ivanova V.P., Jurayeva K.K. Mathematical modeling of the conveyor movement for the cable waste crushing line // The Bulletin of KazATC. – 2022. – Vol. 4, Issue 97. – Pp. 13519-1-13519-7.
4. Мудров М.В. Разработка и исследование программно-аппаратного комплекса для испытаний и наладки электроприводов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Екатеринбург, 2020. – 235 с.

5. Wang L., Xu Y. Modeling and simulation of a belt conveyor system with dual drives // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2013. – Vol. 10, Issue 3. – Pp. 572-580.
6. Kulikov A., Kaverin V., Zyuzev A. Optimizing the operation of a double-motor asynchronous frequency-controlled electric drive of the main belt conveyor in startup mode // International Journal on Energy Conversion. – 2023. – Vol. 11, Issue 5. – Pp. 170-182.
7. Wackerly D., Mendenhall W., Scheaffer R. Mathematical Statistics with Applications. – Ed. 7th. – Boston: Cengage Learning, 2014. – 944 p.
8. Конопелько Л.А., Растоскуев В.В., Кустикова М.А. и др. Математическое моделирование в техно-сферной безопасности – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 65 с.

Ленталық конвейердің электржетегін теориялық зерттеу әдістері: тәсілдер, модельдеу және бағалау

¹***КУЛИКОВ Анатолий Петрович**, магистр, жүйе сәулетшісі, anatoliy.kulikov1990@gmail.com,

²**ЗЮЗЕВ Анатолий Михайлович**, т.ғ.д., профессор, a.m.zyuzev@urfu.ru,

¹«С-NRG» ЖШС, Достық даңғылы, 232, Алматы, Қазақстан,

²Ресей Федерациясының бірінші президенті Б.Н. Ельцин атындағы Орал федералды университеті, Мира көшесі, 19, Екатеринбург, Ресей,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Ленталық конвейердің электржетегін математикалық модельдеу негізінде теориялық зерттеу әдістері қарастырылады. Талдаудың негізі Matlab Simulink бағдарламалық ортасында модель әзірлеу болды, ол жүйенің динамикалық және энергетикалық сипаттамаларын әртүрлі жұмыс режимдерінде зерттеуге мүмкіндік береді. Ерекше назар модельді эксперименттік деректерді пайдаланып калибрлеу процесіне және оның адекваттылығын Фишердің статистикалық әдісімен тексеруге аударылды. Өтпелі процестерді, тұрақты режимдерді және апаттық жағдайларды модельдеу нәтижелері келтірілген, бұл модельдің жоғары дәлдігін және оны ленталық конвейерлерді басқару жүйелерін оңтайландыруға қолдануға болатындығын көрсетеді. Сонымен қатар, жүйенің жұмысына сыртқы жағдайлардың, мысалы, жүктеме мен жылдамдықтың өзгеруінің әсері зерттелді. Басқару параметрлерін оңтайландыру арқылы электржетектің энергия тиімділігін арттыру әдістері талданды. Өнеркәсіптік қолдануда басқару жүйелерін жетілдіру үшін әзірленген модельді қолдануға болатындығы туралы қорытынды жасалды.

Кілт сөздер: асинхронды электрқозғалтқыш, модельдеу, жиілік түрлендіргіш, электржетек, энергия тиімділігі.

Methods of Theoretical Research on the Electric Drive of a Belt Conveyor: Approaches, Modeling, and Evaluation

¹***KULIKOV Anatoliy**, Master's Degree, System Architect, anatoliy.kulikov1990@gmail.com,

²**ZYUZEV Anatoliy**, Dr. of Tech. Sci., Professor, a.m.zyuzev@urfu.ru,

¹«C-NRG» LLP, Dostyk Avenue, 232, Almaty, Kazakhstan,

²Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Mira Street, 19, Yekaterinburg, Russia,

*corresponding author.

Abstract. The methods of theoretical research on the electric drive of a belt conveyor based on mathematical modeling are considered. The foundation of the analysis was the development of a model in the Matlab Simulink software environment, which allows studying the dynamic and energy characteristics of the system in various operating modes. Special attention is paid to the calibration process of the model using experimental data and verification of its adequacy

using Fisher's statistical method. The results of modeling transient processes, steady-state modes, and emergency situations are presented, demonstrating the high accuracy of the model and its applicability for optimizing belt conveyor control systems. Additionally, the influence of external conditions, such as load and speed variations, on system performance was studied. Methods for improving the energy efficiency of the electric drive through parameter optimization are analyzed. It is concluded that the developed model can be used to enhance control systems in industrial applications.

Keywords: asynchronous electric motor, modeling, frequency converter, electric drive, energy efficiency.

REFERENCES

1. Zhou Q. et al. Distributed Permanent Magnet Direct-Drive Belt Conveyor System and Its Control Strategy // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – Pp. 8699-1-8699-19.
2. Dmitrieva V.V. et al. Development of a Mathematical Model of Belt Conveyor with Twin-Engine Drive // *International Journal of Mechanical and Production Engineering*. – 2016. – Vol. 4, Issue 12. – Pp. 107-110.
3. Tsyapkina V.V., Ivanova V.P., Jurayeva K.K. Mathematical modeling of the conveyor movement for the cable waste crushing line // *The Bulletin of KazATC*. – 2022. – Vol. 4, Issue 97. – Pp. 13519-1-13519-7.
4. Mudrov M.V. Razrabotka i issledovanie programmno-apparatnogo kompleksa dlya ispytaniy i naladki elektroprivodov: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03. – Ekaterinburg, 2020. – 235 p.
5. Wang L., Xu Y. Modeling and simulation of a belt conveyor system with dual drives // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. – 2013. – Vol. 10, Issue 3. – Pp. 572-580.
6. Kulikov A., Kaverin V., Zyuzev A. Optimizing the operation of a double-motor asynchronous frequency-controlled electric drive of the main belt conveyor in startup mode // *International Journal on Energy Conversion*. – 2023. – Vol. 11, Issue 5. – Pp. 170-182.
7. Wackerly D., Mendenhall W., Scheaffer R. *Mathematical Statistics with Applications*. – Ed. 7th. – Boston: Cengage Learning, 2014. – 944 p.
8. Konopel'ko L.A., Rastoskuev V.V., Kustikova M.A. i dr. *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnosfernoj bezopasnosti* – SPb.: Universitet ITMO, 2018. – 65 p.