

УДК 658.5.012.14

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-46-58

Оптимизация роботизированных линий розлива на основе математического моделирования и анализа процессов эффективности

Е. С. Квас, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена разработке математической модели, учитывающей гидравлические, механические и электромеханические процессы, протекающие в системе розлива напитков и транспортировки тары. Модель ориентирована на выбор оптимальных режимов насосов и приводов с целью снижения суммарных энергетических потерь при сохранении требуемой производительности. Увеличение производительности и сокращение энергозатрат – приоритетные задачи современных роботизированных линий розлива. При неравномерной загрузке и неправильном подборе параметров привода и насосов потери КПД могут достигать 30 %. Оптимизация таких систем позволяет существенно уменьшить издержки и повысить конкурентоспособность предприятий. Это актуально как для крупных производителей, так и для средних предприятий пищевой отрасли. В ходе исследования разработан подход, включающий анализ и моделирование энергопотребления и потерь в компонентах системы, таких как приводы, конвейерная лента и частотный преобразователь. Выполнено комплексное моделирование, объединяющее уравнения гидродинамики для оценки расхода и давления в трубопроводах с анализом трибологических потерь в конвейерных элементах. Учтены характеристики приводов и насосов, включая влияние частотного регулирования и крутящего момента на КПД системы. Проведены расчеты при различных скоростях и нагрузках, что позволило выявить ключевые факторы, определяющие энергопотребление. Проведенное моделирование подтвердило возможность улучшения энергоэффективности и стабильности работы системы при условии оптимальной настройки основных узлов линии, в том числе коэффициентов трения подвижных частей транспортера линии, что открывает перспективы для дальнейшей разработки и решения задач оптимизации в таких производственных процессах. Для подтверждения корректности модели использованы данные натурных экспериментов, сравниваемые с реальными показателями работы аналогичных конвейерных линий. На основе проведенного анализа предложены стратегии оптимизации работы компонентов для повышения общей эффективности транспортировки и розлива.

Ключевые слова: роботизированные линии розлива, математическое моделирование, оптимизация процессов, энергоэффективность, производственные системы.

Введение

Современные роботизированные линии розлива (РЛР) характеризуются высокой скоростью и точностью операций, однако затраты электроэнергии в таких системах остаются значительными. Исследования показали, что применение методов предиктивного управления позволяет адаптироваться к изменяющемуся графику загрузки, что особенно актуально для линий, где расход электроэнергии может превышать оптимальный уровень на 15...25 % [1]. Анализ применения цифровых технологий в промышленности, представленный Клишиным [2] и дополненный исследованиями Каримова [3], свидетельствует о том, что внедрение современных систем мониторинга и управления, включая цифровые двойники, способствует повышению эффективности производственных процессов. Кроме то-

го, Mikhail и Abed показали, что отсутствие интегрированных систем автоматизированной диагностики и контроля может способствовать ускоренному износу компонентов, что приводит к росту механических потерь до 30 % [4]. Эти и другие исследования подчеркивают, что комплексное применение современных цифровых технологий и адаптивных методов управления является важными предпосылками для сокращения избыточного энергопотребления и повышения общей эффективности работы роботизированных линий розлива.

Несмотря на активное внедрение технологий для повышения операционной эффективности, фундаментальные аспекты теоретического обоснования остаются недостаточно разработанными [5]. В этом контексте существующие исследования не полностью анализируют причины неэффективного использования энергоресурсов.

сурсов, что подчеркивает актуальность дальнейшей оптимизации процессов.

Избыточная мощность оборудования, несоответствие частоты вращения реальной потребности и упрощенное (или недостаточно гибкое) управление ведут к неоптимальному использованию энергоресурсов. Потери энергии часто связаны с трением между конвейерной лентой и направляющими элементами [6, 7]. Насосы подают жидкость в емкости, но их эффективность может снижаться из-за высокого сопротивления в трубопроводах. Система управления координирует работу всех компонентов, и ее эффективность напрямую влияет на производительность и энергопотребление. При этом коэффициент трения подвижных частей транспортера оказывает влияние и на эффективность управления буферными зонами и коэффициент общей эффективности оборудования. Исследования подтверждают, что существует оптимальное значение параметров системы, позволяющее минимизировать простои и повысить производительность линии [8]. Это подчеркивает необходимость дальнейших исследований в области энергосберегающих технологий и адаптивного управления производственными процессами.

В современных задачах оптимизации роботизированных линий розлива, аналогично подходам при проектировании специальных электрических приводов, широко применяются методы математического программирования для нахождения экстремумов функций множества переменных с учетом жестких ограничений. Как показано в работе [9], использование современных оптимизационных алгоритмов позволяет существенно повысить энергоэффективность и надежность электромеханических систем, что является актуальным и для оптимизации линий розлива. При этом текущие подходы не всегда способны обеспечить оптимальную настройку ресурсов в реальном времени, что проявляется как в избыточном потреблении энергии и неэффективности работы приводных систем при частичной нагрузке, так и в виде проблем с адаптацией к изменяющимся условиям производства, что дополнительно снижает эффективность работы [10].

Существует значительный потенциал для улучшения энергоэффективности роботизированных линий розлива. Например, текущие исследования в данной области демонстрируют, что применение оптимизированных алгоритмов регулирования скорости ленточного конвейера позволяет снизить энергозатраты до 15 % за счет более точного соответствия скорости рабо-

ты ленты фактическому грузопотоку [11]. Эти результаты подтверждают актуальность разработки адаптивных систем управления для повышения энергоэффективности конвейерных систем и служат прочной теоретической базой для поддержки проекта по оптимизации эксплуатации ленточных конвейеров.

Повышения эффективности РЛР возможно достичь путем разработки новых методов оптимизации, основанных на математическом моделировании и реальном времени управления производственными процессами [12–14]: минимизировать потери энергии, повысить общую производительность системы, значительно улучшить точность и надежность системы в целом.

Следует рассматривать также и междисциплинарные подходы. Например, в исследовании [15] показано, что циклические термические и электрические нагрузки существенно влияют на долговечность электромеханических систем светодиодных источников света. Аналогичный эффект наблюдается и в системах ленточных конвейеров, где нерегулярное изменение скорости создает дополнительные механические нагрузки, что подчеркивает актуальность оптимизации алгоритмов регулирования для повышения общей энергоэффективности.

Цель исследования – разработка математической модели, позволяющей оценивать энергетические потери на этапах розлива и транспортировки тары, а также осуществлять оптимизацию работы насосов и приводов по выбранным критериям: снижение избыточных затрат электроэнергии, обеспечение требуемой производительности при уменьшении совокупных потерь, повышение общего КПД системы.

Данная задача тесно связана с управлением качеством производственных процессов и организацией производства. Оптимизация параметров не только способствует сокращению затрат на электроэнергию, но и обеспечивает более стабильный технологический режим розлива, повышая качество дозирования и минимизируя риск сбоев в работе линии. Таким образом, комплексный анализ позволяет выявлять узкие места в цепочке «насос – трубопроводы – станция розлива – конвейер» и выстраивать рациональную организацию производства, максимально эффективно используя ресурсы – сырье, энергию, рабочее время.

Для достижения этой цели в работе рассмотрен комплексный подход к моделированию движения и дозирования жидкости (гидравлическая часть), работы приводных систем конвейера (электромеханическая часть), взаимодействия

цепной ленты конвейера с тарой (механическая часть).

Используемые подходы, постановка задачи, критерии оптимизации

Математическое моделирование представляет собой ключевой инструмент для анализа и оптимизации сложных производственных систем, в том числе РЛР. Задачей моделирования в данном исследовании является описание процесса разлива и транспортировки. Модель должна учитывать динамику движения жидкостей в трубопроводах и емкостях, взаимодействие тары с конвейерной системой, энергоэффективность насосов и приводов, воздействие трибологических потерь и их влияние на общую производительность системы [16].

Для решения поставленной задачи моделирования были сделаны следующие допущения, основанные на анализе ключевых факторов технологического процесса разлива жидкости и транспортировки тары по конвейеру, которыми можно пренебречь без существенного влияния на корректность и точность модели.

1. Жидкость (например, вода, сироп) однородна и имеет постоянную плотность ρ (кг/м³) и вязкость μ (Па·с) в рабочем диапазоне [17].

2. Модель ориентирована на стационарный режим работы, при котором параметры процесса (скорость, давление, температура) не изменяются со временем; это допущение позволяет сосредоточиться на устойчивых эксплуатационных режимах, наиболее критичных для оптимизации энергоэффективности и производительности.

3. Сила трения между тарой и конвейерной лентой моделируется как линейная функция от скорости; это допущение обосновано, так как линейное поведение трения доминирует в установленныхся режимах работы, что подтверждается экспериментальными данными. Формула для расчета трения может быть представлена как

$$F_{\text{трения}} = kN,$$

где $F_{\text{трения}}$ – сила трения; k – коэффициент трения; N – нормальная сила (вес тары).

4. Исходя из существующих систем стабилизации температуры на производствах такого рода температурные изменения в системе считаются незначительными и не оказывающими существенного влияния на процессы разлива и транспортировки.

5. Приводы и насосы рассматриваются как работающие без временных задержек и колеба-

ний, чтобы сфокусироваться на их средних рабочих характеристиках и энергоэффективности; это допущение позволяет избежать необходимости учета динамических эффектов и сосредоточиться на статической оптимизации [18].

6. Основной задачей является поиск таких режимов работы насосов и приводов, при которых обеспечивается требуемый уровень производительности (количество единиц тары в единицу времени) и точность дозирования (погрешность разлива) одновременно с минимизацией суммарных энергетических потерь:

$$J = \alpha P_{\text{сум}} + \beta \Delta V,$$

где $P_{\text{сум}}$ – суммарная потребляемая мощность (насосами и приводами) в стационарном режиме; ΔV – отклонение объема разлива от заданного (показатель точности дозирования); α и β – весовые коэффициенты, отражающие приоритет энергоэффективности и качества разлива соответственно.

Такой критерий оптимизации (целевой функционал) позволяет количественно сравнивать разные варианты настройки привода (частота, напряжение, схема включения и др.) и насосного оборудования (регулирование по давлению или расходу через частотные преобразователи).

Следует отметить, что в рассматриваемой модели роботизированной линии разлива применяется частотное управление асинхронными электродвигателями без использования регенеративного режима. В связи с этим:

- энергия, не использованная для выработки полезной механической или гидравлической мощности, не возвращается в энергосистему, а рассеивается в виде тепловых потерь в силовых элементах системы, преобразователе и самом двигателе;

- доля энергии, возвращенной в сеть, не превышает 5 % от общих потерь, тогда как остальная часть (около 95 % и более) преобразуется в тепло вследствие диссипативных процессов;

- тепловые потери обусловлены внутренним сопротивлением активных компонентов, неидеальностью преобразователей и неизбежными потерями, что подтверждается как численным моделированием, так и данными натурных испытаний.

Таким образом, в рамках рассматриваемой системы основная масса неиспользованной электроэнергии переходит в тепловую, что является характерным для обычного (нерегенеративного) режима работы приводных установок в роботизированных линиях разлива.

Материалы и методы

Движение жидкости в трубопроводах описывается уравнениями Навье – Стокса в стационарной постановке. В численной реализации могут применяться метод конечных объемов или метод конечных элементов [19]. Основная система уравнений (в векторной форме) для стационарного случая

$$\begin{cases} \nabla \vec{v} = 0, \\ \rho(\nabla \vec{v})\vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g}, \end{cases}$$

где ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; \vec{v} – вектор скорости потока, $\text{м}/\text{с}$; p – давление или напор жидкости, Па ; μ – динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$; \vec{g} – вектор ускорения свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

На основе предполагаемого расхода Q и уравнений Навье – Стокса (чтобы учесть трение жидкости о стенки, местные сопротивления и др.) определяется перепад давления Δp . Транспортировка тары по конвейеру моделируется с учетом динамики взаимодействия между тарой и конвейерной лентой.

Уравнение движения тары можно записать следующим образом:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{\text{тяги}} - F_{\text{трения}},$$

где m – масса тары, кг ; x – положение тары, м ; $F_{\text{тяги}}$ – тяговая сила конвейера, Н ; $F_{\text{трения}}$ – сила трения, которая выдерживается для стационарного режима как

$$F_{\text{трения}} = kN = kmg,$$

где k – коэффициент трения; N – нормальная сила (вес тары), Н .

Энергоэффективность приводов и насосов оценивается на основе их характеристических кривых, описывающих зависимость потребляемой мощности от нагрузки и скорости вращения. Общий КПД системы определяется не как простая сумма, а как отношение полезной мощности к потребляемой [20, 21]:

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{P_{\text{полезная}}}{P_{\text{насосы}} + P_{\text{приводы}}},$$

где $P_{\text{полезная}}$ – полезная мощность, затрачиваемая на перемещение тары и жидкости, Вт ; $P_{\text{насосы}}$ – мощность, потребляемая насосами, Вт ; $P_{\text{приводы}}$ – мощность, потребляемая приводами, Вт .

Энергоэффективность определяется как

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{P_{\text{полезная}}}{P_{\text{эл}}},$$

где $P_{\text{эл}}$ – суммарная активная (электрическая) мощность, потребляемая от сети, Вт .

Следует учитывать взаимосвязь между движением жидкости и транспортировкой тары. Тяговая сила, $F_{\text{тяги}}$, зависит от давления и скорости жидкости, подаваемой насосами. Насосы создают давление Δp , Па , которое определяет скорость потока жидкости \vec{v} , $\text{м}/\text{с}$. Скорость потока жидкости влияет на объем подаваемой жидкости на станции розлива, что, в свою очередь, влияет на массу и движение тары. Очевидно, что масса тары m изменяется в зависимости от объема жидкости, а изменение полного объема V жидкости определяется через интеграл скорости потока \vec{v} , площади сечения трубы A , м^2 , по которой проходит жидкость с учетом времени наполнения t , с :

$$V = \int_0^t \vec{v} A dt.$$

Затраченная мощность насосов, $P_{\text{насосы}}$, Вт , зависит от давления и скорости потока жидкости:

$$P_{\text{насосы}} = \frac{\Delta p Q}{\eta_{\text{насосы}} (Q, \Delta p)},$$

где Δp – изменение давления (создаваемый напор), Па ; Q – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; $\eta_{\text{насосы}}$ – КПД насосов.

Затраченная мощность приводов, $P_{\text{приводы}}$, зависит от тяговой силы, $F_{\text{тяги}}$, и скорости движения конвейера:

$$P_{\text{приводы}} = \frac{F_{\text{тяги}} v_{\text{конвейера}}}{\eta_{\text{приводы}} (M, f)},$$

где $v_{\text{конвейера}}$ – скорость конвейерной ленты, $\text{м}/\text{с}$; $\eta_{\text{приводы}}$ – КПД приводной системы (двигатель + редуктор + преобразователь частоты), зависящий от крутящего момента M , $\text{Н}\cdot\text{м}$, и частоты f , Гц .

На практике $\eta_{\text{приводы}}$ не является константой и зависит от момента на валу M , $\text{Н}\cdot\text{м}$, и частоты вращения ω , $\text{рад}/\text{с}$. Для частоты выше номинальной (50 Гц) действует двухзонное регулирование:

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60},$$

где n – частота вращения, $\text{об}/\text{мин}$.

В дополнение к моделям движения жидкости и транспортировки тары учитываются следующие потери:

- трения в системе

$$F_{\text{трение общ}} = F_{\text{трение}} + F_{\text{трение подшипников}} + F_{\text{трение соединения}},$$

где $F_{\text{трение общ}}$ – суммарная сила трения, Н; $F_{\text{трение подшипников}}$ – сила трения в подшипниках, Н; $F_{\text{трение соединения}}$ – сила трения в соединениях, Н;

- потери на преобразование энергии:

$$\eta_{\text{насосы общ}} = \eta_{\text{насосы}} \eta_{\text{преобразователь}},$$

$$\eta_{\text{приводы общ}} = \eta_{\text{приводы}} \eta_{\text{преобразователь}},$$

где $\eta_{\text{насосы общ}}$ – общий КПД насосов с учетом преобразователя; $\eta_{\text{приводы общ}}$ – общий КПД приводов с учетом преобразователя; $\eta_{\text{преобразователь}}$ – общий КПД преобразователя.

Исходя из описанных допущений к модели, учитываются следующие потери в конвейерной системе: трение шарнирной ленты – поддержка

в верхнем поясе (транспортировочный участок); трение шарнирной ленты – поддержка в нижнем поясе (возвратная ветвь); трение шарнирной ленты – транспортируемый груз в режиме накопления; трение транспортируемого груза – боковое ведение; трение на приводе и отклонении (трение в подшипниках, шарнирное движение звеньев цепи, трение цепь – звездочка); прочие потери на трение (например, боковое движение цепи); потери КПД редуктора; потери КПД двигателя/регулировки двигателя; основное потребление периферии (источник питания, вентилятор, управление). Как показано на рисунке 1, КПД двигателей существенно зависит от фактора частичной нагрузки.

Более мелкие двигатели (например, мощностью 1 кВт) имеют значительно меньший КПД при низкой нагрузке по сравнению с более крупными двигателями (например, мощностью 5,5 кВт). Это подчеркивает важность выбора подходящих двигателей и режимов их работы для повышения общей энергоэффективности системы.

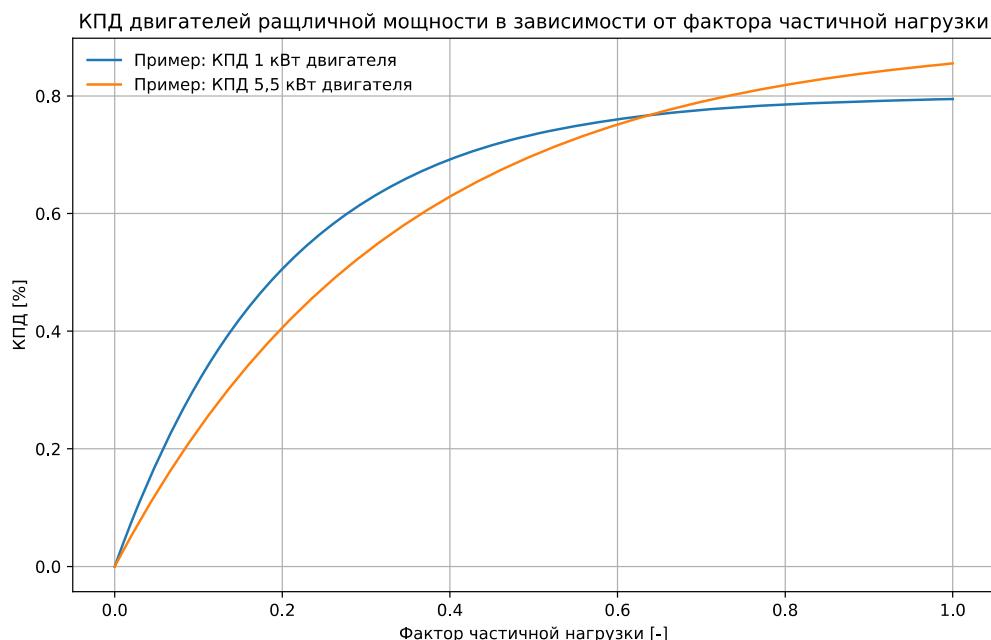


Рис. 1. Пример зависимости КПД двигателей различной мощности от факторов частичной нагрузки

Fig. 1. An example of how partial load factors affect the efficiency of motors with different power ratings

Модель приводной установки включает передачу крутящего момента M от двигателя через редуктор на выходной вал. Частотный преобразователь обеспечивает возможность изменения частоты вращения двигателя, что позволяет анализировать его работу в различных режимах нагрузки. Расчет механической мощности привода выполняется по формуле

$$P_{\text{мех}} = M \omega = M 2\pi n,$$

где M – крутящий момент, Нм; ω – угловая скорость, рад/с; n – частота вращения, об/мин.

Для моделирования эффективности привода были проведены расчеты при различных частотах переключения частотного преобразователя. Нагрузка на двигатель варьировалась поэтапно,

а потребляемая активная мощность рассчитывалась на основе математических моделей. КПД в каждом режиме нагрузки рассчитывался как отношение вырабатываемой механической мощности к потребляемой электрической мощности. Модель учитывает совокупный КПД асинхронного двигателя, червячного редуктора и частотного преобразователя.

Оптимизация сводится к выбору таких f , $v_{\text{ленты}}$, Δp и др., при которых J минимален при сохранении нужной производительности.

Однако в реальном производстве присутствуют пуски/остановы приводов, изменение уровня наполнения тары, масса $m(t)$, а также возможны колебания давления насосов при включении нескольких станций розлива. Для учета этих явлений следует дополнить модель динамическими уравнениями.

Уравнение моментов на валу двигателя (2-й закон Ньютона во вращательной форме):

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{двиг}}(t) - M_{\text{нагрузки}}(t) - M_{\text{трения}}(t),$$

где J – момент инерции системы, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; ω – угловая скорость, ($\text{рад}/\text{с}$); $M_{\text{двиг}}(t)$ – момент двигателя (зависит от f , U), $\text{Н}\cdot\text{м}$; $M_{\text{нагрузки}}(t)$ – момент сопротивления (масса цепи, тары), $\text{Н}\cdot\text{м}$; $M_{\text{трения}}(t)$ – момент механических потерь (редуктор, подшипники), $\text{Н}\cdot\text{м}$.

Моделирование и анализ результатов

В целях верификации и оптимизации разработанной модели была собрана комплексная вычислительная схема, охватывающая ключевые компоненты РЛР. При моделировании учитывалось оборудование следующих категорий: насосы с частотным управлением, резервуары для жидкости, трубопроводы, станции розлива, конвейерная система и ее приводы. Такая детализация позволила объединить в единую модель гидравлические, механические и электромеханические процессы, протекающие при розливе и транспортировке тары.

Основная цель моделирования заключалась в том, чтобы определить, при каких режимах работы насосов и конвейерных приводов достигается наилучшее сочетание энергоэффективности и производительности. Для этого в модель вводились два типа переменных: управляющие переменные (частоты преобразователей, скоростной режим приводов, возможные значения давления в насосах – через задание Δp); конструктивные параметры (передаточные числа, длина конвейера, масса цепи) и эксплуатацион-

ные (коэффициенты трения, массы груза, номинальные мощности).

В ходе численного эксперимента варьировались частоты приводов (от 20 до 220 Гц) и нагрузка (крутящий момент) на валу двигателя, а также изменялся коэффициент трения между цепью и направляющими. Одновременно регистрировалась потребляемая электрическая мощность и вычислялся КПД (отношение полезной механической или гидравлической мощности к общей потребляемой).

Для дальнейшего удобства анализа все входные данные были разделены на два основных набора. Первый набор (табл. 1) описывал параметры приводов и условия их моделирования, включая номинальную мощность $P_{\text{ном}} = 2,5 \text{ кВт}$, номинальный крутящий момент $M_{\text{ном}} = 160 \text{ Н}$ при 100%-й нагрузке, а также передаточное число $i = 25$. Второй набор (табл. 2) содержал характеристики транспортной системы (длина прямых участков, радиус кривой поворота, масса цепи на единицу длины). Эти параметры определяли совокупную механику конвейера и условия трения.

Таблица 1. Параметры системы привода и условия моделирования

Table 1. Drive system parameters and modeling conditions

Параметр	Значение
Номинальная мощность	$P_{\text{ном}} = 2,5 \text{ кВт}$
Номинальный крутящий момент при 100%-й нагрузке	$M_{\text{ном}} = 160 \text{ Нм}$
Номинальная скорость	$n_{\text{ном}} = 3000 \text{ об}/\text{мин}$
Передаточное число	$i = 25$
Частотные ступени преобразователя	от 20 до 220 Гц в 10 ступенях нагрузки
Тормозной момент	от 0 до 180 Нм в 10 ступенях нагрузки

Таблица 2. Параметры конвейерной системы

и привода в роботизированной линии розлива

Table 2. Conveyor system and drive parameters in a robotic bottling line

Параметр	Значение
Длина прямых участков	$L = 3,15 \text{ м}$
Радиус кривой поворота конвейера	$R = 520 \text{ мм}$
Номинальная мощность на выходе редуктора	$P_{\text{ном}} = 2,4 \text{ кВт}$
Номинальный крутящий момент на выходе редуктора	$M_{\text{ном}} = 160 \text{ Нм}$
Номинальная скорость на выходе редуктора	$n_{\text{ном}} = 1200 \text{ об}/\text{мин}$
Масса цепи на единицу длины	$q_z = 3,1 \text{ кг}/\text{м}$
Коэффициент трения между цепью и направляющей	$k_{\text{тр}} = 0,32$

На первом шаге для заданного расхода жидкости Q и давления Δp (которые определялись частотой вращения насосов) вычислялась мощность насосов $P_{\text{насосы}}$. В случае необходимости (например, при разных станциях розлива) учитывалась разница по объемам и потерям давления на различных участках трубопровода.

Каждый участок транспортировки сегментировался на прямые и криволинейные отрезки.

Для каждого из них определялись: дополнительная сила $F_{\text{дбл}}$, связанная с трением ($\mu m_n g$), возможный уклон (участки подъема или спуска), суммарная масса груза и цепи. Силы тяги суммировались поэтапно, чтобы получить $\max(F_n)$ – тяговое усилие на n -м участке. Полученная сила F_U определяла максимальную нагрузку на привод.

При составлении модели для каждого узла конвейера (прямой или кривой) учитывалась добавочная сила сопротивления, зависящая от массы цепи, груза, а также от уклона при наличии наклонных участков. В итоге сила тяги на каждом последующем сегменте рассчитывалась с учетом суммарной нагрузки от всех предыдущих сегментов.

Зная требуемую окружную силу F_U и скорость движения цепи $v_{\text{цепи}}$, можно было вычислить необходимую механическую мощность $P_{\text{мех}} = F_U v_{\text{цепи}}$. На каждом этапе расчета задавалась частота f привода (в диапазоне от 20 до 220 Гц) и соответствующий крутящий момент M . В моделях асинхронного двигателя и червячного редуктора (с учетом частотного преобразователя) вычислялся КПД $\eta_{\text{привод}}(f, M)$. Это позволило определить потребляемую активную мощность $P_{\text{приводы}}$ и свести итоговые данные к значению КПД системы.

В ходе моделирования была установлена зависимость между частотой преобразователя и КПД привода. Результаты моделирования показывают, что КПД привода увеличивается с ростом частоты до определенного значения, после чего он стабилизируется. Графики на рисунке 2 иллюстрируют изменение КПД в зависимости от частоты преобразователя при различных нагрузках для оценки КПД комбинации привода, состоящей из асинхронного двигателя, червячного редуктора и частотного преобразователя, и КПД транспортной системы в зависимости от загрузки и частоты преобразователя.

Акцент сделан на использовании КПД в качестве главного критерия оценки эффективности линии розлива, что обосновано следующими соображениями.

1. КПД определяется как отношение полезной мощности, осуществляющей выполнение

технологической задачи (перемещение тары, дозирование жидкости), к суммарной потребляемой электрической мощности, что позволяет интегрировать влияние всех внутренних потерь – механических, гидравлических и электроэнергетических.

2. Учитывая, что снижение энергопотребления является приоритетной задачей для повышения конкурентоспособности и снижения эксплуатационных затрат, КПД позволяет количественно оценить, насколько эффективно происходит преобразование электроэнергии в полезную работу.

3. Выбор КПД в качестве основного показателя также обусловлен возможностью его универсального применения для сравнения различных режимов работы, вариантов настройки приводов и насосного оборудования, что подтверждено результатами моделирования и полевыми испытаниями.

4. Хотя ряд других показателей (например, стабильность дозирования, время простоя, качество транспортировки) также имеют значение, комплексный характер энергетического баланса линии розлива позволяет считать КПД наиболее объективным и интегральным индикатором эффективности системы.

Результаты, полученные в ходе моделирования и экспериментов, были применены для анализа типичной транспортной системы с цепным конвейером. Основная цель заключается в аналитическом расчете потерь в системе привода в контексте общих потерь транспортной системы. Пример рассматриваемой системы представлен на рисунке 3. Система включает в себя прямые участки и горизонтальные кривые.

Для расчета механической мощности привода $P_{\text{мех}}$ цепного конвейера сначала необходимо определить окружную силу F_U , которая соответствует максимальному тяговому усилию цепи. Для этого система транспортировки сегментируется на отдельные участки:

$$P_{\text{мех}} = F_U v_K,$$

где $P_{\text{мех}}$ – механическая мощность привода; F_U – окружная сила; v_K – скорость цели.

Максимальная сила тяги цепи определяется путем суммирования сил $F_{\text{дбл}}$ каждого отдельного сегмента в направлении движения цепи. Расчет начинается на выходе цепи из звездочки, где тяговое усилие цепи приблизительно равно нулю. Вычисленное тяговое усилие первого участка затем используется в качестве начального значения для расчета следующего участка.

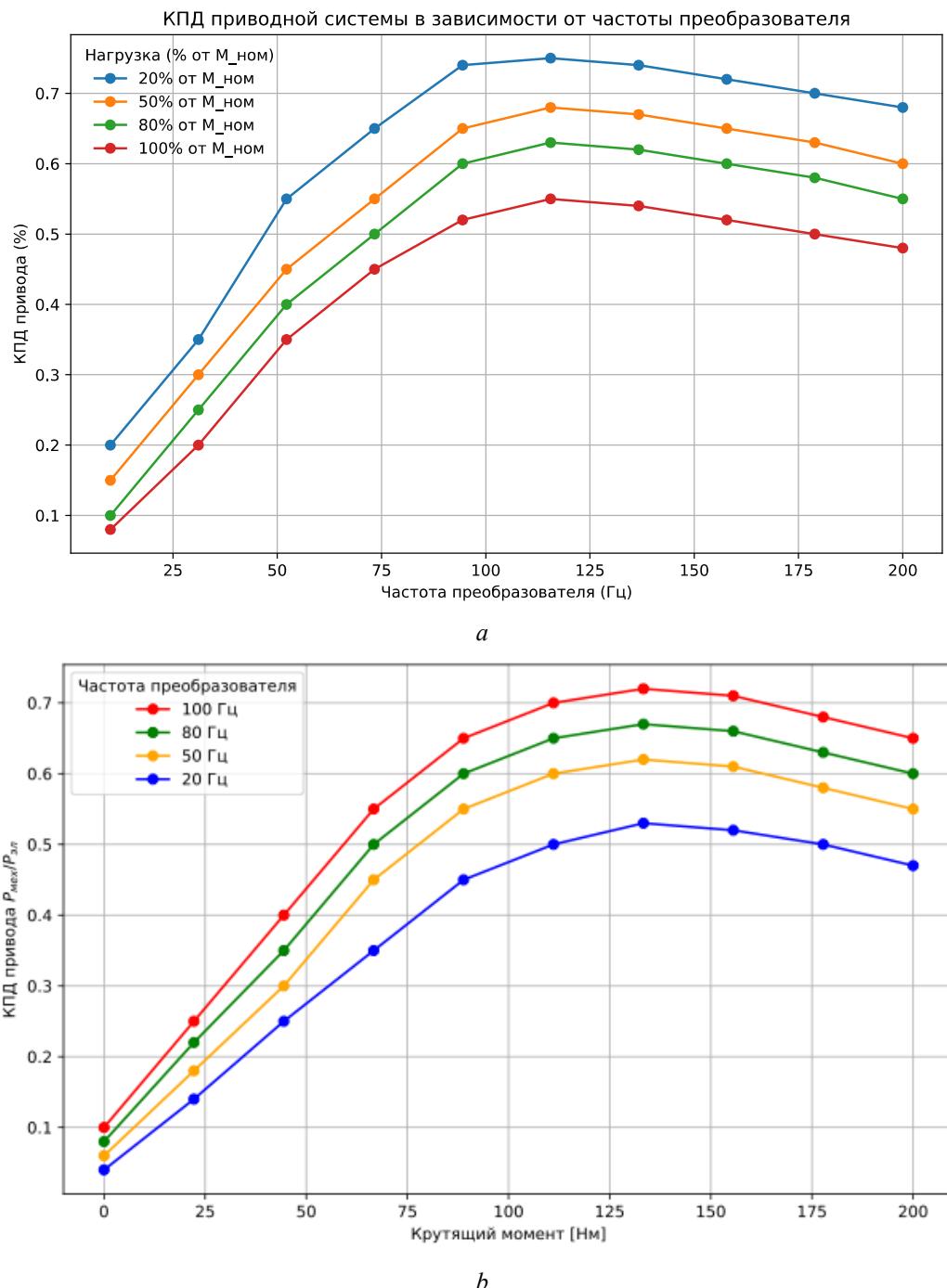


Рис. 2. КПД моделируемой приводной системы в зависимости от частоты преобразователя (а), КПД транспортной системы в зависимости от загрузки и частоты преобразователя (б)

Fig. 2. Efficiency of the modeled drive system as a function of the frequency converter (a) and efficiency of the transport system as a function of load and the frequency converter (b)

Если F_n – это сила тяги цепи на n -м сегменте транспортной системы, то она рассчитывается как сумма тяговой силы на предыдущем сегменте F_{n-1} и добавочной силы на текущем сегменте $F_{\text{доб}}$:

$$F_U = \sum_{n=1}^N (F_{\text{доб}_n}) + F_{\text{начальная}},$$

где F_U – окружная сила, или максимальная тяговая сила цепи на входе в привод, Н; $F_{\text{доб}_n}$ – добавочная сила на каждом отдельном сегменте n транспортной системы, Н; $F_{\text{начальная}}$ – начальная сила тяги на первом сегменте, которая часто принимается за ноль, Н;

$$F_{\text{доб}_n} = \mu m_n g \cos(\alpha_n),$$

где $F_{\text{дб}n}$ – добавочная сила на сегменте n , (Н); μ – коэффициент трения; m_n – масса цепи и груза на сегменте n , кг; g – ускорение свободного

падения, м/с²; $\cos(\alpha_n)$ – косинус угла наклона сегмента α_n .

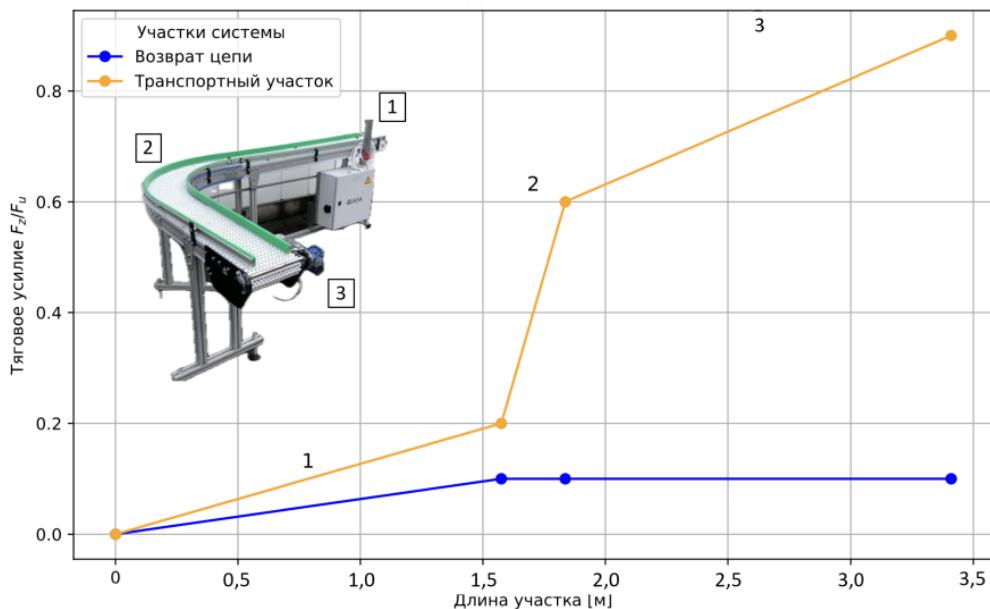


Рис. 3. Зависимость тягового усилия для моделируемой конвейерной системы с окружной силой F_u

Fig. 3. Dependence of the traction force in the modeled conveyor system on the circumferential force F_u

С использованием известной (измеренной) электрической активной мощности $P_{\text{эл}}$ можно рассчитать КПД системы:

$$\eta_{\text{общ}} = P_{\text{мех}} / P_{\text{эл}}.$$

Как правило, трехфазные асинхронные двигатели работают наиболее стабильно и эффективно при номинальной нагрузке. Исходя из этого в ходе моделирования была задана номинальная мощность привода, соответствующая максимальной производительности системы. Моделирование показало, что при высокой загрузке (около 100 кг/м) и скорости движения цепи 50 м/мин (что соответствует частоте преобразователя 100 Гц) система достигает наилучшего КПД, который составил 0,7. Снижение специфической массы груза согласно моделированию приводит к уменьшению КПД. Например, при частоте преобразователя 50 Гц КПД составляет 0,5, однако при снижении частоты до 20 Гц КПД падает до 0,3. Зависимость на рисунке 4 подтверждает, что снижение частоты преобразователя, следовательно, и скорости движения цепи, ведет к значительному ухудшению общей эффективности системы.

Моделирование также показало, что при низких частотах питания (например, 20 Гц) потери в системе привода значительно возрастают и могут даже превышать механические по-

тери. Многие усилия операторов транспортных систем направлены на улучшение условий трения между скользящей цепью и направляющими элементами. Замена изношенных элементов на новые, например, из добавленных пластиков, значительно улучшает коэффициент трения. Однако полная реализация потенциала энергосбережения от такой меры в контексте всей системы конвейера со скользящей цепью имеет смысл только при одновременной оптимизации с приводом и преобразователем частоты. Рисунок 5 демонстрирует зависимость распределения мощностей от различных коэффициентов трения при нагрузке, соответствующей массе груза на единицу длины примерно 20,5 кг/м.

Из анализа данных на рисунке видно, что уменьшение коэффициента трения с 0,3 до 0,1 приводит к снижению потребляемой мощности с 1386,3 до 494 Вт, однако это сопровождается уменьшением КПД системы с 0,68 до 0,3. Напротив, при увеличении коэффициента трения до 0,5 наблюдается рост потребляемой мощности до 1058 Вт, что сопровождается повышением КПД системы до 0,61. Хотя увеличение коэффициента трения ожидаемо приводит к значительному росту потерь на трение в верхнем и нижнем поясе, доля потерь в системе привода снижается.

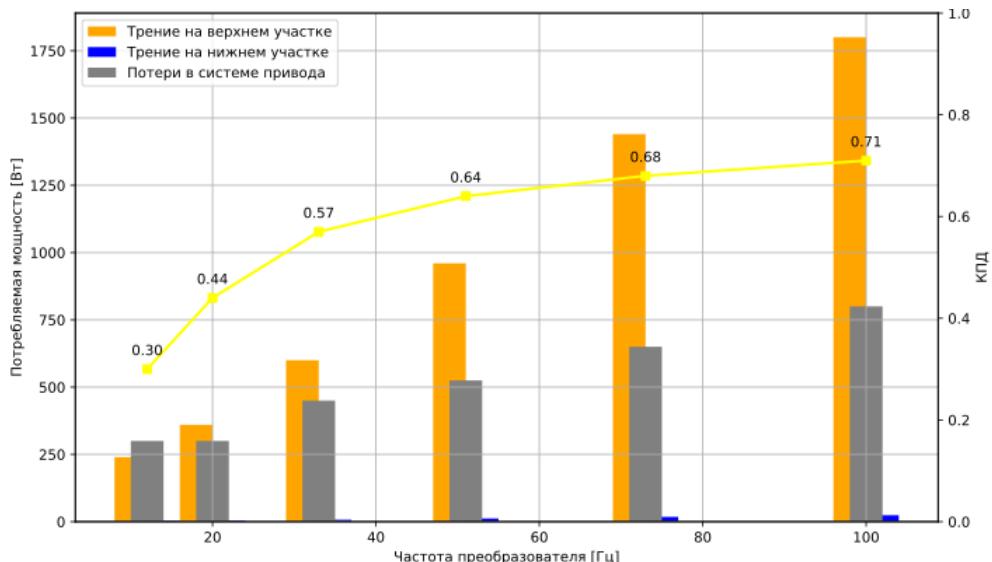


Рис. 4. Смоделированная потребляемая мощность и КПД при различных частотах преобразователя

Fig. 4. Simulated power consumption and efficiency at various frequency converter frequencies

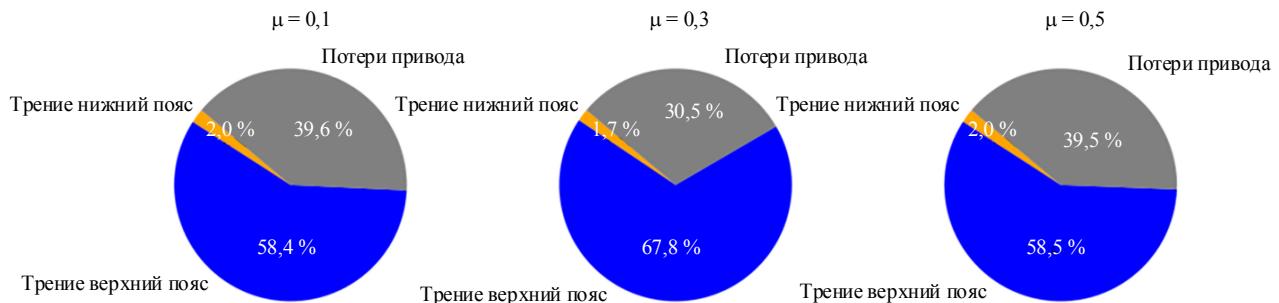


Рис. 5. Влияние коэффициента трения на потери и потребляемую мощность в моделируемой конвейерной системе

Fig. 5. Influence of the friction coefficient on losses and power consumption in the modeled conveyor system

Выводы

Полученные зависимости позволяют определить частоту, при которой (в исследуемом случае) двигатели максимально эффективны при конкретной механической нагрузке; в этом случае следует избегать слишком низких и чрезмерно высоких частот, если они выходят за зону оптимального КПД.

Результаты подтверждают, что существенный резерв экономии энергии достигается при правильном согласовании номинальной мощности двигателя со средней ожидаемой нагрузкой. Чрезмерно избыточная мощность приводит к снижению КПД при работе на низком моменте, а недостаточная – к перегрузкам и преждевременному износу.

Хотя снижение трения всегда рассматривается как полезная мера, на практике оно целесообразно только при одновременном пере-

смотре настройки приводов (режимы ЧП, мощность двигателя). Если не перестраивать электромеханическую систему, то в результате меньших механических усилий двигатель может оказаться в «невыгодной» области своего КПД.

Предложенная модель может быть внедрена в программное обеспечение, которое в реальном времени подстраивает частоту вращения и регулирует давление насосов исходя из текущих условий (температура, фактическая нагрузка, трение). Такие адаптивные алгоритмы позволяют поддерживать оптимальный КПД даже при изменении типа тары или скорости производственной линии.

Проведенный анализ показал, что энергоэффективность роботизированной линии розлива во многом определяется комплексной согласованностью механической и электрической части.

Библиографические ссылки

1. Tousi J., Heydaryan B., Khatib M., Bajçinca N. (2023) Model predictive control strategies for industrial demand response of beverage production lines. 2023 European Control Conference (ECC), pp. 1-6 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.23919/ecc57647.2023.10178176> (accessed: 09.01.2025).
2. Клишин И. А. Влияние цифровых технологий на развитие промышленного предприятия: опыт и перспективы // Вестник Московского финансово-юридического университета. 2023. № 4. С. 117–124. DOI: 10.52210/2224669X_2023_4_117
3. Каримов В. Д. Анализ применения цифровых двойников в автоматизированных системах управления технологическим процессом // Endless lightin science. 2023. Ноябрь. С. 337–341 [Электронный ресурс]. URL: <https://endlesslightinscience.com/article/12345> (дата обращения: 09.01.2025).
4. Mikhail M., Abed K. (2023) Robotic inspection and automated analysis system for advanced manufacturing. IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA). DOI: <https://doi.org/10.11591/ijra.v12i4. pp352-364>
5. Syed R., Suriadi S., Adams M., Bandara W., Lee-mans S., Ouyang C., Hofstede A., Weerd I., Wynn M., Reijers H. (2020) Robotic Process Automation: Contemporary themes and challenges. Comput. Ind., vol. 115, p. 103162. DOI: 10.1016/j.compind.2019.103162
6. Ильин Д. Д. Конвейер, типы конвейеров и их особенности в производстве // Вестник науки. 2024. № 12 (81) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konveyer-tipy-konveyerov-i-ih-osobennosti-v-proizvodstve> (дата обращения: 10.01.2025).
7. Эшмуродов З. О. Исследование факторов, влияющих на эффективность работы ленточных конвейеров горнотранспортных систем // Journal of Advances in Engineering Technology. 2024. № 3. С. 42–49.
8. Квас Е. С., Кузьменко В. П. Оценка эффективности роботизированных линий розлива с использованием имитационного моделирования и эксплуатационных коэффициентов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 4. С. 31–44. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-31-44
9. Анализ методов оптимального проектирования специальных электрических приводов / В. Ю. Карапандей, Б. К. Попов, О. Б. Попова, В. Л. Афанасьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 4. С. 116–122.
10. Vysocký A., Papřok R., Šafářík J., Kot T., Bobovský Z., Novák P., Snášel V. (2020) Reduction in Robotic Arm Energy Consumption by Particle Swarm Optimization. Appl. Sci. No. 10. Р. 8241. DOI: 10.3390/app10228241
11. Дмитриева В. В., Сизин П. Е. Эффективность эксплуатации ленточного конвейера в зависимости от алгоритмов регулирования скорости ленты // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 11. С. 128–139.
12. Дмитриева В. В., Сизин П. Е. Непрерывное регулирование скорости ленточного конвейера в случае усеченной спектральной плотности грузопотока // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 2. С. 130–138. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-130-138
13. Титов Д. В. Инновационные решения для управления скоростью: частотно-регулируемый привод // Вестник науки. 2024. Т. 4, № 12 (81). С. 1771–1778.
14. Система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом / В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев, С. Валтчев, Е. И. Грачева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 116–126.
15. Исследовательские испытания светодиодных источников света / В. П. Кузьменко, В. Ф. Шишлаков, С. В. Соленый [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 632–640. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-632-640
16. Bosak A., Toropov A., Dubovyk V., Toropova L., Bodnaruk O. (2023) Cascade control of electrical drives of a pumping station based on an astatic fuzzy regulator. Bulletin of the National Technical University KhPI Series Energy Reliability and Energy Efficiency. DOI: 10.20998/2224-0349.2023.02.01
17. Menke R., Abraham E., Stoianov I. (2016) Modeling Variable Speed Pumps for Optimal Pump Scheduling: Proceedings of the ASCE [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1061/9780784479858.022> (accessed: 12.02.2025). DOI: 10.1061/9780784479858.022
18. Digalovski M., Cvetkovski G. (2024) Increase of Energy Efficiency in Pump Electric Drive. Energy Efficiency Journal [Electronic resource]. Available at: <https://energyefficiency.com/article/654321> (accessed: 13.02.2025).
19. Коноплев Н. Г., Коробков Г. Е. Эффекты упругости и инерции жидкости при переходных процессах в трубопроводе // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2020. № 3. С. 44–53. DOI: 10.24411/0131-4270-2020-10309
20. Шураев О. П. Экспериментальное определение механического КПД некоторых судовых дизелей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 4. С. 69–78.
21. Анализ потребления электроэнергии асинхронными двигателями классов эффективности IE1 и IE2 в насосной установке мощностью 11 кВт / С. Х. Ошурбеков, В. М. Казакбаев, В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский, А. С. Парамонов // Электротехника и электромеханика. 2020. № 5. С. 18–24.

References

1. Tousi J., Heydaryan B., Khatib M., Bajçinca N. (2023) Model predictive control strategies for industrial demand response of beverage production lines. 2023 European Control Conference (ECC), pp. 1-6 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.23919/ecc57647.2023.10178176> (accessed: 09.01.2025).

- European Control Conference (ECC), pp. 1-6 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.23919/ecc57647.2023.10178176> (accessed: 09.01.2025).
2. Klishin I.A. (2023) [The impact of digital technologies on the development of an industrial enterprise: experience and prospects]. *Vestnik Moskovskogo finansovo-yuridicheskogo universiteta*. No. 4. Pp. 117-124. DOI: 10.52210/2224669X_2023_4_117 (in Russ.).
3. Karimov V.D. (2023) [Analysis of digital twins application in automated process control systems]. *Endless lightins cience*. November. Pp. 337-341 (in Russ.).
4. Mikhail M., Abed K. (2023) Robotic inspection and automated analysis system for advanced manufacturing. *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijra.v12i4. pp352-364>
5. Syed, R., Suriadi S., Adams M., Bandara W., Leemans S., Ouyang C., Hofstede A., Weerd I., Wynn M., Reijers H. (2020) Robotic Process Automation: Contemporary themes and challenges. *Comput. Ind.* Vol. 115. P. 103162. DOI: 10.1016/j.compind.2019.103162
6. Ilyin D.D. (2024) [Conveyor, types of conveyors and their features in production]. *Vestnik Nauki*. No. 12 [Electronic resource]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/konveyer-tipy-konveyerov-i-ih-osobennosti-v-proizvodstve> (accessed: 10.01.2025) (in Russ.).
7. Eshmurodov Z.O. (2024) [Study of factors affecting the efficiency of belt conveyors in mining transport systems]. *Journal of Advances in Engineering Technology*. No. 3. Pp. 42-49 (in Russ.).
8. Kvas E.S., Kuzmenko V.P. (2024) [Evaluation of the efficiency of robotic filling lines using simulation modeling and operational coefficients]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. Vol. 27, no. 4. Pp. 31-44. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-31-44 (in Russ.).
9. Karandei V.Yu., Popov B.K., Popova O.B., Afanasyev V.L. (2022) [Analysis of optimal design methods for special electric drives]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. No. 4. Pp. 116-122 (in Russ.).
10. Vysocký A., Papřok R., Šafařík J., Kot T., Bobovský Z., Novák P., Snášel V. (2020) Reduction in Robotic Arm Energy Consumption by Particle Swarm Optimization. *Appl. Sci.* No. 10. P. 8241. DOI: 10.3390/app10228241
11. Dmitrieva V.V., Sizin P.E. (2020) [Efficiency of belt conveyor operation depending on belt speed control algorithms]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*. No. 11. Pp. 128-139 (in Russ.).
12. Dmitrieva V.V., Sizin P.E. (2020) [Continuous belt conveyor speed control in the case of truncated spectral density of the material flow]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*. No. 2. Pp. 130-138. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-130-138 (in Russ.).
13. Titov D.V. (2024) [Innovative solutions for speed control: frequency-controlled drive]. *Vestnik Nauki*. Vol. 4, no. 12. Pp. 1771-1778 (in Russ.).
14. Meshcheryakov V.N., Sibircev D.S., Valtchev S., Gracheva E.I. (2021) [Control system for frequency-synchronized asynchronous electric drive]. *Izvestiya vysishikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. Vol. 23, no. 3. Pp. 116-126 (in Russ.).
15. Kuzmenko V.P., Shishlakov V.F., Soleny S.V. (2019) [Research testing of LED light sources]. *Izvestiya vysishikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. Vol. 62, no. 7. Pp. 632-640. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-632-640 (in Russ.).
16. Bosak A., Toropov A., Dubovyk V., Toropova L., Bodnaruk O. (2023) Cascade control of electrical drives of a pumping station based on an astatic fuzzy regulator. *Bulletin of the National Technical University KhPI Series Energy Reliability and Energy Efficiency* [Electronic resource]. DOI: 10.20998/2224-0349.2023.02.01
17. Menke R., Abraham E., Stoianov I. (2016) Modeling Variable Speed Pumps for Optimal Pump Scheduling: Proceedings of the ASCE [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1061/9780784479858.022> (accessed: 12.02.2025). DOI: 10.1061/9780784479858.022
18. Digalovski M., Cvetkovski G. (2024) Increase of Energy Efficiency in Pump Electric Drive. *Energy Efficiency Journal* [Electronic resource]. Available at: <https://energyefficiency.com/article/654321> (accessed: 13.02.2025).
19. Konoplev N.G., Korobkov G.E. (2020) [Elasticity and inertia effects of liquid during transient processes in a pipeline]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya*. No. 3. Pp. 44-53. DOI: 10.24411/0131-4270-2020-10309 (in Russ.).
20. Shuraev O.P. (2020) [Experimental determination of the mechanical efficiency of some marine diesel engines]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. No. 4. Pp. 69-78 (in Russ.).
21. Oshurbekov S.Kh., Kazakbaev V.M., Pracht V.A., Dmitrievskiy V.A., Paramonov A.S. (2020) [Analysis of electricity consumption by asynchronous motors of efficiency classes IE1 and IE2 in a pump installation with a capacity of 11 kW]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. No. 5. Pp. 18-24 (in Russ.).

Optimization of Robotic Beverage Bottling Lines Based on Mathematical Modeling and Process Efficiency Analysis

E.S. Kvas, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

This study focuses on the development of a mathematical model that incorporates hydraulic, mechanical, and electromechanical processes occurring in beverage bottling and container transport systems. The model aims to identify pump and drive optimal operating modes to minimize total energy losses while maintaining the required production output. Enhancing productivity while simultaneously reducing energy consumption is a top priority in modern robotic bottling lines. Under conditions of uneven loading and improper selection of drive and pump parameters, efficiency

losses can reach up to 30 %. Optimizing such systems can significantly lower costs and improve competitiveness for both large-scale producers and mid-sized enterprises in the food industry. In this work, an approach that includes analysis and modeling of energy consumption and losses in system components such as drives, conveyor belts, and frequency converters, was developed. A comprehensive modeling framework combines hydrodynamic equations for evaluating flow rate and pressure in pipelines with regard to tribological losses in conveyor elements. The characteristics of drives and pumps, including the effects of frequency regulation and torque on overall efficiency, were taken into account. Calculations at different speeds and load levels were performed to identify the key factors determining energy consumption. The modeling confirmed the potential for improving energy efficiency and operational stability by means of optimal tuning of main system components, including friction coefficients in moving conveyor elements, thus opening prospects for further development and optimization of similar manufacturing processes. Field experiment data were used to verify the model accuracy, with the results compared against real operating parameters of analogous conveyor lines. Based on the analysis, strategies to optimize component operation and enhance overall efficiency in transportation and bottling processes, are proposed.

Keywords: robotic bottling lines, mathematical modeling, process optimization, energy efficiency, manufacturing systems.

Получено 30.01.2025

Образец цитирования

Kvas E. C. Оптимизация роботизированных линий розлива на основе математического моделирования и анализа процессов эффективности // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 1. С. 46–58. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-46-58

For Citation

Kvas E.S. (2025) [Optimization of Robotic Beverage Bottling Lines Based on Mathematical Modeling and Process Efficiency Analysis]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 1, pp. 46-58 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-46-58