

УДК 62-5

Билалова Алиса Ильдаровна, Кандидат технических наук, доцент, кафедра "Электропривод и автоматизация промышленных установок" «Ульяновский государственный технический университет» город Ульяновск.

Шмидт Ольга Николаевна, магистратура 1 курс заочно-вечерний факультет, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», «Ульяновский государственный технический университет» город Ульяновск.

РАЗРАБОТКА МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО МЕХАНИЗМА

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения отказоустойчивости и плавности работы мощных грузоподъемных механизмов (ГПМ). Проанализированы недостатки традиционных однодвигательных систем (высокие пусковые токи, ударные нагрузки на механическую часть, полная остановка работы при выходе из строя единственного привода). В качестве решения предложена многодвигательная система на основе нескольких асинхронных электродвигателей, работающих на общий редуктор через суммирующий планетарный механизм. Сформулированы рекомендации по внедрению системы.

Abstract. The article discusses the problem of ensuring fault tolerance and smooth operation of powerful lifting mechanisms (GPM). The disadvantages of traditional single-engine systems (high inrush currents, shock loads on the mechanical part, complete shutdown of operation in case of failure of a single drive) are analyzed. A multi-motor system based on several asynchronous electric motors operating on a common gearbox through a summing planetary mechanism is proposed as a solution. Recommendations for the implementation of the system are formulated.

Ключевые слова: грузоподъемный механизм, многодвигательный привод, отказоустойчивость, планетарный редуктор, асинхронный двигатель, системы управления.

Key words: lifting mechanism, multi-motor drive, fault tolerance, planetary gearbox, asynchronous motor, control systems.

Актуальность. Современные грузоподъемные механизмы (мостовые краны, порталные краны, подъемные установки шахт) являются критически важным оборудованием в логистике, строительстве, горнодобывающей промышленности. Повышение их производительности, надежности и безопасности, - одна из приоритетных задач машиностроения [1, С. 333; 3, С.102]. Традиционные однодвигательные системы имеют ряд принципиальных ограничений:

- высокие пусковые токи, приводящие к провалам напряжения в сети;
- значительные ударные нагрузки на механические передачи и тормозные системы;
- низкая отказоустойчивость: выход из строя единственного двигателя или элемента преобразовательной техники приводит к полной остановке механизма. А это влечет за собой простой оборудования и финансовые потери. Иногда это чревато созданием аварийной ситуации на производстве.

Разработка многодвигательных систем, лишенных этих недостатков, является актуальным направлением, соответствующим тенденциям повышения энергоэффективности промышленного оборудования [4, С. 66].

Постановка проблемы. Основная проблема заключается в необходимости создания грузоподъемного привода, сочетающего в себе высокую мощность, плавность работы и повышенную надежность [5, С.525]. Необходимо решить следующие задачи:

- обеспечить синхронную работу нескольких двигателей на общую нагрузку без возникновения паразитных циркулирующих мощностей;
- разработать кинематическую схему, позволяющую суммировать крутящие моменты от нескольких источников;
- создать систему управления, обеспечивающую равномерное распределение нагрузки между двигателями;
- реализовать возможность продолжения работы в режиме пониженной производительности при отказе одного из двигателей.

Предлагаемое решение. В качестве решения предлагается многодвигательная система на основе двух или трех асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, управляемых частотными преобразователями (ЧП) [2, С. 74; 6, С.105]. Двигатели работают на общий грузовой вал через суммирующий планетарный редуктор.

1. Кинематическая схема. Для суммирования мощностей наиболее эффективно использование планетарных механизмов. Рассмотрим схему с тремя двигателями (рис. 1).

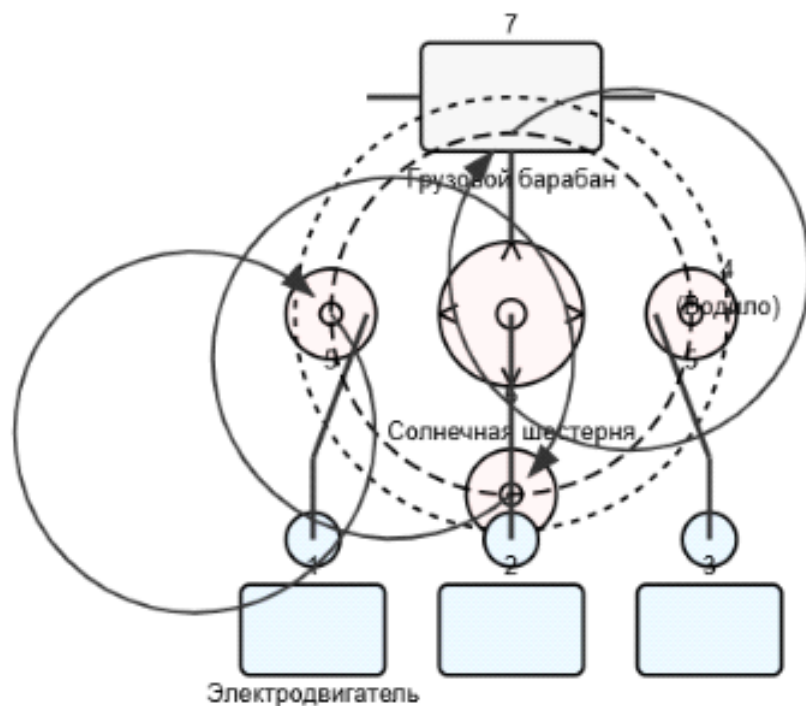


Рисунок 1 – Кинематическая схема многодвигательного привода: 1, 2, 3 – электродвигатели; 4 – планетарный редуктор (водило); 5 – сателлиты; 6 – центральная (солнечная) шестерня; 7 – грузовой барабан.

Схема демонстрирует как вращение от трех двигателей передается через планетарный механизм на общий грузовой барабан. Стрелки показывают направление вращения элементов системы.

В данной схеме:

- вращение от двигателей (1, 2, 3) передается на водила (4) трех идентичных планетарных блоков;
- сателлиты (5) каждого блока находятся в зацеплении с общей центральной (солнечной) шестерней (6);
- солнечная шестерня напрямую связана с грузовым барабаном (7).

Такая схема обеспечивает автоматическое кинематическое суммирование моментов двигателей.

2. Расчет основных параметров

Исходные данные для ГПМ:

- масса груза, $m = 20\,000$ кг;
- диаметр барабана, $D = 0,8$ м;
- скорость подъема, $V = 0,5$ м/с;
- количество двигателей, $n = 3$.

КПД редуктора $\eta = 0,96$.

Шаг 1. Усилие на барабане

$$F = m \cdot g = 20000 \cdot 9,81 = 196200 \text{ Н.}$$

Шаг 2. Крутящий момент на барабане

- $M_{\text{бар}} = F \cdot (D/2) = 196\,200 \cdot 0,4 = 78\,480 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Шаг 3. Мощность на барабане

$$P_{\text{бар}} = F \cdot V = 196200 \cdot 0,5 = 98100 \text{ Вт} = 98,1 \text{ кВт.}$$

Шаг 4. Суммарный момент на входе редуктора (с учётом КПД)

(момент на входе больше, чем на выходе, из-за потерь).

$$M_{\text{сум}} = M_{\text{бар}} / \eta = 78\,480 / 0,96 \approx 81\,750 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Шаг 5. момент на одном двигателе (при равномерном распределении):

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{сум}} / n = 81\,750 / 3 = 27\,250 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Шаг 6. Угловая скорость и частота вращения барабана

- Угловая скорость:

$$\omega_{\text{бар}} = D2V = 0,82 \cdot 0,5 = 1,25 \text{ рад/с.}$$

- Частота вращения:

$$n_{\text{бар}} = \pi 30 \cdot \omega_{\text{бар}} = 3,141630 \cdot 1,25 \approx 11,94 \text{ об/мин (точнее: } \approx 12 \text{ об/мин)}.$$

Шаг 7. Передаточное число редуктора (верно)

При номинальной частоте двигателя $n_{\text{дв}} = 1500$ об/мин:

$$i = n_{\text{бар}} n_{\text{дв}} = 11,94 \cdot 1500 \approx 125,6 \text{ (округлим до 125)}.$$

Шаг 8. Угловая скорость вала двигателя (верно)

$$\omega_{\text{дв}} = 602 \pi n_{\text{дв}} = 602 \cdot 3,1416 \cdot 1500 \approx 157,08 \text{ рад/с.}$$

Шаг 9. Мощность одного двигателя — исправление ошибки

Мощность можно считать либо:

- по моменту и угловой скорости на валу двигателя, либо
- по выходной мощности с учётом КПД.

Посчитаем через выходную мощность и КПД):

Общая механическая мощность на барабане: $P_{\text{бар}} = 98,1$ кВт.

С учётом КПД редуктора, суммарная мощность двигателей:

$$P_{\text{сум}} = \eta P_{\text{бар}} = 0,9698 \cdot 98,1 \approx 102,19 \text{ кВт.}$$

Тогда мощность одного двигателя:

$$P_{\text{дв}} = n P_{\text{сум}} = 3 \cdot 102,19 \approx 34,06 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{дв}} \approx 34,1 \text{ кВт}$$

Имеем следующие итоговые параметры:

- Усилие на барабане: $F = 196200$ Н.
- Момент на барабане: $78,480$ Н·м.
- Мощность на барабане: $P_{\text{бар}} = 98,1$ кВт.
- Суммарный момент на входе редуктора: $81,750$ Н·м.
- Момент на одном двигателе: $27,250$ Н·м.

- Угловая скорость барабана: $\omega_{\text{бар}}=1,25$ рад/с.
- Частота вращения барабана: $n_{\text{бар}}\approx 12$ об/мин.
- Передаточное число: $i\approx 125$.
- Угловая скорость двигателя: $\omega_{\text{дв}}\approx 157$ рад/с.
- Мощность одного двигателя: $P_{\text{дв}}\approx 34,1$ кВт.

Рекомендации по реализации. Для мощности 34,1 кВт подойдут асинхронные двигатели типа АИР200L4 (37 кВт, 1500 об/мин) (или аналоги). Необходимо предусмотреть систему синхронизации двигателей (например, на базе преобразователей частоты с векторным управлением). Редуктор должен обеспечивать передаточное число ≈ 125 , и момент 27,250 Н·м на каждом входном валу.

3. Система управления. Структурная схема системы управления представлена на рис. 2. Она построена по принципу главный-ведомый (Master-Slave).

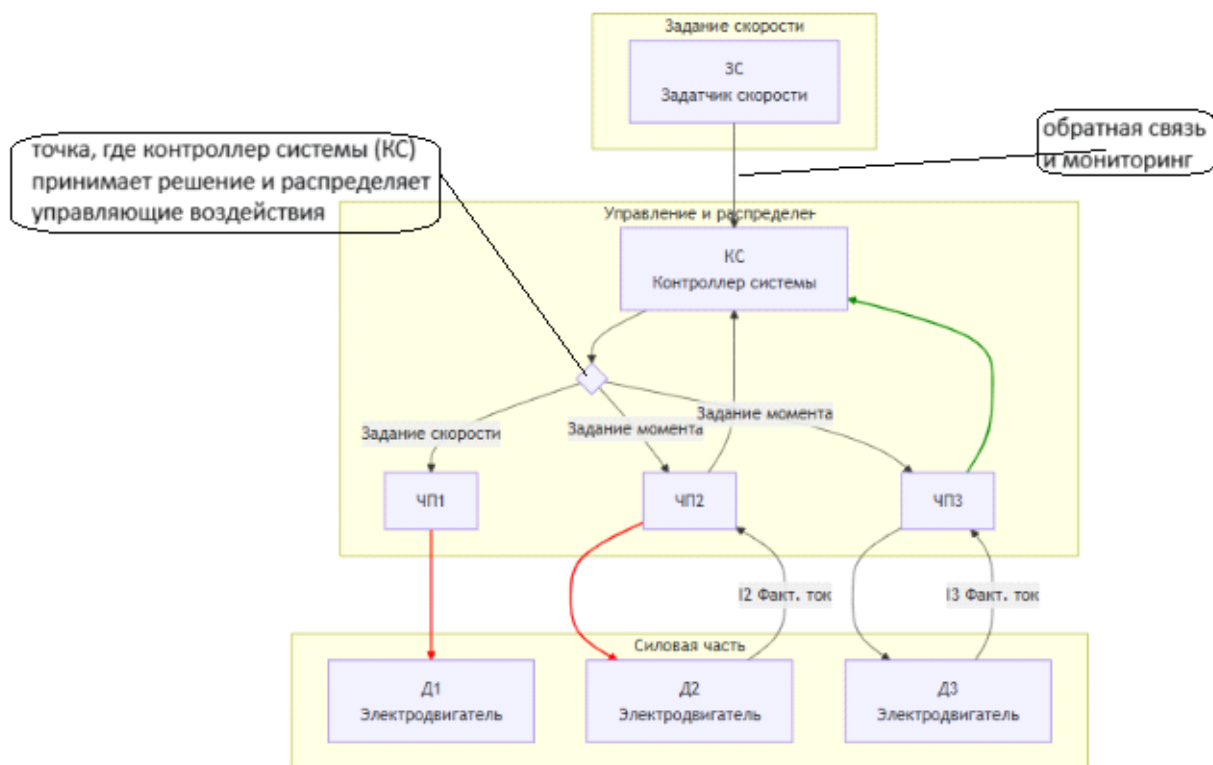


Рисунок 2 – Структурная схема системы управления: ЧП1-ЧП3 – частотные преобразователи; Д1-Д3 – электродвигатели; ЗС – задатчик скорости; КС – контроллер системы.

ЧП1 работает в режиме управления скоростью (получает сигнал от задатчика ЗС). ЧП2 и ЧП3 работают в режиме управления моментом. Их задание по моменту формируется контроллером (КС) как доля от общего задающего сигнала. Контроллер (КС) непрерывно опрашивает токи двигателей и, в случае отклонения от заданного распределения, корректирует сигналы задания на ЧП2 и ЧП3, обеспечивая равномерность нагрузки. При отказе одного из двигателей (например, Д1), система автоматически отключает его, а на остальные двигатели подается сигнал на ограничение момента по условию их перегрузочной способности, позволяя продолжить работу на пониженной скорости.

Пояснения к работе схемы:

- Нормальный режим работы:
- ЧП1 получает от КС сигнал задания скорости (зеленая линия) и поддерживает заданные обороты;
- ЧП2 и ЧП3 получают от КС сигналы задания момента (красные линии), рассчитанные как доля от общего требуемого усилия;
- КС непрерывно сравнивает токи двигателей Д2 и Д3 и корректирует задания момента для ЧП2 и ЧП3, обеспечивая равномерное распределение нагрузки.
- Аварийный режим (отказ двигателя Д1):
- КС фиксирует аномалию (например, нулевой ток или сигнал аварии с ЧП1);
- КС отправляет команду на отключение ЧП1;
- на ЧП2 и ЧП3 подается сигнал на ограничение момента по условию их перегрузочной способности;
- система продолжает работу на пониженной скорости, которую теперь задают ЧП2 и ЧП3, работающие в режиме момента.

На схеме этот ромб (в нотации Flowchart) символизирует точку, где контроллер системы (КС) принимает решение, распределяет управляющие воздействия по разным каналам в зависимости от их типа.

Внутри контроллера: КС получает общий сигнал от Задатчика Скорости (ЗС). «Внутри ромба» происходит ветвление: Общий управляющий сигнал разделяется на два принципиально разных типа заданий:

- одно задание по скорости отправляется в ЧП1;
- два задания по моменту рассчитываются и отправляются в ЧП2 и ЧП3.

Важно, что КС работает не как простой «повторитель», а как интеллектуальное устройство, которое реализует сложную стратегию управления: поддержание скорости одним приводом и согласованное распределение момента между другими.

То есть, ромб — это условное обозначение «блока распределения заданий» внутри контроллера, который преобразует один входной сигнал в три выходных, но разных по своей физической сути (скорость и момент).

Цвета стрелок на схеме используются для визуального разделения типов сигналов и данных, что делает схему интуитивно понятной.

Расшифровка цветовой маркировки стрелок:

- зеленая стрелка (задание скорости). Это «команда», которую система стремится выполнить;
- красные стрелки (Задание момента). Это «команда» на создание определенного силового воздействия;
- черные стрелки (Обратная связь и общее задание):
- стрелка от ЗС к КС: Исходный, «сырой» сигнал от оператора системы (задатчика). Еще не распределенный;
- стрелки от Д2/Д3 к ЧП2/ЧП3. Это обратные связи по току. Ток двигателя прямо пропорционален моменту, поэтому эти стрелки показывают, какую фактическую нагрузку в данный момент «несут» двигатели Д2 и Д3;

- стрелки от ЧП2/ЧП3 к КС. Это передача данных о фактическом токе (моменте) с приводов обратно в контроллер для анализа.

Выводы по статье:

- разработана конструкция многодвигательного привода для грузоподъемного механизма на основе планетарного редуктора, обеспечивающая кинематическое суммирование мощностей:

- проведенный расчет показал, что применение трех двигателей мощностью по 34,1 кВт каждый позволяет заменить один двигатель мощностью 100 кВт. Но при этом значительно повышается надежность системы;

- предложенная система управления на основе частотных преобразователей позволяет обеспечить равномерное распределение нагрузки между двигателями, реализовав режим работы с пониженной производительностью при отказе одного из них;

- внедрение многодвигательного привода позволяет снизить пусковые токи в 2-3 раза (поскольку двигатели можно включать с задержкой друг относительно друга), уменьшить динамические нагрузки, повысить общую надежность ГПМ.

Рекомендации. Для промышленного внедрения необходимо провести динамическое моделирование системы в среде (например, MATLAB Simulink) для уточнения переходных процессов и настройки регуляторов. Рекомендуется оснастить систему мониторинга состояния двигателей (вибродиагностика, контроль температуры подшипников) для прогнозирования отказов. При проектировании планетарного редуктора следует уделить особое внимание точности изготовления и балансировки деталей для минимизации вибраций. Для тяжело нагруженных режимов работы целесообразно рассмотреть использование четырехдвигательной схемы для создания двойного резервирования.

Список литературы

- Коростин А.С. Анализ использования подъемно-транспортных машин в строительной области // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. №11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ispolzovaniya-podemno-transportnyh-mashin-v-stroitelnoy-oblasti> (дата обращения: 22.11.2025). С. 331-333
- Коростин А.С. Аналитическое сравнение подъемно-транспортных машин в строительстве и их расчет // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskoe-sravnienie-podemno-transportnyh-mashin-v-stroitelstve-i-ih-raschet> (дата обращения: 22.11.2025). С. 73-75
- Лагерев А. В. Подъемно-транспортные машины. Оптимальное проектирование деталей и узлов: учебник для вузов / А. В. Лагерев, И. А. Лагерев. — Москва: Издательство Юрайт, 2025. — 283 с.
- Семькина И.Ю., Завьялов В.М., Глазко М.А. Градиентное управление многодвигательным асинхронным электроприводом // Известия ТПУ. 2009. №4, С. 65-69
- Шпрехер Д. М., Овсянников Д. С. Разработка и исследование систем управления многодвигательным электроприводом шахтного скребкового конвейера // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. №9, С. 524-531
- Щеблыкин, П. Н. Подъемно-транспортные машины: учебное пособие / П. Н. Щеблыкин, Р. Г. Боровиков, В. В. Ткачев. — Воронеж: ВГЛУ, 2023. — 195 с.

Literature

- Korostin A. S. Analysis of the use of lifting and transport machines in the construction industry // *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*. 2023. No. 11. URL: (accessed: 22.11.2025). P. 331–333.

- Korostin A. S. Analytical comparison of lifting and transport machines in construction and their calculation // *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*. 2022. No. 10. URL: (accessed: 22.11.2025). P. 73–75.
- Lagerev A. V., Lagerev I. A. *Lifting and Transport Machines. Optimal Design of Parts and Assemblies: textbook for universities*. Moscow: Yurayt Publishing House, 2025. 283 p.
- Semykina I. Yu., Zavyalov V. M., Glazko M. A. Gradient control of a multimotor asynchronous electric drive // *Izvestiya TPU*. 2009. No. 4. P. 65–69.
- Shprekher D. M., Ovsyannikov D. S. Development and research of control systems for a multimotor electric drive of a mine scraper conveyor // *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*. 2022. No. 9. P. 524–531.
- Scheblykin P. N., Borovikov R. G., Tkachev V. V. *Lifting and Transport Machines: study guide*. Voronezh: VGLTU, 2023. 195 p.