

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Винтоняк Виктория Михайловна

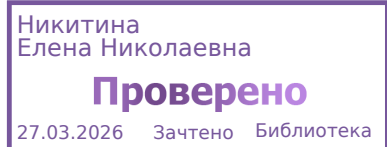
**Разработка и моделирование электропривода
подъема монтажного крана**

Направление подготовки

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

АВТОРЕФЕРАТ

МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель

Кандидат технических наук,
доцент кафедры ЭПАПУ
Горькавый Александр Иванович

Рецензент

Заведующий кафедрой
"Электротехника, электроника и
электромеханика" ФГБОУ ВО
ДВГУПС, канд. техн. наук»
Скорик Виталий Геннадьевич

Защита состоится «19» марта 2026 года в 10 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681913, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 104/3.

Автореферат разослан 13 марта 2026 г.

Секретарь ГЭК

А.В. Бузикаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Существенное количество грузоподъемных машин, используемых в строительстве и монтаже, оснащено электроприводом основных рабочих механизмов. Эффективность и надежность работы таких машин напрямую определяются характеристиками применяемого электропривода.

Эксплуатация электроприводов грузоподъемных машин характеризуется повторно-кратковременным режимом работы, высокой частотой включений, широким диапазоном регулирования скорости и значительными динамическими перегрузками. Традиционно используемые системы (ТП-ДП, ТРН-АДФ) морально и технически устаревают. На смену им приходят частотно-регулируемые асинхронные электроприводы (ПЧ-АД), лишенные недостатков машин постоянного тока (щеточно-коллекторный узел) и обладающие лучшими массогабаритными показателями.

Однако сложность управления асинхронным двигателем классическими методами требует применения современных алгоритмов частотного управления. Возникает научно-прикладная задача обоснованного выбора типа управления (скалярное, векторное или частотно-токовое), обеспечивающего требования по плавности пуска, перегрузочной способности и надежности для конкретного механизма подъема стрелы монтажного крана, что и определяет актуальность данной работы.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка электропривода механизма подъема стрелы монтажного крана и обоснованный выбор системы автоматического регулирования (САР) на основе сравнительного анализа различных принципов частотного управления.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучение устройства и кинематической схемы механизма подъема стрелы, анализ типов приводов, применяемых в грузоподъемных машинах.

2. Расчет и выбор основного электрооборудования (электродвигателя, преобразователя частоты) для разрабатываемой системы.

3. Разработка математических моделей и расчет параметров систем автоматического регулирования скорости на основе скалярного, векторного и частотно-токового (с гистерезисной и пространственно-векторной модуляцией) принципов управления.

4. Проведение сравнительного анализа разработанных САР по динамическим показателям (время переходного процесса, перерегулирование, реакция на возмущение) и энергопотреблению.

5. Выбор оптимальной системы управления и обоснование необходимости применения задатчика интенсивности.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является электропривод механизма подъема стрелы монтажного крана. Предмет исследования — системы автоматического регулирования скорости асинхронного электропривода с частотным управлением.

Методология и методы исследования. При выполнении работы были использованы методы теории электропривода, математического и имитационного моделирования. Расчет параметров систем автоматического регулирования выполнялся на основе методов настройки на модульный оптимум. Моделирование разработанных систем проводилось в среде MATLAB Simulink.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрено устройство и кинематическая схема механизма. Выполнен анализ типов крюковых подвесок и требований, предъявляемых к механизмам подъема стрелы. Проведен анализ приводов, применяемых в грузоподъемных машинах. Сравнение систем ТП-ДП, ТРН-АДФ и ПЧ-АД показало, что наиболее перспективным является применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода с короткозамкнутым ротором, который лишен недостатков, связанных с наличием щеточно-коллекторного узла, и обладает лучшими массогабаритными показателями. Обоснована необходимость рассмотрения различных методов частотного управления: скалярного, векторного и частотно-токового.

Во второй главе выполнен обоснованный выбор типа электродвигателя. На основе сравнительного анализа конструкций двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором как более надежный и простой в эксплуатации.

Произведен расчет мощности и выбор электродвигателя на основе заданных параметров монтажного крана (грузоподъемность до 4,5 т, вылет стрелы до 20 м, высота подъема до 35 м). Расчет включал определение натяжения стрелового полиспаста, ветровых и инерционных нагрузок, момента внешних сопротивлений.

В результате расчета получены следующие параметры:

- расчетная мощность двигателя: 51,4 кВт;
- расчетная частота вращения: 1113 об/мин;
- момент внешних сопротивлений: 10277 Н·м.

На основе расчетов выбран крановый электродвигатель с короткозамкнутым ротором серии 4МТКФ2П280SB4 со следующими характеристиками:

- номинальная мощность: 75 кВт (с учетом ПВ 40%);
- номинальная частота вращения: 1475 об/мин;
- номинальный ток: 136 А;

- кратность максимального момента: 2,8;
- момент инерции ротора: 1,12 кг·м².

Для управления двигателем выбран комплектный преобразователь частоты Micromaster 430 (Siemens), подходящий по мощности и обладающий необходимым функционалом для реализации скалярного и векторного методов управления.

В третьей главе представлен синтез системы управления на базе скалярного, векторного и частотно-токового управления. Для САР на основе принципа скалярного управления была разработана одноконтурная система ПЧ-АД с обратной связью по скорости (рисунок 1). Настройка регулятора выполнена на модульный оптимум. Моделирование в Simulink показало, что переходный процесс характеризуется временем $t_{пп} = 0,34$ с и перерегулированием $\sigma = 4,33\%$. Выявлен высокий пусковой момент, что требует применения задатчика интенсивности.

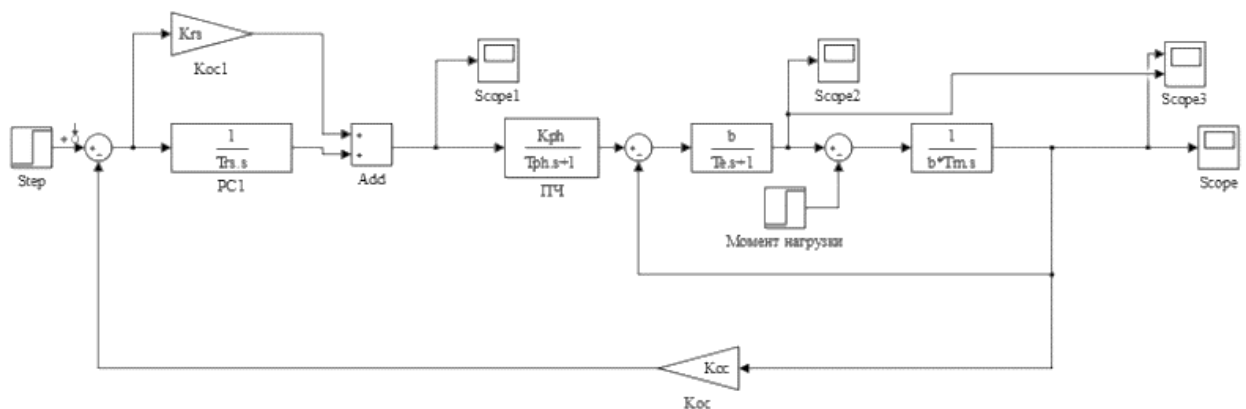


Рисунок 1 – Структурная схема САР на базе скалярного управления

Подобным образом проводился синтез САР на основе принципа векторного управления (рисунок 2). В ходе исследования была разработана система с прямой ориентацией по вектору потокосцепления ротора, структура которой подобна системе двухзонного регулирования двигателя постоянного тока. Выполнен детальный расчет параметров регуляторов тока, потокосцепления и скорости при настройке на модульный оптимум. Моделирование системы подтвердило её работоспособность и высокое быстродействие ($t_{пп} = 0,02$ с) при перерегулировании $\sigma = 34,2\%$.

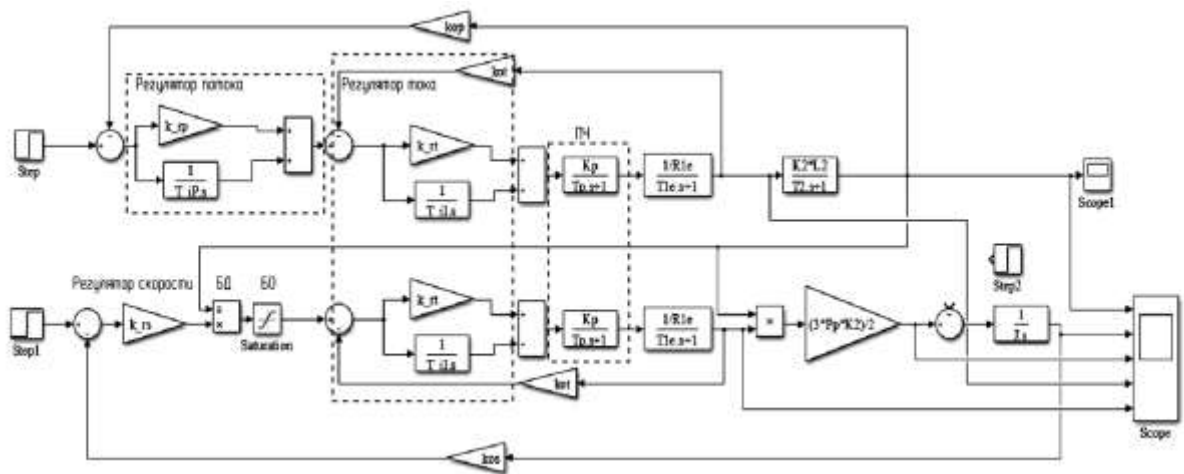


Рисунок 2 – Структурная схема САУ на базе векторного управления

Далее было осуществлено моделирование САУ на основе принципа частотно-токового управления, где рассматривались два типа модуляции в системах частотно-токового управления:

- с гистерезисной модуляцией (рисунок 3): принцип действия основан на поддержании тока в заданном гистерезисе. Моделирование показало время переходного процесса $t_{пп} = 0,15$ с и перерегулирование $\sigma = 6,3\%$.

- с пространственной векторной модуляцией (ПВМ) (рисунок 4): более совершенный метод, обеспечивающий лучшую форму тока и динамику. Моделирование дало результаты: $t_{пп} = 0,05$ с, $\sigma = 7,6\%$.

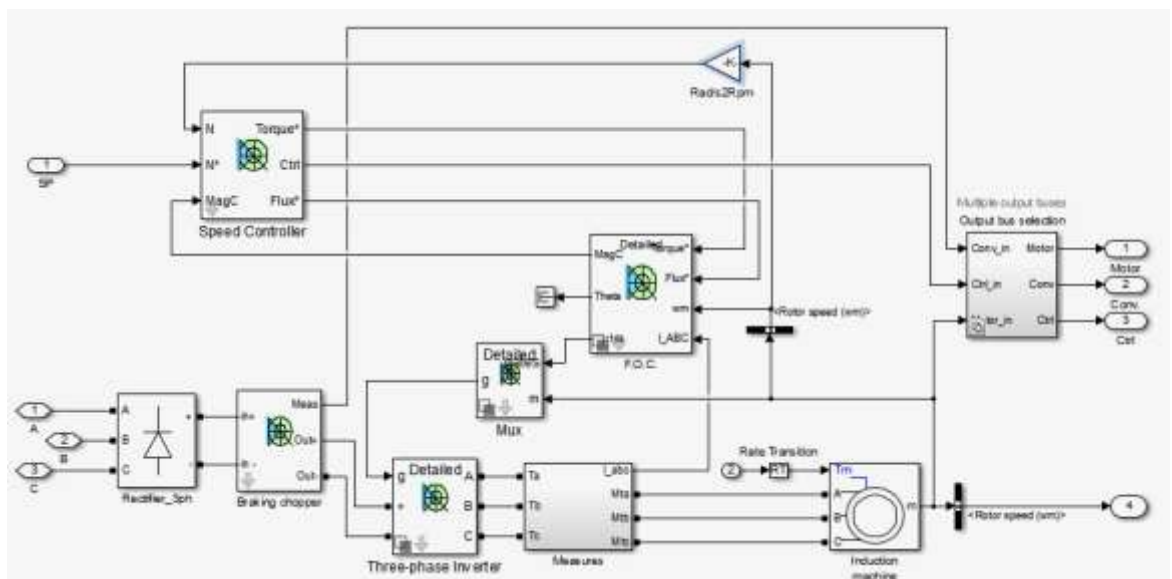


Рисунок 3 – Имитационная модель замкнутой системы частотно-токового управления с гистерезисной модуляцией

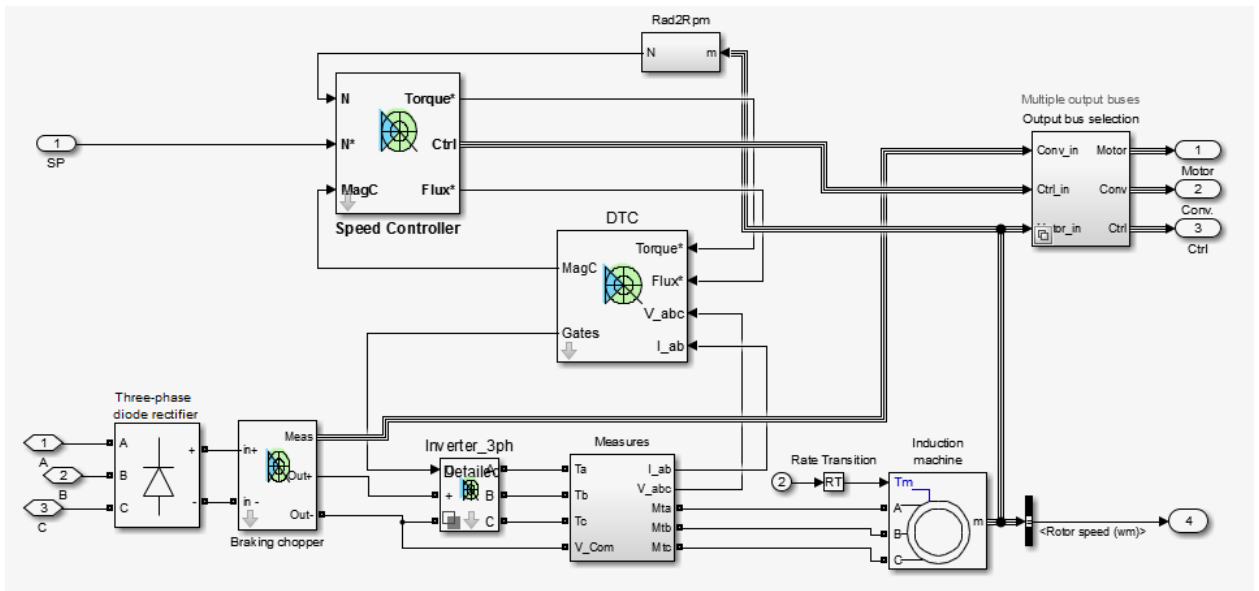
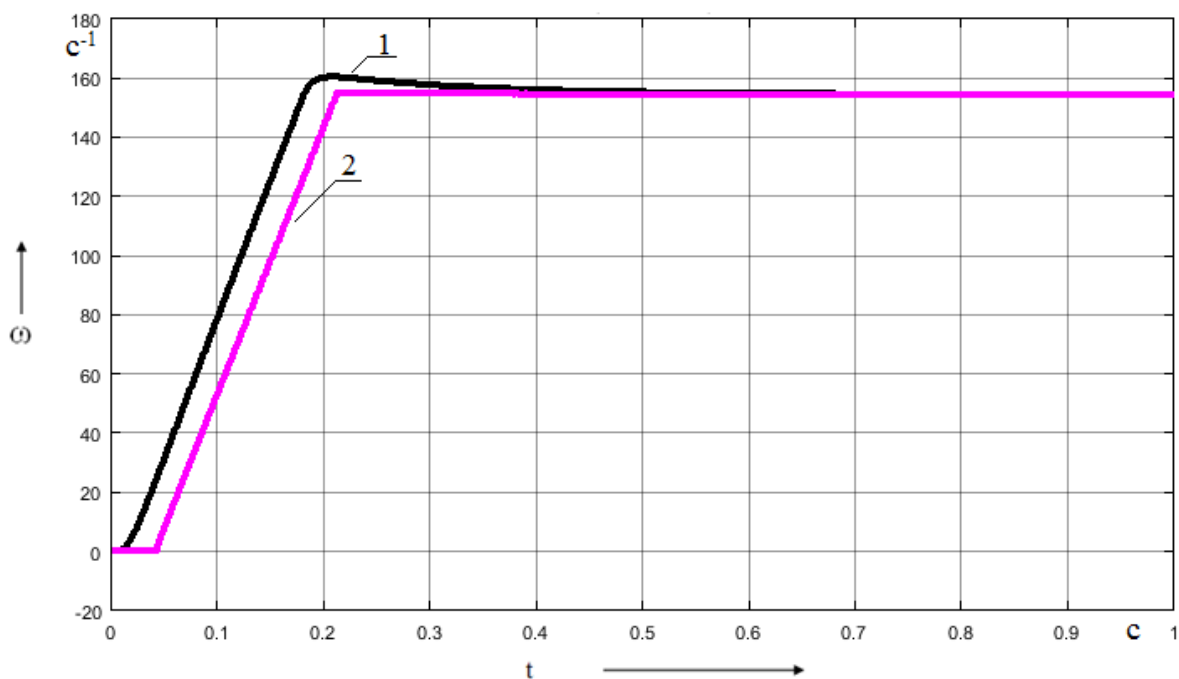


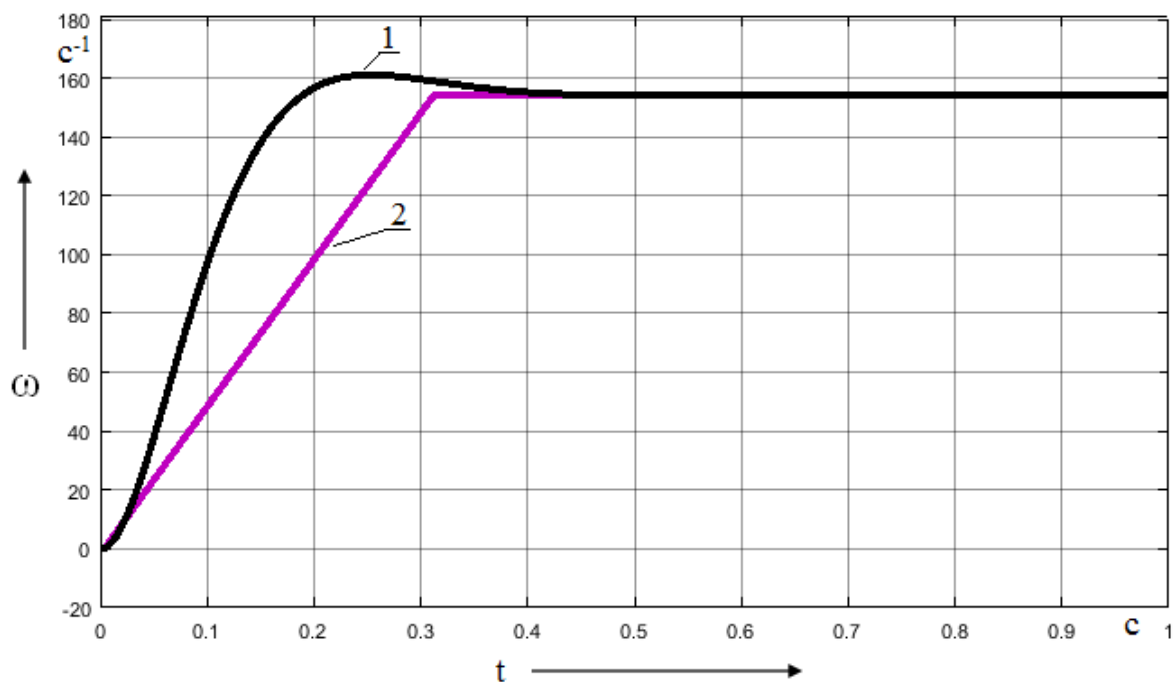
Рисунок 4 – Имитационная модель замкнутой системы частотно-токового управления с пространственной векторной модуляцией

В четвертой главе выполняется сравнительный анализ САР на основе различных принципов частотного регулирования, в результате делается заключение об оптимальном принципе управления с позиции предъявляемых требований.

Анализ переходных процессов по скорости (рисунки 5 и 6) показал, что наиболее предпочтительным быстродействием обладает векторная САР. Системы частотно-токового управления занимают промежуточное положение, причем ПВМ обеспечивает лучшее качество тока и меньшее время переходного процесса по сравнению с гистерезисной модуляцией. Скалярная система обладает наибольшей инерционностью.



1 – гистерезисная модуляция; 2 – пространственно векторная модуляция
 Рисунок 5 – Переходной процесс по скорости в системе с частотно-токовым управлением

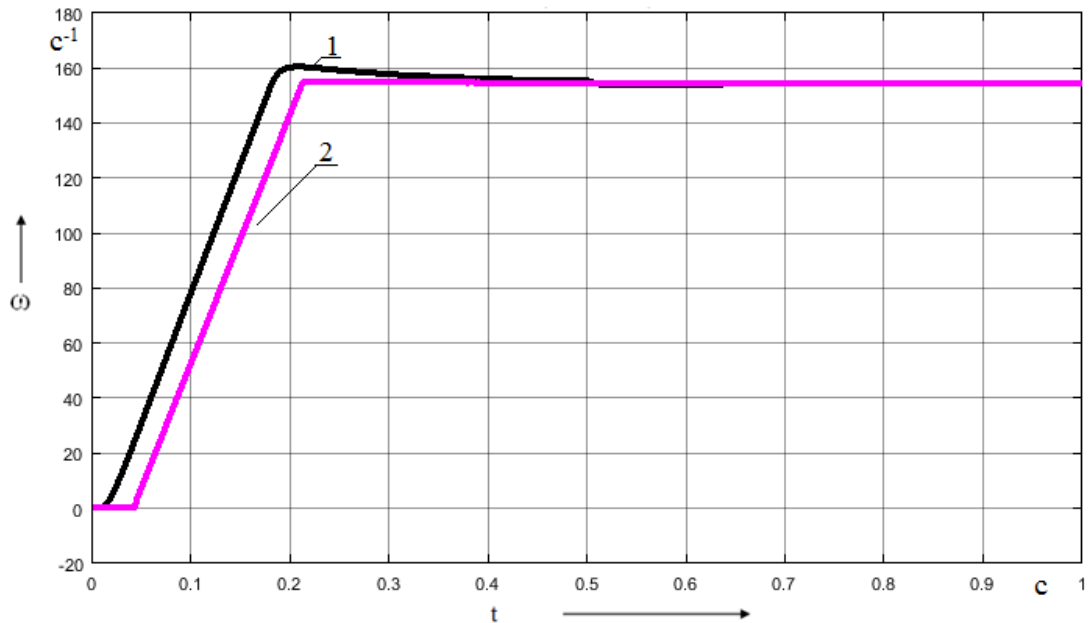


1 – САР на основе скалярного принципа; 2 – САР на основе векторного принципа

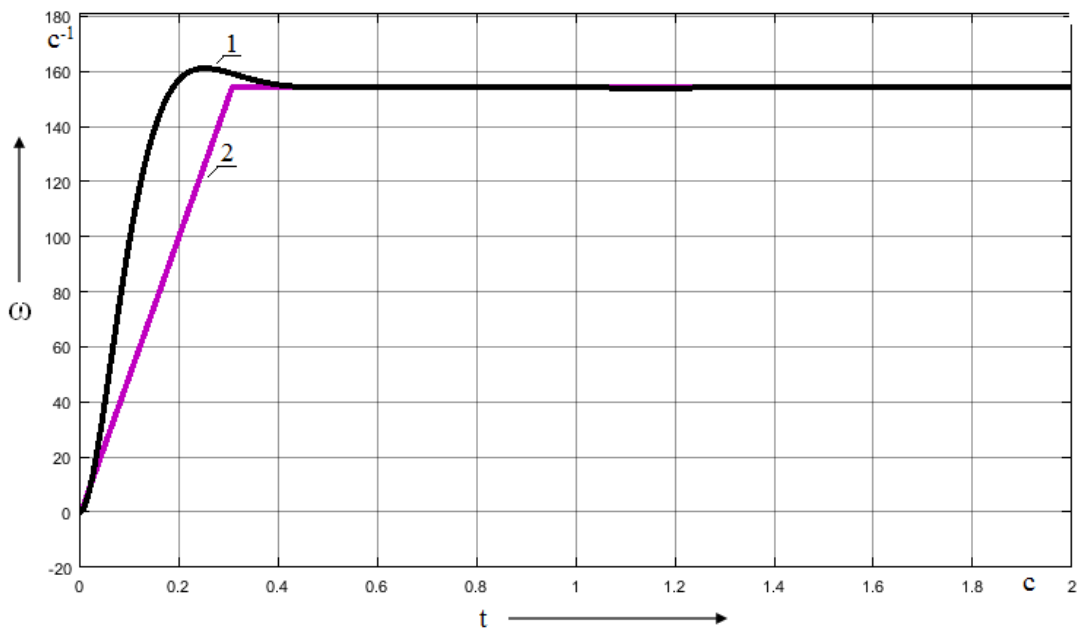
Рисунок 6 – Переходной процесс по скорости

Анализ реакции на наброс номинальной нагрузки (рисунки 7 и 8) выявил, что векторная система и системы частотно-токового управления реагируют на возмущение практически мгновенно, в то время как скалярная

система более медлительна. Все системы обрабатывают возмущение с незначительной статической ошибкой.



1 – гистерезисная модуляция; 2 – пространственно векторная модуляция
Рисунок 7 – наброс нагрузки в системе с частотно-токовым управлением



1 – на основе скалярного принципа; 2 – на основе векторного принципа
Рисунок 8 – наброс нагрузки в САР

Далее был проведен анализ мгновенной активной мощности (таблица 1), потребляемой электроприводом в переходных режимах, согласно следующей формуле:

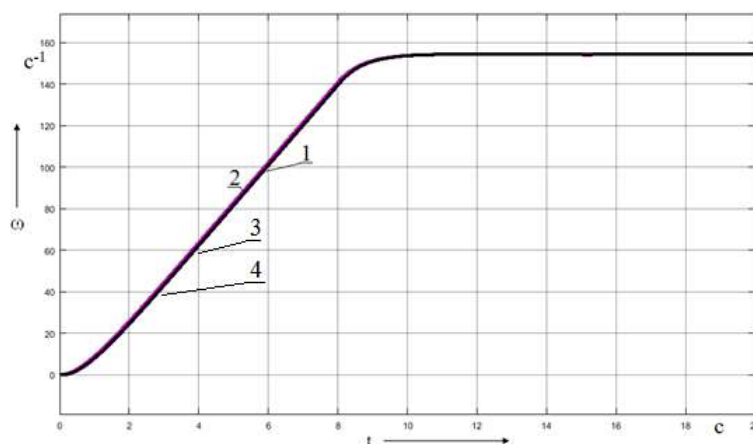
$$P_{\text{НОМ}}(t) = M_{\text{НОМ}}(t) \cdot \omega_{\text{НОМ}}(t).$$

Таблица 1 – Сравнение максимальной мгновенной активной мощности

Тип САР	Максимальная мощность, $P_{max} (\cdot 10^6 \text{ Вт})$
Скалярное управление	7,0
Векторное управление	5,3
Частотно-токовое (гистерезис)	4,6
Частотно-токовое (ПВМ)	4,6

Наименее экономичной является скалярная САР, характеризующаяся наибольшим пиковым потреблением.

Высокие пусковые моменты во всех системах (особенно в скалярной) могут негативно сказаться на ресурсе механической части (люфты, рывки). Для обеспечения плавности пуска и ограничения динамических нагрузок предложено использование S-образного задатчика интенсивности. Моделирование (рисунок 9) подтвердило, что применение задатчика позволяет ограничить электромагнитный момент на уровне $M_{э.пуск} \approx 1320 \text{ Н}\cdot\text{м}$, что ниже максимально допустимого момента двигателя (1360 Н·м), обеспечивая при этом требуемое качество переходного процесса.



1 – САР на основе скалярного принципа; 2 – САР на основе векторного принципа; 3 – гистерезисная модуляция; 4 – ПВМ

Рисунок 9 – Переходной процесс по скорости с использованием задатчика интенсивности

Рисунок 9 показывает, что при использовании задатчика интенсивности обе САР отработывают сигнал задания одинаково.

Таким образом, можно сделать вывод, что каждый из рассмотренных принципов управления обладает достоинствами и недостатками.:

– скалярное управление: простота реализации, достаточный диапазон регулирования; недостаток — невозможность регулирования момента и низкое быстродействие.

– векторное управление: высокое быстродействие, точность, хорошая отработка возмущений; недостаток — сложность вычислений и необходимость точного знания параметров двигателя.

– частотно-токовое управление: хорошие динамические показатели, простая схемотехника; недостаток — возможная несогласованность работы регуляторов тока, приводящая к автоколебаниям.

Исходя из предъявляемых к механизму подъема стрелы монтажного крана требований (отсутствие необходимости в регулировании момента, ограниченный диапазон регулирования скорости), для практической реализации рекомендуется САР на основе скалярного управления с применением задатчика интенсивности, как обеспечивающая требуемое качество при минимальной сложности и стоимости реализации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа технологического процесса и существующих типов приводов обоснована целесообразность применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода с короткозамкнутым ротором для механизма подъема стрелы монтажного крана.

2. Выполнен расчет и выбор основного оборудования: выбран двигатель 4МТКФ2П280SB4 (75 кВт, 1475 об/мин) и преобразователь частоты Micromaster 430.

3. Разработаны и настроены системы автоматического регулирования скорости для трех принципов управления: скалярного, векторного и частотно-токового (с гистерезисной и ПВ модуляцией). Получены их параметры и передаточные функции.

4. Проведен сравнительный анализ систем по динамическим и энергетическим показателям. Установлено, что векторная система обладает

наилучшим быстродействием, а скалярная — наибольшей простотой, но и наибольшим энергопотреблением.

5. Обоснована необходимость применения задатчика интенсивности для ограничения пусковых моментов и обеспечения плавности работы механизма.

6. По совокупности требований и показателей для управления электроприводом подъема стрелы монтажного крана рекомендована система скалярного управления с задатчиком интенсивности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1 Винтоняк, В.М. Анализ системы электропривода механизма подъема стрелы монтажного крана на базе скалярного управления / В.М. Винтоняк, А. В. Бузикаева // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы IX Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06–10 апреля 2026 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2026.

2 Винтоняк, В.М. Разработка и моделирование электропривода подъема монтажного крана / В.М. Винтоняк, А. В. Бузикаева // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы IX Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06–10 апреля 2026 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2026.