

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

16+
ISSN 2071-6168

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 10

**Тула
Издательство ТулГУ
2024**

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ОРИЕНТАЦИЕЙ ПО ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЮ РОТОРА

К.В. Лицин, А.А. Клименко, И.А. Ореховский

На данный момент существует несколько способов управления электрическими приводами переменного тока. Среди них выделяются скалярный метод управления и векторный с ориентацией по потокоосцеплению ротора. За счет своих преимуществ, а именно более высокой точности и повышенной динамике системы, векторная система управления превосходит скалярную. Есть несколько способов построения модели векторной системы управления и каждая имеет как преимущества, так и недостатки. Представлены варианты построения модели векторной системы управления по потокоосцеплению ротора в виде передаточных функций и на основе готовой модели асинхронного двигателя Matlab Simulink. Проанализированы структуры разработанных моделей. Приведено описание элементов рассмотренных моделей и обосновано их построение. Проведён анализ качественных показателей рассмотренных моделей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, векторное управление, схема замещения, скорость, система управления.

Введение и постановка задач. В настоящее время в системах электроприводов используется два основных типа управления: скалярное и векторное по потокоосцеплению ротора. Выделяют ещё и прямое управление моментом (DTC), которое характерно для ряда электроприводов зарубежного производства, но в связи с политикой импортозамещения его применение весьма ограничено [1-4].

Векторное управление по потокоосцеплению ротора за счёт контроля моментобразующего тока и потокообразующего тока позволяет улучшить динамику, которая является главным недостатком и неподконтрольна при скалярном управлении [5-7].

Векторное управление по потокоосцеплению ротора электродвигателя имеет ряд преимуществ [8,9]:

- высокая точность управления;
- улучшенная динамика системы;
- гибкость и масштабируемость;
- снижение энергопотребления;
- устойчивость к внешним воздействиям;
- возможность работы на низких скоростях.

Целью статьи является проведение сравнительного анализа векторной схемы управления асинхронным двигателем с ориентацией по потокоосцеплению ротора на различных моделях Matlab Simulink.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать способы частотного управления асинхронным электроприводом;
- разработать и провести анализ модели асинхронного векторного электропривода в операторной форме;
- разработать и провести анализ имитационной модели асинхронного векторного электропривода;

Научная новизна работы заключается в:

- разработке и апробировании алгоритмов построения векторного управления асинхронного электропривода на базе имитационного моделирования;
- разработке модели частотного управления асинхронного электропривода на базе Matlab Simulink.

Выбор объекта исследования. В качестве объекта исследования берем двигатель модели 5A225M2. Его технические характеристики показаны в таблице 1.

Таблица 1

Паспортные данные двигателя 5A225M2

Параметры	Значения
Номинальная мощность P_n , кВт	55
Номинальное линейное напряжение U_n , В	660
Синхронная скорость n_0 , об/мин	1000
Коэффициент мощности $\cos(\varphi)$	0,92
КПД η , %	91
Номинальное скольжение S_n , %	2,1
Кратность пускового момента $M_{пуск}$	1,2
Кратность максимального момента M_{max}	2,2
Кратность пускового тока $I_{пуск}$	7,5
Момент инерции электродвигателя $J_{дв}$, кг·м ²	0,25

В таблице 2 показаны параметры схемы замещения необходимые для САР [10].

Таблица 2

Параметры схемы замещения электродвигателя

Параметры	X_r	В номинальном режиме			
		Статора		Ротора	
В относительных единицах	5,6	R_1	X_1	R_2'	X_2'
		0,026	0,092	0,019	0,12

Модель векторной системы управления с ориентацией по потокоосцеплению ротора в виде передаточных функций

Полная структурная схема векторной САР скорости АД представлена на рисунке 1.

Основные блоки структурной схемы:

- модель электродвигателя при векторном управлении;
- модель преобразователя частоты;
- модель системы управления.

Управление асинхронным двигателем происходит через два внешних контура регулирования – модулем потокосцепления и скорости ротора, а так-же два подчиненных им контура тока (ток статора). Чаще всего токи статора обозначают через I_x и I_y .

Токи вращаются с синхронной скоростью поля статора двигателя. Сами токи находятся в осях X и Y.

Данный вид управления обеспечивает регулирование модуля вектора потокосцепления ротора и скорости ротора. При этом прямая пропорциональность между моментом двигателя и составляющей намагничивающей силы статора остаётся.

Задание, для формирования электромагнитного момента, формируется выходным сигналом РС (регулятора скорости). На входе регулятора скорости выполняется сравнение сигнала задания скорости U_{3C} с выхода задачника интенсивности и сигнал пропорциональный реальной скорости двигателя. Для постоянного поддержания момента при изменении потокосцепления ротора нужно ввести дополнительный блок. Он будет производить деление сигнала с выхода регулятора скорости на потокосцепление, на выходе будет выходит сформированный сигнал составляющей тока статора I_y .

Для формирования сигнала для составляющей тока статора по оси X нужно использовать регулятор потока. На входе регулятора сравниваются два сигнала (сигнал задания и сигнал потокосцепления ротора).

После этого сигналы задания I_{1x} и I_{1y} сравниваются с текущими токами статора. Сравнение выполняется в регуляторах тока. Выходные сигналы с регулятора определяют задания составляющих напряжения статора в координате XY.

Для получения желаемых переходных процессов необходимо выполнить синтез регуляторов векторной системы управления. Полная структурная схема векторной САУ показана на рисунке 1.

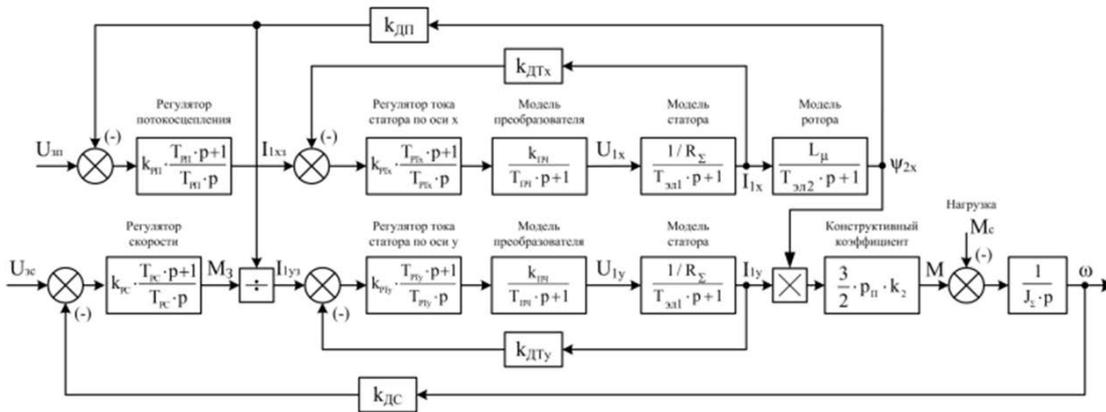


Рис. 1. Структурная схема векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора в виде передаточных функций

В результате проведённых расчётов на основе метода двухконтурной системы, известной из теории электропривода и теории автоматического управления, синтезируем модель, показанную на рисунке 2.

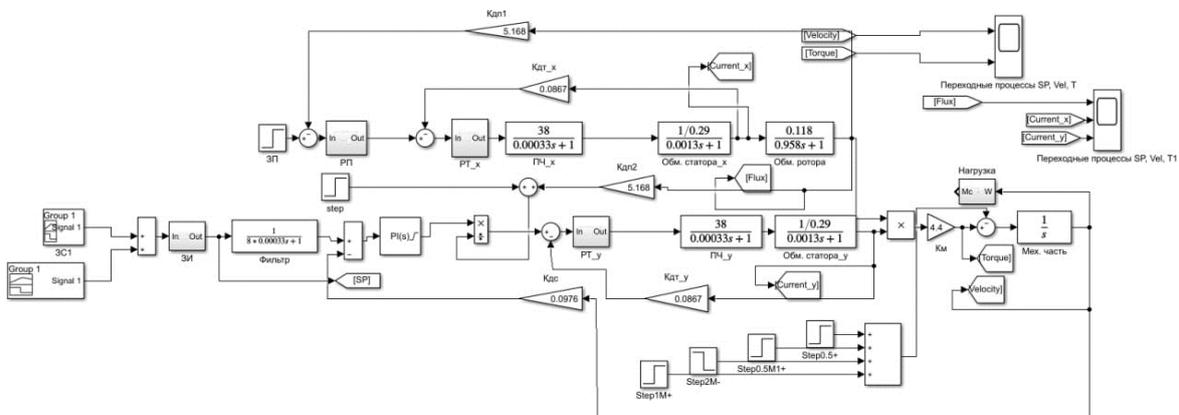


Рис. 2. Модель векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора в виде передаточных функций в Matlab Simulink

Полученные графики переходных процессов скорости и момента при учете разгона и торможения представлены на рисунке 3.

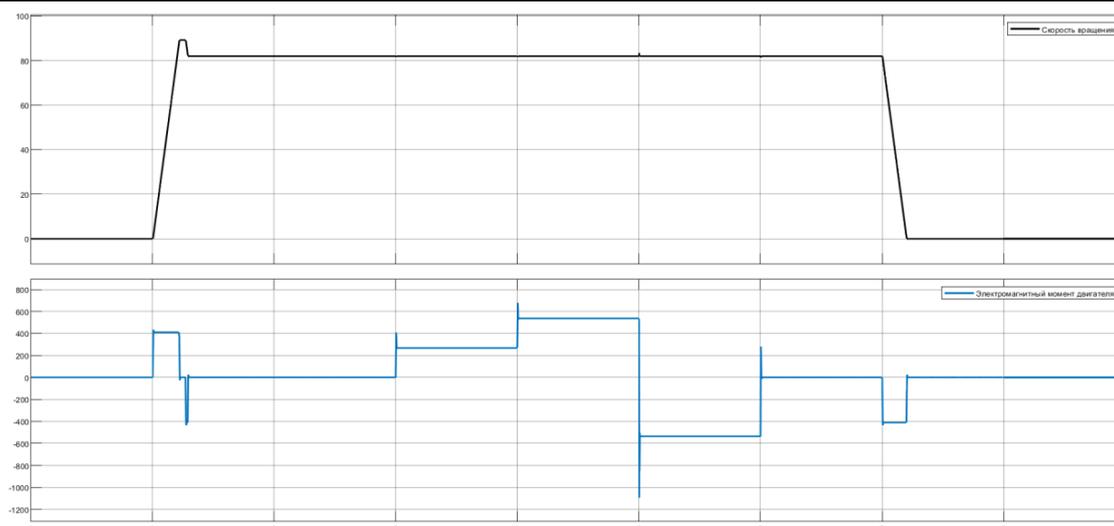


Рис. 3. Переходный процесс скорости и момента для модели векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора в виде передаточных функций в Matlab Simulink

Модель векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора на базе готовой модели асинхронного двигателя. Функциональная схема системы электропривода с векторным управлением с ориентацией по потокосцеплению ротора и датчиком скорости представлена на рисунке 4.

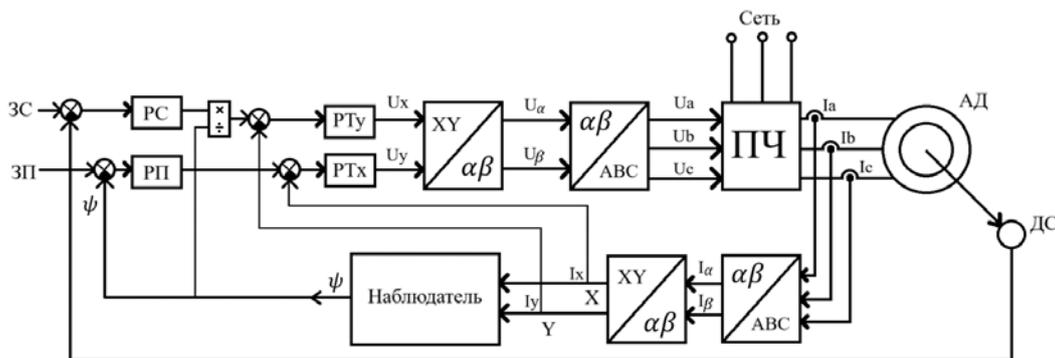


Рис. 4. Функциональная схема электропривода с векторным управлением асинхронным электродвигателем и датчиком скорости

Принцип управления скоростью вращения асинхронного двигателя заключается в формировании автономным инвертором синусоиды напряжения различной амплитуды и частоты. На основании рисунка 4 была разработана модель в приложении Matlab Simulink (рисунок 5).

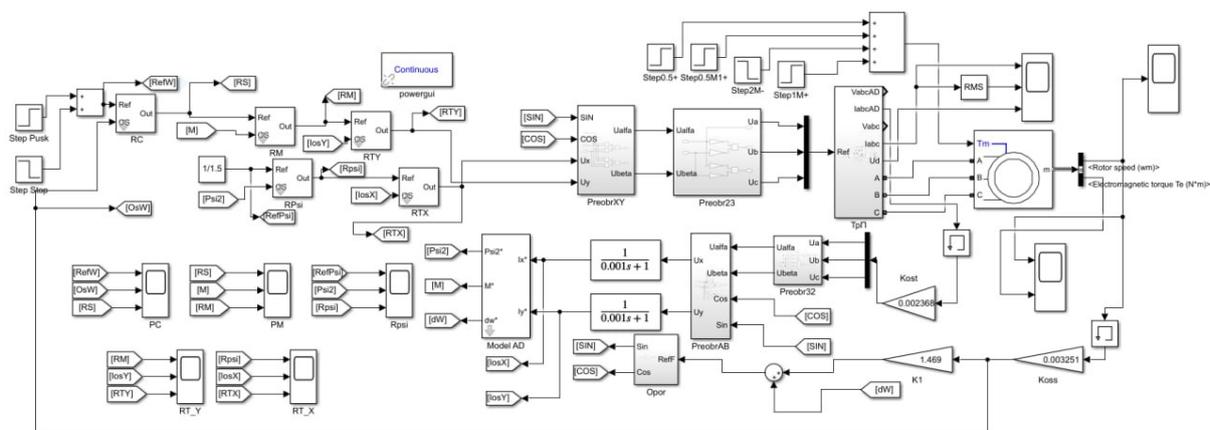


Рис. 5. Модель векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора на базе готовой модели асинхронного двигателя в Matlab Simulink

На рисунке 6 показаны осциллограммы скорости и электромагнитного момента при разгоне, торможении и номинальной работы двигателя.

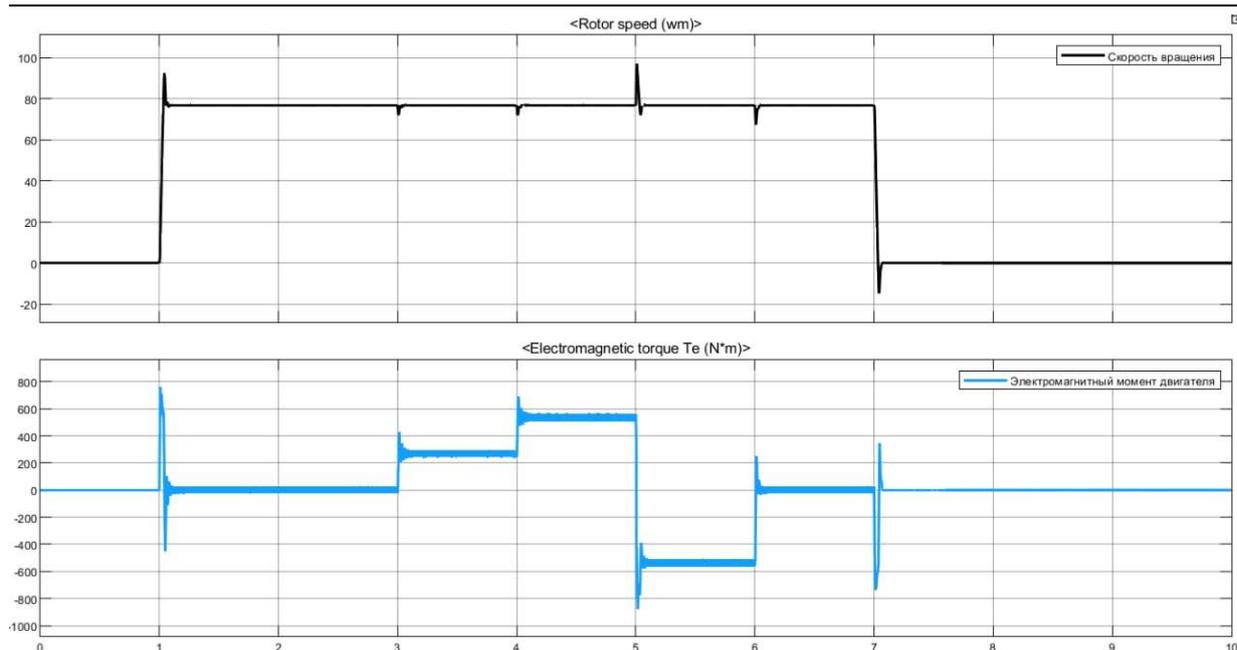


Рис. 6. Переходный процесс скорости и момента для модели векторной системы управления с ориентацией по потокоцеплению ротора на базе готовой модели асинхронного двигателя в Matlab Simulink

На основе переходных процессов (рисунок 3 и 6), получены следующие результаты качественных показателей (таблица 3).

Таблица 3

Анализ параметров

Параметр	Модель векторной системы управления с ориентацией по потокоцеплению ротора в виде передаточных функций	Модель векторной системы управления с ориентацией по потокоцеплению ротора на базе готовой модели асинхронного двигателя
Время регулирования, с	1,28	1,06
Перерегулирование по скорости, %	7,03	8,64

- сигнал на выходе регулятора скорости соответствует развиваемому моменту двигателя – динамическому при пуске и торможении и статическому при нагружении двигателя;
- точное поддержание величин внутренних контуров, а именно – тока по осям X, Y, потокоцепления ротора и электромагнитного момента объясняется тем, что регуляторы внутренних контуров не входят в насыщение;
- при пуске двигателя, ток плавно нарастает, а в установившемся режиме величина тока пропорциональна нагрузочному моменту, В тормозных режимах ток потребления отсутствует.

Заключение. В результате проведённого анализа можно заключить, что модель векторной системы управления с ориентацией по потокоцеплению ротора на базе готовой модели асинхронного двигателя обладает более высоким быстродействием, что объясняется меньшим временем инерционности используемых в ней элементов преобразователя частоты и асинхронного двигателя при практически равном перерегулировании, которое зависит напрямую от настройки параметров регулятора скорости, которое проводилось одинакового для каждой из моделей. При этом модель на базе готового асинхронного двигателя также имеет наблюдатель потокоцепления, который имеет в своём составе инерционное звено роторной цепи, позволяющее проводить вычисление величину потокоцепления без необходимости использования датчиков Холла.

Список источников

1. Фираго Б.И., Палячик Л.Б. Теория электропривода. Минск: Техноперспектива, 2007. 2-е изд. 585 с.
2. Онищенко. Г.Б. Теория электропривода. Москва: ИНФРА-М, 2017. 294 с.
3. Фираго Б.И. К вопросу векторного управления асинхронными двигателями / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 5. С. 5-16.
4. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. Учебник для вузов. Москва: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. СПб.: КОРОНА принт, 2001. 320 с.
6. Калачев Ю.Н., Самохвалов Д.В. Основы регулируемого электропривода (Антиучебник), 2023. 234 с.
7. Цуканов А.В., Лицин К.В. Разработка автоматизированной системы управления электроприводом барабана моталки // Металлург. 2024. № 1. С. 95-99.
8. Белодурин А.Д., Харлашкин К.Е., Гартлиб Е.А., Лицин К.В. Анализ системы автоматического управления на основе линейных регуляторов и прс-регуляторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 377-381.
9. Кувшинов А.А., Греков Э.Л. Теория электропривода. Москва: БИБКМ, 2009. 197 с.

10. Греков Э.Л., Безгин А.С. Имитационное моделирование частотно-регулируемых электроприводов. Оренбург: ОГУ, 2022. 139 с.

11. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии А4: Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

Лицин Константин Владимирович, канд. техн. наук, доцент, k.litsin@rambler.ru, Россия, Новотроицк, Новотроицкий филиал Национальный Исследовательский Технологический Университет «ИТМО»,

Клименко Алексей Александрович, студент, Россия, Челябинск, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),

Ореховский Илья Андреевич, студент, orekhovsky.ilya@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Национальный исследовательский университет «ИТМО»

RESEARCH OF VECTOR CONTROL MODELS WITH ORIENTATION BY ROTOR FLUX LINKAGE

K.V. Litsin, A.A. Klimenko, I.A. Orekhovsky

There are currently several ways to control AC electric drives. Among them, the scalar control method and the vector control method with orientation along the rotor flux linkage stand out. Due to its advantages, namely higher accuracy and increased system dynamics, a vector control system is superior to a scalar one. There are several ways to build a vector control system model, and each has both advantages and disadvantages. Options for constructing a model of a vector control system based on rotor flux linkage in the form of transfer functions and based on a ready-made Matlab Simulink asynchronous motor model are presented. The structures of the developed models are analyzed. A description of the elements of the considered models is given and their construction is justified. An analysis of the qualitative indicators of the considered models was carried out.

Key words: induction motor, vector control, equivalent circuit, speed, control system.

Litsin Konstantin Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, k.litsin@rambler.ru, Russia, Novotroitsk, Novotroitsk branch of the National Research Technological University "MISIS",

Klimenko Alexey Alexandrovich, student, Russia, Chelyabinsk, South Ural State University (National Research University),

Orekhovsky Ilya Andreevich, student, orekhovsky.ilya@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, National Research University "ITMO"

УДК 681.5.015

DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-542-543

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЙ

К.В. Гриценко, А.А. Жиленков

В современном мире автоматизированные системы играют ключевую роль в управлении технологическими процессами. Особое внимание уделяется системам управления движением манипуляторов параллельной структуры, так как они обеспечивают точность и эффективность процессов в промышленности. Однако, для эффективной работы таких систем необходимо правильно идентифицировать и настроить их параметры, особенно в условиях ограничений, например, при работе в ограниченном пространстве или при ограничениях на максимальную скорость или ускорение. В данной статье проведено исследование методов идентификации параметров автоматизированных систем управления движением манипуляторов параллельной структуры в условиях ограничений. Таким образом, данная статья вносит вклад в развитие науки и техники в области автоматизированных систем управления и поможет специалистам и исследователям создавать более эффективные и надежные системы управления для технологических процессов.

Ключевые слова: манипулятор с 3 степенями свободы, автоматизированные системы управления, идентификация параметров, сингулярные области, технологические процессы.

Введение. Современные промышленные процессы все чаще требуют автоматизации и улучшения производственных операций с применением роботизированных систем управления. Одной из ключевых задач в этой области является разработка эффективных алгоритмов управления для манипуляторов параллельной структуры, способных работать в условиях ограничений пространства и времени. Для этого необходимо провести идентификацию всех параметров таких систем, чтобы обеспечить их оптимальное функционирование и минимизировать вероятность ошибок. Идентификация параметров автоматизированных систем управления технологическими процессами для управления движением манипуляторов параллельной структуры является сложным и многоэтапным процессом, требующим комплексного подхода и использования специализированных методов и технологий. Для достижения эффективных результатов при идентификации параметров автоматизированных систем управления применяются различные алгоритмы и методы математического моделирования, такие как метод наименьших квадратов, метод подбора, метод ошибок, методы оптимизации и др. Эти методы позволяют провести анализ и оценку динамических ха-