КУКУШКИН МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКООРДИНАТНЫХ ЭЛЕКТРО-ПРИВОДОВ НА БАЗЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Специальность 05.09.03 – "Электротехнические комплексы и системы"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре Автоматизированного электропривода федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор

Бычков Михаил Григорьевич

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор

Красовский Александр Борисович;

кандидат технических наук

Семенчук Виталий Анатольевич

Ведущая организация Закрытое акционерное общество

«Шнейдер Электрик»

Защита диссертации состоится «<u>16</u>» декабря 2011 года в 12 час. 00 мин. в аудитории М-611 на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при Московском энергетическом институте по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, корп. М

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского энергетического института

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направить по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый Совет Московского энергетического института

Автореферат разослан «____» <u>ноября</u> 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.157.02 к.т.н., доцент

Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Применение современных систем многокоординатного электропривода достаточно часто позволяет упростить кинематические схемы разнообразных технологических установок путем согласованного управления частотно-регулируемыми электроприводами индивидуальных осей. Получение высоких точностных и динамических показателей в многокоординатных системах управления движением достигается как за счет применения специальных быстродействующих электроприводов по каждой координате, так и за счет их согласованного централизованного управления с помощью специального контроллера управления движением, имеющего достаточно мощный и высокопроизводительный процессор. В таких системах применяются специальные высокоскоростные интерфейсы для связи центрального контроллера с электроприводами. Если для конкретных применений технологические требования по точности и быстродействию относительно невелики, то применение упомянутых выше специализированных технических средств может быть нерациональным по экономическим соображениям. Примерами таких применений могут служить раскройные столы, плоттеры, упаковочные машины и многие другие. В этих случаях альтернативным вариантом построения многокоординатных систем движения может применение в качестве исполнительных устройств регулируемых электроприводов общепромышленного назначения (ПЧ-АД), координация их перемещений с помощью типового программируемого контроллера (ПЛК) и применение для реализации информационных связей в системе интерфейсов, традиционно применяемых в распределенных АСУТП. Применение типового оборудования позволяет снизить стоимость системы, упрощает её эксплуатацию, расширяет возможности дальнейшей модернизации. Диссертация посвящена исследованию подобных систем и разработке способов улучшения их технических показателей. Изложенное позволяет считать тему диссертации весьма актуальной.

<u>Цель диссертационной работы</u> - разработка новых методик экспериментального исследования и проектирования систем управления движением, позволяющих эффективно использовать общепромышленные компоненты при реализации многокоординатных электроприводов. Предметом исследований являются многокоординатные электроприводы на базе асинхронных двигателей с преобразователем частоты и общепромышленные контроллеры в качестве генератора траектории и контроллера согласования осей.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

- анализ составляющих частей задержек управляющего воздействия, передающегося по цифровым промышленным сетям передачи данных;

- анализ влияния квантования по времени управляющего сигнала выхода регулятора положения на качество переходных процессов при управляющих и возмущающих воздействиях;
- разработка способов компенсации влияния квантованного по времени сигнала управления на качество переходного процесса;
- экспериментальная проверка разработанного способа управления при его реализации в многокоординатных системах управления движением на базе на общепромышленных компонентов;
- разработка алгоритма выбора и проверки аппаратной части и программного обеспечения системы управления многокоординатным электроприводом для обеспечения требуемых показателей движения.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач использованы: положения теории автоматического управления, теории автоматизированного электропривода, методы компьютерного имитационного моделирования (в среде Matlab/Simulink). Экспериментальные исследования проводились на промышленных образцах программируемых контроллеров и частотно-регулируемых электроприводов с применением фирменных (Shneider Electric) аппаратно-программных средств отладки.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждена совпадением основных теоретических результатов, полученных в результате компьютерного моделирования, и экспериментальных данных, полученных при реализации исследуемых систем на базе общепромышленных компонентов.

Научные положения, выносимые на защиту:

- Предложена эффективная структура управления осями многокоординатного электропривода, компенсирующая негативное влияние квантования по времени управляющего сигнала в распределенных системах управления движением с помощью корректирующих сигналов, получаемых из генератора траектории и эталонной модели объекта управления.
- Выработаны рекомендации по способу расчета эталонной модели в ПЛК. Определены требования к быстродействию контроллера для реализации эталонной модели объекта управления.
- Предложен способ экспериментальной оценки реальных значений задержек при обмене информацией по цифровым сетям между ведущим и ведомым устройствами.
- Разработана методика итерационного проектирования многокоординатных электроприводов на базе общепромышленных компонентов, которая включает в себя этапы предварительного выбора основных компонентов, проведение экспериментальных исследований для определения недостающих параметров, моделирование системы с целью определения её статических и динамических показателей, конфигури-

рование и программирование ПЧ и ПЛК с учётом обмена информацией между ними.

Основные практические результаты диссертации состоят в реализации на базе различных типов ПЛК и частотно-регулируемых электроприводов многокоординатных систем управления движением, способных решать типовые задачи позиционного и контурного управления. Результаты могут быть рекомендованы предприятиям, связанным с разработкой и производством многокоординатного электропривода для различных сфер применения.

<u>Апробация работы.</u> Основные результаты работы обсуждались на XVII (Москва, 2011 г.) Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, на заседании кафедры Автоматизированного электропривода федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

<u>Публикации.</u> По теме диссертации опубликованы 3 печатные работы (в том числе одна в рецензируемом научном журнале, рекомендуемом Высшей Аттестационной Комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации).

<u>Структура и объем работы.</u> Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 58 наименований. Ее содержание изложено на 142 страницах машинописного текста, включая 117 иллюстраций и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследований, определены основные задачи для достижения цели, отражена научная новизна и практическая ценность работы, дана общая характеристика работы.

В первой главе выполнен обзор основных категорий систем управления движением: цикловое программное управление, регулирование частоты вращения, непрерывное движение, управление движением в режиме позиционирования, контурное управление движением, электронная редукция. Все разнообразие может быть сведено к двум режимам работы внешнего контура регулирования положения: режим позиционирования и режим слежения. Показатели качества многокоординатного электропривода в общем случае определяются соответствующими показателями каждой из осей в отдельности, а координацию их работы выполняет генератор траектории. В работе основное внимание уделено рассмотрению одной оси электропривода в режиме отработки малых перемещений. Рассмотрена аппаратная часть сис-

тем управления движением, приведены достоинства и недостатки разных вариантов их реализации.

В настоящее время использование микропроцессорных средств управления является основным средством реализации систем управления электроприводов различного назначения. Микропроцессор как элемент системы управления обладает комбинацией специфических свойств дискретного элемента: квантованием входных и выходных сигналов по уровню и по времени. В распределенных системах управления движением система управления является многопроцессорной, а обмен информацией между ведущим контроллером и контроллерами отдельных осей производится по локальным информационным сетям. Это приводит к тому, что в контурах управления содержится несколько дискретных элементов с различными временными задержками, что существенно усложняет теоретический анализ таких систем.

Одним из вариантов реализации многокоординатных систем движения может быть применение электроприводов на базе частотно-регулируемых асинхронных двигателей общепромышленного назначения и координация движений их рабочих органов с помощью типового ПЛК посредством связи по общепромышленным информационным сетям. При этом ПЛК выступает в качестве генератора траектории, а в ПЧ реализуются функции контуров скорости и тока. Такие варианты конфигурации аппаратной части на базе универсальных устройств обладают следующими преимуществами:

- Широкая распространенность универсальных устройств. Это положительно влияет на стоимость компонентов системы и на возможность их быстрой замены, настройки и запуска таких систем.
- Хорошая масштабируемость, а именно возможность увеличения числа осей благодаря встроенным в ПЛК средствам коммуникации.
- Это открытая система. Предполагается, что инженер может свободно перепрограммировать систему управления под конкретные нужды.

Однако, использование универсальных устройств для реализации многокоординатных электроприводов приводит к трудностям при проектировании системы в целом. Анализ технической литературы показал, что в общедоступных каталогах недостаточно данных, по которым можно оценить реальные времена выполнения основной программы и вспомогательных задач в контроллере, невозможно оценить быстродействие вычислений на одну ось привода, нет данных о скорости выполнения инструкций для ПЧ.

Выполнен обзор существующих сетей передачи данных, наиболее часто используемых в общепромышленных системах и электроприводах на базе преобразователей частоты и асинхронных двигателей. Наилучшими показателями для построения многокоординатного электропривода обладают специализированные сети (Sercos, SyncNet) за счет применения специальных аппаратных средств, форматов передачи данных и алгоритмов работы. Общепромышленные сети используют типовые аппаратные средства, могут обеспечить обмен между различными компонентами систем автоматизации,

но не ориентированы на построение систем распределенного управления электроприводами.

При реализации «аналоговых» систем подчинённого регулирования с последовательной коррекцией в цифровом виде не учитывается влияние квантования по времени управляющих воздействий. При синтезе цифровых контуров регулирования традиционными методами дискретных систем задержки по времени берутся как данные и не ставится задача компенсации их влияния на качество переходного процесса.

Задачей исследований распределённой системы многокоординатного электропривода является проведение анализа проблемных мест всей системы управления и каждого компонента в отдельности.

Во второй главе рассматриваются результаты исследования на компьютерной модели влияния квантования по времени на показатели качества регулирования в контуре положения при типовых управляющих воздействиях и различных настройках внутреннего контура скорости.

Структурная схема одной оси исследуемой системы, реализованная в среде моделирования MATLAB/Simulink, приведена на рис. 1. Исследуется трехконтурная система регулирования положения со звеном квантования по времени T_d (Zero-Order Hold) на выходе пропорционального (Π) регулятора положения RP. Значение T_d задается в долях от T_u . Во внутреннем контуре используется П-регулятор скорости, настроенный на технический оптимум (время регулирования $t_{pc} = 9.4 T_{II}$). Сигнал задания скорости ω_{3aI} преобразуется в квантованный по времени сигнал $\omega_{\text{зад.кв}}$, который отрабатывается внутренним контуром в сигнал скорости ω, который, в свою очередь, интегратором $Int_{-}\theta$ преобразуется в соответствующий выходной сигнал перемещения θ . Примем допущение, что единственная задержка T_d в контуре регулирования положения эквивалентна по действию всем задержкам по этой оси регулирования. Такое допущение будет оправданным, если показать, что применяемые алгоритмы управления будут достаточно робастными к изменению параметров системы, в частности, к значению интервала дискретизации сигналов по времени.

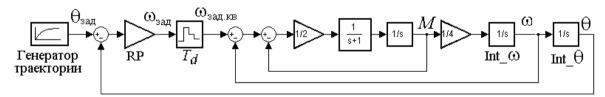
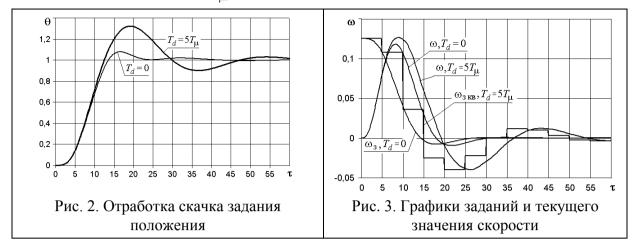


Рис. 1. Структурная схема трехконтурной системы регулирования положения

Для обобщения результатов исследований будем использовать относительные величины. В данной компьютерной модели используется относительное время $\tau = t/t_6$. За базовое время t_6 принята эквивалентная некомпенсируемая постоянная времени контура регулирования момента T_{μ} , определяемая настройкой этого контура в преобразователе частоты. За базовые зна-

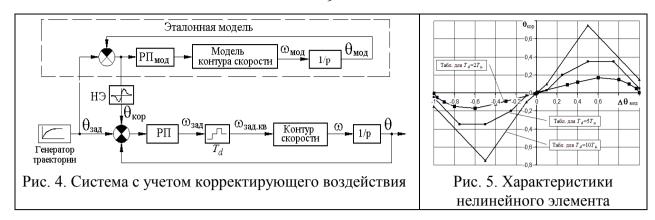
чения момента и скорости приняты их номинальные значения $M_{\text{ном}}$, $\omega_{\text{ном}}$. Базовое значение $\theta_{\text{б}} = \omega_{\text{ном}} \cdot T_{\text{ц.}}$



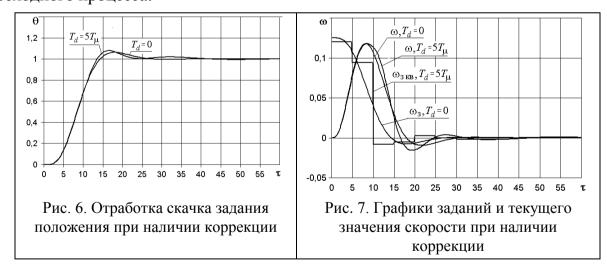
Отработка единичного скачка задания положения показана на рис. 2, где приведены график выходной координаты (положения) в системе без квантования ($T_d = 0$) и соответствующий график при дискрете квантования $T_d = 5T_{\mu}$. Как следует из этих графиков, при $T_d \approx 0.3~t_{\rm pn}$ перерегулирование по положению возрастает до 32% по сравнению с 5% в системе без квантования. Кроме того, возрастает и колебательность системы.

Причину ухудшения качества переходного процесса поясняет рис. 3, на котором показаны графики неквантованного (ω_3 , $T_d=0$) и квантованного (ω_3 , $T_d=5T_\mu$) задания скорости. На первых трех тактах квантования кривая ω_3 -кв располагается выше кривой ω_3 . Эти сигналы совпадают только в начале каждого последующего интервала квантования. Как следствие, происходит соответствующее увеличение скорости в квантованной системе (ω , $T_d=5T_\mu$) по сравнению с неквантованной (ω , $T_d=0$). Площадь между ними пропорциональна разнице максимумов в графиках положения. Варьирование значений показало, что уменьшение относительного значения интервала квантования до $T_d/T_\mu=2$ уменьшает перерегулирование по положению до 15%, а его увеличение до $T_d/T_\mu=10$ увеличивает перерегулирование до 53%. В последнем случае интервал квантования становится соизмерим с временем переходного процесса в системе без квантования, что увеличивает период колебаний и уменьшает их демпфирование. При $T_d/T_\mu > 10$ контур положения становится неустойчивым.

Для уменьшения перерегулирования и влияния квантования по времени на колебательность системы предлагается изменить сигнал квантованного задания скорости так, чтобы он в среднем совпадал с сигналом неквантованного задания скорости. Для этого в систему управления вводится эталонная модель объекта управления: модель замкнутого контура скорости, включенного в контур регулирования положения с регулятором положения без квантователя $P\Pi_{\text{мод}}$ (рис. 4).



На вход модели подается тот же сигнал задания θ_{300} , что и на основной регулятор положения. Коррекция сигнала задания положения на входе основного РП осуществляется добавлением с отрицательным знаком сигнала $\theta_{\text{кор}}$ рассогласования регулятора положения модели объекта управления, пропущенного через блок коррекции НЭ — нелинейный элемент Lookup Table (рис. 5). Характеристика блока коррекции формируется следующим образом. Для первой точки в таблице значение аргумента $\Delta\theta = \theta_{\text{зал}} - \theta_{\text{мод}}$ определяется значением скачка задания при $\tau = 0$, а значение функции — как половина от разности значений рассогласования в начале данного и последующего интервалов квантования $\theta_{\text{кор}} = 0.5(\Delta\theta(0) - \Delta\theta(0+1))$. Чтобы получить вторую точку, повторяют расчет переходного процесса, но уже с сигналом коррекции функции. Значение аргумента $\Delta\theta(\tau) = \theta_{\text{зад}} - \theta_{\text{мод}}(\tau)$ определяется в неквантованной системе, а значение $\theta_{\text{кор}} = 0.5(\Delta\theta(\tau) - \Delta\theta(\tau+1))$ — в квантованной. Для всех последующих точек таблицы процедура повторяется. Как видно (рис. 6 и 7), введение сигнала коррекции при $T_d = 5T_{\mu}$ позволяет практически полностью устранить негативное влияние квантования на качество переходного процесса.



Детальное исследование переходных процессов отработки скачка задания показало, что изменение значения T_d требует существенной корректировки графика НЭ (рис. 5). Кроме того, изменение значения отрабатываемого скачка задания должно сопровождаться пропорциональным изменением

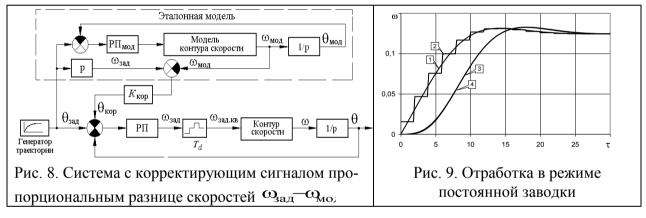
масштабов как по горизонтальной, так и по вертикальной оси. Это может быть достигнуто применением в соответствующих цепях множительно-делительных блоков и переводу эталонной модели в режим отработки приращений задания, что, однако, усложняет практическую реализацию системы и может обеспечить оптимальный характер переходных процессов только в режиме позиционирования.

Вариант системы управления с корректирующими воздействиями по разности производной задания на перемещение и скорости эталонной модели

Более универсальный способ коррекции контура положения можно получить, если учесть, что при фиксированном значении интервала дискретизации T_d значение скачка квантованного сигнала рассогласования на входе регулятора положения пропорционально разности средних значений производных задания и текущего значения положения, т.е. разности заданной и текущей скоростей (рис. 8). Сигнал коррекции формируется из разности задания скорости $\omega_{\text{зад}}$ и скорости эталонной модели $\omega_{\text{мод}}$:

QERGRAM,

где $K_{\text{кор}} = 0.5T_d$ – коэффициент передачи корректирующего сигнала.



Подача с соответствующим коэффициентом такого корректирующего сигнала на вход регулятора положения позволяет отказаться от нелинейного блока коррекции и автоматически получить требуемое смещение квантованного сигнала задания на скорость при любом значении скачка задания, а также при его линейном нарастании с разным темпом — типовом режиме «постоянной заводки» (рис. 9). Полученные результаты свидетельствуют о том, что негативное влияние квантования по времени на качество переходных процессов по управляющему воздействию можно практически полностью устранить при отработке малых перемещений, если интервал квантования не превышает 30% от времени переходного процесса.

Реализация эталонной модели в ПЛК

На практике значение T_d будет определяться многими факторами: производительностью процессора ПЛК, организацией в нём процесса выполнения программ, скоростью передачи данных по информационной сети и применяемыми протоколами обмена информацией, настройкой контуров регулирования момента и скорости в частотно-регулируемом электроприводе и организацией в нём процесса выполнения программ. Все перечисленные факторы будут вносить свой вклад в значение интервала дискретизации, но некоторые их них могут иметь доминирующее значение. Остановимся на одном из аспектов — минимизации затрат процессорных ресурсов ПЛК при реализации в нем эталонной модели объекта управления. Применение известных аналитических формул, описывающих реакцию на типовые управляющие воздействия, нецелесообразно по двум причинам. Во-первых, эти формулы содержат экспоненциальные и тригонометрические функции, которые могут отсутствовать в системе команд ПЛК. Во-вторых, реальный сигнал задания совпадает с типовыми управляющими воздействиями только на отдельных участках, которые нужно будет стыковать друг с другом. Всё это усложняет аналитический расчет и делает нецелесообразным его применение в ПЛК качестве эталонной модели.

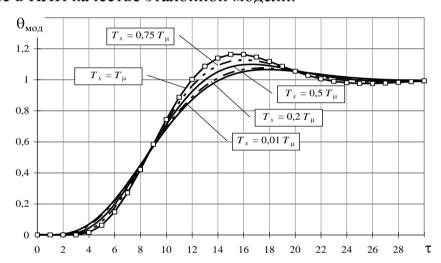


Рис. 10. Графики $\theta_{\text{мод}}(\tau)$ для модели 4-го порядка, рассчитанной в ПЛК при различных значениях шага интегрирования T_s

Альтернативный вариант реализации эталонной модели в ПЛК — решение численным методом системы дифференциальных уравнений объекта управления, соответствующей его структурной схеме. Известно множество методов численного интегрирования, но, чтобы не усложнять в ПЛК вычислительную задачу, ограничимся алгоритмом первого порядка — методом Эйлера. Полагаем, что шаг интегрирования T_s совпадает с циклом выполнения данной программы в ПЛК. График с $T_s = 0.01T_{\mu}$ примем за точное решение, а $T_s = 0.5T_{\mu}$ является искомым максимальным значением, при котором отклонения в реакции контура положения от истинного значения не превышают 5% от установившегося значения.

Рассмотрим возможности дальнейшего увеличения значения шага расчёта в эталонной модели T_s за счет понижения порядка системы дифференциальных уравнений. Этот прием известен в теории систем подчинённого регулирования, когда при синтезе регулятора внешнего контура внутренний

контур упрощают до простого инерционного звена. Моделирование контура регулирования положения при $T_{\rm g}=5T_{\rm m}$ показало, что последовательное удвоение значения T_s при одновременном понижении порядка системы уравнений эталонной модели незначительно ухудшает реакцию системы. Для модели второго порядка при $T_s=2T_{\rm m}$ перерегулирование по выходной координате θ не превышает 8% при незначительном увеличении колебательности. Оптимальной структурой с точки зрения затрат процессорных ресурсов и точности воспроизводимых переходных процессов объекта управления считаем структуру эталонной модели с двумя интегрирующими элементами, описывающую реальную трехконтурную структуру управления положением. При изменении вида регулятора положения на ПИ, будет увеличиваться количество интегрирующих элементов эталонной модели до трех.

Далее рассмотрим влияние отклонения реальных значений $T_{\rm д}$ от заданных в системе регулирования на показатели качества переходного процесса в различных режимах работы. Одновременно уточним оптимальное значение шага дискретизации T_s .

Система с П- регулятором положения

Как видно из графика на рис. 11, в большинстве случаев значение перерегулирования ($\sigma(T_d/T_\mu)$ %) остается в пределах 10% при $T_d \leq 5T_\mu$. Минимальные значения перерегулирования имеем при $T_{\rm s} = 3\,T_\mu$. Однако, как показал анализ графиков $\theta(\tau)$, при $T_{\rm s} > 3T_\mu$ значительно возрастает время регулирования.

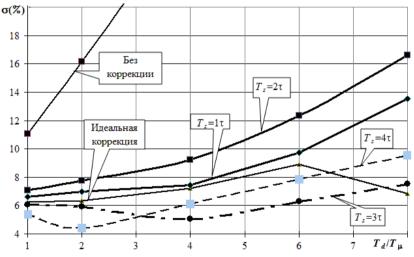


Рис. 11. Зависимость $\sigma(T_d/T_{\parallel})$ при разных значениях T_s

При управляющем воздействии в виде постоянной заводки задания на перемещение (следящий режим) и П-регуляторе положения присутствует установившаяся ошибка по положению $\Delta\theta(\tau)$, пропорциональная производной от задания на перемещение $\omega_{\text{зад}}$ и обратно пропорциональная значению коэффициента РП. Результаты моделирования показали, что и в этом режиме $T_{\text{s}}=3\,T_{\text{u}}$ является оптимальным значением.

Для устранения установившейся ошибки по положению $\Delta\theta(\tau)$ применяют различные методы: используют ПИ-регулятор положения или вводят дополнительный сигнал предуправления по скорости изменения задания.

Система с ПИ-регулятором положения

Моделирование переходного процесса реакции системы на скачок задания проведено при оптимальном шаге интегрирования эталонной модели $T_s = 3 \, T_\mu$. Оно показало, что при использовании корректирующего воздействия удается значительно уменьшить максимальное рассогласование. Так, при времени дискретизации $T_d = 5 \dots 6 \, T_\mu$ значение σ % уменьшается с 14% до 4% по сравнению с моделью без учета дискретностей ($T_d = 0.01 \, T_\mu$).

Увеличение порядка астатизма структуры привело к затягиванию переходного процесса в 2 раза по сравнению со структурой с П-регулятором положения. В структуре без учета дискретности ($T_d = 0.01 \, T_\mu$) оно составляет $T_{\rm per} = 37.4 \, T_\mu$. Это является существенным недостатком данного способа устранения статической ошибки по положению. В структуре без коррекции $T_{\rm per}$ растет по мере увеличения дискретности и при $T_d = 5 \, T_\mu$ уже в 2 раза больше, чем без квантования (рис. 12). Введение корректирующего сигнала снижает $T_{\rm per}$ до $40 \, T_{\rm u}$ при значениях $T_d \le 5 \, T_{\rm u}$.

Переходный процесс проходит в 2 раза быстрее, чем при использовании ПИ-регулятора положения ($T_{\rm per}=18.8T_{\mu}$ при $T_d=0.01T_{\mu}$). При $T_d \leq 5T_{\mu}$ введение корректирующего сигнала снижает $T_{\rm per}$ до $T_{\rm per} \leq 25T_{\mu}$. (рис. 12).

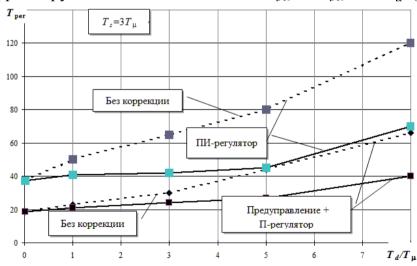


Рис. 12. Время $T_{\rm per}$ вхождения выходной координаты $\theta(\tau)$ в 5%-ный диапазон точности для режима постоянной заводки при $T_s=3T_{\rm u}$

Система с П-регулятором положения и предуправлением по скорости

Существенный недостаток предыдущего способа можно устранить введением дополнительного сигнала задания по скорости, этот метод также известен как предуправление по скорости. При этом способе используется Прегулятор положения. Введение дополнительного сигнала $\omega_{\rm 3ag}$, рассчитанно-

го в ПЛК (рис. 13), в обход регулятора положения РП устраняет установившуюся ошибку по положению.

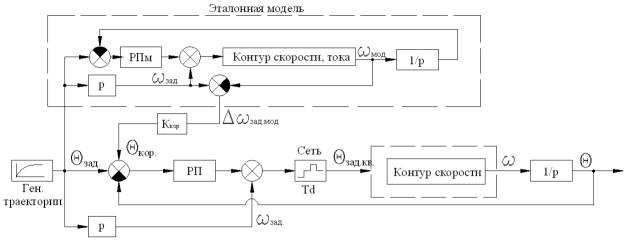


Рис. 13. Система с коррекцией по производной задания и дополнительным сигналом задания по скорости $\omega_{\text{зад}}$

Влияние возмущающего воздействия на систему с дискретностью и коррекцией

Корректирующее воздействие в рассматриваемой структуре управления не устраняет ошибок от возмущающих воздействий, основным из которых является нагрузка. При П-регуляторах скорости и положения изменение момента нагрузки приводит к изменению значения статической ошибки. Ее можно устранить различными способами, например с помощью ПИ-регулятора скорости. Однако динамическая ошибка при изменении типа регулятора останется. Наличие дискретности управляющего воздействия приводит к увеличению колебательности процесса (рис. 14). Вплоть до значения $T_d = 5T_{\mu}$ дискретность управляющего воздействия не оказывает существенного влияния на переходный процесс. Максимальное отклонение по положению возрастает всего на 4% по сравнению с моделью без квантования.

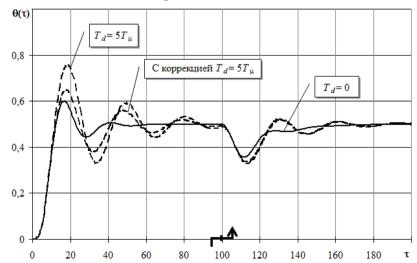


Рис. 14. Переходный процесс $\theta(\tau)$ при $T_d = 5T_\mu$ и $T_s = 3T_\mu$, задании позиционирования в виде скачка и набросе нагрузки в момент $\tau = 100$

<u>В третьей главе</u> описана аппаратная часть и программное обеспечение оборудования, на котором проводились экспериментальные исследования электроприводов при совместном управлении от программируемого контроллера. Исследовались две конфигурации оборудования.

В первой конфигурации три идентичных комплекта (ПЛК Twido + ПЧ Altivar 71 + АД мощностью 1,5 кВт, 1500 об/мин) были связаны по сети Modbus RTU или Modbus TCP.

В ходе экспериментов по обмену данными между двумя ПЛК было установлено, что зависимость времени квантования сигнала управляющего воздействия от скорости сети передачи данных линейная, а реальное время квантования состоит из многих составляющих. Оно может быть не постоянным и иметь широкий диапазон изменения в зависимости от способа опроса сети, скорости работы сети передачи данных, времени цикла работы передающего и принимающего устройства. Время передачи двух байт данных при скорости 38400 Бод по последовательному каналу составляет 0,6 мс. Однако установлено, что реальное значение периода повторения посылки составляет 7,2 мс, а при чтении-записи одного слова данных период повторения посылки достигает $T_d = 25$ мс, что объясняется спецификой протокола Modbus RTU. Дополнительные исследования выявили передачи данных причину снижение эффективной скорости обмена информацией: основную задержку вносит время обработки цикла программы устройства, принимающего данные.

Экспериментально определены задержки в передаче задания частоты вращения от ПЛК Twido к ПЧ Altivar 71. Период квантования управляющего воздействия при управлении преобразователем частоты Altivar 71 от контроллера Twido на скорости работы сети по протоколу Modbus RTU 38,4 кбод может достигать значения 1с/ось при организации общения между устройствами встроенными средствами — библиотекой MacroDrive.

При пересылке только части общей таблицы D_MANAGER короткими сообщениями с помощью макросов библиотеки Comm Macros можно сократить задержку до 18,5 мс/ось. Этот результат указывает на то, что и в данном случае «узким» местом, определяющим период передачи одного пакета данных, является быстродействие встроенного контроллера преобразователя частоты.

Поскольку в технических характеристиках контроллеров серии Twido не указано время выполнения математических операций, то одной из важных задач работы было определение времени расчета программы регуляторов и эталонной модели в ПЛК. В состав программы дополнительно входили все необходимые элементы для реализации предложенного способа управления: П- и ПИ-регуляторы положения с ограничениями по уровню, накапливающие сумматоры сигналов. Для вычислений использовался формат с плавающей точкой. Установлено, что интервал времени для алгоритма расчета составляет $T_s = 0.31$ мс/ось. Следует заметить, что полученные оценки связаны

только с алгоритмом регулятора положения и не учитывают затрат процессорной мощности на реализацию многоканального генератора траектории, связь с верхним уровнем управления, организацию интерфейса с оператором.

Поскольку среди доступных параметров ПЧ Altivar отсутствует значение положения выходного вала двигателя, то экспериментальная проверка предложенной системы потребовала бы дополнительных затрат времени и ресурсов для организации такой связи.

Во второй конфигурации оборудования один ПЛК Modicon M258 по сети CANopen был связан с двумя комплектами (сервопреобразователь Lexium 32 + серводвигатель BSH 55MM 0,5Hм, 6000 об/мин). Для управления режимами работы и изменения различных уставок использовалась графическая панель оператора XBTGT1335. Из графиков отработки скачка задания скорости экспериментально определена заложенная в систему управления эквивалентная некомпенсируемая постоянная времени электропривода $T_{\mu} = 5$ мс. Исследовался заложенный в сервопреобразователь регулятор положения. Установлено, что настройка внутреннего контура положения сервопривода близка к оптимальной, обеспечивающей отработку заданного перемещения без перерегулирования как в области малых, так и больших перемещений. Заданный уровень ограничения ускорения не достигается, поэтому малые перемещения (без ограничений переменных) сразу переходят в большие (с ограничением скорости). При $n_{\text{max}} = 1000$ об/мин граница находится в районе $\theta_3 = 200...300^{\circ}$ и линейно увеличивается при увеличении n_{max} .

Для практического подтверждения полученных ранее теоретических результатов в дополнительном программном модуле ПЛК был реализован пропорциональный регулятор положения, выходной сигнал которого выдавался в качестве задания на скорость сервопривода, который в данном случае использовался в режиме отработки скорости. Для оценки влияния квантования по времени на качество переходного процесса изменялся период сканирования программы расчета регулятора. Минимальное значение $T_{\rm KB}$ составляло 2 мс, что примерно в два раза меньше эквивалентной некомпенсируемой постоянной времени сервопривода. Тем самым создавалась ситуация, когда квантование по времени не сказывалось на качество переходного процесса, которое определялось значением коэффициента регулятора положения $K_{\rm pn}$ и настройкой внутреннего контура скорости. Как показали эксперименты, программно реализованный в ПЛК регулятор обеспечил $T_{\rm per}$ =160 мс, что соизмеримо с встроенным регулятором положения в сервопреобразователе.

При увеличении $T_{\rm KB}$ до 40 мс перерегулирование по положению увеличивается до 17% (рис.15). Увеличение $T_{\rm KB}$ до 80 мс приводит к перерегулированию в 30%. Таким образом, экспериментально проверено влияние квантования по времени на показатели качества переходных процессов в контуре регулирования положения. На рис. 15 на рассмотренный ранее переходный

процесс отработки скачка задания положения при $T_{\rm kb} = 40$ мс наложены графики выходной координаты модели $\theta_{\rm mog}$ и её производной $n_{\rm mog}$. Следует заметить, что модель начинает отрабатывать скачок задания практически без задержки, а привод — с переменной задержкой, поскольку $T_{\rm uht} << T_{\rm kb}$ и интервал расчета регулятора положения никак не синхронизировался с периодом повторения скачков задания. Экспериментальные исследования подтверждают теоретически полученные данные о негативном влияния квантования по времени управляющего воздействия на выходную координату системы регулирования перемещения при реализации регулятора в ПЛК.

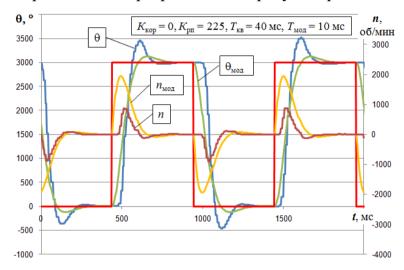


Рис. 15. Переходные процессы отработки приводом скачков заданий в режиме позиционирования без коррекции

В соответствии с полученными ранее теоретическими результатами для компенсации негативного влияния квантования по времени программно реализован сигнал коррекции по скорости, получаемый из эталонной модели. Для реализации такого управления в ПЛК добавлен модуль программы расчета эталонной модели, выполняемый с шагом интегрирования $T_s = 10$ мс.

При введении дополнительного корректирующего сигнала, рассчитанного в ПЛК с T_s =2 T_μ , перерегулирование θ уменьшается до 5% и не превосходит перерегулирования модели (рис. 16). Однако и здесь проявляется отсутствие синхронизации запуска модели с интервалом квантования при расчёте регулятора положения — график отработки фронта спадания θ_3 немного отличается от отработки фронта нарастания.

Практическая реализация предложенной теоретической методики подтвердила свою эффективность. Удается значительно улучшить показатели качества при больших значениях дискретности управляющего воздействия. Реализация корректирующего воздействия в контуре ПЛК позволила снизить перерегулирование с 30% до 6% при периоде квантования $T_{\rm д}=80$ мс при сохранении первоначальной формы задания на перемещение. Результаты экспериментов по работе привода в следящем режиме показали, что удается

снизить значения динамической ошибки по сравнению с системой управления без коррекции.

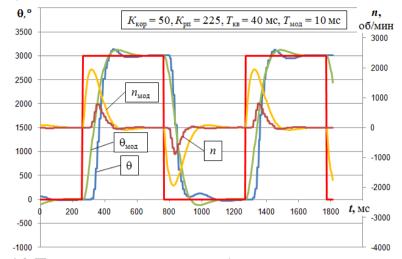


Рис.16. Переходные процессы отработки приводом скачков заданий в режиме позиционирования с коррекцией

В четвертой главе представлена методика проектирования многокоординатных электроприводов на базе общепромышленных компонентов, которая обеспечивает помощь проектировщику в подборе аппаратной части электропривода, контроллера, а также помощь в выборе структур системы автоматического регулирования с последующим расчетом регуляторов данной структуры. Основные разделы методики: І) Выбор варианта кинематической схемы и задание её параметров; ІІ) Выбор элементов силовой части электропривода; ІІІ) Выбор структуры системы автоматического управления; ІV) Выбор аппаратной части реализации САУ на базе общепромышленных компонентов; V) Моделирование системы для определения её статических и динамических показателей; VI) Конфигурирование и программирование ПЧ и ПЛК.

Каждый из разделов предполагает ряд последовательных этапов, на которых пользователю предоставляется возможность выбора решений из предложенных вариантов или рекомендации, основывающиеся на типовых решениях в электроприводе и результатах предшествующих этапов выбора. Исходя из параметров рабочего органа и тахограммы движения вычисляются требуемые значения динамических моментов двигателя, скоростей вращения. Выбор силовой части и расчет параметров электропривода базируются на классической теории электропривода.

Выбор типа структурной схемы системы автоматического управления предполагает несколько этапов:

- Определение типов задач, решаемых многокоординатным электроприводом;
- Выбор типа структуры управления;
- Выбор необходимых датчиков обратной связи;

- Синтез регуляторов системы управления. Раздел выбора аппаратной части также поделен на несколько последовательных этапов:
 - Определение количества и типов устройств обработки данных;
 - Выбор ПЛК для поставленных задач;
 - Анализ производительности ПЛК и рекомендации по оптимизации программной части;
 - Выбор сети передачи данных и оценка задержек;
 - Выбор периферийных устройств.

В заключении обобщены основные результаты и выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие основные результаты:

- 1. На компьютерной модели исследовано влияние квантования по времени управляющего сигнала в распределенных системах управления движением на качество переходных процессов в контуре регулирования положения. Установлено, что даже при интервале квантования T_d , соизмеримом с эквивалентной постоянной времени внутренних контуров регулирования T_μ , перерегулирование превышает 10%. При $T_d=15T_\mu$ оно возрастает до 80%, дальнейшее увеличение T_d приводит к неустойчивости системы.
- 2. Проанализированы факторы, определяющие реальное значение задержек во времени для различных структур управления движением. При реализации регуляторов положения индивидуальных осей в ПЛК эквивалентное значение T_d зависит от: числа управляемых осей, времени цикла обработки программы передающего устройства, принимающего устройства, заданной скорости передачи данных. Кроме того, T_d может быть не постоянным и иметь широкий диапазон изменения из-за многих факторов.
- 3. Предложен и экспериментально проверен способ коррекции сигнала управления, передаваемого по информационной сети в качестве задания контура регулирования скорости, компенсирующий негативное влияние квантования по времени и обеспечивающий требуемое качество переходного процесса по управляющему воздействию. Коррекция эффективно действует, если интервал квантования не превышает 30% от времени переходного процесса.
- 4. Выработаны рекомендации по способу расчета эталонной модели в ПЛК. При П-регуляторе положения и настройке на технический оптимум порядок системы дифференциальных уравнений модели может быть понижен до второго порядка без существенного ухудшения качества переходного процесса в контуре положения с коррекцией. Определены требования к быстродействию контроллера для реализации эталонной модели объекта управления шаг интегрирования $T_s = 3T_{\mu}$.

- 5. Корректирующее воздействие в рассматриваемой структуре управления не устраняет ошибок от возмущающих воздействий, основным из которых является нагрузка. Установившуюся ошибку можно устранить различными способами, например, с помощью ПИ-регулятора скорости, однако динамическая ошибка останется. Вплоть до $T_d = 5T_{\mu}$ дискретность управляющего воздействия не оказывает существенного влияния на переходный процесс. Максимальное отклонение по положению возрастает всего на 4% по сравнению с моделью без квантования.
- 6. На базе анализа существующих компьютерных средств поддержки проектирования систем управления движением и полученных автором результатов теоретических и экспериментальных исследований предложена методика итерационного проектирования многокоординатных электроприводов на базе общепромышленных компонентов. Она предполагает накопление экспериментальной базы данных по динамическим показателям функционирования промышленных образцов ПЛК и ПЧ, моделирование системы с целью определения её статических и динамических показателей в реальных условиях управления многокоординатным электроприводом, конфигурирование и программирование ПЧ и ПЛК с учётом обмена информацией между ними.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

- 1. **Бычков М.Г., Кукушкин М.С.** Компенсация дискретности по времени управляющего сигнала в системе регулирования положения с эталонной моделью // Электричество. 2011. № 9. С. 55 63.
- 2. **Бычков М.Г., Кукушкин М.С**. Исследование на компьютерной модели влияния квантования по времени в контуре регулирования положения // Труды МЭИ. Вып. 686. –М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 4 17.
- 3. **Бычков М.Г., Кукушкин М.С**. Реализация многокоординатного электропривода на базе ПЛК и ПЧ общепромышленного назначения// Семнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Том 2. –М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 152 153.