

На правах рукописи



Остроухов Всеволод Викторович

**ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДАЧИ  
СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2012

Работа выполнена на кафедре систем управления ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Научный руководитель – Усынин Юрий Семенович, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: Смирнов Юрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор – профессор кафедры «Приборостроение» ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ); Карандаев Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор – главный научный сотрудник кафедры «Электротехника» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Ведущая организация – ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (г. Челябинск).

Защита диссертации состоится 29 марта 2012 г., в 12 часов, на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина 76, аудитория 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет, тел. (351) 267-91-23, email: vsvd@yandex.ru

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор



Ю.С. Усынин

**Актуальность темы.** Станы холодной прокатки труб (ХПТ) предназначены для производства холоднокатаных труб из легированных и нержавеющей сталей. Эти трубы используются в авиации, атомной энергетике и автомобилестроении. Например, на Челябинском трубопрокатном заводе, на стане ХПТ-450П2 производят трубы-ланжероны для сверхтяжелого вертолета МИ-26.

При прокатке необходимо осуществлять подачу, поворот трубной заготовки и перемещение, поворот оправки. Эту задачу выполняет группа поворотно-подающих механизмов (ППМ). В существующих решениях величины подачи, поворота и перемещения жестко определяются параметрами конструкции ППМ. Недостатком такого решения является ограниченный диапазон изменения параметров прокатки, невозможность быстрого изменения параметров и низкая эксплуатационная надежность механизма. Преимуществом механического ППМ является строгая синхронизация всех механизмов с циклограммой главного привода.

Развитие техники позволило заменить механическую связь электрической с полной автоматизацией управления. Однако большие маховые массы электродвигателей и высокая динамика механизмов делают задачу совместной работы приводов достаточно сложной. Поэтому для создания электропривода требуется изучение динамики всего комплекса механизмов, определения оптимальных с точки зрения точности и быстродействия параметров механизма, а также синтез систем управления электроприводами, обеспечивающих требуемое качество управления этими элементами автоматизированной системы.

Вопросы технологии холодной прокатки труб рассмотрены в работах З.А. Коффа, М.И. Гриншпуна, Ю.Ф. Шевакина, А.И. Целикова, др.

Разработкой и исследованием металлургического электропривода занимались Д.П. Морозов, О.В. Слежановский, Н.Н. Дружинин, А.С. Филатов, А.Г. Мирер, Б.Н. Дралюк, регулируемые электроприводами переменного тока для металлургической промышленности А.М. Вейнгер, Г.Б. Онищенко, Р.Т. Шрейнер, И.Я. Браславский и др. Вопросы оптимизации быстродействия в позиционном и следящем электроприводе освещены в работах Ю.А. Борцова, Н.Д. Поляхова, В.В. Путова, В.Г. Кагана, И.Н. Исаева, Ю.П. Петрова и др.

**Объектом исследования** в работе является механизм подачи станов холодной прокатки труб. Исследование проводится на примере механизма подачи трубы стана ХПТ-450. Механизм подачи выбран потому, что к нему по сравнению с другими механизмами поворотно-подающей группы предъявляются самые высокие технологические требования, а стан ХПТ-450 – потому, что это самый крупный стан холодной прокатки, и многие его параметры и режимы работы предельные.

**Целью работы** является увеличение производительности, надежности и качества продукции станов холодной прокатки за счет совершенствования электропривода подачи трубы, обеспечивающего максимальное быстродействие и точность подачи, а также удобство в эксплуатации.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Определение требований к электроприводу поворотно-подающих механизмов.

2. Построение математической модели и изучение динамических свойств электропривода подачи трубы с целью обоснования выбора элементов и определения оптимальных с позиции повышения точности и быстродействия параметров.

3. Увеличение точности и быстродействия электропривода подачи трубы с на основании анализа возмущающих воздействий и экспериментальных осциллограмм.

4. Экспериментальная проверка полученных результатов на стане ХПТ-450 ОАО «Челябинский трубопрокатный завод».

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались основные положения теории автоматического управления, теории электромеханического преобразования энергии, теории расчёта электрических цепей, теории электропривода, методы математического моделирования систем на ЭВМ, методы экспериментального исследования.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается совпадением с заданной точностью основных теоретических результатов и экспериментальных данных, полученных на действующем промышленном и лабораторном оборудовании, аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ электротехники, корректным использованием теории.

**Научная новизна:**

1. Предложена математическая модель механизма подачи в виде трехмассовой колебательной системы, учитывающая податливость винтов и трубы. Определены способы вычисления основных параметров модели.

2. Предложена математическая модель тиристорного преобразователя частоты с непосредственной связью, учитывающая задержку на переключение вентиляльных групп при раздельном управлении, с помощью которой получены частотные характеристики преобразователя и оценено его влияние на качество процессов управления.

3. Предложена методика декомпозиции электромеханической системы, основанная на частотных характеристиках, позволившая оценить влияние параметров механизма на качество процессов в системе, и сформировать рекомендации по выбору параметров силовых элементов.

4. Предложена математическая модель срыва трубы с оправки, с помощью которой определена количественная связь между разбросом величины подачи трубы и параметрами механизма, а также даны рекомендации по изменению передаточного числа редуктора для уменьшения разброса подачи трубы.

5. Предложен метод анализа экспериментальных осциллограмм для определения путей увеличения быстродействия электропривода, применение которого дало рекомендации по выбору максимальной скорости, ускорения и настроек регуляторов.

**Научное значение работы** заключается в следующем:

1. Предложена методика исследования влияния параметров механизма на качество процессов управления, основанная на частотных методах, применимая для широкого класса электромеханических систем.

2. Доказана эффективность метода последовательной частной оптимизации позиционного электропривода подачи трубы, основанного на экспериментальных переходных функциях электропривода, позволяющего понизить размерность решаемой задачи и связать результаты оптимизации с параметрами элементов конструкции.

**Практическая значимость** заключается: в обосновании выбора структуры системы регулирования и ее параметров; в формировании требований к параметрам силового механо- и электрооборудованиям электропривода подачи станов ХПТ-450.

Полученные результаты могут быть использованы при модернизации существующих станов ХПТ, а также при разработке новых. Предложенные методики исследования могут быть применимы для аналогичных электроприводов.

**Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель кинематической передачи электропривода подачи трубы, учитывающая упругие податливости элементов механизма.

2. Метод частотного анализа и его применение для оценки влияния параметров механизма на работу электропривода подачи стана ХПТ-450, рекомендации по выбору электродвигателя.

3. Метод анализа экспериментальных осциллограмм токов и скорости, его применение для увеличения быстродействия электропривода подачи трубы стана ХПТ-450, рекомендации по увеличению быстродействия за счет изменения максимальной скорости и ускорения электропривода.

4. Результаты анализа влияния возмущающих воздействий на точность позиционирования: модель срыва трубы с оправки и рекомендации по выбору передаточного числа редуктора для уменьшения разброса подачи трубы стана ХПТ-450.

5. Результаты исследования динамики преобразователей частоты, рекомендации по выбору типа преобразователя.

6. Обоснование выбора типа электропривода, структуры системы регулирования, типа регуляторов и их параметров.

**Реализация выводов и рекомендаций работы.** Рекомендации по выбору оборудования и разработанные структурные и функциональные схемы синхронного электропривода подачи приняты для использования:

1. При модернизации станов ХПТ-450П1 и ХПТ-450П2 ОАО «Челябинский трубопрокатный завод». Модернизация выполнена ООО НТЦ «Приводная техника» (г. Челябинск).

2. В учебном процессе Южно-Уральским государственным университетом на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» при чтении лекций и проведении лабораторных работ по курсу «Системы управления электроприводов».

Внедрение подтверждено соответствующими актами.

**Апробация работы.** В полном объеме работа докладывалась на расширенных заседаниях кафедр «Системы управления» и «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского государственного университета.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

1. XII Международная конференция Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты (г. Алушта, 2010 г.).

2. Четвертый Всероссийский Форум студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах», (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010 г.).

3. Международная научно-практическая конференция «Современные методы и средства автоматического управления техническими объектами» (г. Челябинск, 2006 г.).

4. 61-я, 62-я научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ (г. Челябинск, 2009–2010 гг.).

5. Первая, вторая и третья конференции аспирантов и докторантов (г. Челябинск, 2009–2011 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 публикации в журналах, включённых в перечень ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 154 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков, 16 таблиц, список используемой литературы из 124 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, научная новизна и практическая значимость, определены объект, проблемы, цели и методы исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** на основе обзора работ З.А. Коффа, М.И. Гриншпуна, Ю.Ф. Шевакина, В.Я. Осадчего, Р.Ш. Адамия определяются требования к комплексу поворотного-подающих механизмов с целью обоснования требований к приводу, исследуются возможные варианты реализации электропривода.

Холодная прокатка труб заключается в том, что на коническую оправку 1 надевают цилиндрическую заготовку 2 и обжимают валками 3 (рис. 1).

При каждом двойном ходе клетки происходит подача трубы в область прокатки и поворот трубы и оправки для устранения дефектов. Производительность и качество выпускаемой продукции станов холодной прокатки труб зависит от точности и быстроты действия механизмов поворотной-подающей группы. Наиболее важными по совокупности требований являются механизмы подачи трубы и перемещения оправки.

На основе анализа динамических характеристик показано, что электропривод обладает наилучшими эксплуатационными характеристиками по сравнению с механическими, гидравлическими и пневматическими приводами, в первую очередь, надежностью и гибкостью в управлении. Однако большие маховые массы электродвигателей и высокая динамика механизмов делают задачу совместной работы приводов достаточно сложной.

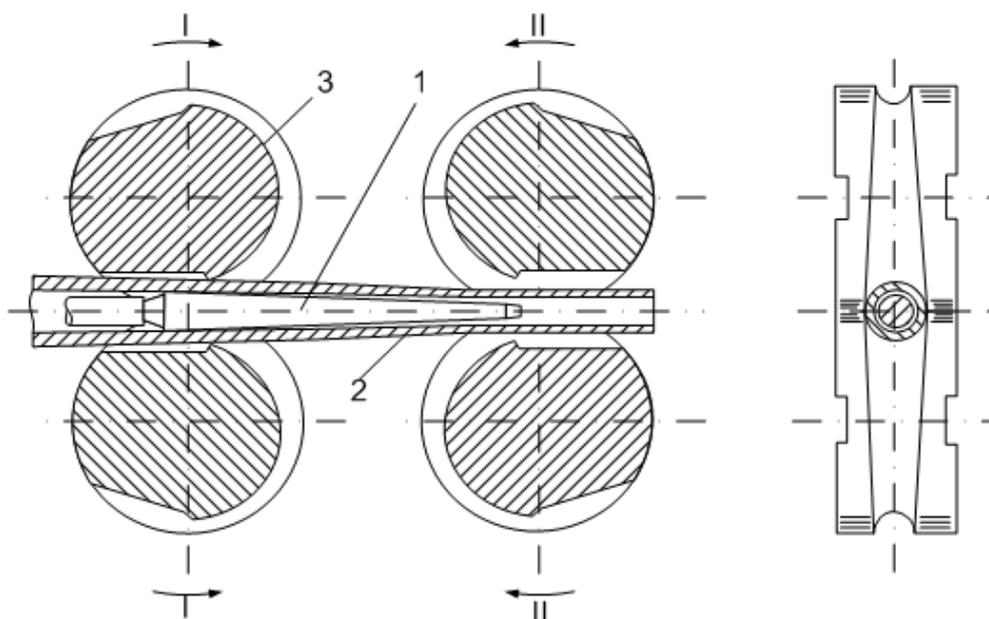


Рис. 1. Схема холодной прокатки труб на стане валкового типа

С учетом особенностей технологии холодной прокатки сформулированы требования к качеству процессов управления в электроприводе подачи: перерегулирование по положению недопустимо, время регулирования положения не должно превышать время раскрытия калибров, статическая точность должна быть не менее 0,5%.

Проанализированы динамические характеристики машин постоянного тока, переменного тока асинхронных, синхронных, двойного питания и реактивной машины с независимым возбуждением. Для реализации механизма подачи рекомендован синхронный электропривод с векторным методом управления. Отмечена возможность применения синхронного реактивного двигателя с независимым возбуждением, обладающим более простой конструкцией и системой регулирования, но динамические свойства которого пока мало изучены.

Предложена функциональная схема электропривода подачи, реализующая векторный метод управления синхронным электродвигателем (рис. 2).

**Во второй главе** решается задача получения математического описания силового модуля электропривода подачи трубы стана холодной прокатки, определяются необходимые параметры модели.

Силовой модуль является критичным элементом электропривода подачи трубы, и при высоких требованиях к быстродействию системы вопрос выбора элементов и параметров силового модуля выходит на первое место. Силовой модуль электропривода подачи трубы включает в себя преобразователь частоты, электродвигатель и кинематическую передачу. Каждый элемент является самостоятельной сложной системой, требующей отдельного исследования.

Кинематическая передача электропривода подачи представляет собой сложную многомассовую систему с невыясненными в литературе величинами люфтов и податливостей. Механизм подачи состоит из электродвигателя, цилиндрического редуктора, винтовой передачи и трубы (рис. 3).



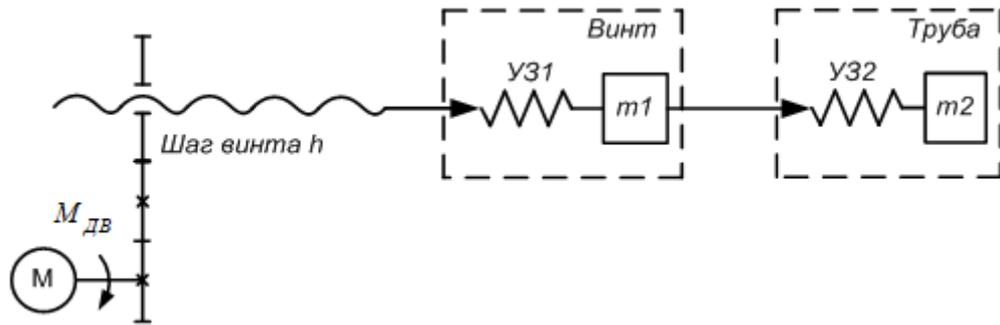


Рис. 3. Расчетная кинематическая схема

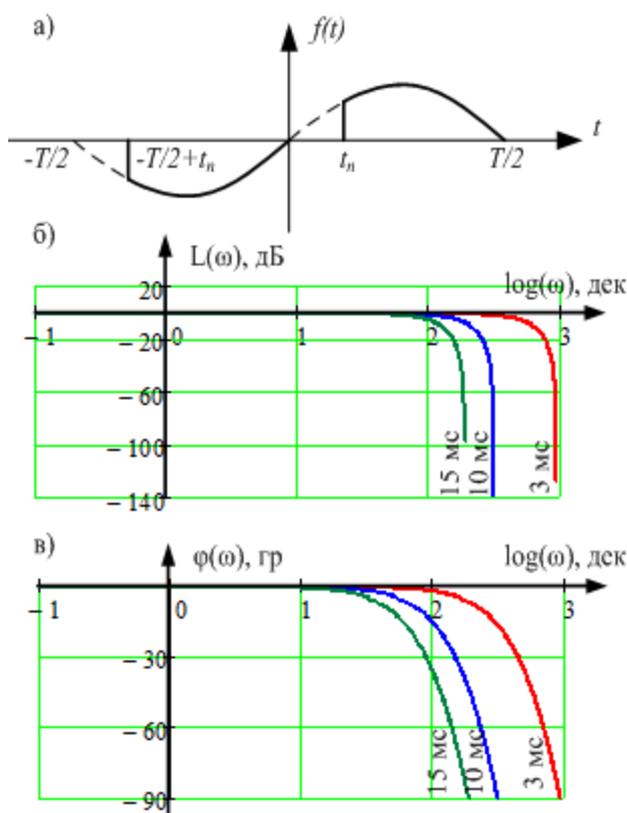
Основной вклад в величину податливости вносит сжатие трубы и винтов механизма подачи. Для исследования динамики силового модуля электропривода подачи предложена математическая модель кинематической передачи, учитывающая податливость трубы и винтовой передачи, представленная системой дифференциальных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega_{ДВ}}{dt} = \frac{1}{J_{СУММ}} (M_{ДВ} - M_{СОПР}); \\ \frac{dF_1}{dt} = C_1(V_1 - V_2); \\ \frac{dV_2}{dt} = \frac{1}{m_1} (F_1 - F_2); \\ \frac{dF_2}{dt} = C_2(V_2 - V_3); \\ \frac{dV_3}{dt} = \frac{1}{m_2} (F_2 - F_{СОПР}); \\ \frac{ds_3}{dt} = V_3. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь  $\omega_{ДВ}$  – скорость вращения двигателя;  $M_{ДВ}$ ,  $M_{СОПР}$  – электромагнитный момент двигателя и момент сопротивления;  $J_{СУММ}$  – момент инерции вращающихся частей;  $F_1$ ,  $F_2$  – силы реакции винта и трубы;  $F_{СОПР}$  – сила сопротивления поступательному движению;  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  – линейные скорости концов винта и трубы;  $m_1$ ,  $m_2$  – массы винта и трубы;  $C_1$ ,  $C_2$  – коэффициенты жесткости винта и трубы;  $s_3$  – перемещение конца трубы.

Динамика преобразователя частоты с непосредственной связью с учетом задержки на переключение вентиляльных групп обычно не рассматривается в литературе. Но экспериментальное исследование на станах ХПТ-450 показывает, что именно это явление препятствует увеличению быстродействия электропривода подачи трубы, и исследование этого вопроса является актуальным.

Для исследования динамики преобразователя частоты с учетом задержки на переключение вентиляльных групп предложена математическая модель, представленная статической нелинейной характеристикой выходного сигнала (рис. 4 а).



ис. 4. Характеристики ПЧНС:  
а) выходной сигнал;  
б) ЛАЧХ и в) ФЧХ при  
разных значениях бестоковой паузы

Частотные характеристики, полученные с помощью предложенной математической модели, показывают значительное снижение коэффициента передачи и увеличение фазового сдвига выходного сигнала преобразователя на частотах, близких к частотам рабочего диапазона электропривода, что приводит к значительному снижению момента электродвигателя (рис. 4 б,в).

Для исследования влияния выбора электродвигателя на качество процессов в электроприводе подачи предложены математические модели трех типов электродвигателей: двигателя постоянного тока, асинхронного и синхронного электродвигателей переменного тока.

Для исследования динамики, выбора параметров и элементов силового модуля электропривода подачи трубы предлагается использовать частотный метод. Применительно к данной системе, сохраняя научную

строгость подхода, он оказываются весьма практичным и наглядным в своей простоте переходов к параметрам силового оборудования.

С помощью частотного анализа также выполняется декомпозиция и редуцирование математической модели силового модуля электропривода. Метод декомпозиции предусматривает следующие операции:

- а) получение математического описания системы в виде структурной схемы, состоящей из звеньев не выше первого порядка;
- б) нормирование структурной схемы;
- в) анализ влияния отдельных звеньев, контуров и связей на систему по частотным характеристикам.

**В третьей главе** решается задача увеличения точности и быстродействия электропривода подачи трубы.

Одним из самых важных требований, предъявляемых к электроприводам подачи трубы станков ХПТ, является стабильность величины подачи. Разброс величины подачи зависит от внешних возмущающих воздействий. Анализ возмущающих воздействий выявил влияние явления срыва трубы с оправки на точность по-

дачи. На основе математической модели кинематической передачи (1) предложены две модели процесса срыва трубы с оправки, дающие количественную связь между величиной разброса подачи и параметрами механизма. Процесс срыва трубы с оправки носит ударный характер, и ограниченность исходных данных не позволяет получить полное математическое описание данного явления. В зависимости от учета потерь энергии в механической системе срыв с оправки можно рассматривать в виде упругого и неупругого соударения эквивалентной поступательной массы электропривода и трубы.

Величина неконтролируемого перемещения трубы  $s$  при срыве с оправки для модели абсолютно упругого удара равна

$$s = \frac{F_{срыва}^2}{2F_{сопр}m_T},$$

а для модели абсолютно неупругого удара

$$s = \frac{F_{срыва}^2}{2F_{сопр}(m_{II} + m_T)}. \quad (2)$$

Здесь  $F_{срыва}$  – сила срыва трубы с оправки;  $F_{сопр}$  – сила сопротивления поступательному движению;  $m_T$  – масса трубы;  $m_{II}$  – эквивалентная поступательная масса электропривода, определяемая выражением

$$m_{II} = \frac{\mu J_{КП}}{i_{КП}^2}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – КПД винтовой передачи,  $J_{КП}$  – момент инерции вращающихся частей;  $i_{ВП}^2$  – передаточное число винтовой передачи.

Выбор модели осуществляется сравнением расчетной величины свободного перемещения трубы после срыва с оправки и реальной величины, полученной в ходе эксперимента.

Задача увеличения быстродействия является многофакторной: оптимизация производится при равенстве вкладов различных факторов (габариты, мощность, передаточное число редуктора, вид диаграммы скорости и момента, значения максимальной скорости и ускорения). Сложность этой проблемы заключается в том, что максимальный эффект получается при одновременном изменении многих параметров с учетом накладываемых ограничений, что приводит к вариационной постановке задачи. Решение такой задачи аналитическими способами невозможно, поэтому для ее решения предложен метод анализа экспериментальных осциллограмм скорости и тока якоря.

Осциллограммы можно разбить на семь участков (рис. 5). На каждом участке можно выделить факторы, оказывающие наибольшее влияние на длительность этого участка.

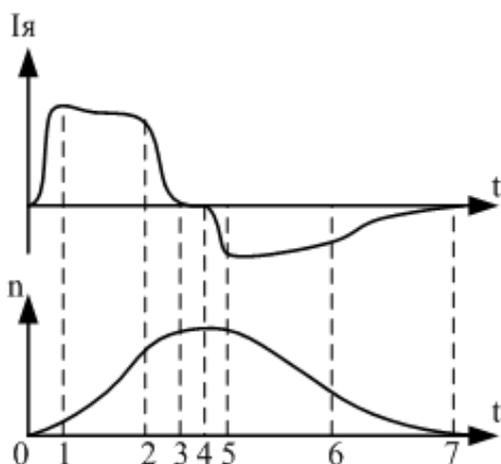


Рис. 5. Осциллограммы переходных процессов в позиционном электроприводе

дает до нуля, так как двигатель разогнался до полной скорости. Темп спадания тока якоря определяется быстродействием контура регулирования скорости, который изменяется настройкой регулятора скорости. Отрезок времени 4...6 формируется изменением величины задания на входе регулятора скорости, поэтому время нарастания тока на отрезке времени 4...5 определяется быстродействием контура регулирования скорости. Наконец, спадание тока якоря до нуля в конце переходного процесса (участок 6...7) определяется быстродействием контура регулирования положения.

Применение метода анализа экспериментальных осциллограмм позволяет дать ответ на вопрос о том, какие факторы оказывают наибольшее воздействие на быстродействие электропривода подачи станов ХПТ, и указывает возможные пути увеличения быстродействия.

**В четвертой главе** для проверки выдвинутых гипотез и получения практических рекомендаций по усовершенствованию электропривода подачи трубы проведено экспериментальное исследование на стане ХПТ-450.

Предложена математическая модель силового модуля электропривода подачи стана ХПТ-450, определены параметры модели. К модели применен метод частотного анализа, который показал незначительность влияния процессов упругой деформации трубы на работу системы. Математическая модель упрощена за счет замены упругости трубы элементом с бесконечно большой жесткостью. Исходная структура модели представляла собой трехмассовую колебательную систему, состоящую из сосредоточенных масс двигателя, винта и трубы и упругостей винта и трубы (рис. 6а). Конечная рекомендуемая структура представляет собой двухмассовую колебательную систему, состоящую из сосредоточенной массы двигателя и объединенной массы винтов и трубы и упругости винта (см. рис. 6б).

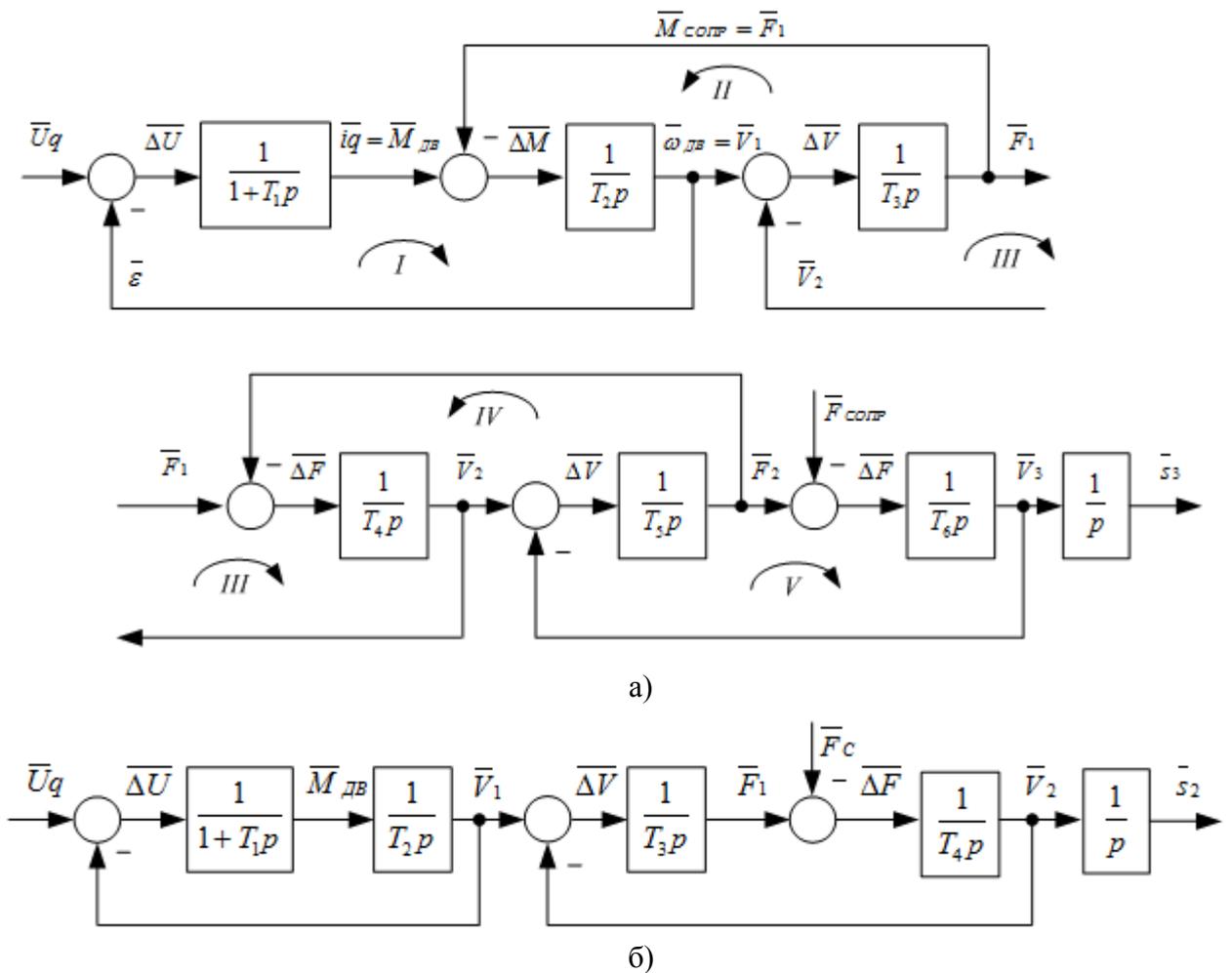


Рис. 6. Структурная схема математической модели механизма подачи: а) исходная; б) после применения метода декомпозиции

Частотный анализ позволил сформулировать требования к наиболее важным параметрам силового механо- и электрооборудования. Конкретно для электропривода подачи стана ХПТ-450 рекомендовано применение асинхронных двигателей с улучшенными динамическими характеристиками серии RA. Показано, что выбором типа двигателя даже в рамках серийных электрических машин можно увеличить быстродействие системы на 40%.

Проведено экспериментальное исследование частотных характеристик преобразователя частоты на лабораторном оборудовании. Эксперимент показал, что цифровая система управления преобразователя вносит существенную фазовую задержку и не позволяет создать замкнутый контур регулирования тока с высоким быстродействием (рис. 7). Это усложняет проблему с задержкой на переключение вентильных групп и не дает линеаризовать статическую характеристику преобразователя

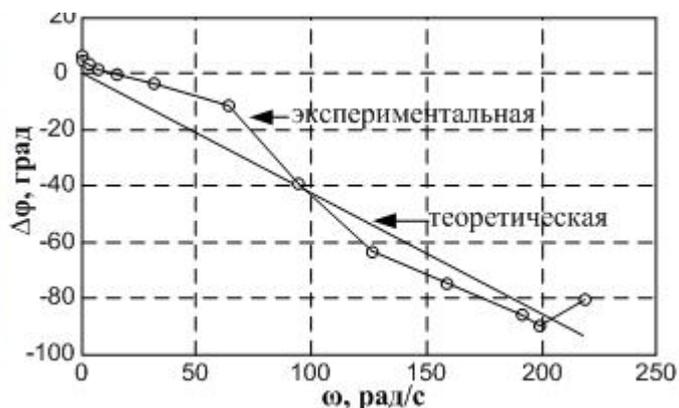
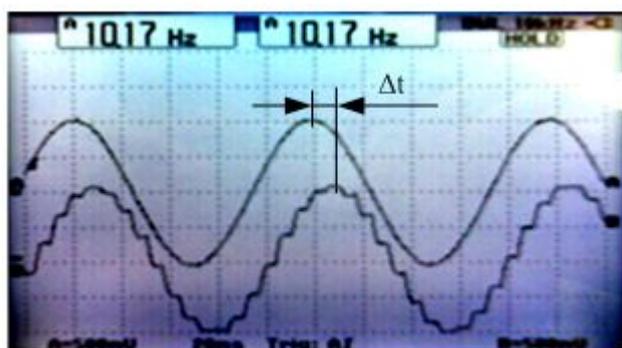


Рис. 7. Влияние дискретности процессов управления:

а) возникновение фазовой задержки; б) ФЧХ привода Mentor 2 ф. Control Techniques (теоретическая и экспериментальная)

Преобразователь частоты с непосредственной связью не удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к электроприводу подачи станов ХПТ, но промышленно-выпускаемых преобразователей частоты с требуемыми техническими характеристиками не существует, поэтому требуется разработка и изготовление преобразователя по индивидуальному заказу.

Экспериментальное исследование на стане ХПТ-450 показало, что модель срыва трубы с оправки в виде неупругого удара более правдоподобна. Значение усилия срыва трубы с оправки уточнено по экспериментальным данным. Анализ выражений (2) и (3) модели процесса показал, что для снижения разброса величины подачи трубы желательно уменьшение передаточного числа редуктора. Уменьшение шага винта с 72 до 47 мм дает уменьшение разброса подачи трубы в два раза.

Анализ осциллограмм, полученных во время экспериментального исследования механизма подачи стана ХПТ-450, показал, что длительность участков соизмерима между собой, но наибольшей длительностью обладают участки достижения максимального тока 0-1 и движения с постоянным ускорением 1-2 (рис. 8). Следовательно, для увеличения быстродействия электропривода необходимо увеличение быстродействия контура регулирования тока и уменьшение максимальной скорости электродвигателя за счет перехода от треугольной диаграммы скорости к трапецевидной.

Возможности по увеличению быстродействия контура регулирования тока ограничены преобразователем частоты. Поэтому для увеличения быстродействия предложено изменение параметров диаграммы скорости электропривода.

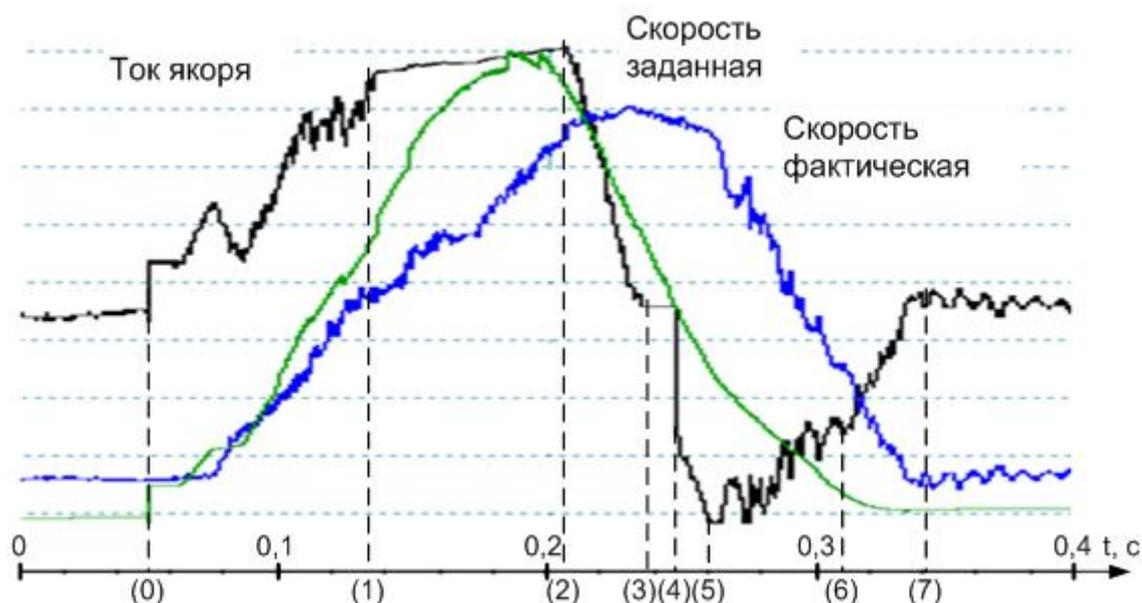


Рис. 8. Осциллограммы тока якоря и скорости двигателя электропривода подачи трубы стана ХПТ-450

Получена математическая зависимость, связывающая время позиционирования  $t_{\Pi}$  с выбором максимальной скорости  $n_{\max}$  и ускорения  $\varepsilon_{\max}$  при трапецевидной форме траектории скорости

$$t_{\Pi}(n_{\max}, \varepsilon_H) = \frac{s}{n_{\max}} + \frac{n_{\max}}{\varepsilon_H}. \quad (4)$$

Исследование зависимости (4) показало возможность снижения максимальной скорости на 40%, что дает существенный выигрыш в габарите электродвигателя, при этом время позиционирования увеличивается не более чем на 10% (рис. 9). Изменение максимального ускорения в пределах 10% процентов приводит к изменению времени позиционирования на более чем на 5%. Реальные возможности по уменьшению времени регулирования ограничены предельными динамическими усилиями в механизме.

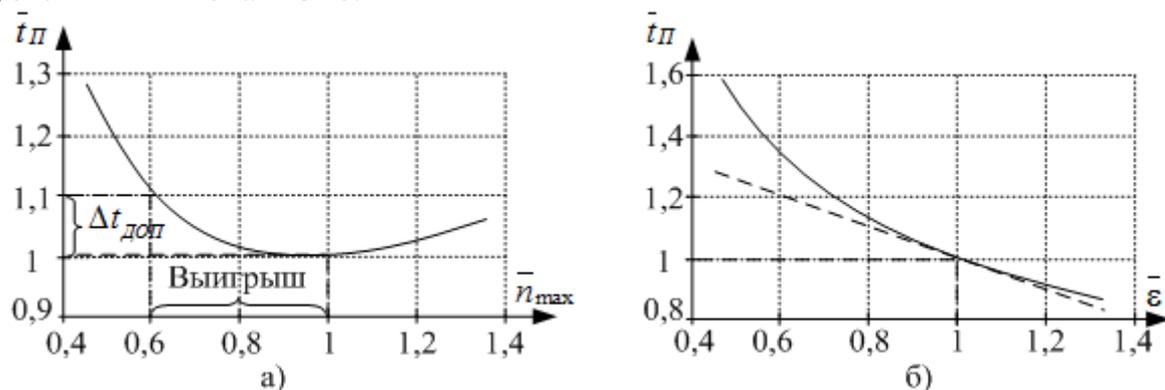


Рис. 9. Зависимость времени позиционирования: а) от максимальной скорости; б) от максимального ускорения

С целью проверки правильности выбора структуры и параметров системы регулирования проведено компьютерное моделирование всей системы. Результаты моделирования совпадают с экспериментальными данными, полученными на ста-

не ХПТ-450, что подтверждает адекватность предложенных математических моделей, а также выводов, сделанных на их основе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – увеличение производительности, надежности и качества продукции станов холодной прокатки за счет усовершенствования электропривода подачи трубы, обеспечивающего максимальное быстродействие и точность подачи. Выполненные исследования позволяют отметить следующие основные результаты и сделать выводы:

1. На основе анализа динамических характеристик различных типов приводов для реализации механизма подачи рекомендован синхронный электропривод с векторным методом управления. Сформулированы требования к качеству процессов управления в электроприводе подачи.

2. Для выбора элементов и параметров электропривода предложена математическая модель кинематической передачи механизма подачи, учитывающая податливость винтов и трубы, и модель преобразователя частоты, учитывающая задержку на переключение вентиляльных групп.

3. Для исследования динамики, выбора параметров и элементов силового модуля электропривода подачи трубы предлагается использовать метод частотного анализа. Применительно к данной системе, сохраняя научную строгость подхода, он оказываются весьма практичным и наглядным в своей простоте переходов к параметрам силового оборудования.

4. Для увеличения быстродействия электропривода подачи трубы предложен метод анализа экспериментальных осциллограмм скорости и тока якоря. Этот метод позволяет отказаться от сложного математического анализа и разбивает задачу многофакторной оптимизации на несколько однофакторных.

5. Для увеличения точности подачи трубы проведен анализ возмущающих воздействий электропривода. Анализ показал, что явление срыва трубы с оправки приводит к увеличению разброса величины подачи. Предложены модели процесса срыва трубы с оправки, дающие количественную связь между величиной разброса подачи и параметрами механизма.

6. Для проверки выдвинутых гипотез и получения практических рекомендаций по усовершенствованию электропривода подачи трубы проведено экспериментальное исследование на стане ХПТ-450. На основе предложенной математической модели силового модуля получена модель электропривода подачи стана ХПТ-450. Частотный анализ позволил редуцировать математическую модель системы и сформулировать требования к наиболее важным параметрам силового механо- и электрооборудования. Конкретно для электропривода подачи стана ХПТ-450 рекомендовано применение асинхронных двигателей с улучшенными динамическими характеристиками серии RA, применение которых позволит увеличить производительность стана ХПТ-450 на 40%.

7. Экспериментальное исследование преобразователя частоты показало, что преобразователь частоты с непосредственной связью не удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к электроприводу подачи, но промышленно-выпускаемых преобразователей частоты с требуемыми техническими характеристиками не существует, поэтому требуется разработка и изготовление преобразователя по индивидуальному заказу.

8. Модель срыва трубы с оправки и величина усилия срыва уточнены по экспериментальным данным. Анализ модели показал, что для снижения разброса величины подачи трубы желательным является уменьшение передаточного числа редуктора. Уменьшение шага винта с 72 до 47 мм дает уменьшение разброса подачи трубы в два раза.

9. Применение метода анализа экспериментальных осциллограмм выявило существенную зависимость времени позиционирования от выбора максимальной скорости и ускорения. Исследование этой зависимости показало возможность снижения максимальной скорости на 40%, что дает существенный выигрыш в габарите электродвигателя.

Представленные результаты приняты к использованию при модернизации существующих станков ХПТ, а также при разработке новых.

Работа проводилась в рамках реализации Федеральной целевой программы «Энергоэффективные электроприводы нового поколения для объектов с тяжелыми условиями эксплуатации (электроприводы нефтегазового комплекса, тяговые электроприводы)» ФЦП Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (г.к. № 14.740.11.1100).

Работа поддержана грантом по программе развития научного творчества молодёжи в вузах Челябинской области, осуществляемой Министерством образования РФ и Администрацией Челябинской области.

### **Научные публикации по теме диссертации**

*Статьи, входящие в издания, рекомендованные ВАК*

1. Остроухов, В.В. Математическая модель силового модуля системы перемещения оправки стана ХПТ-450П2 / В.В. Остроухов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 5. – №7(79). – С. 34–40.

2. Усынин, Ю.С. Декомпозиция электромеханической системы механизма подачи трубы стана ХПТ-450 / Ю.С. Усынин, В.В. Остроухов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 11. – №2(178). – С. 41–45.

3. Усынин, Ю.С. Применение индивидуального электропривода в механизмах подачи станков холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, В.В. Остроухов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – СПб.: Издательство политехнического университета, 2010. 4(110). – С. 96–100.

*Статьи и труды научных конференций*

4. Остроухов, В.В. Влияние инерционности преобразователя частоты на качество процессов в электроприводе подачи стана холодной прокатки труб / В.В.

Остроухов // Наука и инновации в технических университетах: материалы Четвертого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 10–11.

5. Usynin, Y. Electric drive of a tube feed mechanism for a cold rolling mill / Y.Usynin, V. Ostroukhov // Proceedings of the XIII-th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components (ICEEE-2010). – М.: Electrical Engineering Institute of MPEI(TU), 2010 – P. 102.

6. Остроухов, В.В. Математическая модель неизменяемой части электропривода механизма подачи трубы стана ХПТ-450 / В.В. Остроухов // Наука ЮУрГУ: материалы 61-й науч. конф. Секции техн. наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т. 2. – С. 78–82.

7. Усынин, Ю.С. Оптимизация быстродействия электропривода подачи стана холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, В.В. Остроухов // Наука ЮУрГУ: материалы 62-й науч. конф. Секции техн. наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 2. – С. 205–208.

8. Остроухов, В.В. Электропривод поворотно-подающих механизмов станов холодной прокатки труб / В.В. Остроухов // Научный поиск: материалы первой научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – С.219–223.

9. Остроухов В.В. Параметрическая оптимизация поворотно-подающих механизмов станов холодной прокатки труб / В.В. Остроухов // Научный поиск: материалы второй научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С. 43–47.

10. Остроухов В.В. Исследование электропривода подачи стана холодной прокатки труб как объекта автоматизации / В.В. Остроухов // Научный поиск: материалы третьей научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 136–140.

Остроухов Всеволод Викторович

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДАЧИ  
СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать 20.02.2012. Формат 60×84 1/16. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 33/103.

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.