На правах рукописи

Боровик Александр Александрович

МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированный электропривод» Московского энергетического института (технического университета).

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Ладыгин Анатолий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Онищенко Георгий Борисович

кандидат технических наук, доцент
Платонова Вера Евгеньевна

Ведущая организация: ООО «РУСЭЛПРОМ-Мехатроника»

Защита диссертации состоится «10» июня 2011 г. в 14 час. 00 мин. в аудитории М-611 на заседании диссертационного совета Д212.157.02 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского энергетического института (технического университета).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим отправлять по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д.14, Ученый Совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан «6» мая 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.157.02
кандидат технических наук, доцент Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

На рынке потребления трубной продукции особое место занимают холоднокатаные трубы специального назначения, являющиеся самой точной и высококачественной продукцией трубного производства. Основным способом производства таких труб является прокатка их на станах ХПТ. Основными потребителями подобных труб являются предприятия авиационно-космической и энергетической отраслей промышленности.

На данный момент только отечественный парк станов ХПТ составляет более 300 единиц. Большинство из них морально и физически устарели и не удовлетворяют предъявляемым требованиям по производительности, качеству получаемых труб и экологическим нормам. В связи с этим актуален вопрос об обновлении трубопрокатного парка российских заводов с увеличением производительности трубных цехов и улучшением качества прокатываемых труб.

В 2007 г. по заданию ФГУП «РФТР» ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» приступил к разработке опытных образцов 3 – х типоразмеров станов ХПТ нового поколения. Станы нового поколения должны отличаться повышенной надежностью и производительностью относительно станов предыдущих поколений. Достижение такого результата предполагается осуществить путем реализации на стане ХПТ нового поколения ряда новых решений:

- Переход от группового привода стана к многодвигательному приводу (Рис.1). Многодвигательный привод включает в себя главный привод 7, два привода поворота оправки 1,2, два привода поворота трубы 3,4 и два привода подачи трубы 5,6.
- Осуществление непрерывного процесса прокатки (подача труб в линию прокатки без остановки процесса прокатки).
- Увеличение количества технологических режимов работы стана.
- Бесступенчатое регулирование величин подачи и углов поворота труб в процессе прокатки.

Реализация этих решений требует разработки новой системы электропривода и автоматики.

Цель диссертационной работы - создание теоретической базы для разработки многодвигательного электропривода стана ХПТ нового поколения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:

1. Анализ требований к электроприводам стана ХПТ нового поколения.
2. Создание методик расчета мощностей двигателей приводов, с учетом особенностей их работы.
3. Синтез регуляторов координат электроприводов, обеспечивающих желаемые показатели качества движений подачи и поворота труб.

4. Синтез эффективной структуры системы управления электроприводами для многодвигательного привода.
5. Экспериментальная проверка предлагаемых теоретических решений для многодвигательного электропривода станов ХПТ нового поколения.

Методы исследования.

Для решения поставленных в работе задач использовались методы теории электропривода, математического моделирования, теория механизмов машин (ТММ). Исследования проводились в ходе экспериментов на опытно - промышленном оборудовании, имитационное моделирование проводилось на моделях, реализованных в специализированном пакете SigmaWin фирмы Yaskawa и программных моделях, написанных на языке DELPHI.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами экспериментальных исследований на промышленном оборудовании.

Научная новизна работы.

1. Сформулированы требования к многодвигательному приводу станов ХПТ нового поколения.
2. Предложены методики расчета мощности двигателей главного привода и позиционных приводов стана ХПТ нового поколения с учетом особенностей их работы.
3. Предложена структура управления многодвигательным приводом, обеспечивающая выполнение всего объема технологических функций.

Практическая ценность работы.

1. Результаты работы использованы при создании пяти станов ХПТ нового поколения, находящихся в эксплуатации, и обеспечивающих в 1,5…2 раза большую производительность относительно станов предыдущих поколений.
2. Предложенные теоретические решения актуальны для разработок новых прототипов станов ХПТ.

Апробация работы.

Основные научные результаты диссертации доложены и обсуждены на XIII и XV Международных научно - технических конференциях студентов и аспирантов (Москва, 2007, 2009г.), на конференции «Будущее машиностроения» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009г.), на 14-й научно – технической конференции по проблемам автоматизированного электропривода (г. Тула, ТГУ, 2010г.).

Публикации.

Основное содержание работы опубликовано в 6 печатных трудах, 3 работы опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Получен патент РФ №2352415 на полезное изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Количество страниц – 94, иллюстраций – 29, число наименований использованной литературы – 43.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее научная и практическая значимость. Рассмотрен принцип работы стана холодной прокатки труб, приведены характеристики отдельных механизмов, входящих в состав стана. Проведен обзор существующих аналогов станов различных производителей. Определены недостатки в конструкции стана, препятствующие достижению требуемых результатов. Поставлены цели и задачи исследования.

В первой главе рассматривается главный привод (привод перемещения рабочей клети) стана ХПТ. Проведен анализ кинематической схемы механизма главного привода, выявлены специфические требования к электроприводу. Обоснована целесообразность и возможность применения электропривода переменного тока в главном приводе стана ХПТ нового поколения.

Особенностями кинематической схемы главного привода стана ХПТ являются наличие в ней двух механических звеньев:

а) дезаксиального кривошипно-шатунного механизма (КШМ).

б) клиноременной передачи (КРП).

Звено (а) обладает переменным моментом инерции, а звено (б) – значительным постоянным моментом инерции. Кроме того, спецификой процесса периодической прокатки труб является переменный статический момент прокатки, существенно зависящий от маршрута прокатки (рис.2.). Специфика механизма предопределяет следующие требования к главному приводу стана ХПТ нового поколения:

1. Преодоление статического и динамического моментов нагрузки без перегрева двигателя.
2. Обеспечение заданного скоростного режима работы (до 140 двойных ходов рабочей клети в минуту).
3. Возможность плавного регулирования скорости вращения двигателя главного привода (с дискретностью не более 1 дв.ход/мин.) в диапазоне ~15:1.
4. Обеспечение рационального использования особенностей кинематической схемы привода, при работе со значительными маховыми массами и звеньями кинематической цепи, имеющими переменный момент инерции.
5. Обеспечение степени неравномерности хода (отклонения реальной скорости от заданной) рабочей клети не более 3%.

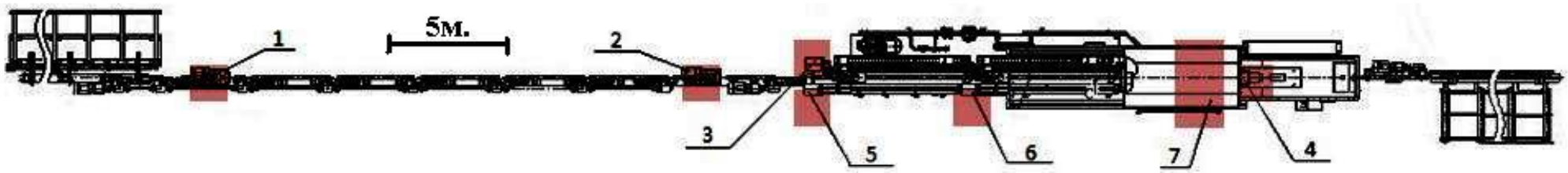


Рис.1. Общий вид стана ХПТ нового поколения

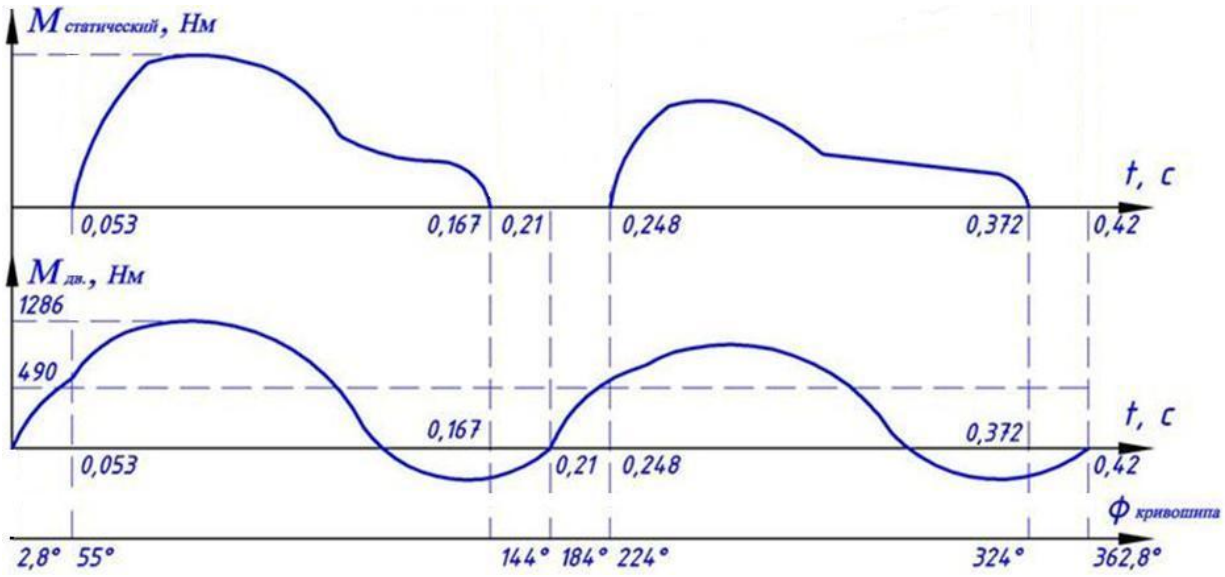


Рис.2 Кривые статического момента и момента на валу двигателя главного привода стана ХПТ 10-45для частоты перемещения клети 140дв.ход/мин.

Первым шагом в реализации предъявляемых требований является выбор структуры силового канала электропривода. Сравнительная оценка систем ТП-Д и ПЧ-АД по основным технико-экономическим характеристикам показала, что наиболее целесообразным видится применение системы ПЧ – АД, для управления главным приводом стана ХПТ.

Однако наличие в цикле работы привода значительной доли генераторного режима вызывает проблемы при работе системы ПЧ – АД. Стандартные ПЧ оснащены неуправляемыми выпрямителями, не позволяющими отдавать энергию рекуперации в сеть. Установка тормозных резисторов для гашения энергии генераторного торможения, не решает проблемы, т.к при высокой скорости движения рабочей клети частота перехода двигателя в генераторный режим очень высока, и в этой ситуации неизбежно возникают лишние потери энергии. Применение же специального ПЧ, с возможностью рекуперации энергии является очень дорогим решением.

Для решения этой проблемы рекомендуется использовать одну из особенностей кинематической схемы механизма, а именно наличие в главном приводе значительного момента инерции (от шкивов КРП). Использование кинетической энергии, запасенной в маховых массах, возможно при снижении жесткости механической характеристики (МХ) приводного двигателя. В качестве самого доступного способа получения требуемой величины жесткости МХ предлагается снижение напряжения, подаваемого на статор двигателя. Увеличение скольжения достигается формированием необходимого соотношения $\frac{U}{f}$, в скалярном режиме управления ПЧ. Уровень снижения жесткости МХ двигателя, требуемая для него величина напряжения и мощность двигателя главного привода определяются в разработанной методике.

Методика расчета мощности двигателя главного привода учитывает характер работы привода с КШМ, характер нагрузки, носящий переменный характер и изменение жесткости МХ приводного двигателя, как средство оптимизации работы привода. Методика состоит из следующих этапов:

1. Определение базовых параметров КШМ
2. Расчет момента инерции механизма, приведенного к валу кривошипа.
3. Расчет динамического, полного и среднеквадратичного моментов на валу кривошипа.
4. Выбор двигателя 1-го приближения по значениям максимальной мощности и максимальной скорости двигателя.
5. Расчет потребляемой двигателем мощности при различных значениях жесткости МХ двигателя.
6. Выбор двигателя 2-го приближения по критерию минимума потребляемой мощности

7. Проверка выбранного двигателя по нагреву и степени неравномерности хода при различных значениях напряжения, подаваемого на статор двигателя. Определение оптимального значения напряжения статора двигателя.

В методике предлагается осуществить совмещение известных методов расчета в приложении их к дезаксиальному КШМ с переменной статической нагрузкой. Также в методике рассматривается вопрос, связанный с изменением жесткости МХ приводного двигателя, и влиянием её на потребную мощность двигателя. Система уравнений (1) описывает зависимости динамического момента $M_{\text{ин.пр}}(\varphi)$ и момента инерции $J_{\text{пр}}(\varphi)$ от угла поворота кривошипа при абсолютной жесткости МХ приводного двигателя. Расчет статического момента прокатки для валков с переменным профилем ручья и периодической подачей заготовки представляет собой сложную инженерную задачу, решение которой рекомендуется проводить по методике, предложенной Шевакиным Ю.Ф. Полученные от технологов данные $M_{\text{ст}}(\varphi)$, рассчитанные по этой методике используются в методике расчета мощности двигателя главного привода. Таким образом, определяется зависимость полного момента от угла поворота кривошипа при условии постоянства скорости кривошипа $M_{\Sigma.пр} = M_{ин.пр}(\varphi) + M_{ст.пр}(\varphi)$.

$$\begin{cases} J_{пр}(\varphi) = R^2 \times \left[\left(m_\Sigma + \dfrac{A^2}{L_ш^2} \times m_ш \right) \times Б^2 + m_ш \times \left(\dfrac{b}{A} \times \cos\varphi + \dfrac{R \times \sin\varphi - e}{L_ш} \times Б \right)^2 + m_ш \times \dfrac{b^2}{A^2} \times \cos^2\varphi \right] + J_A \\ A = \sqrt{L_ш^2 - (R \times \sin\varphi - e)^2} \\ Б = \sin\varphi + \dfrac{R \times \sin\varphi - e}{A} \times \cos\varphi \\ M_{полн.пр} = M_{ст.пр} + M_{ин.пр} \\ M_{ин.пр} = \dfrac{\omega^2}{2} \times \dfrac{dJ_{пр}(\varphi)}{d\varphi} \end{cases} \qquad (1)$$

где: $M_{\text{ст.пр}}$, $M_{\text{ин.пр}}$ - статический и инерционный моменты привода, $J_{\text{пр}}$ - момент инерции механизма, $J_{\text{А}}$ - постоянный момент инерции механизма, ω – частота вращения кривошипа, $M_н$, $S_н$, ω_0 - номинальные данные двигателя, $\omega_{\text{дв}}$- реальная частота вращения двигателя, $L_ш$, R, e- параметры КШМ, $m_ш, m_\Sigma$ - массы шатунов и клети с валками.

Мощность двигателя 1-го приближения определяется как произведение среднеквадратичного полного момента на валу кривошипа и скорости кривошипа $N_{дв.\max} = M_{полн.ср} \times \omega_{крив}$. Предусматривается работа двигателя на максимальной скорости во 2-й зоне.

Уравнение движения с учетом жесткости МХ приводного двигателя, с учетом конечной жесткости его МХ имеет вид (2):

$$\begin{cases} \dfrac{d\omega}{d\varphi} = \dfrac{1}{J_{пр} \times \omega} \times \left(\dfrac{U_{\Sigma}^2 \times M_н}{\omega_0 - \omega_н} \times \left(\dfrac{\omega_0}{U_{\Sigma}} - \omega \right) - M_{ст.пр} - \dfrac{\omega^2}{2} \times \dfrac{dJ_{пр}}{d\varphi} \right) \\ M_{дв} = M_н \dfrac{S}{S_н} = \dfrac{M_н \times (\omega_0 - \omega_{дв})}{S_н \times \omega_0} \end{cases} \quad (2)$$

Решением уравнения являются зависимости $M_{дв}(\varphi)$ и $\omega_{дв}(\varphi)$. Расчет производится для нескольких значений скольжения. Эти зависимости позволяют определять среднеквадратичные значения момента и скорости двигателя на цикле перемещения клети, и, затем, определять оптимальные значения скольжения и мощности двигателя по критерию минимума его мощности. Определенное значение мощности используется как 2-е приближение к искомому конечному значению.

Поскольку средством снижения жесткости МХ является снижение напряжения, то далее необходимо определить его оптимальный уровень. Для этого производится расчет кривых $M_{дв}(\varphi)$ и $\omega_{дв}(\varphi)$ по формулам (3), с данными двигателя 2-го приближения при различных значениях напряжения.

$$\begin{cases} J_{пр}(\varphi) \times \dfrac{d\omega}{dt} + \dfrac{1}{2} \times \dfrac{dJ_{пр}(\varphi)}{d\varphi} \times \omega^2 = M_{дв.пр} - M_{ст.пр} \\ M_{дв} = \dfrac{2 \cdot M_к}{\dfrac{S}{S_к} + \dfrac{S_к}{S}}; \\ M_к = \dfrac{3 \cdot m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (\sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1)}; \\ S_k = \dfrac{S_н \cdot (\lambda_м + \sqrt{\lambda_м^2 + 2 \cdot S_н \cdot (\lambda_м - 1) - 1})}{1 - 2 \cdot S_н \cdot (\lambda_м - 1)}; \end{cases} \quad (3)$$

По полученным графикам выбирается оптимальный уровень снижения напряжения, при этом критериями выбора являются следующие параметры:

- Заданная средняя скорость двигателя
- Заданная степень неравномерности хода двигателя
- Допустимая величина среднеквадратичного момента на валу двигателя. Полученная величина сравнивается с длительно допустимым моментом на валу двигателя при рабочей частоте напряжения, подаваемого на статор двигателя.

Таким образом, выбирается мощность двигателя, и уровень снижения напряжения, при котором выбранный двигатель имеет наименьшую установленную мощность и удовлетворительные показатели по вышеприведенным критериям.

Предложенная методика использована при создании программы для расчета мощности двигателя главного привода, используемой во ВНИИМЕТМАШ.

Во второй главе рассмотрены теоретические вопросы разработки позиционных приводов стана ХПТ. Предложена методика расчета

мощностей двигателей позиционных приводов, с учетом особенностей их работы. Обоснована необходимость учета потерь в механических передачах, от динамического момента привода. Приведены результаты моделирования синтезированного привода.

В стане ХПТ нового поколения для осуществления движений подачи трубы и поворота трубы и оправки используется многодвигательный привод с электрической синхронизацией движений отдельных механизмов. Многодвигательный привод состоит из 6 индивидуальных приводов:

- 2 привода подачи трубы
- 2 привода поворота оправки
- 2 привода поворота трубы

Исходя из требований технологического процесса, были сформулированы следующие требования к позиционным электроприводам стана ХПТ нового поколения:

1. Число включений приводов - до17000 вкл./час.
2. Время отработки заданного перемещения – не более 0,1 с.
3. Регулирование заданной величины подачи должно осуществляться в пределах 0…10 мм. с шагом 0,1 мм. Регулирование заданного угла поворота трубы должно осуществляться в пределах 0…90° с шагом 1°.
4. Статическая ошибка регулирования величин подачи и угла поворота – не более 5%.
5. Приводы должны обеспечивать возможность прокатки трубы в 4 – х технологических режимах работы.
6. Для приводов должна быть обеспечена высокая степень повторяемости результатов. Отличия в величинах подачи и угла поворота для каждого двойного хода рабочей клети не должны отличаться более чем на 5%.
7. Работа приводов поворота трубы и оправки должна быть синхронизирована. Статическая ошибка по углу поворота для всех приводов поворота трубы не должна превышать 5%.

Требованиями 1 и 2 определяются высокие требования к динамическим показателям приводов. Сравнительная оценка известных систем электропривода по основным технико-экономическим характеристикам показала, что наиболее целесообразным видится применение системы преобразователь частоты – синхронный двигатель с постоянными магнитами на роторе (ПЧ-СДПМ).

Далее необходимо определится с мощностями используемых двигателей. Выбор мощности двигателей для таких приводов представляет собой непростую задачу, т.к. статический момент варьируется в широких пределах в зависимости от маршрута прокатки, длины трубы, температуры и качества смазки, качества изготовления оправки и т.д.. Кроме того, высокие требуемые динамические показатели (т.е. высокие ускорения и динамический момент) и высокая частота включений приводов также осложняет выбор двигателей.

Для расчета требуемой мощности каждого из двигателей предлагается методика, состоящая из следующих этапов:

1. Приведение к валу двигателя моментов инерции механизма и статического момента.
2. Приведение к валу двигателя заданного перемещения механизма подачи или поворота трубы.
3. Предварительный выбор двигателя
4. Проверка двигателя по динамическим показателям и нагреву.
5. В случае несоответствия двигателя предъявляемым требованиям - повторный выбор двигателя и повторный расчет.

Исходными данными для расчета служат следующие величины:

- M_c - максимальный момент нагрузки на валу механизма [$Н \cdot м$].
- $J_{\Sigma мех}$ - суммарный момент инерции механизмов, приведенный к выходному валу редуктора [$кг \cdot м^2$].
- $\varphi_{\max}$, $S_{\max}$ - максимальное угловое или линейное перемещение, которое необходимо отработать приводу за 1 цикл работы;
- $t_{\max}$ - максимально допустимое время отработки перемещения (с).
- i - передаточное число от вала двигателя к валу механизма.
- η - коэффициент полезного действия (КПД) редуктора.

В своей базовой части методика представляет собой комбинацию известных формул из теории электропривода. Отличительной особенностью методики является учет потерь в редукторах от передаваемого динамического момента. Работа привода в повторно–кратковременном режиме предполагает работу двигателя в переходных режимах и отсутствие времени работы в установившемся режиме. Анализ работы станов ХПТ показывает, что статический момент нагрузки не превышает 40%, а динамический момент, необходимый для обеспечения высоких динамических показателей привода, может достигать значений 220…250% от номинального момента выбираемых двигателей. В классической теории электропривода, при расчете необходимого динамического момента учитываются только статический момент сопротивления и моменты инерции механизмов. Однако, если статический момент сопротивления очень мал, и время переходного процесса составляет доли секунды, то без учета потерь в механических передачах от динамического момента можно существенно ошибиться в выборе двигателя. Оценку потерь в механических передачах от динамического момента можно произвести с помощью КПД. Но КПД передачи величина переменная, и зависит от частоты вращения её элементов и нагрузки на них. При учете потерь целесообразнее пользоваться не КПД, а потерями мощности ΔP в редукторе [2]. В таком случае, уравнения динамического момента для разгона и торможения привода будут иметь вид:

$$M_{дин.раз} = \frac{M_c}{i_{ред}} + \frac{\Delta P}{\omega} + (J_{дв} + \frac{J_{\Sigma мех}}{i_{ред}}) \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

$$M_{дин.торм} = (J_{дв} + \frac{J_{\Sigma мех}}{i_{ред}^2}) \cdot \frac{d\omega}{dt} - \frac{M_c}{i_{ред}} - \frac{\Delta P}{\omega} (H \cdot м)$$

Дальнейший расчет мощности двигателя должен проводиться по классической методике. Проверка двигателя по нагреву осуществляется методом эквивалентного момента. Предложенная методика реализована в программном виде на языке программирования DELPHI.

После определения требуемых величин мощностей двигателей необходимо обеспечить выполнение требований к показателям качества регулирования координат позиционных электроприводов. Для выполнения этих требований рекомендуется классическая трехконтурная структура регулирования координат, имеющая дополнительно каналы предуправления в контурах регулирования скорости и положения (рис.3.).

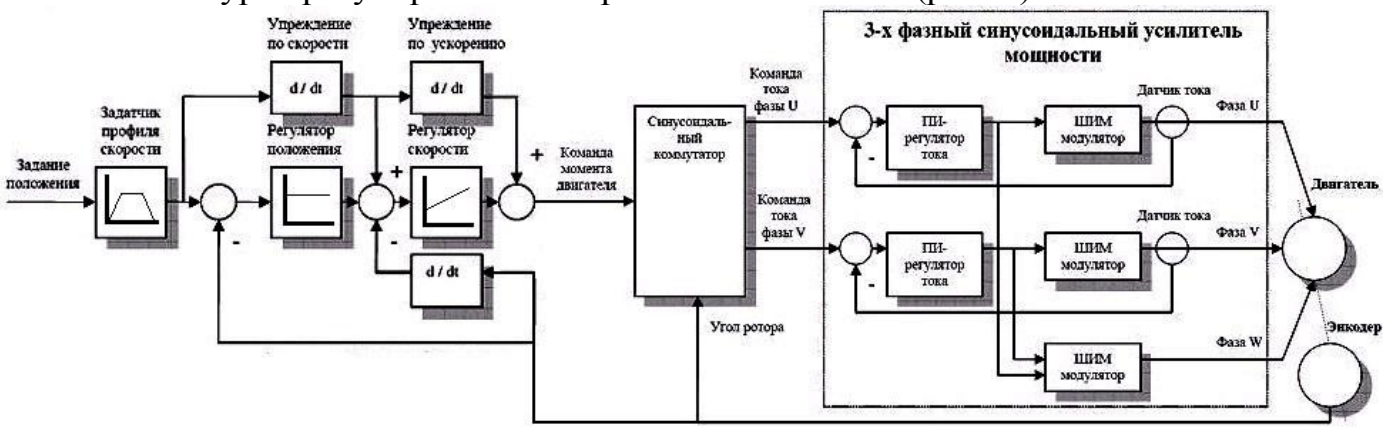


Рис.3. Система управления позиционным приводом

Получение требуемых показателей качества обеспечивается настройкой коэффициентов усиления регуляторов. Для определения их величин предлагается использовать эмпирический метод с применением динамических моделей, которые несложно реализовать в программных пакетах производителей сервоприводов. В качестве примера приводятся результаты такого синтеза электропривода поворота трубы стана ХПТ 10 – 45 в программном пакете SIGMAWin от фирмы Yaskawa. В качестве исходных данных для расчета приняты следующие значения:

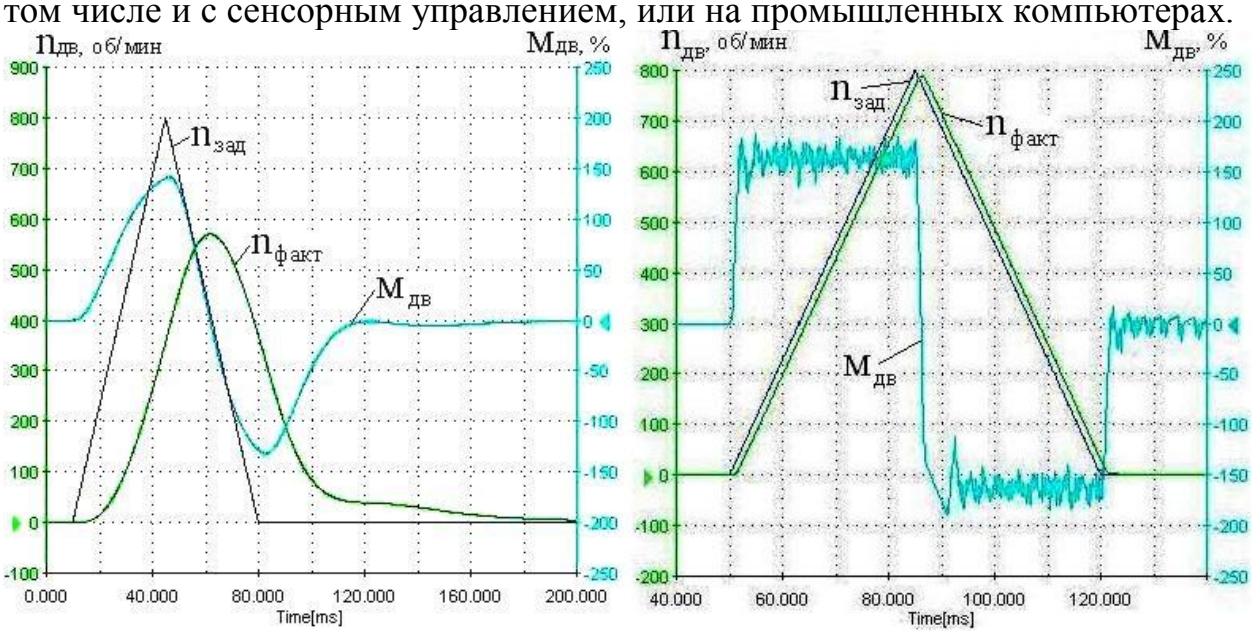
- Мощность двигателя - 11 кВт.
- Угол поворота вала двигателя максимальный - $\varphi_{\max} = 187{,}5^{\circ}$
- Максимальное допустимое время отработки угла поворота – $t_{\max} = 0{,}08$ с.
- Максимальная скорость при работе по симметричной треугольной тахограмме $n_{\max}$ = 782 об/мин.
- Перерегулирование - отсутствует

Результирующие осциллограммы заданной и фактической скорости привода, а также момента на валу двигателя, при отработке заданного перемещения приведены на Рис.4б. Анализ этих осциллограмм показывает, что рекомендуемый метод определения параметров регуляторов позволяет

обеспечивать предъявленные требования (время отработки заданного перемещения без перерегулирования составляет 0,07с.)

В третьей главе рассмотрена структура системы управления многодвигательным приводом стана ХПТ. Обоснована необходимость применения централизованной структуры управления и нескольких промышленных интерфейсов связи.

Система управления стана ХПТ нового поколения должна строиться на принципах, классических для современных системы автоматизации 1-го и 2-го уровней, но с учетом особенностей технологического процесса холодной прокатки труб. Ядро системы, должен представлять собой программируемый логический контроллер (ПЛК). Ввод и отображение информации о ходе технологического процесса должны производиться на панелях оператора, в том числе и с сенсорным управлением, или на промышленных компьютерах.



а) При заводской настройке *б) После синтеза*

Рис. 4 Расчетные осциллограммы работы привода поворота

К системе управления предъявляются требования по реализации следующих основных функций:

1. Общее управление технологическим процессом
2. Управление работой многодвигательного привода с жесткой синхронизацией отдельных движений механизмов стана.
3. Отображение информации о ходе технологического процесса, о состоянии оборудования и сбоях в его работе.

Выполнение 2-го требования возможно только при управлении позиционными приводами в режиме “реального времени”. "Реальное время" при выполнении задач передачи данных означает определенное время с постоянными промежутками, в течение которого система реагирует на внешнее событие. При этом важны не только время цикла, но его стабильность. Аппаратная и программная базы высокоскоростного

интерфейса связи на базе распространенного протокола RTE (RealTimeEthernet) позволяют получить скорость передачи команд до 100Mbps и сократить время цикла приема – передачи данных до 1мс.

При выполнении требований 1 и 3 нет необходимости в высокой скорости передачи данных, но требуется значительный их объем. При наличии значительного объема датчиков целесообразно использование распределенной периферии, со связью между центральным ПЛК и периферией по стандартному полевому протоколу (Profibus, DeviceNet, Modbus и т.д.).

Реализацию всех предъявленных к системе управления требований предлагается осуществить в структуре, приведенной на рис.5. структур.

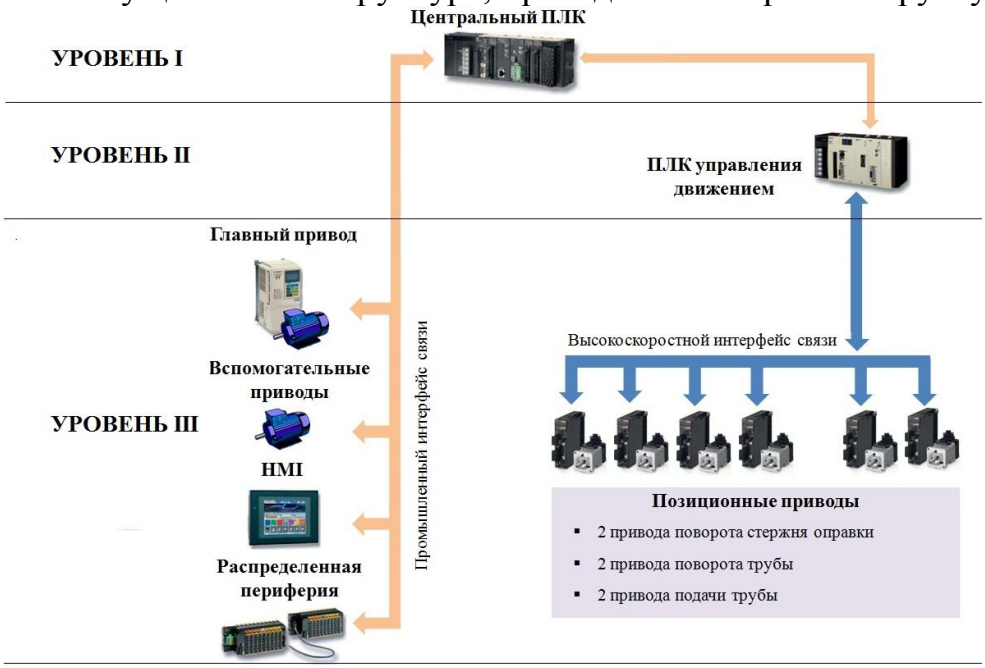


Рис.5 Предлагаемая структура системы управления

Предлагаемая к применению в стане ХПТ нового поколения структура представляет собой централизованную 2-х уровневую структуру, с центральным ПЛК автоматизации и ведомым ПЛК управления позиционными электроприводами.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальной проверки теоретических результатов работы в промышленных условиях. Дана оценка полученных практических результатов.

Экспериментальные исследования проводились на опытно – промышленных образцах станов ХПТ с проверкой правильности выбора двигателя главного привода и решения о снижении напряжения для выравнивания кривой нагрузки на валу двигателя, а также с целью оценки правильности выбора двигателей позиционных приводов и показателей качества регулирования.

По предложенной в главе 2 методике были проведены расчеты по выбору двигателя главного привода. На рис.6 приведена иллюстрация зависимости требуемой мощности двигателя от жесткости МХ привода.

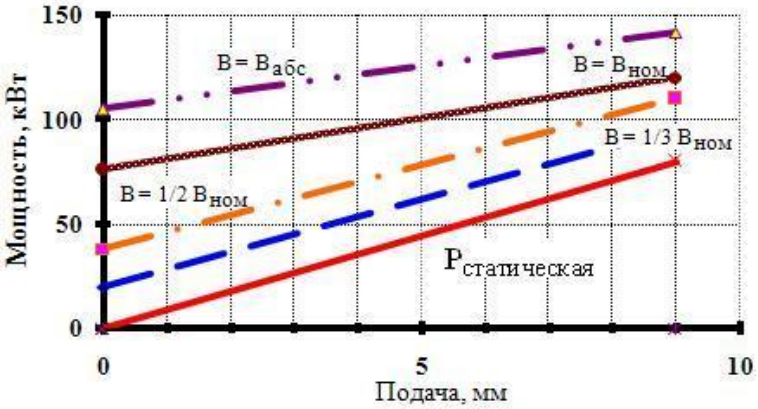
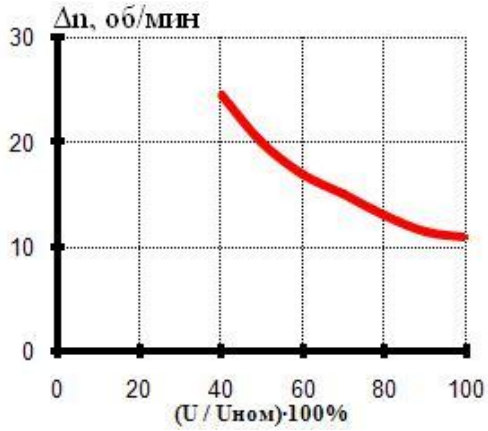
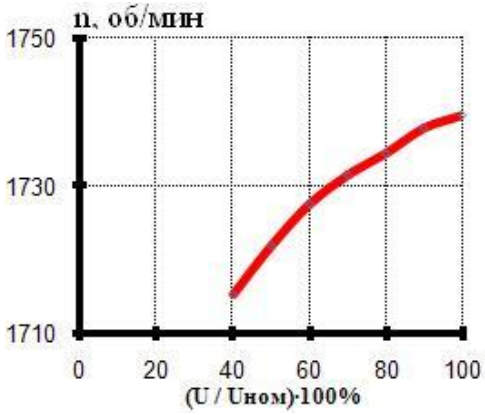


Рис.6. Зависимость полной мощности прокатки от величины подачи для различных значений жесткости (В) механических характеристик главного привода

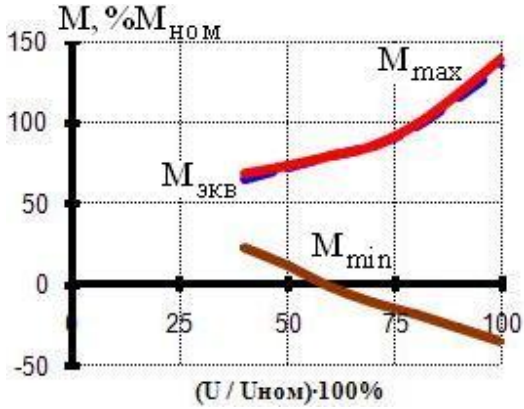
На рис.7 приведены зависимости для основных критериев выбора двигателя при различных величинах снижения напряжения.



а) *Степень неравномерности хода двигателя*



б)*Средняя скорость двигателя*



с) *Момент на валу двигателя*

Рис.7 Кривые критериев выбора оптимального уровня напряжения

В работе рекомендован оптимальный уровень напряжения, принятый равным 50…80% от номинального напряжения. При таком напряжении питания двигателя эффективно используется кинетическая энергия маховых масс, и требуемая мощность двигателя может быть снижена более чем на 30% относительно двигателя с абсолютно жесткой механической характеристикой.

На рис. 8 приведены экспериментальные графики зависимости амплитуд активной мощности на валу двигателя главного привода от частоты перемещения рабочей клети для рекомендованного по результатам расчета уровня снижения напряжения статора до 60% от номинального.

Как можно видеть на графике, генераторный режим работы двигателя не превышает 3% от номинальной мощности, что позволяет говорить об эффективном выравнивании нагрузки на валу двигателя. Максимальное значение потребляемой мощности при прокатке трубы с подачей 30% от максимальной, на максимальной скорости, не превышает 30% от номинальной мощности, что согласуется с расчетными данными (рис.6.). Полученные результаты позволяют сделать заключение о правильности выбора двигателя, и, следовательно, об адекватности предложенной методики.

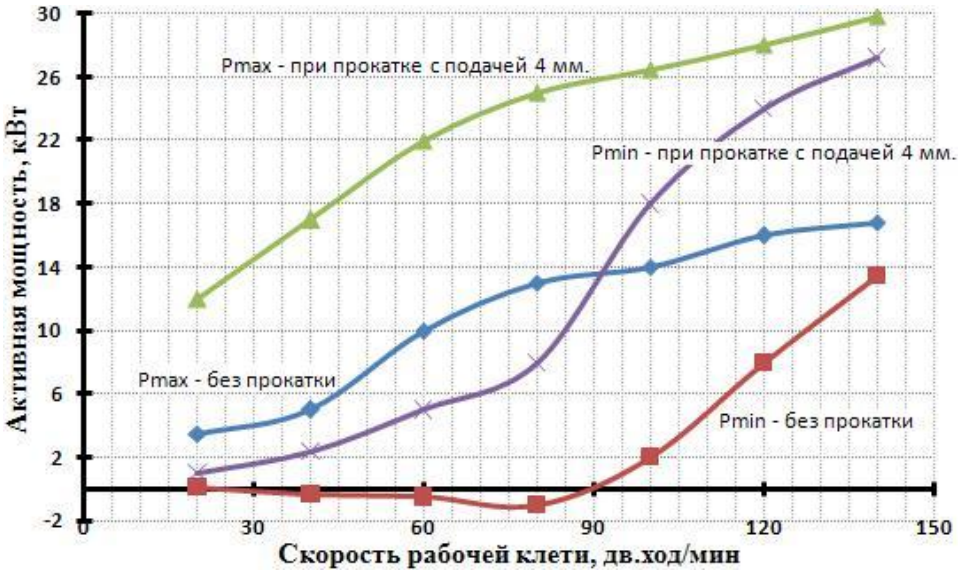


Рис.8 Активная мощность, потребляемая двигателем главного привода

На рис.9 и рис.10 приведены графики переходных процессов для максимального угла поворота трубы и эквивалентного момента для привода поворота трубы. В качестве параметров регуляторов положения и скорости использованы параметры, полученные при применении метода синтеза, рекомендованного в главе 2.

Динамические показатели привода могут быть признаны удовлетворительными. Время отработки заданного максимального перемещения не превышает 70 мс, при максимально допустимом времени 80 мс. Отработка заданных перемещений происходит без перерегулирования,

статическая ошибка отработки перемещения стремится к 0 (за счет применения сочетания ПИ регулятора скорости и П регулятора положения).

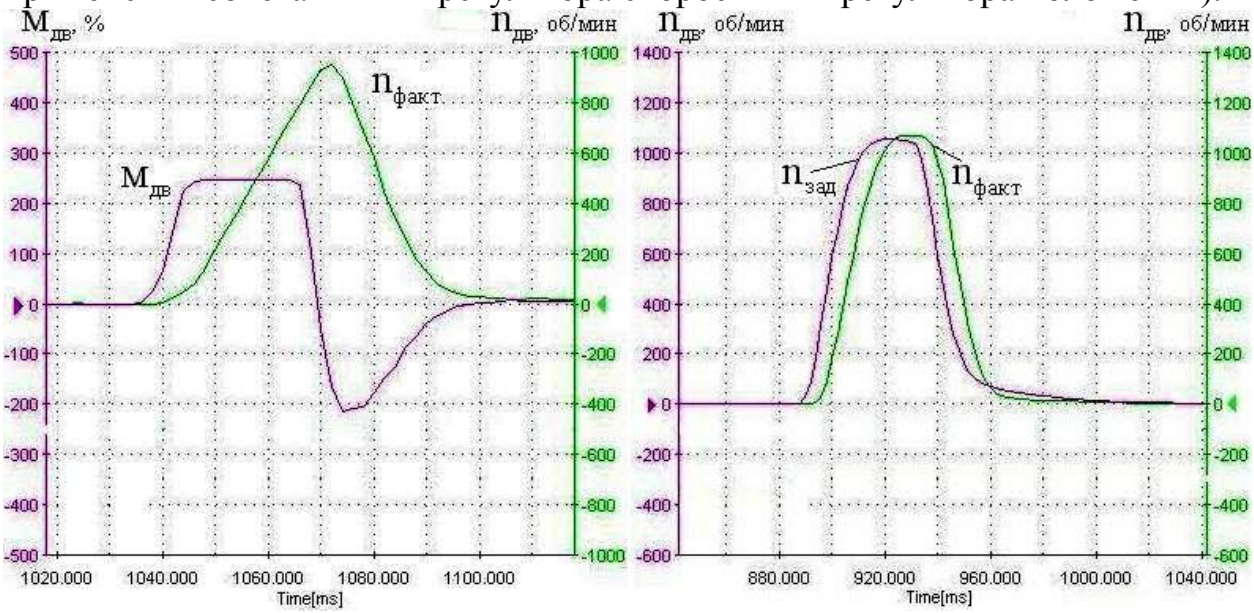


Рис.9 Осциллограммы работы привода поворота

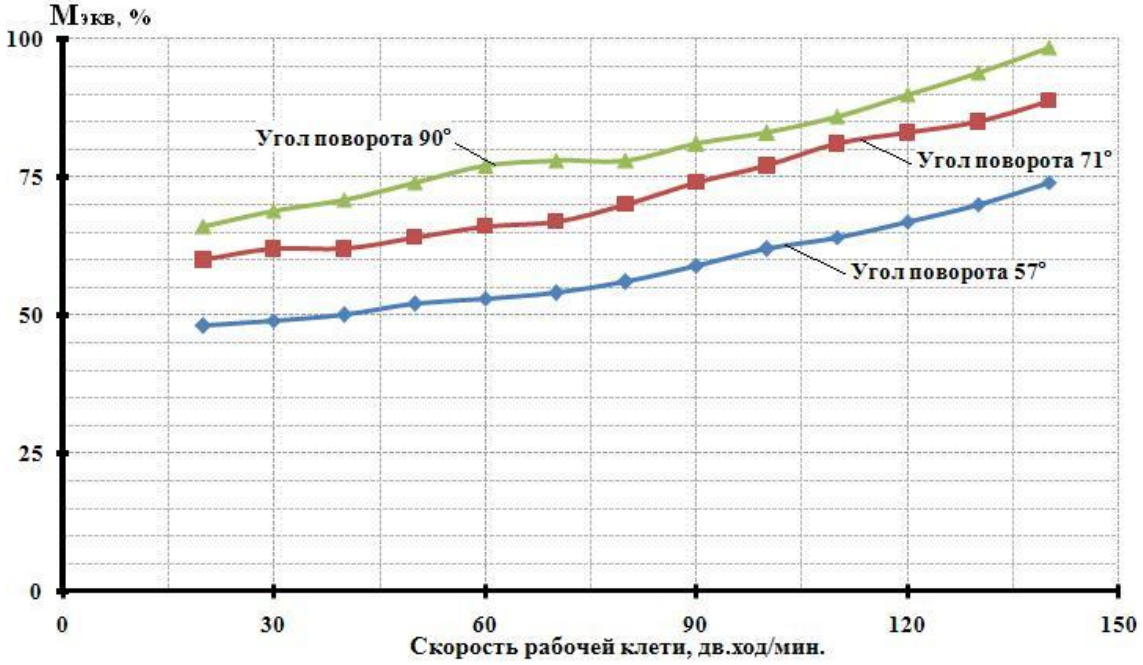


Рис.10 Эквивалентный момент на валу двигателя поворота заготовки при повороте заготовки два раза за цикл

Проверка двигателя привода поворота по “нагреву” методом эквивалентного момента показывает правильность выбора мощности двигателя. Однако для обеспечения нормальной работы привода поворота заготовки (с эквивалентным моментом, не превышающим 90% от номинального момента двигателя) было принято решение ограничить

максимально допустимый угол поворота заготовки при повороте заготовки 2 раза за цикл на скоростях 100…140 дв.ход./мин. величиной 75°.

В заключении приведены выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выработаны требования к многодвигательному приводу для стана ХПТ нового поколения.
2. Разработана методика расчета мощности главного привода станов ХПТ нового поколения, учитывающая влияние жесткости механической характеристики привода на требуемую мощность двигателя. Показано, что при снижении жесткости механической характеристики привода требуемая мощность двигателя может быть снижена более чем на 30% относительно привода с абсолютно жесткой механической характеристикой.
3. Разработана методика расчета мощности позиционных приводов для станов ХПТ нового поколения с уточненным учетом потерь в динамических режимах, доля которых, в общей установленной мощности привода может достигать 20%.
4. Выработаны рекомендации по синтезу и выбору параметров регуляторов координат электроприводов подачи и поворота труб, которые позволили реализовать весь объем требований к динамике позиционных приводов стана.
5. Предложена структура управления многодвигательным приводом, обеспечивающая выполнение всего объема технологических функций.
6. Проведена экспериментальная проверка теоретических результатов.
7. Результаты работы использованы при создании пяти станов ХПТ нового поколения, находящихся в эксплуатации, и обеспечивающих в 1,5…2 раза большую производительность относительно станов предыдущих поколений.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Боровик А.А. Многодвигательный электропривод стана холодной прокатки труб. Журнал «Электротехника». Москва. Изд. ЗАО «Знак».2010г. №3. – С. 20-25.**
2. **Козырев С.К., Боровик А.А. Учет потерь в редукторе при переходных процессах. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч.1. – С. 223-228.**
3. **Боровик А.А. Многодвигательный электропривод стана холодной прокатки труб. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч.2. – С. 243-248.**

4. Козырев С.К., Боровик А.А. Многодвигательный электропривод стана холодной прокатки труб, тезисы доклада. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тринадцатая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. 1-2 марта 2007г.: Тезисы докладов: в 3-х томах. – Москва, издательский дом МЭИ, 2007г. ISBN 978-5-903072-98-9. Том 2, стр.118-119

5. Боровик А.А. Электропривод клети трубопрокатного стана. Электропривод и системы управления //.Труды МЭИ, выпуск 684. – Москва, издательский дом МЭИ, 2009г. ISBN 978-5-383-00358-9. стр.39-50.

6. Козырев С.К., Боровик А.А. Многодвигательный электропривод стана холодной прокатки труб, тезисы доклада. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Пятнадцатая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. : Тезисы докладов: в 3-х томах. – Москва, издательский дом МЭИ, 2009г. ISBN 978-5-383-00346-6. Том 2, стр.118-119

Подписано в печать Зак. Тир. П.л.
Полиграфический центр МЭИ (ТУ)
Красноказарменная ул. Д.13