

На правах рукописи

Козлов Константин Эдуардович

**ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД И СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ
МЕХАНИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ
ЦЕПНЫХ ПЕРЕДАЧ**

05.11.13 - Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Поволжский государственный технологический университет» и федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Егоров Алексей Васильевич

Официальные оппоненты: **Глухов Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, Омский государственный технический университет, заведующий кафедрой «Метрология и приборостроение»

Чухланцева Марина Михайловна, кандидат технических наук, доцент, ФБУ Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний «Томский ЦСМ», директор

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Защита диссертации состоится «17» ноября 2015 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд.215

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «10» сентября 2015 г.

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

Васендина Е.А.

Актуальность рассматриваемой проблемы.

Повышение механического коэффициента полезного действия (КПД) силового привода остается важной задачей на пути улучшения качества и технического уровня механических систем, а, следовательно, повышения конкурентоспособности нашей страны в области машиностроения. Возможность обеспечения высокого механического КПД машин и механизмов и их безотказной работы может быть достигнуто благодаря улучшению качества методов и средств контроля механических потерь в механических передачах, в частности, цепных передачах, широко используемых во многих приводах.

Условия трения и инерционные характеристики цепных передач оказывают влияние на скорость деградиационных процессов, таких как износ и контактная выносливость, которые, в свою очередь, являются критериями их работоспособности, и, как следствие, оказывают значительное влияние на срок службы цепных передач. Поэтому исследования, направленные на разработку методов и средств контроля механического КПД цепных передач, являются актуальными.

Степень разработанности темы.

Исследованиям цепных передач посвящено немало количество работ отечественных и зарубежных ученых. Особое внимание в них уделено вопросам изнашивания и прочности цепей, повышения долговечности и совершенствования технического обслуживания цепных передач, методам контроля их состояния. Наиболее подробно эти вопросы освещены в работах Ю. С. Баршая, Р. Биндера, Н. В. Воробьева, К. П. Жукова, И. И. Ивашкова, А. А. Петрика, Г.К. Рябова и др. Однако в этих работах вопросам контроля механического КПД в цепных передачах уделено недостаточно внимания.

Для целей контроля механического КПД цепных передач наиболее часто применяется тензометрический метод, который требует высокой точности контроля сигнала и тарирования тензодатчиков. При этом контроль крутящего момента производится с низкой частотой регистрации, что обусловлено временем, необходимым для восстановления упругодеформированного состояния тензоэлемента. Кроме того, имеют место сложности, связанные с передачей сигнала от тензоэлемента в измерительную систему, а также дороговизна измерительной аппаратуры.

Другие методы контроля, такие как метод регистрации реактивных моментов на статорах электрических машин и метод свободного выбега, также обладают рядом недостатков, связанных со значительными методическими погрешностями и сложностью измерительного процесса (метод регистрации реактивных моментов), и невозможностью создания номинального усилия в цепи во время исследований (метод свободного выбега).

Таким образом, выявленные недостатки существующих методов контроля механического КПД цепных передач требуют создания новых методов и средств.

Поэтому исследования, направленные на разработку точных, надежных и экономически целесообразных методов и средств контроля механического КПД цепных передач, расширяющие возможности существующих, являются актуальными.

Объект исследования: приводные втулочные и роликовые цепи и цепные передачи.

Предмет исследования: метод контроля механического КПД цепных передач, основанный на разработанном методе определения механического КПД асинхронного цепного электропривода.

Цель диссертационной работы: разработка и практическая реализация динамического метода и средства контроля механического коэффициента полезного действия цепных передач.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих методов и средств контроля механического КПД цепных передач.
2. Разработать метод, методику и средство контроля механического КПД цепных передач.
3. Провести теоретическое исследование степени влияния параметров цепной передачи с приводной втулочной цепью на ее механические потери.
4. Провести экспериментальное обоснование достоверности результатов, получаемых с помощью разработанного динамического метода контроля механического КПД цепных передач.
5. Провести экспериментальные исследования степени влияния параметров цепной передачи с двухрядной приводной втулочной цепью на ее механические потери.

Методы исследования.

Для достижения поставленной цели и реализации основных задач использованы методы математической статистики, планирования экспериментов, тензорезистивный метод измерения крутящего момента на валу асинхронного электродвигателя, метод физического моделирования, методы теоретической механики, динамики вращательного движения, теории двигателей вращательного действия, теории механизмов и машин. Для обработки экспериментальных данных использовались пакеты прикладных программ Microsoft Excel, Solidworks, MATLAB.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных автором, обеспечивается необходимым объемом экспериментальных данных, удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментально полученных результатов исследований, удовлетворительной сходимостью результатов, полученных общеизвестными способами и разработанным, непротиворечивостью исследованиям других авторов, а также использованием экспериментального оборудования, позволяющего с достаточной точностью осуществлять измерения требуемых параметров, обработкой полученных

результатов с применением средств вычислительной техники, программного обеспечения и методов математической статистики.

На защиту выносятся:

1. Метод определения КПД асинхронного цепного электропривода, характеризующего его механические и добавочные потери.
2. Метод и средство контроля механического КПД цепной передачи, основанные на регистрации времени разгона асинхронного цепного электропривода.
3. Регрессионная зависимость механического КПД цепной передачи с двухрядной приводной втулочной цепью от ее параметров.

Научная новизна:

1. Разработан метод определения механического КПД асинхронного цепного электропривода, характеризующего его механические и добавочные потери.
2. Разработаны метод и средство контроля механического КПД цепной передачи, основанные на регистрации времени разгона асинхронного цепного электропривода.
3. Впервые получены регрессионные уравнения, характеризующие изменение механического КПД цепной передачи с двухрядной приводной втулочной цепью при варьировании значений различных ее параметров (межосевое расстояние, плоскопараллельное смещение звездочек, величина стрелы провеса холостой ветви, способ смазки, относительное удлинение шага цепи) в различных скоростных диапазонах.

Практическая значимость работы.

1. Разработанный метод, средство и методика позволяют проводить контроль механического КПД цепной передачи в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов работы с более высокими частотными характеристиками, чем при применении существующих методов.
2. Предложенный метод может стать основой для дальнейших исследований, направленных на уменьшение механических потерь в цепной передаче и улучшение динамических свойств цепей и цепных устройств, как на стадии производства, так и их эксплуатации.
3. Предложенный метод может применяться для контроля факторов, влияющих на механические потери в цепных, зубчатых, червячных и других видах передач.

Реализация результатов работы. Динамический метод и средство контроля механического КПД цепных передач нашел применение в ООО «Поволжский центр неразрушающего контроля», ООО «Институт перспективных технологий», ООО «Интеллектуальные технологии». Теория метода контроля механического КПД цепных передач внедрена в магистерскую программу «Технологии инерционного контроля машин и оборудования нефтегазового и энергомашиностроительного комплексов» по направлению 150402 «Технологические машины и оборудование».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались:

- 1.) на IX международной заочной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2012);
- 2.) на VI международной научно-практической конференции «Техник и технология: новые перспективы развития» - М.: Издательство «Спутник+» (Москва, 2012);
- 3.) на международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу — творчество молодых» (Йошкар-Ола, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них в журналах, рекомендованных ВАК – 3, получен патент №2507492 РФ МПК⁷ G01M1/10 от 20.02.2014 г.

Личный вклад автора. Автором разработан метод контроля механического КПД цепных передач, спроектирован аппаратно-программный комплекс, проведены научные эксперименты, произведена обработка экспериментальных данных, подготовлены основные публикации и получен патент, результаты исследований представлены на всероссийских и международных научных конференциях и внедрены на предприятиях, в том числе неразрушающего контроля.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы из 102 наименований и семи приложений, в том числе четырех актов внедрения. Объем работы 177 страниц, 22 иллюстрации, 38 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и значимость темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи проводимых исследований, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен анализ существующего уровня развития методов и средств контроля механического КПД цепных передач, а также приведено описание основанных на этих методах установок.

До настоящего времени основным способом решения задач повышения эффективности и обеспечения работоспособности цепных передач служил тензометрический метод контроля механических потерь в цепных передачах. Однако этот метод обладает недостатками, связанными со сложностью передачи сигнала от тензоэлемента в измерительную систему, дороговизной необходимого оборудования, необходимостью тарировки измерительных органов, а также погрешностями измерения во время переходных режимов работы, которые связаны со временем, необходимым для восстановления упругодеформированного состояния тензоэлемента.

Метод регистрации реактивных моментов на статорах электрических машин обладает значительными методическими погрешностями и сложностью

измерительного процесса, поэтому в настоящее время практически не используются.

Преимущество метода свободного выбега, основанного на контроле момента инерции цепного электропривода, заключается в возможности контроля механических характеристик цепных приводов любой мощности и габаритных размеров. Недостаток заключается в том, что этот метод применяется при работе объекта контроля в режиме холостого хода.

Опираясь на вышеизложенное, можно заключить, что разработка метода и средства контроля механического КПД цепных передач в широком диапазоне скоростных, нагрузочных и переходных режимов работы, лишенная недостатков, присущих существующим методам, и расширяющая их возможности, является актуальной задачей.

Во второй главе разработан метод определения КПД асинхронного цепного электропривода (АЦЭП), характеризующего его механические и добавочные потери, метод контроля и методика контроля механического КПД цепных передач, произведена оценка погрешности контроля КПД цепного электропривода, спроектирован аппаратно-программный комплекс (АПК) для контроля механического КПД цепных передач.

Рассмотрим сущность разработанного метода определения КПД АЦЭП, характеризующего его механические и добавочные потери. На рисунке 1 представлена схема АЦЭП, поясняющая принцип определения его КПД.

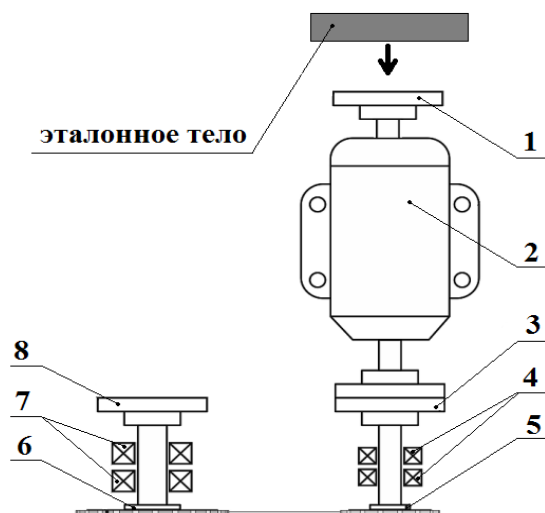


Рисунок 1 - Схема цепной передачи с электроприводом от асинхронного электродвигателя (АЭД): 1 – полумуфта для крепления махового тела с эталонным моментом инерции; 2 – АЭД; 3 – предохранительная муфта АЭД; 4 – подшипниковые узлы ведущего вала; 5 - ведущий вал с надетой на него звездочкой; 6 – ведомый вал с надетой на него звездочкой; 7 – подшипниковые узлы ведомого вала; 8 - предохранительная полумуфта ведомого вала для соединения нагрузочного устройства

Вначале с помощью энкодера измеряют результирующее угловое ускорение ε_1 АЦЭП без эталонного тела:

$$\varepsilon_1 = \frac{M - M_c}{J_{np}} = \varepsilon_1' - \frac{M_c}{J_{np}}, \quad (1)$$

где M – крутящий момент, развиваемый АЭД, Н·м; $\varepsilon_1' = M/J_{np}$ – ускорение, которым обладала бы система вращающихся масс (СВМ) АЦЭП при отсутствии механических и добавочных потерь в АЭД, рад/с²; M_c – момент сопротивления «паразитных» сил в АЦЭП, Н·м; J_{np} – приведенный к оси вращения ведущего вала АЦЭП момент инерции его СВМ с учетом потерь, кг·м².

Крутящий момент, развиваемый АЦЭП в момент разгона, можно записать следующим образом:

$$M = M_c + J_{np} \cdot \varepsilon_1, \quad (2)$$

где $J_{np} \cdot \varepsilon_1$ – крутящий момент, расходуемый на изменение кинетической энергии движущихся масс (полезный момент), Н·м.

С другой стороны, при отсутствии сил сопротивления в СВМ масс АЦЭП выражение для крутящего момента, развиваемого АЦЭП, примет вид:

$$M = J_{np} \cdot \varepsilon_1' = J_{np} \cdot \frac{M}{J_{np}}. \quad (3)$$

Из (1) и (3) получаем:

$$\begin{aligned} M &= J_{np} \cdot \left(\varepsilon_1 + \frac{M_c}{J_{np}} \right) = J_{np} \cdot \left(1 + \frac{M_c}{J_{np} \cdot \varepsilon_1} \right) \cdot \varepsilon_1 = \\ &= J_{np} \cdot \left(1 + \frac{M_c \cdot J_{np}}{J_{np} \cdot (M - M_c)} \right) \cdot \varepsilon_1 = J_{np} \cdot \left(\frac{M}{M - M_c} \right) \cdot \varepsilon_1 = J_{np} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{цэп}} \right) \cdot \varepsilon_1, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\eta_{цэп}$ – КПД АЦЭП, характеризующий его механические и добавочные потери (зависит от механических потерь в АЦЭП и добавочных потерь в асинхронном электродвигателе (все виды трудно учитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник МДС, пульсацией магнитной индукции и другими причинами), оказывающих противодействие

движению системы вращающихся масс асинхронного цепного электропривода).

В настоящей работе, при упоминании понятия «момент инерции СВМ с учетом потерь», подразумевается произведение приведенного к выбранной оси вращения момента инерции исследуемой СВМ $J_{СВМ}$ и величины, обратной КПД обозначенной СВМ, $(1/\eta_{СВМ})$, который характеризует механические и добавочные потери в асинхронном электродвигателе.

Затем на полумуфту 1 вала АЭД с помощью скрепляющих элементов закрепляется тело, обладающее эталонным моментом инерции $J_{э}$. При этом момент инерции движущихся масс увеличивается, а, следовательно, результирующее угловое ускорение СВМ уменьшается. АЭД запускается, и угловая скорость СВМ доводится до номинальной, определяется результирующее угловое ускорение ε_2 СВМ АЦЭП с эталонным телом.

С учетом (3) выражение для крутящего момента, развиваемого АЦЭП, примет следующий вид:

$$M = (J_{np} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{цэп}} \right) + J_{э}) \cdot \varepsilon_2, \quad (5)$$

где $J_{э}$ - приведенный к оси вращения ведущего вала АЦЭП момент инерции тела с эталонным моментом инерции, кг·м².

Поскольку внешняя характеристика АЭД при постоянных значениях входного напряжения, частоты питающей сети и неизменном значении сопротивления обмоток всегда постоянна, можем приравнять правые части выражений (4) и (5) и определить выражение для приведенного к оси вращения ведущего вала момента инерции АЦЭП с учетом потерь:

$$J_{np} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{цэп}} \right) = J_{э} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}. \quad (6)$$

Далее, определив приведенный к оси вращения ведущего вала АЦЭП момент инерции его СВМ, можем определить его КПД с учетом механических и добавочных потерь:

$$\eta_{цэп} = \frac{J_{np} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{J_{э} \cdot \varepsilon_2}. \quad (7)$$

Аналогичным образом можно найти КПД любой СВМ, в состав которой входит АЭД, с учетом механических и добавочных потерь.

При этом крутящий момент, развиваемый АЭД, можно рассчитать:

$$M = \varepsilon_1 \cdot J_{np} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{цэп}} \right). \quad (8)$$

Методика определения механического коэффициента полезного действия цепной передачи

В общем случае методику определения механического КПД цепной передачи можно представить в виде блок-схемы (рис.2), где $J_{aэд} \cdot (1/\eta_{aэд})$ - приведенный к оси вращения ротора момент инерции системы вращающихся масс АЭД с учетом потерь, $кг \cdot м^2$; $J_{aэд+в2} \cdot (1/\eta_{aэд+в2})$ - приведенный к оси вращения ротора момент инерции системы вращающихся масс (ротор АЭД, подшипниковые узлы АЭД, предохранительная муфта, ведомый вал с надетой на него ведомой звездочкой, опорные подшипники ведомого вала) с учетом потерь, $кг \cdot м^2$; $J_{aэд+в1} \cdot (1/\eta_{aэд+в1})$ - приведенный к оси вращения ротора момент инерции системы вращающихся масс (ротор АЭД, подшипниковые узлы АЭД, ведущий вал с надетой на него ведущей звездочкой, опорные подшипники ведущего вала) с учетом потерь, $кг \cdot м^2$; $J_{ц1}$ - момент инерции части цепи, охватывающей ведущую звездочку, относительно оси ее вращения, $кг \cdot м^2$; $J_{ц2}$ - момент инерции части цепи, охватывающей ведомую звездочку, относительно оси ее вращения, $кг \cdot м^2$; $J_{в2} \cdot (1/\eta_{в2})$ - приведенный к оси вращения ведомого вала момент инерции системы вращающихся масс (ведомый вал, подшипниковые узлы) с учетом потерь, $кг \cdot м^2$; $L_{ц}$ - общая длина цепи, м; $l_{ц1}, l_{ц2}$ - длина окружности обхвата ведущей и ведомой звездочек, соответственно, м; $m_{ц}$ - линейная удельная масса цепи, $кг/м$; d_1 - диаметр делительной окружности ведущей звездочки, м; $J_{мд}$ - момент инерции нагрузочных маховых дисков, $кг \cdot м^2$; i - передаточное отношение цепной передачи; t_{np} - время, необходимое для разгона АЦЭП без учета потерь в цепном зацеплении в выбранном скоростном диапазоне, с; $t_{aэд}$ - время, необходимое для разгона АЦЭП, в выбранном скоростном диапазоне, с; $t_{цэп}$ - время, необходимое для разгона АЦЭП с учетом потерь в цепном зацеплении, в выбранном скоростном диапазоне, с; $\eta''_{цэп}$ - КПД АЦЭП, характеризующий его механические и добавочные потери, без учета потерь в цепном зацеплении; $\Delta\omega$ - разница между конечной и начальной угловыми скоростями в выбранном скоростном диапазоне, $рад/с$.

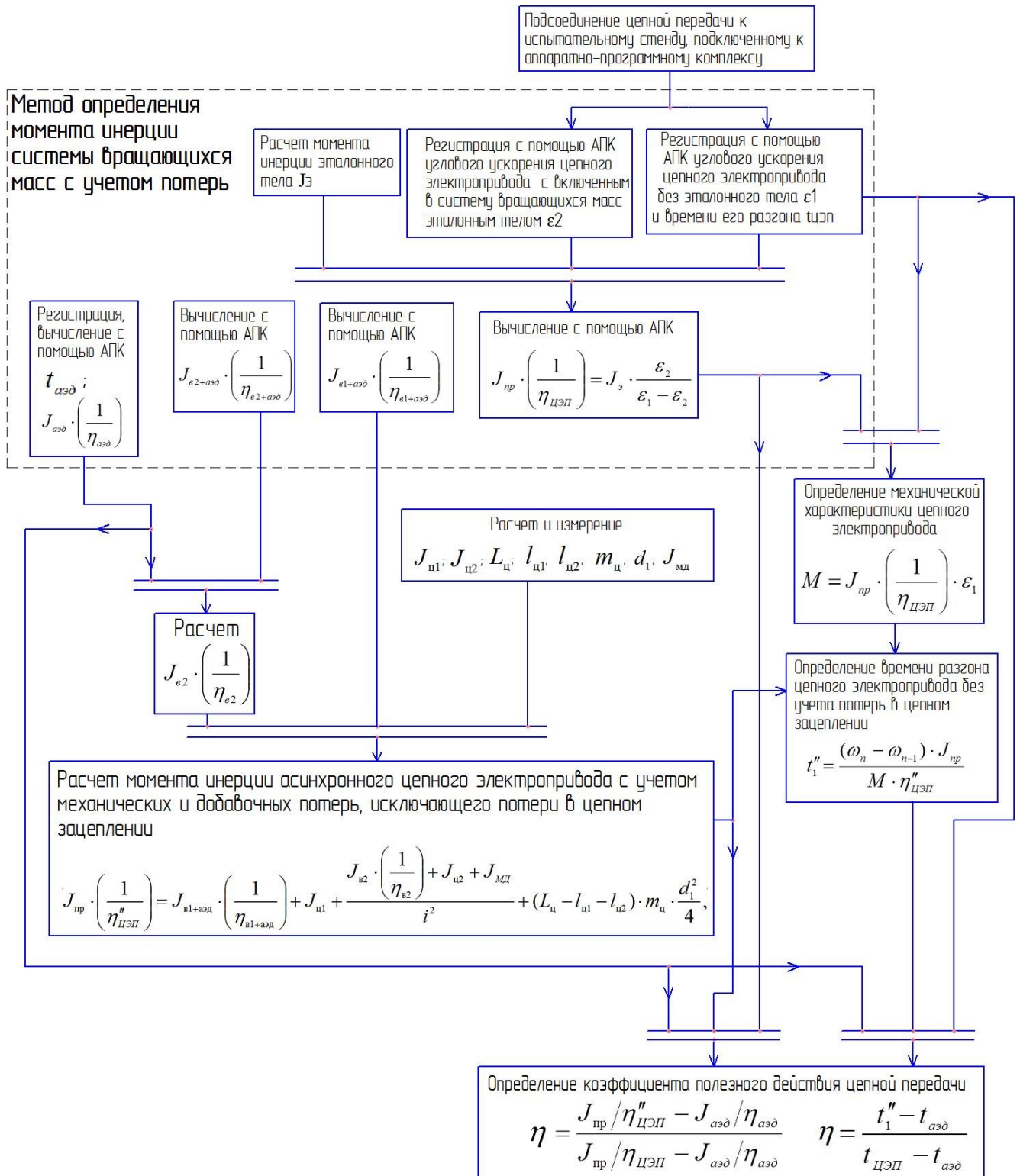


Рисунок 2 – Блок-схема определения механического КПД цепной передачи

Динамический метод контроля механического КПД цепной передачи

Метод контроля механического КПД цепной передачи представлен на рисунке 3 в виде блок-схемы.

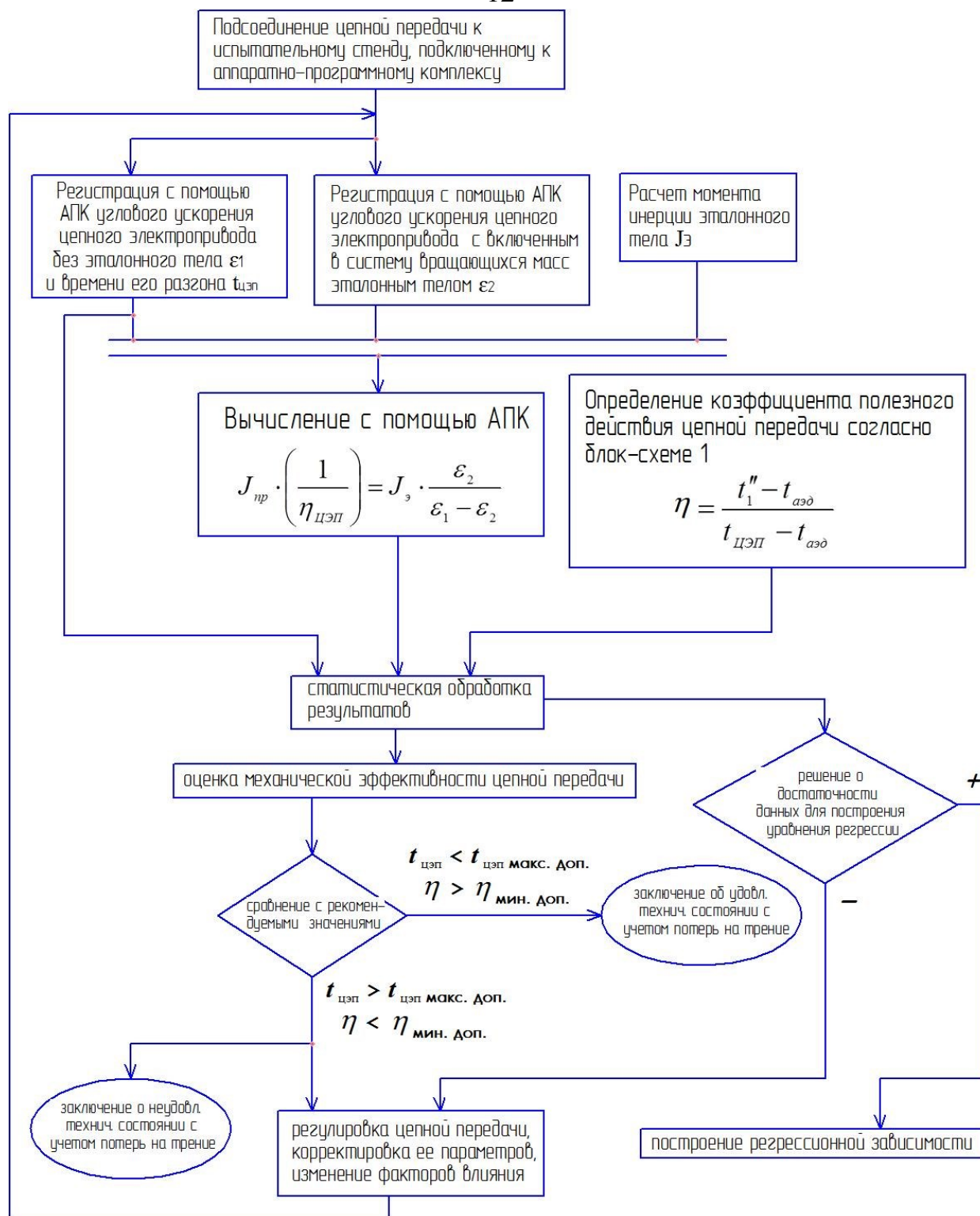


Рисунок 3 – Блок-схема реализации динамического метода контроля механического КПД цепной передачи

Для контроля механических параметров цепной передачи предложен АПК, состоящий из энкодера, измерительного преобразователя (блока регистрации) и

персонального компьютера (ПК) с установленной программой регистрации и анализа цифрового сигнала (рисунок 4).

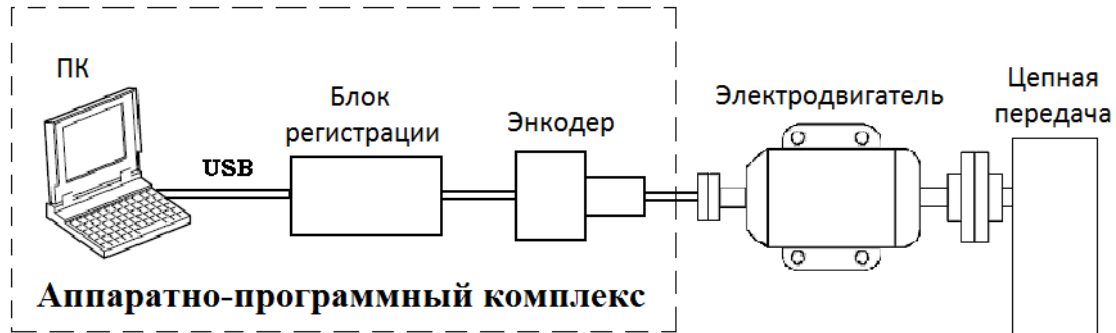


Рисунок 4 – Структурная схема контроля механических параметров АЦЭП

В третьей главе теоретическим путем выявлена закономерность изменения механических потерь во втулочной цепной передаче вследствие изменения ее параметров.

Для выявления степени влияния факторов на КПД втулочной цепной передачи в качестве критерия оценки принимаем работу трения в цепи при повороте звездочки с количеством зубьев z на угол, соответствующий сумме углов поворота двух смежных звеньев (наружного и внутреннего) $4\pi/z$.

Получено выражение суммарной работы с учетом дополнительных усилий, возникающих в цепи по причине неравномерности движения ведомой звездочки и цепи, биения звездочек и увеличения предварительного натяжения:

$$A_{mp} = \left[P + P_{тб} + 2S_x + \frac{E_{01} \cdot F_{оп}}{\sqrt{l^2 + b^2}} \cdot (\sqrt{l^2 + b^2} - l) + \frac{E_{02} \cdot F_{оп}}{\sqrt{l^2 + b^2}} \cdot (\sqrt{l^2 + b^2} - l) \right] \times \\ \times 2\pi \cdot f \cdot \left[\left(2t \cdot \sin \varphi + a_1 \cdot \cos \varphi \cdot \frac{d}{2} + b_1 \cdot \cos \varphi \cdot \frac{d_1}{2} + \cos \varphi \cdot \frac{d}{2} \right) \cdot \frac{1}{z_1} + \right. \\ \left. + \left(2t \cdot \sin \varphi + a_2 \cdot \cos \varphi \cdot \frac{d}{2} + b_2 \cdot \cos \varphi \cdot \frac{d_1}{2} + \cos \varphi \cdot \frac{d}{2} \right) \cdot \frac{1}{z_2} \right], \quad (9)$$

где P – рабочая нагрузка, Н; $P_{тб}$ – усилие, возникающее в ведущей ветви исследуемой передачи при биениях звездочки и валов, Н; S_x – натяжение холостой ветви, Н; E_{01} и E_{02} – модули жесткости ведущей и ведомой цепей, соответственно, Н/см²; $F_{оп}$ – площадь поперечного сечения втулки, см²; l – длина ведущей ветви цепи, мм; b – плоскопараллельное смещение звездочек, мм; f – коэффициент трения (зависит от количества смазочного материала в цепи); t – шаг цепи, м; φ – угол смещения звездочки относительно нормали, рад; a_1 , b_1 – коэффициенты, учитывающие влияние числа зубьев ведущей звездочки, угол заострения зуба и коэффициент трения; d – диаметр валика, м; d_1 – диаметр втулки, м; z_1 , z_2 – число зубьев ведущей и ведомой звездочек, соответственно.

Для проведения сравнительного анализа причин изменения механических потерь на трение в цепной передаче с втулочной цепью и нахождения теоретической зависимости работы трения в цепной передаче от ее параметров были выбраны интервалы варьирования рассмотренных факторов, которые не должны выходить за пределы, рекомендуемые в известных источниках, или значительно отличаться от реальных условий эксплуатации. Полученные значения для исследуемой цепной передачи с приводной втулочной цепью представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Интервалы варьирования факторов, влияющих на значение работы трения в цепи

Уровень кодированного фактора	Параметр			
	$P_{тб}, Н (x_1)$	$S_x, Н (x_2)$	$f(x_3)$	$b, м (x_4)$
+1	123,10	134,90	0,15	0,008
-1	61,55	72,65	0,10	0,004
$2x_i$	0	16,40	0,05	0

Уровень кодированного фактора характеризует экстремумы рассматриваемых факторов влияния (+1 – максимальное рекомендуемое значение; -1 – минимальное рекомендуемое значение).

При этом теоретическая математическая модель объекта исследования принимает следующий вид:

$$y = 0,214 + 0,014x_1 + 0,027x_2 + 0,110x_3 + 0,59x_4. \quad (10)$$

На основании проведенных расчетов предполагаем следующее:

1. Основным параметром цепных передач, влияющим на механические потери в них, является количество смазочного материала в сопряжениях звеньев цепи. Этот параметр может иметь относительно узкий интервал варьирования значений;
2. Плоскопараллельное смещение звездочек, предварительное натяжение ведомой ветви цепи требуют широких интервалов варьирования их значений, то есть близких к предельно рекомендуемым;
3. Интервалы варьирования значений такого фактора влияния как способ смазки цепи обеспечивается качественными уровнями (1 – картерная смазка; 2 – периодическая смазка).

В четвертой главе экспериментальным путем доказана достоверность результатов, получаемых динамическим методом контроля, проведено исследование влияния параметров цепной передачи с двухрядной приводной втулочной цепью на ее механический КПД, и получены уравнения регрессии, а также проведена статистическая обработка экспериментальных данных.

На рисунке 5 представлен стенд для контроля механического КПД цепных передач, который позволяет регистрировать время разгона и ускорение АЦЭП. Стенд позволяет изменять качественное и количественное значение факторов влияния независимо друг от друга для получения объективной регрессионной зависимости.

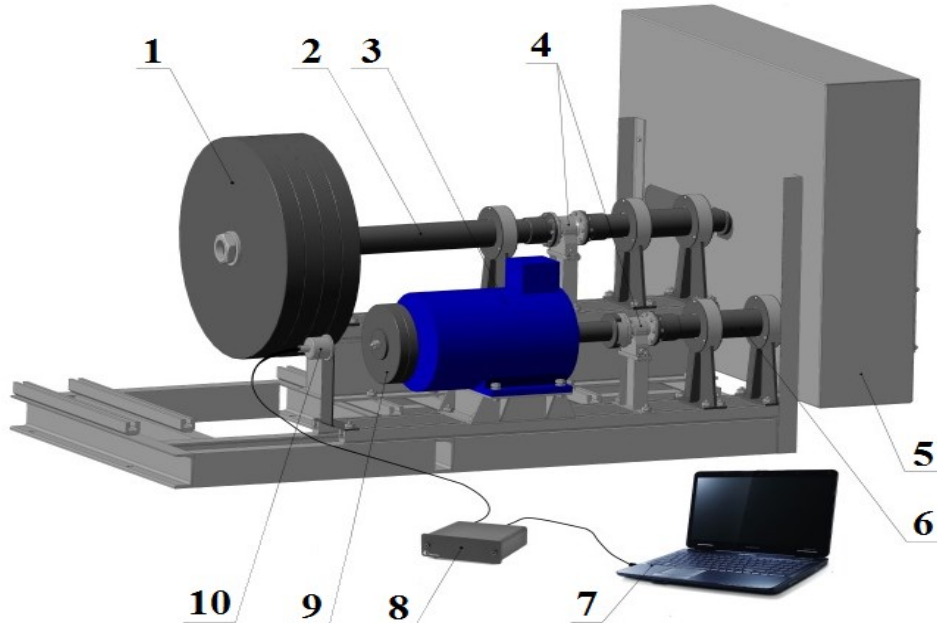


Рисунок 5 – Стенд для контроля механического КПД цепных передач:

1 – нагрузочные маховые диски; 2 – ведомый вал; 3 – однофазный АЭД АИР 112МВ6 (220/380 В), 1,1 кВт, $n = 940$ об/мин; 4 – датчики крутящего момента М40-100; 5 – кожух цепной передачи; 6 – ведущий вал; 7 – ПК с установленным программным обеспечением; 8 – блок регистрации данных; 9 – эталонный диск; 10 – энкодер

Определение усилия, возникающего в цепи при разгоне АЦЭП

Для того чтобы определить среднее значение полезного усилия в цепи в выбранном скоростном диапазоне $\overline{P_{136}}$, необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$\overline{M_{136}} = \overline{M_{a0}} - J_{a0+61} \cdot \left(\frac{1}{\overline{\eta_{a0+61}}} \right) \cdot \overline{\varepsilon_{un}}, \quad (11)$$

где $\overline{M_{a0}}$ – среднее значение крутящего момента, развиваемого АЭД, в выбранном скоростном диапазоне, $H \cdot m$; $J_{a0+61} \cdot \left(\frac{1}{\overline{\eta_{a0+61}}} \right)$ – среднее значение приведенного к оси вращения ведущего вала АЦЭП момент инерции СВМ «ротор АЭД, подшипниковые узлы АЭД, ведущий вал цепной передачи, опоры ведущего вала цепной передачи, ведущая звездочка» с учетом потерь в выбранном скоростном диапазоне, $kg \cdot m^2$; $\overline{\varepsilon_{un}}$ – среднее значение углового ускорения АЦЭП с нагрузкой во время его разгона в выбранном скоростном диапазоне, rad/c^2 .

На рисунке 6 представлены полученные значения моментных характеристик в зависимости от момента инерции нагрузочных дисков на ведомом валу.

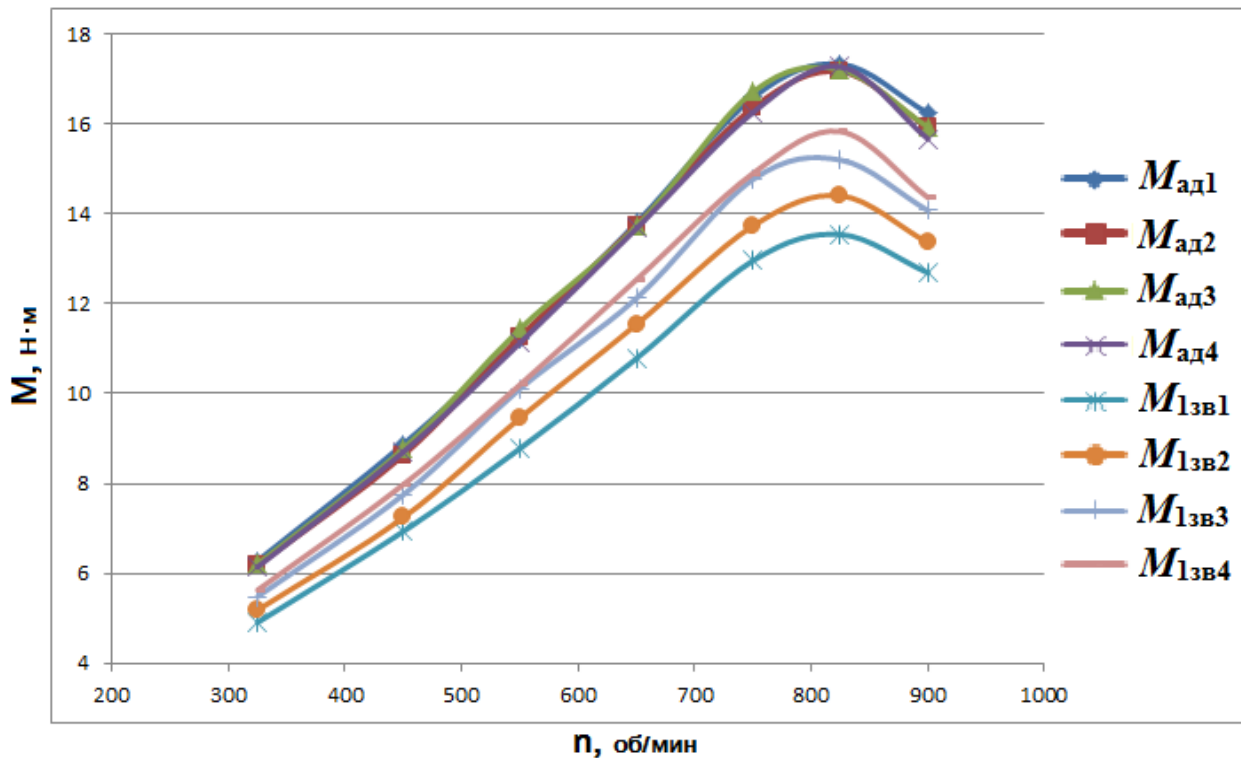


Рисунок 6 – Моментные характеристики однофазного АЭД и на ведущей звездочке: $M_{ад1}$, $M_{ад2}$, $M_{ад3}$, $M_{ад4}$ - крутящий момент АЦЭП при моменте инерции нагрузочного диска 0,261 кг·м²; 0,439 кг·м²; 0,617 кг·м²; 0,878 кг·м², соответственно; $M_{лзв1}$, $M_{лзв2}$, $M_{лзв3}$, $M_{лзв4}$ - крутящий момент на ведущей звездочке при моменте инерции нагрузочного диска 0,261 кг·м²; 0,439 кг·м²; 0,617 кг·м²; 0,878 кг·м², соответственно.

Выражение (11) подразумевает, что с увеличением нагрузки на ведомом валу цепной передачи (при этом угловое ускорение АЦЭП уменьшается) моментная характеристика на ведущей звездочке стремится к моментной характеристике АЭД, что является подтверждением достоверности результатов, получаемых динамическим методом контроля.

Экспериментальное обоснование достоверности результатов, получаемых динамическим методом контроля механического КПД цепных передач

Для обоснования достоверности результатов, полученных разработанным методом контроля, проводим два опыта:

1. Сравнение значений крутящего момента, полученных разработанным динамическим методом контроля (ДМ) и с помощью датчика крутящего момента (ДКМ) М40-100 во время разгона АЭД.

2. Сравнение значений момента инерции добавочного диска, полученных расчетным путем и с помощью разработанного ДМ.

В таблицах 3 и 4 представлены полученные значения.

Таблица 3 - Сравнение средних значений крутящего момента в выбранном скоростном диапазоне, полученных ДМ и с помощью ДКМ

Величина	Число оборотов, об/мин						
	250-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-850	850-950
$M_{\text{дм}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	5,262	7,438	9,420	11,555	13,886	14,515	13,582
$M_{\text{дкм}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	5,370	7,356	9,498	11,620	14,034	14,786	13,692
$\delta, \%$	2,006	-1,120	0,824	0,560	1,0547	1,835	0,803

В таблице 4 приведены значения погрешностей измерения момента инерции добавочного тела динамическим методом с учетом того, что за истинное значение принимаем расчетное $J_{\text{ист}} = 0,015987 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Таблица 4 - Погрешность определения момента инерции тела с известным значением момента инерции

n, об/мин	200-400	400-600	600-800
$J_{\text{ист}}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,015987	0,015987	0,015987
$J_{\text{дм}}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,015855	0,015898	0,015911
$\delta, \%$	0,83	0,56	0,48

Планирование экспериментов

При исследовании факторов, влияющих на механический КПД цепной передачи, было принято решение применить многофакторный эксперимент с использованием метода математического планирования.

На основе теоретического исследования механической эффективности цепных передач в качестве факторов влияния были приняты следующие параметры: плоскопараллельное смещение звездочек (x_1), сила предварительного натяжения цепи (x_2), способ смазки (x_3), изменение шага цепи (x_4), межосевое расстояние (x_5).

В таблице 5 приведены факторы влияния, их уровни и кодированные значения для экспериментов.

Таблица 5 - Определение уровней факторов влияния на механический КПД цепной передачи

Уровень кодированного фактора	Параметр				
	$\Delta b, \text{мм}$ (x_1)	$S_x, \text{мм}$ (x_2)	k_c (x_3)	$\Delta t_{\text{ц}}, \%$ (x_4)	$a, \text{мм}$ (x_5)
-1	8	134,9	2	2,00	55
+1	0	16,4	1	0,44	35
$2x_i$	8	118,5	1	1,56	20

В таблице 5 при установлении области определения способа смазки k_c использованы условные уровни: $k_c=1$ – картерная смазка; $k_c=2$ – периодическая смазка (в эксперименте цепь предварительно работала в течение 24 часов при номинальной нагрузке).

Таблица 6 - Уравнения регрессии для цепной передачи с двухрядной приводной втулочной цепью

Скоростной диапазон, об/мин	Уравнение регрессии, $\eta_{цп}$, %
200 - 400	$\eta_{цп} = 87,92 + 1,86 x_1 + 1,55 x_2 + 5,12 x_3 + 0,98 x_4 + 0,43 x_5 - 0,73 x_1 x_2 - 0,25 x_2 x_4 + 0,49 x_1 x_5$
400 - 600	$\eta_{цп} = 85,85 + 1,49 x_1 + 1,11 x_2 + 4,63 x_3 + 0,86 x_4 + 0,99 x_5 - 0,24 x_1 x_2 - 0,31 x_2 x_4 + 0,50 x_1 x_5$
600 - 800	$\eta_{цп} = 85,14 + 1,52 x_1 + 1,17 x_2 + 4,86 x_3 + 1,01 x_4 + 1,25 x_5 - 0,16 x_1 x_2 - 0,30 x_2 x_4 + 0,45 x_1 x_5$

Для матрицы планирования была проведена статистическая обработка экспериментальных данных, определена однородность дисперсий по Кохрену, проверена адекватность модели, то есть ее пригодность, с помощью критерия Фишера при пятипроцентном уровне значимости, и проверена значимость коэффициентов уравнений регрессии. На основе полученных данных можно сделать вывод об адекватности полученных зависимостей.

Основные научные результаты и выводы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования и анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ существующего уровня развития методов контроля цепных передач показал, что существующие методы контроля механического КПД цепной передачи обладают рядом недостатков и не могут в полной мере отвечать требованиям современного машиностроения.

2. Впервые предложенные метод и методика контроля механического КПД цепных передач в качестве критерия механической эффективности цепной передачи используют момент инерции АЦЭП с учетом потерь и время его разгона в выбранных скоростных диапазонах. В настоящей работе предлагается проводить контроль эффективности цепной передачи с помощью времени разгона, поскольку это позволит в значительной мере увеличить точность контроля по сравнению с существующими методами вследствие отсутствия косвенности измерений и необходимости тарировки измерительных органов.

3. Предлагаемый метод контроля предполагает использование дополнительной инерционной массы на ведомом валу АЦЭП для создания необходимого усилия в цепи, что избавляет от необходимости использования нагрузочного устройства.

4. Разработанный динамический метод контроля решает проблему определения механического КПД цепной передачи без учета потерь в ее подшипниковых узлах.

5. Впервые спроектированный АПК позволяет проводить контроль механического КПД цепных передач и выявлять исследуемые зависимости в широком диапазоне скоростей и с более высокими частотными характеристиками, чем при применении существующих методов.

6. Проведенные теоретические расчеты влияния параметров цепной передачи с приводной втулочной цепью на ее механическую эффективность показали, что основным фактором, в наибольшей степени воздействующим на механические потери, является коэффициент трения между движущимися элементами цепной передачи, который почти в два раза превышает степень влияния плоскопараллельного смещения звездочек при интервале варьирования последнего выше предельно рекомендуемого.

7. Результаты проведенных экспериментов показывают, что сходимость результатов, полученных динамическим методом и расчетным путем при определении момента инерции добавочного диска, варьируется в пределах 1%.

8. Полученные механические характеристики АЭД при различных значениях моментов инерции нагрузочных маховых дисков, расположенных на ведомом валу, совпадают на всем скоростном диапазоне с максимальным относительным отклонением 1,34%, что является подтверждением достоверности результатов, получаемых с помощью динамического метода.

9. Впервые полученные уравнения регрессии, оценивающие степень влияния параметров цепной передачи с двухрядной приводной втулочной цепью на ее механическую эффективность, согласуются с результатами теоретических расчетов и показывают, что наибольшее влияние на значение механического КПД оказывает способ смазки цепи k_c (количество смазки в сопряжениях цепной передачи). При увеличении скоростного диапазона до 600 - 800 оборотов в минуту степень влияния межосевого расстояния увеличивается и приближается к значению степени влияния плоскопараллельного смещения звездочек.

10. Обнаружение изменения шага цепи Δt_{η} с помощью разработанного метода контроля при оценке технического состояния цепной передачи представляется проблематичной задачей, поскольку степень влияния данного фактора на механический КПД цепной передачи незначительно превышает случайную погрешность измерения ускорения АЦЭП.

Основные результаты диссертации изложены в публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Егоров, А.В. Инерционный метод контроля качества цепных передач / А.В. Егоров, **К.Э. Козлов**, В.Н. Белогусев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, Краснодар. – 2013. - №88(04).

2. Егоров, А.В. Инерционный метод оценки влияния качества смазочного материала на энергетическую эффективность цепных передач / А.В. Егоров, **К.Э. Козлов** // Наука и образование: электронное научно-техническое издание - М. – 2013. - №6.

3. Егоров, А.В. Инерционный метод оценки энергетической эффективности асинхронного цепного электропривода / А.В. Егоров, **К.Э. Козлов** // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова, Ижевск. - 2013. - № 2. - С. 2225 : ил.

Публикации в научных изданиях

1. **Козлов, К.Э.** Анализ существующих методов и средств диагностики ременных и цепных передач / **К.Э. Козлов** // Материалы международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу — творчество молодых». - Йошкар-Ола: Поволжский Государственный технологический университет, 2012 г. - С. 17-22.

2. Егоров, А.В. Инерционный метод оценки мощности механических потерь в ременных и цепных передачах / А.В. Егоров, **К.Э. Козлов** // Материалы международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу — творчество молодых» - Йошкар-Ола: Поволжский Государственный технологический университет, 2012. - С. 26-32.

3. **Козлов, К.Э.** Исследование параметров цепной передачи с приводной втулочной цепью на ее механическую эффективность с помощью динамического метода контроля механического коэффициента полезного действия цепной передачи / **К.Э. Козлов** // Вестник науки Сибири, Томск. – 2015. - №15. – С. 113-122.

4. Егоров, А.В. Способ определения момента инерции ременных и цепных передач: пат. 2507492 Рос. Федерация: МПК⁷ G01M1/10 / Егоров А.В., **Козлов К.Э.**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет». - 2012107764/28; заявл. 29.02.2012; опубл. 20.02.2014. Бюл. №5.

5. Егоров, А.В. Способы определения неисправностей ременных и цепных передач. Инерционный метод оценки мощности механических потерь в ременных и цепных передачах / А.В. Егоров, **К.Э. Козлов** // Материалы IX международной заочной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» - Новосибирск: Изд. «Сибирская ассоциация консультантов», 2012 – С. 51-57.

6. Егоров, А.В. Оценка энергоэффективности работы ременных и цепных передач на основе инерционного метода / А.В. Егоров, **К.Э. Козлов** // Материалы VI международной научно-практической конференции «Техник и технология: новые перспективы развития» - М.: Издательство «Спутник+», 2012 – с. 49.

Подписано к печати 25.08.2015. Формат 60х84/40. Бумага «Снегурочка»

Печать XEROX. Усл. печ. л. 1,25

Тираж 100 экз.

Издательство ТПУ. 634050. г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел./факс: 8 (3822) 56-35-35, www.tpu.ru