

На правах рукописи



Хазиев Тимур Равилевич

**ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ МАШИНЫ
ДЛЯ БЕЗОГНЕВОЙ РЕЗКИ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА
ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО
ЗАВИСИМЫХ ПРИВОДОВ**

Специальность 05.02.02 Машиноведение, системы приводов и
детали машин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2017

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
почётный работник науки и техники РФ,
Лопатин Борис Александрович

Официальные оппоненты: **Плеханов Федор Иванович**
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки УР,
профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство» ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Лукин Евгений Владимирович
кандидат технических наук,
заместитель директора по качеству
ООО «КАМ-Инжиниринг»

Ведущая организация ФГБОУ ВО "Тюменский индустриальный университет"

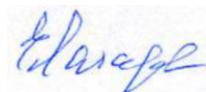
Защита состоится « 26 » апреля 2017 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001 гл. корп.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» и на сайте <http://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229809/haziev-timur-ravilovich>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Е.А. Лазарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Открытие новых нефтяных месторождений вносит серьезные коррективы в развитие нефтяной промышленности и в первую очередь в количественное и качественное развитие трубопроводного транспорта.

Остановка нефтепроводов даже на один час приводит к значительным материальным затратам. Любое сокращение простоя нефтепроводов при плановых и аварийных работах является важной задачей. Поэтому задача создания техники и технологии, позволяющих сократить время и максимально обезопасить процесс производства работ является **актуальной**.

В настоящее время в нефте- и газодобывающей отрасли при ремонте трубопровода для вырезки дефектного участка применяются два метода резки труб: с использованием энергии взрыва - кумулятивными труборезами и безогневым методом с применением машин для резки труб (далее МРТ).

Применение кумулятивных труборезов связано со сложностью обеспечения безопасности работ в полевых условиях при резке трубопроводов. В связи с этим наибольшее применение получил безогневой метод. В этом случае механическая резка осуществляется с помощью специальных машин, оснащённых фрезой.

Анализ рынка машин МРТ показал, что машины имеют следующие основные недостатки: ручная врезка инструмента (фрезы), жесткая кинематическая связь привода перемещения и привода вращения инструмента, отсутствие обратной связи, позволяющей контролировать процесс резания.

Ручная врезка инструмента является небезопасной т.к. оператор осуществляет работу вблизи зоны резания, опасной является первая врезка инструмента т.к. в трубопроводе могут присутствовать горючие остатки нефтепродуктов.

Отсутствие регулировки режимов резания и обратной связи из-за жесткой кинематической цепи в приводе перемещения машины приводит к неконтролируемому износу инструмента, к увеличению силы резания, росту нагруженности привода, не позволяет оперативно оценить текущее состояние процесса резки трубопровода, а, следовательно, предпринимать меры при возникновении нештатной ситуации. В случае внезапной поломки инструмента возникают ударные нагрузки, что вызывает разрушение элементов машины. Это приводит к увеличению времени ремонта трубопровода.

Возможность регулировки режимов резания реализована на станках с ЧПУ, такие станки имеют следующие режимы работы:

- автоматический режим работы по заранее подготовленной оператором управляющей программе (УП);
- режим вмешательства оператора в процесс автоматической работы станка;
- ручной режим управления станком.

Реализованные в станках с ЧПУ системы управления приводами обеспечивают регулировку режимов резания, но только в соответствии с командами, прописанными в УП, в независимости от действия внешних факторов.

Таким образом, актуальным является развитие метода управления приводами машины или станка с возможностью автоматической корректировки режимов резания в процессе работы машины в зависимости от действия внешних факторов на нагруженность приводов.

Объект исследования. Процесс безогневой резки труб нефтегазопроводов большого диаметра.

Предмет исследования. Закономерности согласованной работы системы приводов машины в процессе безогневой резки труб нефтегазопроводов большого диаметра.

Цель работы. Повышение технического уровня машины для безогневой резки труб большого диаметра путём применением системы функционально зависимых приводов: привода перемещения машины по трубе, привода вращения инструмента и привода врезания инструмента.

Задачи исследования:

- выполнить анализ существующих методов согласования работы приводов машин для безогневой резки труб большого диаметра с учётом процессов резания, врезания и перемещения;
- построить структурную схему новой машины на базе трёх функционально зависимых электромеханических приводов: привода вращения инструмента, привода перемещения машины, привода врезания инструмента;
- выполнить теоретическое исследование нагруженности приводов машины в зависимости от действующих факторов для установления закономерностей работы приводов в процессе безогневой резки;
- разработать математические модели нагруженности приводов при их совместной работе и алгоритм автоматического управления приводами машины;
- спроектировать испытательный стенд для обкатки и исследования нагруженности приводов машины и разработать методику испытаний;
- разработать опытный образец машины и выполнить экспериментальное исследование работы приводов при заданных режимах работы.

Методы исследования. В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретический раздел основывается на методах теоретической механики, сопротивления материалов, классической электромеханики, теории автоматического управления.

Экспериментальные исследования проводились на опытном образце МРТ «Волжанка 4» с использованием электроизмерительных приборов.

Достоверность научных результатов подтверждается: корректностью использования теоретических и экспериментальных методов, а также изготовлением опытного образца, показавшего свою работоспособность.

На защиту выносятся:

- обоснование предложенной кинематической и структурной схемы машины для безогневой резки труб большого диаметра;
- разработанные аналитические зависимости для оценки нагруженности приводов в зависимости от параметров разрезаемой трубы, условий закрепления и углового положения машины на трубе;
- математические модели нагруженности приводов при их совместной работе;
- алгоритмы автоматического управления приводами машины в процессе безогневой резки;
- результаты вычислительных и натурных экспериментов по оценке нагруженности приводов при заданных режимах работы машины;
- опытный образец МРТ на базе независимых приводов;

– реализация результатов работы при создании новых конструкций МРТ для серийного производства.

Научная новизна работы:

– получены теоретические зависимости нагруженности системы приводов вращения инструмента, его врезания и перемещения машины в зависимости от параметров разрезаемой трубы, типа инструмента, условий закрепления и углового положения машины на трубе;

– разработаны и исследованы математические модели нагруженности приводов машины при их совместной работе, позволяющих установить предельные величины режимов работы, исключающие поломку её элементов в зависимости от факторов, действующих в процессе безогневой резки трубопровода;

– разработан алгоритм управления приводами машины в процессе безогневой резки, позволяющий автоматически корректировать режимы резания в зависимости от действия внешних факторов на нагруженность приводов.

Практическая ценность работы:

– предложена и обоснована новая структурная схема машин для безогневой резки труб большого диаметра на основе применения системы функционально зависимых приводов вращения инструмента, его врезания и перемещения машины по трубе, позволяющая организовать согласованную работу кинематически не связанных приводов машины;

– получены экспериментально подтверждённые данные для исследованию работы машины с функционально зависимыми приводами врезания инструмента, перемещения машины и вращения инструмента;

– разработаны практические рекомендации по проектированию, наладке и работе с машинами;

– повышена безопасность работы оператора при врезании инструмента за счёт применения автоматического привода врезания инструмента и управлением машиной на безопасном расстоянии.

Реализация результатов. Спроектирован и изготовлен опытный образец машины «Волжанка 4» для безогневой резки труб большого диаметра на базе трёх независимых электромеханических приводов (патент на полезную модель №130245). На основе опытного образца разработан промышленный образец машины на базе МРТ «Волжанка 4» с независимым приводом врезания инструмента (патент на полезную модель №150471). Результаты работы использованы при проектировании машин для безогневой резки труб большого диаметра на предприятии ЦБПО АО «Транснефть-Приволга» г. Новокуйбышевск, которое является дочерним предприятием компании ПАО «АК «Транснефть».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научных конференциях: Уральской выставке научно-технического творчества молодежи (НТТМ) изобретателей, рационализаторов, конструкторов «Евразийские ворота России» (Челябинск, ЮУрГУ, 2010, 2011 г.), медаль III степени; Новые материалы и технологии НМТ-2010 (Москва, МАТИ, 2010 г.); XXII Международной Инновационно – ориентированной конференции молодых учёных и студентов МИКМУС-2010. Будущее машиностроения России (Москва, ИМАШ РАН, 2010г.); ежегодные научные конференции аспирантов и докторан-

тов ЮУрГУ (Челябинск, ЮУрГУ, 2011-2013 гг.); XI Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2011» (Москва, 2011 г.);

Работа выполнялась при поддержке гранта научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых учёных высших учебных заведений, расположенных на территории Челябинской области по теме «Ресурсосберегающее оборудование для ремонта и строительства нефтегазопроводов» 2013 г. и в рамках хоз. договора № 201450087 от 14.05.2014 г. «Модернизация машины для безогневой резки труб «Волжанка-3М» с ЦБПО АО «Транснефть-Приволга». Работа получила поддержку Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «СТАРТ» на тему «Проектирование машины нового поколения для безогневой резки труб большого диаметра с адаптивной системой регулирования режимов резания и дистанционным управлением» 2016 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 3 статьи в журналах по Перечню ВАК РФ, 1 статья в журнале, входящем в базу цитирования Scopus и получено 3 патента на полезную модель.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка, включающего 81 наименование, и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, поставлены задачи исследования и сформулирована цель работы, представлены ее научная новизна и практическая ценность.

В первой главе приводятся основные сведения о резке трубопроводов большого диаметра и проведён их анализ, рассмотрены особенности и перспективы применения. Проведён обзор существующих машин для безогневой резки трубопроводов. Рассмотрены особенности конструкции машины для безогневой резки «Волжанка 3М».

Вопросами разработки огневых методов резки трубопроводов занимался ВНИИСПТнефть (ныне ИПТЭР) совместно с сотрудниками Института электросварки им. Е.О. Патона и Казанским химико-технологическим институтом. Позднее в этом направлении были работы Калашникова В.В., Лаптева Н.И., Пойлова В.В., Трохина О.В. и других. Исследования в области безогневой (холодной) резки труб приведены в работах Никитина В.Ф., Шчепановича В.М., Курдыша С.М., Грешняева В.А.

Отечественной и зарубежной промышленностью выпускается ряд машин для безогневой резки труб нефте- и газопроводов. Характеристики машин для безогневой резки приведены в таблице 1.

Разработанные авторами методы резки труб и оборудование не полностью удовлетворяют современным требованиям безопасности и правилам работы с оборудованием. Эксплуатация машин для безогневой резки труб выявила следующие недостатки:

- машины с гидравлическим и пневматическим приводом малопригодны для работы в суровых климатических условиях, в районах Крайнего Севера и Сибири в зимнее время года;

- реализованные в машинах методы управления не позволяют осуществлять необходимую регулировку режимов резания при резке труб с различной толщиной стенки, оценивать её нагруженность, не всегда обеспечивают резку труб за один проход вследствие недостаточной стойкости режущего;

- отсутствие информации о возникающем износе фрезы и увеличении сил резания в процессе работы машины часто приводят к внезапной поломке инструмента, возникновению ударных нагрузок и поломке элементов машины;

- реализованный в машинах метод врезания инструмента является небезопасным для оператора, т.к. врезка инструмента осуществляется оператором вручную в непосредственной близости к зоне резания.

Таблица 1 – Характеристики машин для безогневой резки

| Марка машины | Диаметр разрезаемых труб, мм | Вид главного привода | Масса, кг | Толщина стенки разрезаемой трубы, мм | Подача инструмента, мм/мин |
|-----------------------|---|---|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| «Волжанка» | 219 - 550, 219 - 820, 530 - 1220. | электрический, пневматический, гидравлический | 130 | до 20 | 37,6 |
| «Волжанка 2» | 325 - 1420 | электрический | 110 | до 20 | 30 |
| «Волжанка 3» | 325 - 1420 | электрический | 95 | до 30 | 30 |
| СМ 307 | 315 - 1420 | электрический | 95 | до 20 | 30,3 |
| Fein | 250 - 3000 | электрический | 130 | до 45 | 40 |
| Машина гидравлическая | 352 - 1420 | гидравлический | машины-50 станции- 120 | до 20 | 45 |
| СГМ – 1 | 153 - 1829 | пневматический, гидравлический | 185 | до 38 | 38 |

На устранение указанных недостатков и разработку алгоритмов автоматического управления машиной направлены исследования работы.

Во второй главе предложена и обоснована новая кинематическая схема машины для резки труб на базе трёх функционально зависимых электромеханических приводов (рисунок 1). Приведены результаты теоретического исследования нагруженности приводов врезания инструмента и перемещения машины.

Эффективность машин МРТ при резке труб зависит от рационального проведения процесса резания, которое достигается в том случае, если обработка ведётся с технически и экономически обоснованными подачами S и скоростями резания v с возможностью их корректировки. В связи с этим в основу машины новой конструкции положена техническая задача автоматической регулировки режимов резания, снижение стоимости и времени ремонта трубопровода, а также повышение безопасности работы оператора путём дистанционного управления приводами.

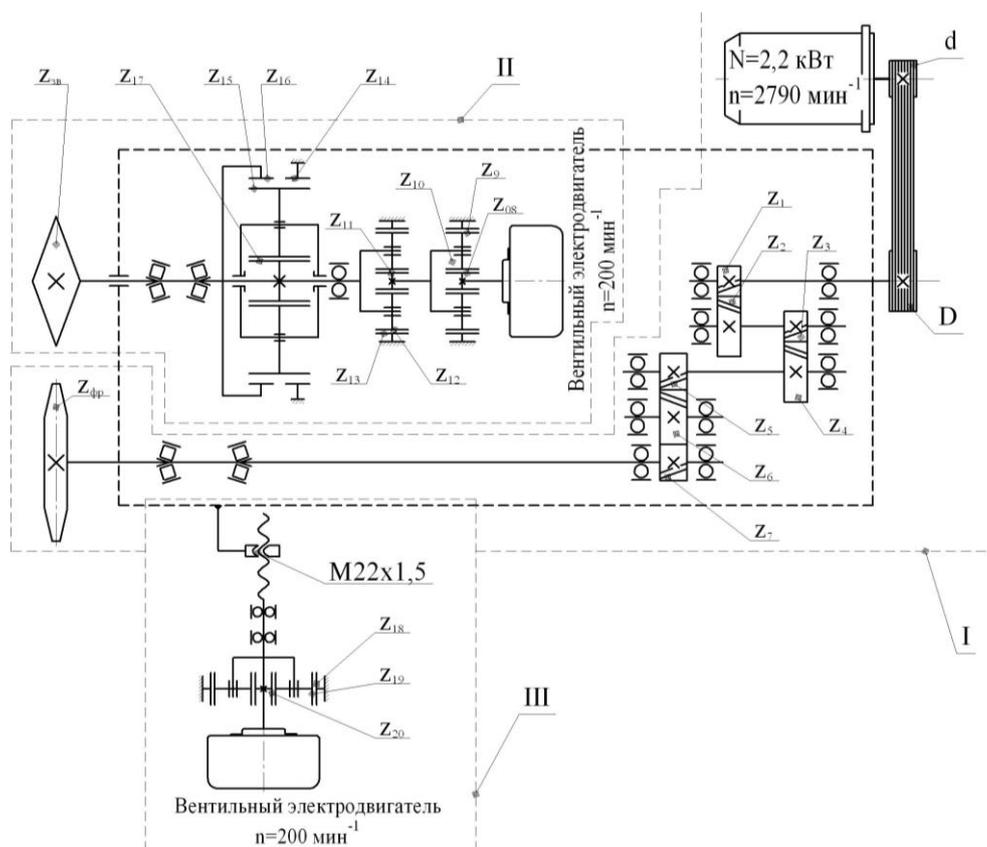


Рисунок 1 - Кинематическая схема машины новой конструкции

При разработке нового образца машины в качестве прототипа была выбрана машина «Волжанка 3М», где вращение инструмента и перемещение машины по трубе осуществляется от одного электродвигателя при ручном врезании инструмента. Кинематическая схема машины новой конструкции в отличие от аналогов снабжена тремя электромеханическими приводами, а именно: привод главного движения I, привод перемещения II и привод врезания инструмента III.

Исследование нагруженности приводов при различных условиях эксплуатации являлось одной из основных задач проектирования новой конструкции МРТ.

На первом этапе при проектировании привода подачи врезания был проведён анализ возможных эксплуатационных нагрузок, возникающих в процессе врезания инструмента.

Нагрузка привода подачи врезания обусловлена силой резания, которая в процессе врезания возрастает с увеличением глубины и ширины фрезерования. При использовании фасонной фрезы глубина фрезерования определяется вертикальным перемещением h и геометрическими параметрами фрезы. На рабочей поверхности фрезы с углом профиля α_1 глубина фрезерования $t_1 = t_1'' + 2h/\operatorname{tg}\alpha_1$, а при угле α_2 глубина $t_2 = t_2'' + 2h/\operatorname{tg}\alpha_2$. При использовании отрезной фрезы, глубина резания остаётся постоянной на всём протяжении процесса врезания, это обусловлено профилем инструмента.

После определения зависимостей изменения параметров фрезерования при врезании инструмента расчёт силы резания P_Z осуществлялся по известным

формулам теории резания. Главная составляющая силы резания при фрезеровании – окружная сила, P_Z :

$$P_Z = \frac{10 C_p t^x S_Z^y B^u z}{D^q n^w} K_{MP}, \quad (1)$$

где C_p – коэффициент в формуле окружной силы P_Z ; x, y, u, q, w – показатели степени в формуле окружной силы P_Z ; K_{MP} – поправочный коэффициент на качество обрабатываемого материала.

Для определения мощности мотор-редуктора привода врезания необходимо оценить осевую силу винта механизма врезания P_{oc} :

$$P_{oc} = \frac{P_Z(0,5 l_2 \cos \beta - l_2 \cos(90^\circ - \beta) R_{\phi p})}{l_2 \cos \theta}, \quad (2)$$

где $R_{\phi p}$ – радиус фрезы; l_2, β, θ – конструктивные размеры в приводе.

Для обеспечения требуемой осевой силы к винту механизма врезания необходимо приложить вращающий момент $M_{B.в}$:

$$M_{B.в} = P_{oc} \frac{d}{2} \operatorname{tg}(\delta + \gamma), \quad (3)$$

где d – номинальный диаметр резьбы; δ – угол подъема витков резьбы, γ – приведённый угол трения.

Требуемая мощность мотор – редуктора определяется по выражению:

$$N_{M.p} = M_{B.в} \omega_{B.в}, \quad (4)$$

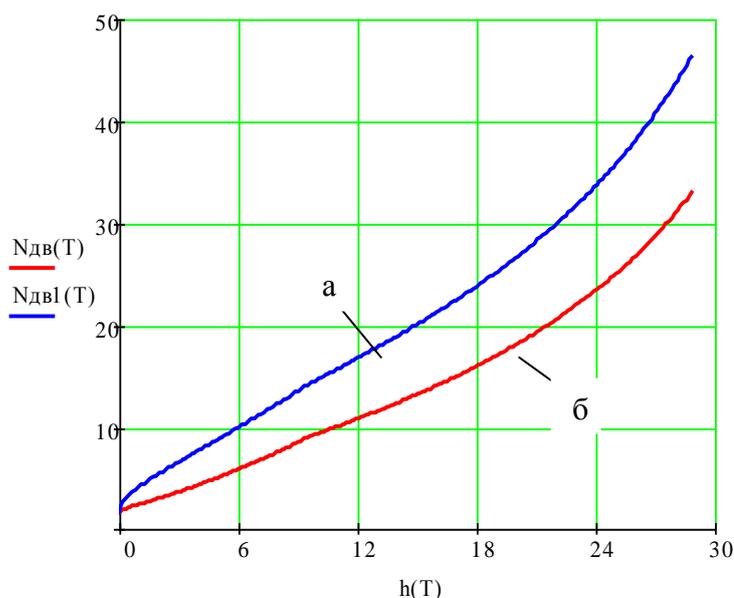
где $\omega_{B.в}$ – угловая скорость вращения винта механизма врезания.

На рисунке 2 приведён график потребляемой мощности двигателем привода врезания в зависимости от толщины разрезаемой трубы.

Из графика видно, что при врезании фрезы в трубу с толщиной стенки 24 мм потребляемая мощность около 23..24 Вт, в то время как с изношенной фрезой потребляется 33..35 Вт.

Кроме того, было установлено, что изменение натяжения приводных цепей и углового положения машины на трубе, влияния на мощность привода врезания практически не оказывает.

Следующий этап исследования заключался в анализе нагруженности привода перемещения и привода главного движения. В ходе исследования были проанализированы внешние нагрузки, действующие на машину в ходе её работы. Для установки машины МРТ на трубопроводе применя-



а) фрезы с износом б) фрезы без износа

Рисунок 2 - График мощности привода подачи врезания в зависимости от толщины разрезаемой трубы

ются натяжные цепи, обеспечивающие надёжную фиксацию машины на трубе. Таким образом, одной из внешних сил, действующих на машину, является сила натяжения цепей, прижимающая машину к трубопроводу. В свою очередь со стороны трубопровода на машину действует другая внешняя сила – сила реакции опор, возникающая в опорных роликах машины.

проанализированы внешние нагрузки, действующие на машину в ходе её работы. Для установки машины МРТ на трубопроводе применяются натяжные цепи, обеспечивающие надёжную фиксацию машины на трубе. Таким образом, одной из внешних сил, действующих на машину, является сила натяжения цепей, прижимающая машину к трубопроводу. В свою очередь со стороны трубопровода на машину действует другая внешняя сила – сила реакции опор, возникающая в опорных роликах машины.

На рисунке 3 показаны внешние силы, действующие на машину в процессе резания трубопровода, где P_1 – сила затяжки амортизаторов, P_3 – сила натяжения приводных цепей, R_1 и R_2 – силы реакции опорных роликов, G – вес машины, P_z и P_y – окружная и радиальная силы резания. Влияние этих сил на машину зависит от её углового расположения на трубе, от расстояния между опорными роликами передней и задней осей и размера трубы. Для преодоления внешних сил и перемещения машины по трубе в процессе резания необходимо создать момент на ведущей звёздочке привода перемещения $M_{ЗВ}$, который находится из выражения:

$$M_{ЗВ} = M_{TP} + M_{P_{yz}} + M_G, \quad (5)$$

где $M_{P_{yz}}$ – момент от силы резания P_{yz} ; M_G – момент от веса машины G ; M_{TP} – момент от сил трения.

В процессе резки машина совершает орбитальное движение вокруг трубопровода, вследствие чего вес машины оказывает существенное влияние на нагруженность привода перемещения машины. Значение момента от веса машины меняет знак в зависимости от углового положения на трубе и находится по формуле:

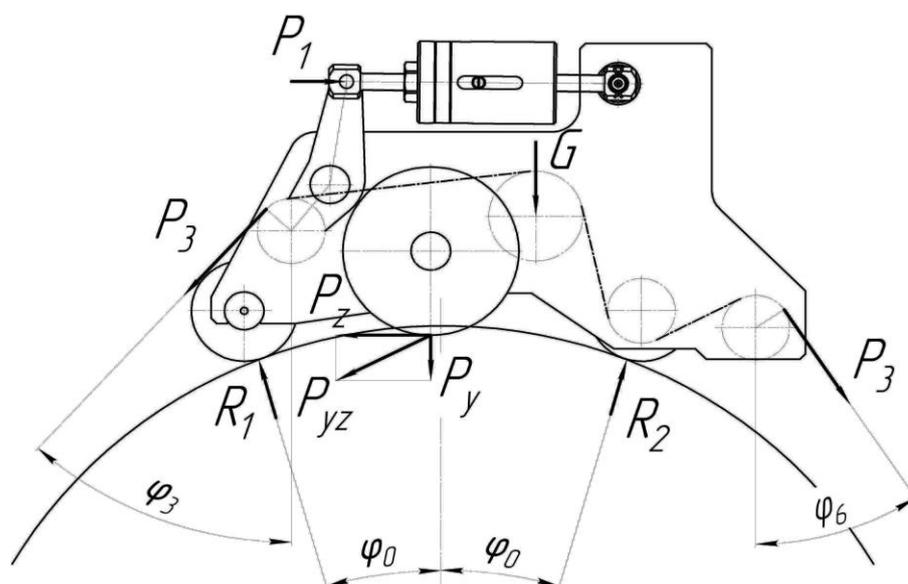


Рисунок 3 - Внешние силы, действующие на машину

$$M_G = G \cdot \sin(\varphi) \cdot r_{B3}, \quad (6)$$

где G – вес машины; r_{B3} – радиус ведущей звёздочки; φ – угловое положение машины на трубе.

Для процесса резания труб безогневым методом, при использовании трубо-резных машин, регламентом РД 153-39.4-130-2002 определена подача инструмента, которая составляет не более 30 мм/мин. После установления параметров глубины, ширины фрезерования и подачи инструмента были определены круговая сила резания P_z и радиальная сила резания P_Y , необходимые для определения приведённого момента от действия силы резания. Приведённый момент для преодоления сил резания находится из выражения:

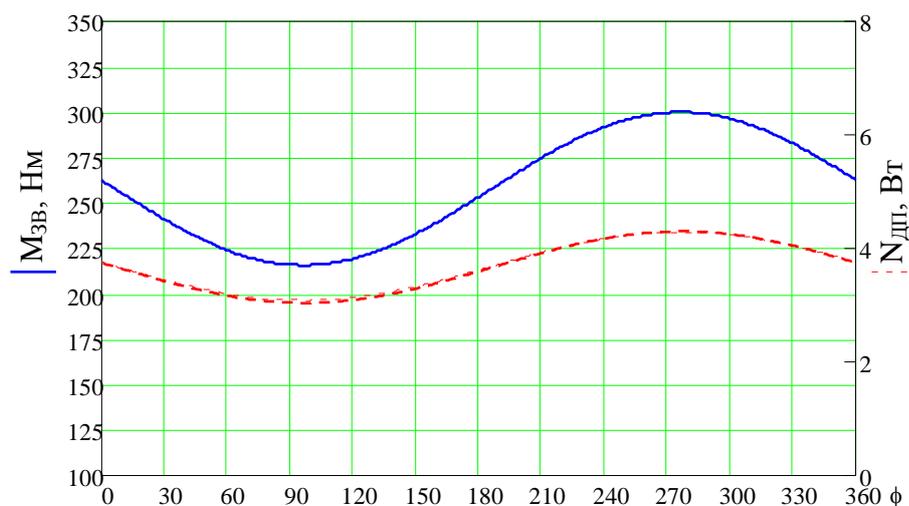
$$M_{P_z} = P_z r_{B3}, \quad (7)$$

где P_z - круговая сила резания; r_{B3} - радиус ведущей звёздочки.

Результирующий момент от сил трения вычислялся как сумма моментов в элементарных узлах трения скольжения M_{TPi}^C и качения M_{TPi}^K :

$$M_{TP} = M_{TP1}^C + \dots + M_{TP5}^C + M_{TP1}^K + M_{TP2}^K. \quad (8)$$

По результатам теоретических исследований были построены графики зависимости приведённого момента от углового расположения машины на трубе и график требуемой мощности для перемещения машины по трубе (рис. 4). Из графиков на рисунке 4 видно, что при угловом расположении машины на трубе 3/4 пройденного пути ($\varphi=270^\circ$) максимальное значение приведённого момента около 300 Нм, а затрачиваемая мощность составляет около 4,5 Вт.



$P_1=4400\text{Н}; t=10; S=30 \text{ мм/мин}$

Рисунок 4 - График зависимости $M_{зв}(\varphi)$ и $N_{дп}(\varphi)$

Третья глава посвящена разработке и исследованию математических моделей совместной работы: привода врезания инструмента и вращения инструмента, привода перемещения машины и вращения инструмента.

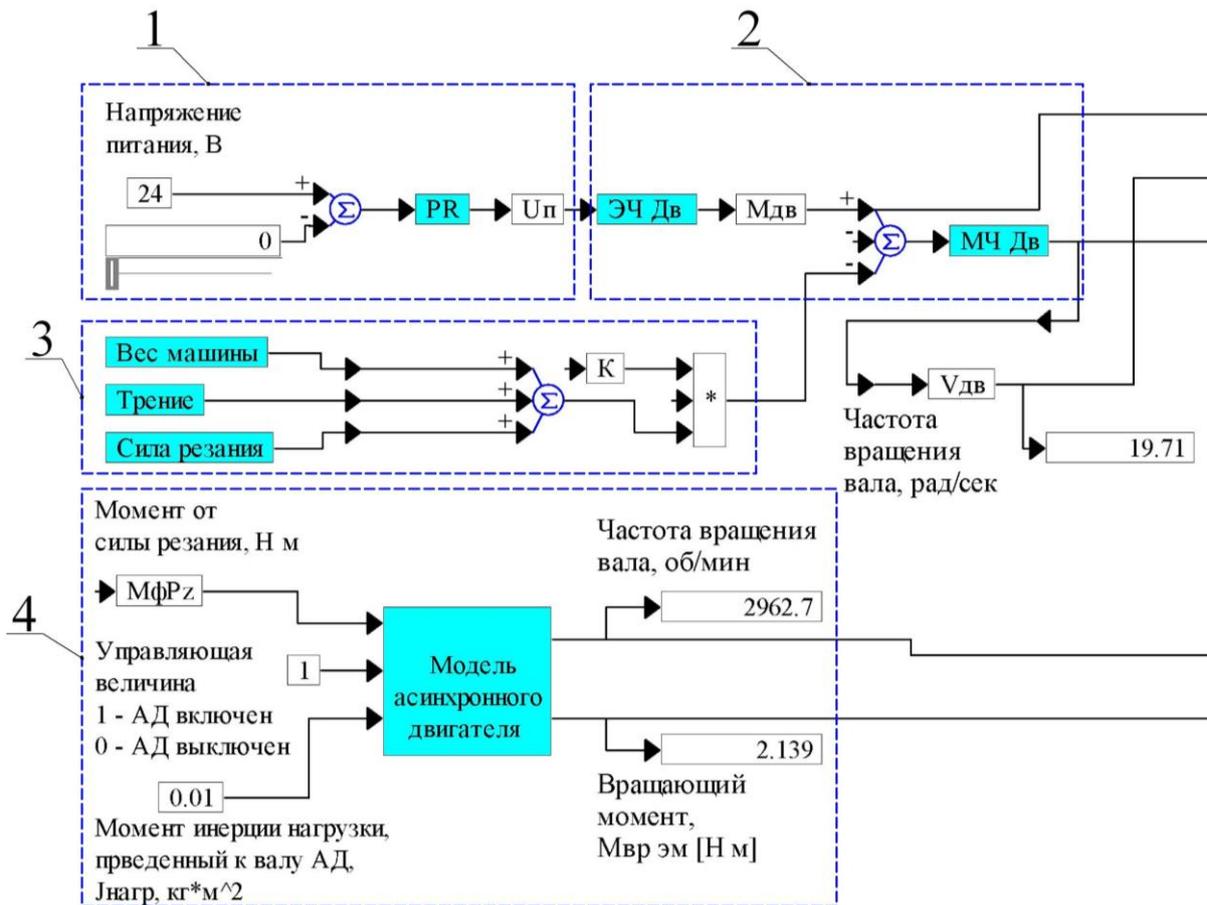
Для обеспечения согласованной работы привода перемещения машины по трубе и привода вращения фрезы необходимо установить связь процесса резания и скорости перемещения машины по трубе.

В уравнение $M_{TP} + M_{Pz} + M_G \leq [M]$, где $[M]$ допустимый момент на приводной звёздочке, подставим выражения (6), (7) и (8) после дополнительных

преобразований получим уравнение совместной нагруженности привода перемещения машины и привода вращения фрезы:

$$Gr_{3B} \sin \left[\frac{r_{3B} \omega_{ДП} T}{R_{TP} i_{ПП}} \right] + \frac{10C_{pt}^x \left[\frac{r_{3B} \omega_{ДП} i_{ПВ} \pi}{i_{ПП} z 30 \omega_{ПВ}} \right]^y B^u z K_{MP}}{D^q \left(\frac{30 \omega_{ПВ}}{i_{ПВ} \pi} \right)_\phi} r_{3B} + M_{TP} = [M]. \quad (9)$$

Выражение (9) является трансцендентным уравнением, решение данного уравнения выполнено численным методом с помощью ЭВМ. В среде визуального моделирования Vissim разработана модель совместной работы привода перемещения машины и привода вращения инструмента (рисунок 5), которая представляет собой совокупность математических соотношений (блоков), описывающих её поведение. В модели реализована обратная связь по нагрузке, позволяющая автоматически корректировать режимы работы привода. На рисунке 6 изображена схема алгоритма управления приводами машины.



1 - Блок управления, 2 - Электродвигатель привода перемещения,
3 - Внешние факторы, 4 – Электродвигатель привода вращения фрезы
Рисунок 5 - Общая блок схема электропривода подачи

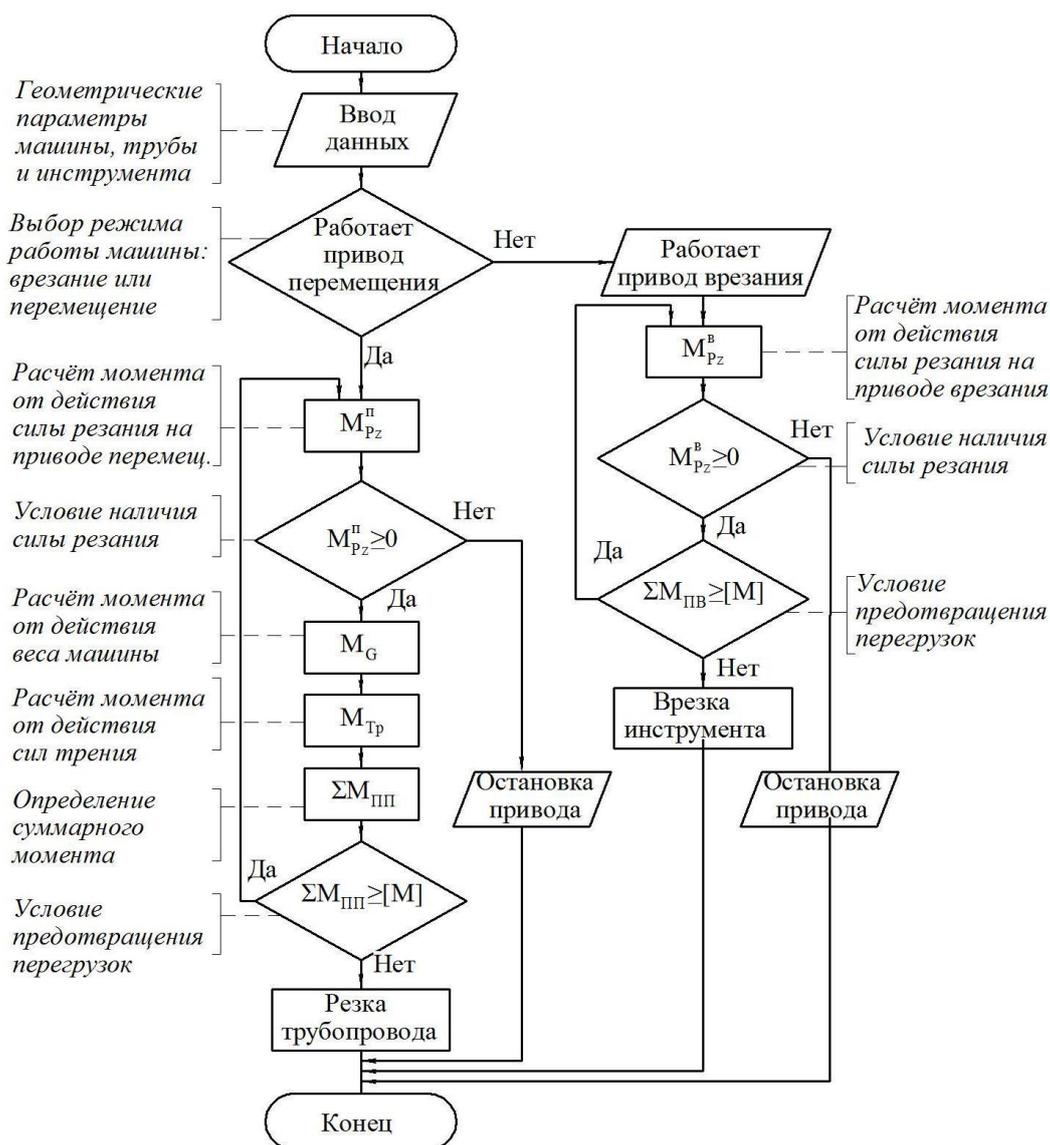


Рисунок 6 - Схема алгоритма управления приводами машины

В «Блок управления» на вход преобразователя «PR» подаётся питающее напряжение 24 В. С выхода блока «PR» (рисунок 7) питающее преобразованное напряжение $U_{п}$ идёт на вход блока «Электродвигатель» в электрическую часть двигателя «ЭЧ Дв».

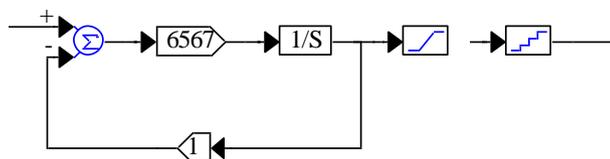


Рисунок 7 - Блок преобразователя «PR»

Передаточные функции преобразователя:

$$W = \frac{K_{п}}{Tp + 1}, \quad (10)$$

где $Kп$ – коэффициент усиления преобразователя; T – постоянная времени преобразователя; p – оператор Лапласа.

С выхода блока «ЭЧ Дв» (рисунок 8) снимается момент двигателя и идёт на сумматор. Момент двигателя $M_{дв}$, Н·м, находится по формуле:

$$M_{дв} = k\Phi \cdot I_{я}, \quad (11)$$

где $I_{я}$ – ток якоря, А; $k\Phi$ – магнитный поток двигателя, Вб.

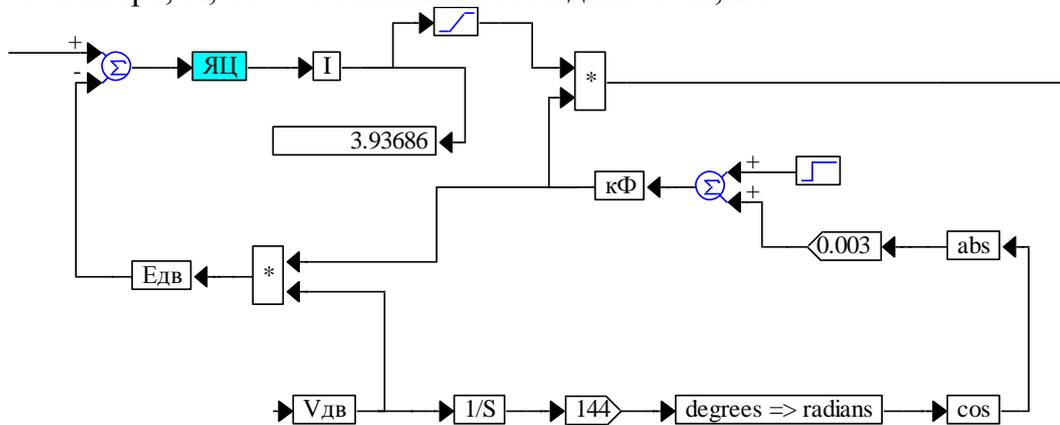


Рисунок 8 – Блок электрической части двигателя «ЭЧ Дв»

На этот же сумматор поступает значение момента «Внешние факторы» от силы резания, момента от трения в узлах трансмиссии машины и момента от веса машины. С сумматора сигнал идёт на блок механической части электродвигателя «МЧ Дв», с выхода которого снимается скорость двигателя привода перемещения $V_{дв}$. Скорость двигателя определяет величину подачи инструмента в блоке «Сила резания». С увеличением скорости двигателя возрастает подача инструмента, вследствие чего увеличивается сила резания. Для установки нагрузки стабилизации на приводе врезания и перемещения реализована регулировка момента и скорости вращения электродвигателя.

Блок «Внешние факторы» включает в себя влияние веса машины, силы трения в элементах трансмиссии и силы резания. В блоке «Сила резания» (рисунок 9) рассмотрено воздействие на работу машины силы резания, возникающей в процессе резки трубопровода. На входе блока «Сила резания» задаются необходимые параметры, а на выходе снимается момент от силы резания M_{Pz} . С увеличением скорости $V_{де}$ прямо пропорционально возрастает сила резания P_z , кроме того в процессе длительного резания возникает износ инструмента, который приводит к изменению прямой зависимости скорости и силы резания.

При движении машины по поверхности трубопровода, начиная с верхней точки, машина движется на спуск, её вес способствует движению, после прохождения половины пути машина идёт на подъём, при этом вес препятствует движению. В блоке «Вес машины» (рисунок 10) задаётся характер изменения и вес машины, действующий на усилие перемещения машины, а на выходе блока момент для преодоления веса машины.

В блоке «Трение» (рисунок 11) на вход подаётся цифровое значение суммарного момента трения качения и трения скольжения в элементах трансмиссии машины, анализ моментов трения в зависимости от внешних сил был произведён в математическом редакторе Mathcad.

| | | | | | | | |
|---|--------|---|------|----------------------------|-----|---|-----|
| Коэффициент перевода в СИ | 10 | → | A | Число зубьев фрезы, z | 40 | → | z |
| Коэффициент Ср | 47 | → | Cp | Ширина фрезерования, B, мм | 15 | → | B |
| Глубина резания, t, мм | 30 | → | t | Диаметр фрезы, Dфр, мм | 150 | → | Dфр |
| Передаточное число редуктора привода перемещения, i | 1233 | → | i | | | | |
| Частота вращения фрезы n фр, об/мин | | → | n фр | | | | |
| Передаточное число редуктора привода вращения, iвр | 60.775 | → | iвр | | | | |

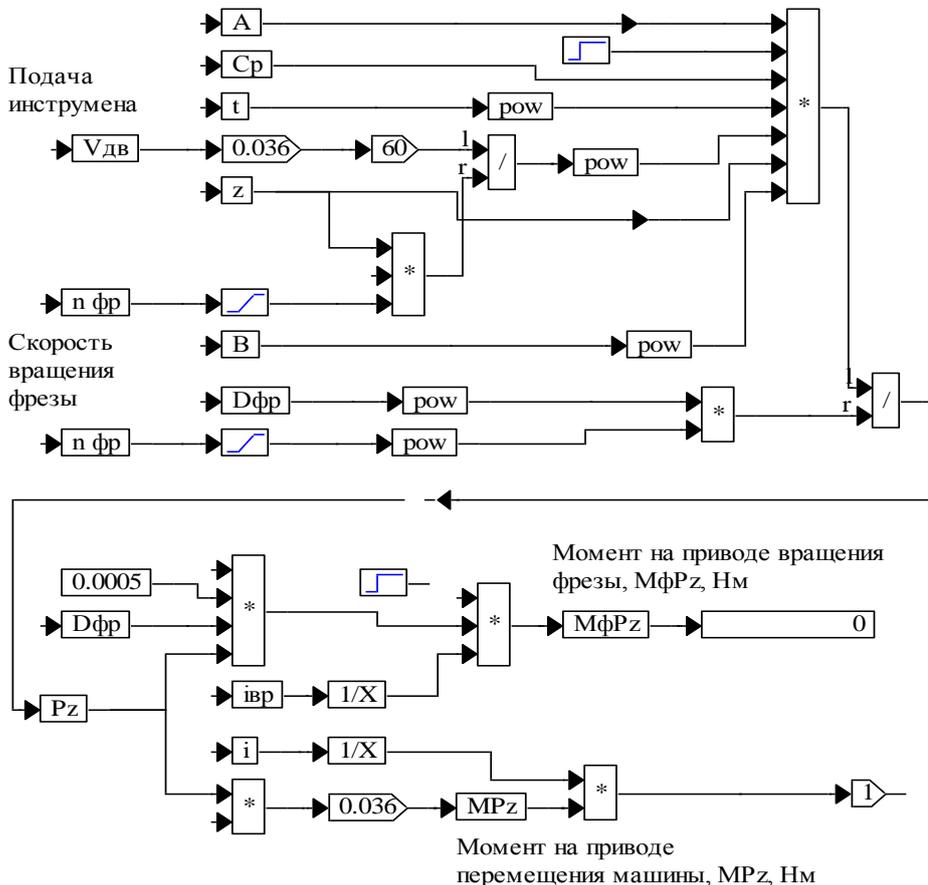


Рисунок 9 – Блок «Сила резания»

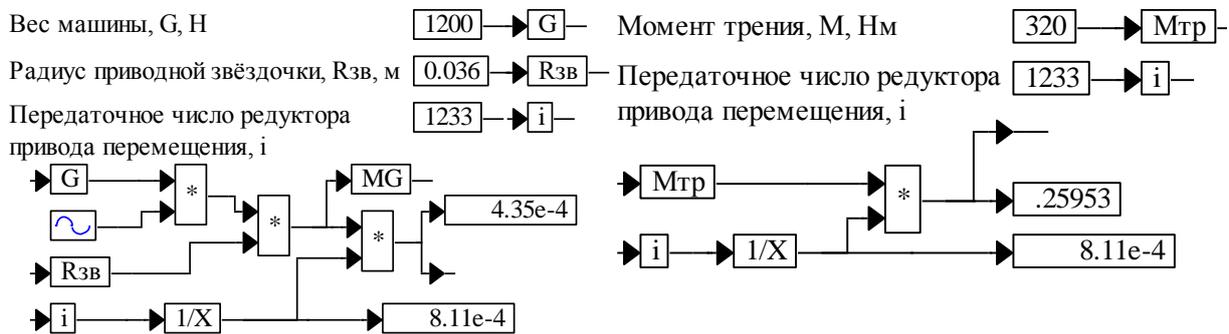


Рисунок 10– Блок «Вес машины»

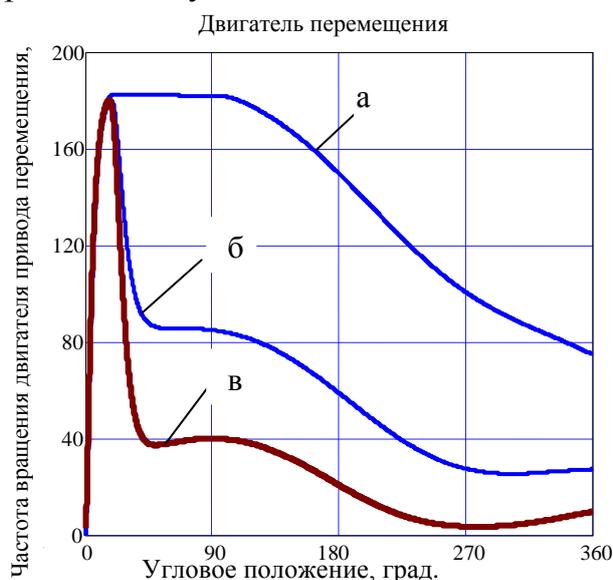
Рисунок 11– Блок «Трение»

Трение в элементах и узлах трансмиссии машины зависит от усилия натяжения приводных цепей, которое задаётся на натяжителях-амортизаторах. С учётом трения общая нагрузка на привод возрастает, к моменту для

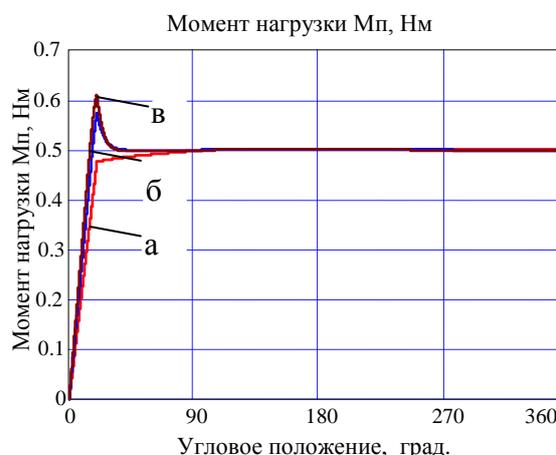
преодоления силы резания добавляется момент от сил трения. В процессе резания момент от сил трения практически остаётся постоянным, следовательно, для стабилизации общей нагрузки на определённом уровне целесообразно корректировать силу резания с помощью изменения величины подачи инструмента. Графики частоты вращения двигателя привода перемещения для разных усилий натяжения приводных цепей представлены на рисунке 12. Из графиков видно, что при увеличении натяжения цепей падают обороты двигателя, следовательно, подача инструмента замедляется и уменьшается сила резания. Благодаря уменьшению силы резания стабилизируется общая нагрузка привода на допустимом уровне, график стабилизированного момента приведен на рисунке 13.

Анализ математической модели показал, что существенное влияние на потребляемую мощность приводом перемещения оказывает вес машины это обусловлено тем, что вес машины на спуске способствует движению, а на подъёме препятствует, действует в противоположном направлении.

Реализация модели привода врезания инструмента в среде визуального моделирования Vissim выполнена аналогично модели привода перемещения. Отличие модели заключается в блоке «Внешние факторы», в котором отсутствует внутренний блок «Вес машины» и блок «Трение». Кроме того в блоке «Сила резания» добавляются ещё два переменных параметра: ширина резания и глубина.



$t=10\text{ мм}$, $V=30\text{ мм}$ при $I=1,5\text{ А}$
а) $P_1=4400\text{ Н}$; б) $P_2=6600\text{ Н}$; в) $P_3=8800\text{ Н}$
Рисунок 12 – Частота вращения двигателя



$t=10\text{ мм}$, $V=30\text{ мм}$ при $I=1,5\text{ А}$
а) $P_1=4400\text{ Н}$; б) $P_2=6600\text{ Н}$; в) $P_3=8800\text{ Н}$
Рисунок 13 - Момент нагрузки на двигателе

При настройке системы управления рассматривались два варианта стабилизации нагрузки на приводе врезания: регулировка момента и регулировка скорости вращения двигателя.

Разработанная модель позволяет исследовать влияние внешних факторов на нагруженность приводов машины.

В четвёртой главе для подтверждения теоретических положений и оценки работоспособности машины были проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов. На начальном этапе привод устанавливался на тарировочный стенд (рисунок 14) и с помощью тормоза нагружался. Определялась зависимость тока на двигателе от момента на ведущей звёздочке привода перемещения (рисунок 15). В дальнейшем эта зависимость используется для оценки нагрузки на приводе по показаниям потребляемого тока.

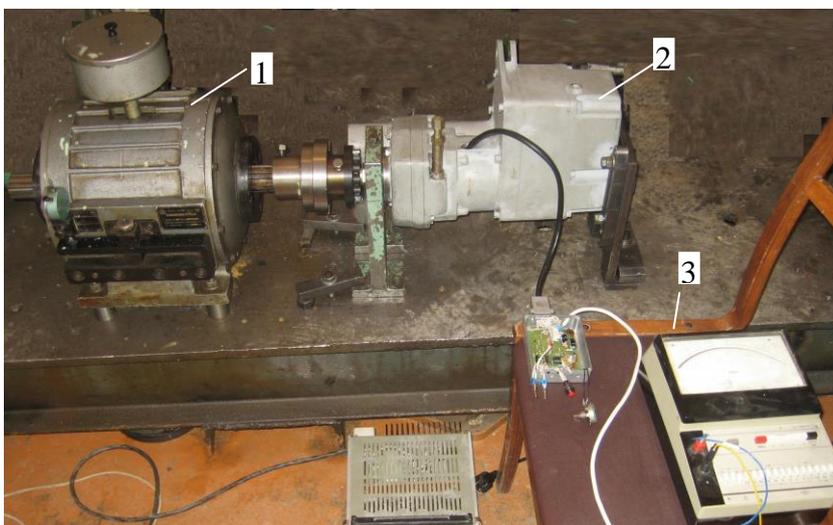
На следующем этапе исследования для проверки работоспособности машины был спроектирован её лабораторный образец (патент №130245), рисунок 16.

С использованием планирования 4-х факторного эксперимента первого порядка на лабораторном образце проведены исследования:

- оценка влияния натяжения приводных цепей на мощность привода перемещения;
- анализ потребляемой мощности приводом перемещения в различных угловых положениях машины, работа на холостом ходу;
- экспериментальная резка при различных величинах подач с установкой разных фрез;
- резка трубы в режиме стабилизации нагрузки.

В качестве примера на рисунке 17 приведены экспериментальные и теоретические данные момента на ведущей звёздочке привода перемещения при разной затяжке приводных цепей в ходе резки трубы диаметром 720 мм с толщиной стенки 8 мм и подачей инструмента 25 мм/мин.

Из графиков на рисунке 17 видно, что теоретические значения момента на ведущей звёздочке меньше экспериментальных на 10-15%.



1-Порошковый тормоз; 2-Привод перемещения; 3-Амперметр
Рисунок 14 - Тарировочный стенд для привода перемещения

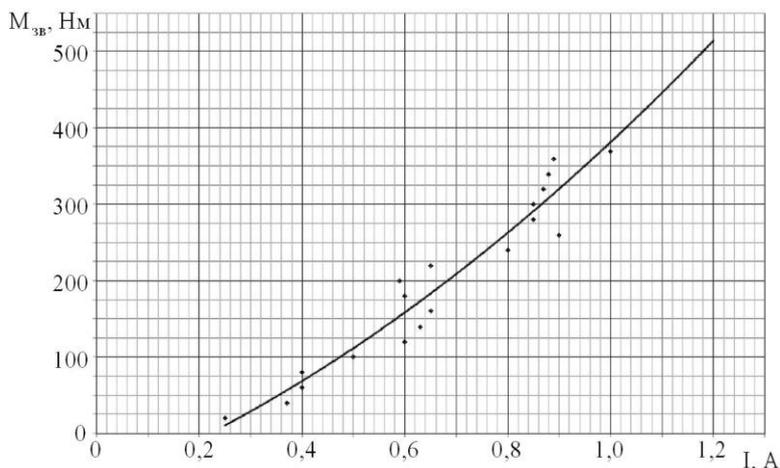


Рисунок 15 – График зависимости тока привода перемещения от момента на приводной звёздочке

Это связано с тем, что реальный КПД привода перемещения меньше теоретического. Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили работоспособность машины и достоверность математической модели при оценке мощности и моментов привода перемещения машины по трубе.

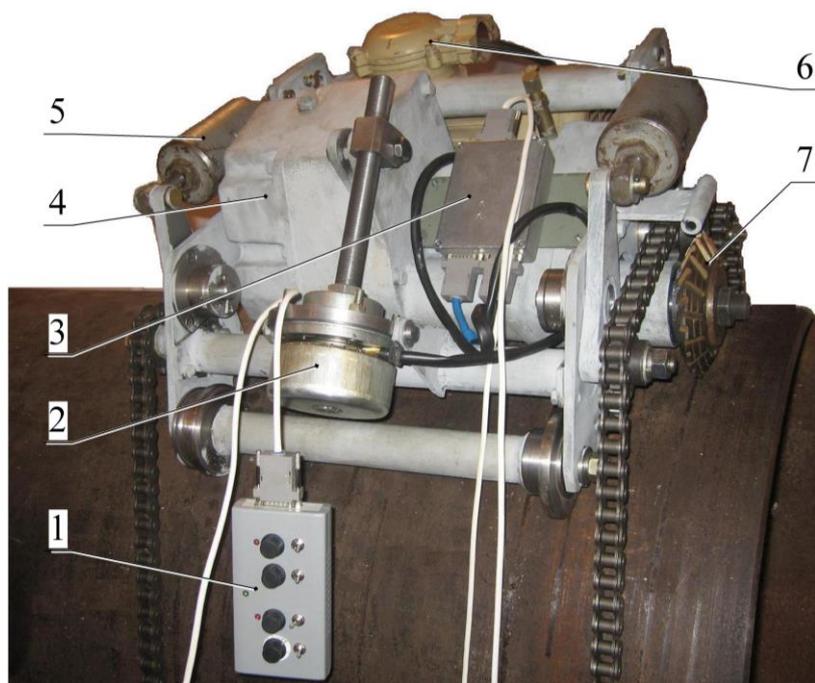
Результаты исследования были использованы при проектировании машин МРТ с системой независимых приводов.

Пятая глава посвящена практическому использованию результатов исследования при создании опытного образца машины МРТ.

Данная машина предназначена для проведения работ по вырезке дефектных участков трубопроводов, соединительных деталей, запорной и регулирующей арматуры на опорожненных нефте- и нефтепродуктопроводах.

Результаты диссертационной работы были использованы в рамках договора № 201450087 от 14.05.2014 г. «Модернизация машины для безогневой резки труб «Волжанка-ЗМ» с АО «Транснефть-Приволга».

В ходе модернизации машина оснащена независимым приводом врезания инструмента, уменьшена энергоёмкость машины, улучшены массо-габаритные показатели (патент №150471). Центральной базой



1-пульт управления; 2-мотор-редуктор привода врезания инструмента; 3-блок управления двигателями; 4-редуктор; 5-натяжители-амортизаторы; 6- асинхронный электродвигатель привода вращения фрезы; 7-фреза

Рисунок 16 - Лабораторный образец машины для резки труб диаметром 315-1440 мм и толщиной стенки до 30 мм

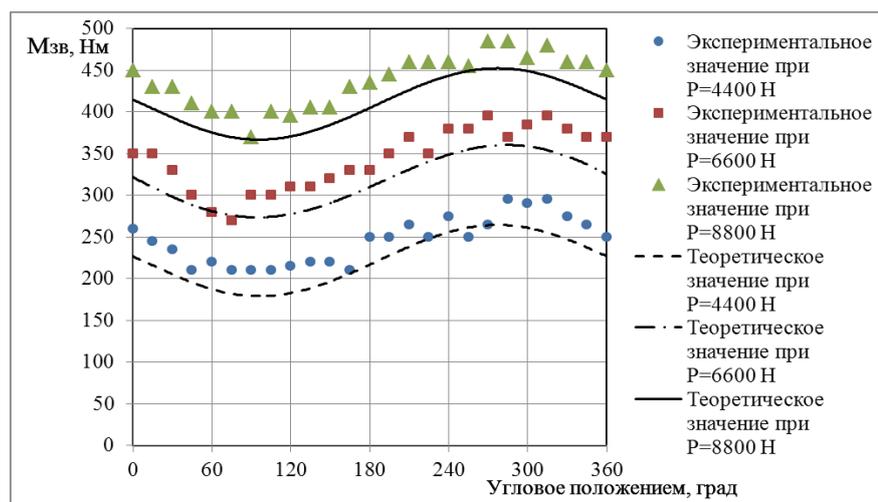


Рисунок 17- График момента на ведущей звёздочке Мзв при различном натяжении приводных цепей; $t=8$; $S=25$ мм/мин

производственного обслуживания АО «Транснефть-Приволга» планируется серийный выпуск машины в 2017 году.

Дальнейшее развитие работы

Предложенные в настоящей работе математические модели согласованной работы приводов машины и расчетно-экспериментальная методика могут быть использованы как основа при решении задач проектирования машин нового поколения с различным набором варьируемых параметров. Для оценки работоспособности машины в условиях холодного климата, необходимо исследовать влияние отрицательных температур окружающей среды на нагруженность приводов.

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Получены теоретические зависимости нагруженности системы приводов вращения инструмента, его врезания и перемещения машины в зависимости от параметров разрезаемой трубы, типа инструмента, условий закрепления и углового положения машины на трубе. Для используемой номенклатуры труб определены минимальные значения сил натяжения приводных цепей, при которых допускается использование машины. Так например, при резке трубы диаметром 530 мм с толщиной стенки 16 мм минимальное усилие натяжения приводных цепей $P=4400$ Н, а для трубы диаметром 1420 с толщиной стенки 25 мм минимальное усилие $P=8800$ Н. В ходе исследований было установлено, что значение потребляемой мощности приводом перемещения зависит от углового положения машины на трубе и колеблется с амплитудой до 30-40% за период реза трубы. Нагруженность привода перемещения при износе инструмента с двухкратным увеличением силы резания возрастает на 15-30 %

2. Разработаны математические модели нагруженности приводов машины при их совместной работе, позволившие установить предельные величины режимов работы машины, исключающие поломку её элементов. Модель позволила оценить нагруженность приводов при различных условиях работы машины, условиях закрепления, углового положения машины на трубе и износе инструмента. В результате установлено, что мощность привода перемещения инструмента не превышает 25 Вт, а мощность привода врезания не более 35 Вт.

3. Разработан алгоритм управления приводами машины в процессе безогневой резки, позволяющий автоматически корректировать режимы резания в зависимости от действия внешних факторов на нагруженность приводов. Система управления приводами с использованием обратной связи и ограничением максимального крутящего момента на приводах позволила стабилизировать силу резания и предотвратить поломку инструмента. Реализованная в схеме управления обратная связь позволяет находиться оператору на безопасном расстоянии от зоны резания и информирует его о текущем состоянии процесса резания. Кроме того с помощью модели были определены расчётные величины токоограничений для двигателей приводов врезки и перемещения из условий прочности элементов машины и инструмента, величина токоограничений составила соответственно 2 А и 1,5 А.

4. Предложена и обоснована новая структурная схема машин для безогневой резки труб большого диаметра на основе применения системы функцио-

нально зависимых приводов вращения инструмента, его врезания и перемещения машины по трубе, позволяющая организовать согласованную работу кинематически не связанных приводов машины. Такая конструкция машины позволила обеспечить рациональную регулировку режимов резания, предохранить элементы машины от поломок и перегрузок, кроме того автоматический привод врезки позволил исключить присутствие оператора в опасной зоне резания трубопровода.

5. Разработан испытательный стенд для обкатки и исследования привода перемещения машины по трубе и привода вращения фрезы. На стенде был определён КПД привода перемещения машины, его экспериментальное значение составило 42..45%. Установлена зависимость момента на выходном валу от тока двигателя, данная зависимость необходима для выставления величины токоограничения на двигателе привода перемещения.

6. С использованием результатов работы спроектирован опытный образец машины безогневой резки труб большого диаметра на базе трёх функционально зависимых электромеханических приводов. Снижено энергопотребление привода вращения инструмента на $\approx 30\%$ (с 2,2 до 1,5 кВт). На разработанную машину получен патент на полезную модель № 130245.

7. Проведено экспериментальное исследование работы машины для безогневой резки труб. Испытания опытного образца машины показали работоспособность и подтвердили достоверность математической модели работы системы приводов. Так, например, отклонения экспериментальных значений вращающего момента на приводах от теоретических не более 10-15%

8. Результаты диссертационной работы использовались при проектировании и производстве машин для безогневой резки труб большого диаметра на предприятии ЦБПО АО «Транснефть-Приволга» г. Новокуйбышевск, а также применяются в учебном процессе кафедры технической механики филиала ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) в г. Златоусте.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в зарубежных журналах, входящих в базу Scopus:

1. Lopatin V.A., Khaziev T.R. Improved Design of Machine for Cold Cutting of Oil Pipes and Gas Pipelines.– Procedia Engineering, Volume 129, 2015, Pages 563-570.

Статьи в журналах из перечня ВАК РФ:

2. Лопатин, Б.А. Исследование нагруженности приводов подачи машины для безогневой резки труб большого диаметра / Б.А. Лопатин, Т.Р. Хазиев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2013. – Т. 13. – С. 28–35.

3. Лопатин, Б.А. Машина для безогневой резки труб большого диаметра / Б.А. Лопатин, Т.Р. Хазиев // Вестник машиностроения. –2014. Вып. 1. – С. 84–87.

4. Хазиев, Т.Р. Разработка и исследование математических моделей работы приводов врезания и перемещения машины для безогневой резки труб большого диаметра / Т.Р. Хазиев, Б.А. Лопатин, Е.А. Полуэктов / Вестник ИжГТУ.– Раздел «Машиностроение». – 2016. – Т.19, №4.– С. 27–30.

Патенты на полезную модель:

5. Пат. № 94497, МПК В23D 21/06; Устройство для резки труб / Б.А. Лопатин, Д.Б. Лопатин, Е.А. Полуэктов, Т.Р. Хазиев. – Оpubл. 27.05.2010. Бюл. №15.

6. Пат. № 130245, МПК В23D 21/10; Устройство для резки труб / Б.А. Лопатин, Д.Б. Лопатин, Е.А. Полуэктов, Т.Р. Хазиев. – Оpubл. 20.07.2013. Бюл. №20.

7. Пат. № 150471, МПК В23D 21/10; Устройство для резки труб / Б.А. Лопатин, Д.Б. Лопатин, Е.А. Ворона, В.В. Хазиев. – Оpubл. 20.02.2015. Бюл. №5.

Публикации в журналах и научных сборниках:

8. Хазиев, Т.Р. Исследование нагруженности отрезной машины при резке труб большого диаметра / Т.Р. Хазиев, Б.А. Лопатин, А.С. Петухов // Наука ЮУрГУ. Материалы 62 научной конференции. Секция технических наук. – Челябинск: ЮУрГУ, 2010. – Т.3. – С.205–209.

9. Хазиев, Т.Р. Исследование нагруженности отрезной машины при резке труб большого диаметра / Т.Р. Хазиев // Новые материалы и технологии НМТ-2010: сб. докладов Всероссийской научн.-техн. конф. – М.: МАТИ – Российский гос. технологический ун-т им. К.Э. Циолковского. – Т. 3. – С. 47–48.

10. Хазиев, Т.Р. Оценка мощности привода перемещения отрезной машины в процессе резания труб большого диаметра / Т.Р. Хазиев, Д.Г. Абузьяров // Наука ЮУрГУ. Материалы 63 научной конференции. Секция технических наук. – Челябинск: ЮУрГУ, 2011. – Т.2. – С.322–326.

11. Хазиев, Т.Р. Оценка кинематических погрешностей механических передач привода перемещения отрезной машины «Волжанка-4» / Т.Р. Хазиев, Д.Г. Абузьяров // Наука ЮУрГУ. Материалы 64 научной конференции. Секция технических наук. – Челябинск: ЮУрГУ, 2012. – Т.2. – С.272–276.

12. Хазиев, Т.Р. Анализ неравномерности перемещения отрезной машины «Волжанка-4» / Т.Р. Хазиев // Наука ЮУрГУ. Материалы 65 научной конференции. Секция технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – Т.2. – С.231–235.

13. Хазиев, Т.Р. Новая конструкция машины для безогневой резки труб большого диаметра / Т.Р. Хазиев, Б.А. Лопатин // Наука ЮУрГУ. Материалы 66 научной конференции. Секция технических наук. – Челябинск: ЮУрГУ, 2014. – С.1500–1504.

14. Хазиев, Т.Р. Применение вентильных двигателей в независимых приводах машины безогневой резки труб большого диаметра / Т.Р. Хазиев, В.М. Сандалов, Е.А. Полуэктов // Наука ЮУрГУ. Материалы 67 научной конференции. Секция технических наук. – Челябинск: ЮУрГУ, 2014. – С.1317–1324.