

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

На правах рукописи



Хазиев Тимур Равилович

**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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор

Лопатин Борис Александрович

Челябинск - 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ РЕЗКИ ТРУБОПРОВОДОВ И ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МАШИН ДЛЯ БЕЗОГНЕВОЙ РЕЗКИ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА .....	10
1.1 Общие сведения о методах резки трубопроводов большого диаметра..	10
1.2 Обзор существующих конструкций машин для безогневой резки трубопроводов большого диаметра .....	14
1.3 Особенности конструкции машины «Волжанка 3М» .....	20
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИВодОВ ВРЕЗАНИЯ ИНСТРУМЕНТА И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАШИНЫ ПО ТРУБЕ	26
2.1 Разработка кинематической схемы машины для безогневой резки труб большого диаметра .....	26
2.2 Исследование нагруженности привода врезания инструмента при изменении параметров резания .....	30
2.3 Исследование нагруженности привода перемещения машины в цикле резки трубопровода при изменением внешних факторов .....	41
3 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАБОТЫ ПРИВОДА ВРЕЗАНИЯ ИНСТРУМЕНТА, ПРИВОДА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАШИНЫ И ПРИВОДА ВРАЩЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА .....	53
3.1 Выбор двигателей привода врезания инструмента, привода перемещения машины и привода вращения инструмента .....	53
3.2 Анализ совместной работы привода перемещения машины и привода вращения инструмента .....	59
3.3 Анализ совместной работы привода врезания инструмента и привода вращения инструмента .....	75
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МАШИНЫ .....	81
4.1 Стендовые испытания привода перемещения машины .....	81
4.1.1 Тарировка привода перемещения машины .....	82

4.1.2	Определение зависимости момента на двигателе привода перемещения от силы затяжки амортизаторов на холостом ходу .....	87
4.2	Испытание привода перемещения машины при резке труб .....	91
4.3	Испытание привода врезания инструмента при резке труб .....	92
5	ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ .....	96
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	102
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	105
	ПРИЛОЖЕНИЯ .....	115
	Приложение А – Исходные данные для исследования нагруженности приводов врезания инструмента и перемещения машины по трубе в среде математического моделирования Mathcad 14 .....	112
	Приложение Б – Исследования нагруженности привода перемещения машины по трубе в среде математического моделирования Mathcad 14 .....	114
	Приложение В – Исследования нагруженности привода врезания инструмента в среде математического моделирования Mathcad 14 .....	125
	Приложение Г – Акт внедрения научно-исследовательской работы на предприятии АО «Транснефть-Приволга» .....	130
	Приложение Д – Акт внедрения научно-исследовательской работы на предприятии ООО НПП «Механика» .....	132

## ВВЕДЕНИЕ

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

Проблема своевременной транспортировки добываемой нефти может быть решена только путем сооружения ряда мощных магистральных нефтепроводов и реконструкцией существующих нефтепроводов с заменой многих сотен километров низконапорных участков.

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. Кроме того повреждение труб при взрыве, а также возможные структурные изменения материала трубы являются нежелательными и часто непредсказуемыми. В связи с этим наибольшее применение получил безогневой метод. В этом случае механическая резка осуществляется с помощью специальных машин, оснащённых фрезой или резцами. В настоящее время в нашей стране наибольшее распространение имеют машины, где в качестве режущего инструмента используется дисковая фреза. Широкое применение получила машина для безогневой резки труб «Волжанка».

Анализ рынка машин МРТ показал, что все машины имеют три существенных недостатка:

– жесткая кинематическая связь привода перемещения и привода вращения инструмента;

– ручная врезка инструмента (фреза);

– отсутствие обратной связи, позволяющей контролировать процесс резания.

Отсутствие регулировки режимов резания из-за жесткой кинематической цепи в приводе перемещения машины приводит к неконтролируемому износу инструмента, к увеличению силы резания, росту нагруженности привода. В случае внезапной поломки инструмента возникают ударные нагрузки, что вызывает разрушение элементов машины. Это приводит к увеличению времени ремонта трубопровода.

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

Отсутствие обратной связи с машиной не позволяет оперативно оценить текущее состояние процесса резки трубопровода, а, следовательно, предпринимать меры при возникновении не штатной ситуации.

В связи с вышеизложенным **целью диссертационной работы** является повышение технического уровня машины для безогневой резки труб большого диаметра применением системы независимых приводов: привода перемещения машины по трубе, привода вращения инструмента и привода врезания инструмента.

**Объект исследования** – машина для безогневой резки труб нефтегазопроводов большого диаметра.

**Предмет исследования** – согласование работы системы независимых приводов машины для безогневой резки труб нефтегазопроводов большого диаметра.

В соответствии с целью работы были поставлены и решены следующие **задачи**:

– анализ существующих машин для безогневой резки труб большого диаметра;

- построение структурной схемы новой машины на базе трёх независимых электромеханических приводов: привода вращения инструмента, привода перемещения машины, привода врезания инструмента;
- теоретическое исследование нагруженности приводов машины в зависимости от действующих факторов;
- разработка и исследование математических моделей совместной работы приводов вращения, перемещения и вращения инструмента;
- проектирование опытного образца машины и экспериментальное исследование работы приводов машины при заданных режимах работы.

**На защиту выносятся** следующие научные положения:

1. Анализ существующих машин и обоснование предложенной кинематической и структурной схемы машины для безогневой резки труб большого диаметра;
2. Полученные аналитические зависимости нагруженности приводов в зависимости от параметров разрезаемой трубы, условий закрепления машины и углового положения машины на трубе;
3. Математические модели работы системы приводов врезания инструмента и перемещения машины по трубе;
4. Результаты вычислительных и натурных экспериментов и сравнительный анализ потребляемой мощности при заданных режимах работы машины;
5. Конструкция МРТ на базе независимых приводов;
6. Реализация результатов работы при проектировании МРТ.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

- предложена и обоснована новая структурная схема МРТ на основе применения системы независимых приводов вращения инструмента, его врезания и перемещения машины по трубе;
- впервые проведены теоретические исследования и получены математические зависимости для оценки нагруженности системы приводов врезания инструмента

и перемещения машины в зависимости от параметров разрезаемой трубы, типа инструмента, условий закрепления и углового положения машины на трубе;

– на основе теоретических исследований нагруженности приводов машины с применением современных средств компьютерного моделирования разработаны и исследованы математические модели совместной работы приводов машины позволяющие устанавливать предельные величины режимов работы машины, исключая поломку её элементов.

**Практическая ценность** работы состоит в следующем:

– впервые получены экспериментальные данные по исследованию работы машины с независимыми приводами врезания инструмента, перемещения машины и вращения инструмента;

– 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);

– разработаны практические рекомендации по проектированию, наладке и управлению машиной;

– повышена безопасность работы оператора при врезании инструмента.

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».

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений.

**В первой главе** приводятся основные сведения о безогневой 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».

**Во второй главе** рассмотрена кинематическая схема новой машины МРТ. Конструкция машины предполагает использование трёх независимых электромеханических приводов, а именно: привод врезания инструмента, привод перемещения машины по трубе, привод главного движения. Для оценки требуемой мощности приводов машины проведены теоретические исследования нагружения элементов приводов, в зависимости от толщины и диаметра разрезаемых труб, положения машины на трубе, натяжения цепей и износа инструмента.

**Третья глава** посвящена разработке и исследованию математических моделей: совместной работы привода врезания инструмента и привода вращения инструмента; привода перемещения машины и привода вращения инструмента. Создана схема управления приводами и выполнена настройка системы управления в пакете математического моделирования VisSim. Получены данные по моментам и частотам вращения на приводах, установлены зависимости влияния приводов друг на друга в ходе работы.

**В четвёртой главе** представлены результаты экспериментального исследования работы машины. Исследования проведены на специальном лабораторном образце машины с независимыми приводами (патент №130245). На этом образце проведена экспериментальная проверка работоспособности машины, подтверждены основные результаты теоретических исследований нагруженности приводов и расчётов мощностей приводов.

**Пятая глава** посвящена практическому использованию результатов исследования на примере модернизации машины МРТ «Волжанка 3М». В результате модернизации машина оснащена независимым приводом врезания инструмента, уменьшена энергоёмкость машины, улучшены массо-габаритные показатели. (патент №150471)

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:



– на пятой Уральской выставке научно- технического творчества молодежи (НТТМ) изобретателей, рационализаторов, конструкторов «Евразийские ворота России» (Челябинск, ЮУрГУ, 2010 г.);

– на всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции «Новые материалы и технологии» – НМТ-2010 (Москва, МАТИ, 2010 г.);

– на XXII международной инновационно – ориентированной конференции молодых учёных и студентов МИКМУС-2010. Будущее машиностроения России (Москва, ИМАШ РАН, 2010г.);

– на шестой Уральской выставке научно- технического творчества молодежи (НТТМ) изобретателей, рационализаторов, конструкторов «Евразийские ворота России» (Челябинск, ЮУрГУ, 2011 г.);

– на научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, ЮУрГУ, 2011 г., 2012 г., 2013 г.);

– на XI всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2011» (Москва, ВВЦ, 2011 г.);

– на VII международном симпозиуме по фундаментальным и прикладным проблемам науки (Миасс, МСНТ, 2012 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.

# **1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ РЕЗКИ ТРУБОПРОВОДОВ И ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МАШИН ДЛЯ БЕЗОГНЕВОЙ РЕЗКИ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

## **1.1 Общие сведения о методах резки трубопроводов большого диаметра**

Классический способ ведения огневых работ на действующих или демонтируемых нефтепроводах включает следующие операции:

- 1) опорожнение нефтепровода от продукта (нефть, нефтепродукт, промывочная вода) перед демонтажем;
- 2) вырезку в трубопроводе "окна" (отверстия) для создания внутри его полости герметизирующего тампона, изолирующего место резки трубопровода от поступления газов;
- 3) создание герметизирующего тампона внутри полости трубопровода;
- 4) резку трубопровода (вырезку "катушки", арматуры, соединительных деталей и т.д.);
- 5) подбивку или перенабивку герметизирующих тампонов; возможен ввод в открытую полость трубопровода твердых тампонов - герметизаторов.
- б) резку концов трубопровода под "шаблон" с последующей обработкой под сварку.

При таком способе возникают определенные трудности:

- "окно", вырезаемое в трубопроводе, должно быть достаточно большим, чтобы обеспечить возможность создания тампона достаточной длины и плотности;
- стенки трубопровода в местах расположения тампонов не поддаются очистке и протирке от настенного парафина, нефти и грязи, что значительно уменьшает устойчивость тампона; не исключается загрязнение тампона на всей его длине и горение в процессе производства огневых работ;
- для достаточной герметизации внутренней полости трубопровода длина тампона должна быть не менее двух-трех диаметров трубопровода, что связано со значительными трудностями, особенно в трубопроводах большого диаметра;

- материалы для герметизирующего тампона должны быть нетоксичными как в холодном, так и в нагретом состоянии, так как тампон формируется в зоне огневых работ;

- в связи с недостаточным качеством, создаваемых в таких условиях герметизирующих тампонов возможна разгерметизация зоны ведения огневых работ, что требует в лучшем случае приостановки их ведения для частичной или полной замены тампона;

- после завершения процесса резки с открытых торцов нефтепровода производится полная или частичная замена тампона для безопасного продолжения огневых работ. При работах с открытого торца трубы сокращается время, повышаются качество и долговечность создаваемых тампонов. Возможен ввод во внутреннюю полость трубопровода и различных механических герметизаторов.

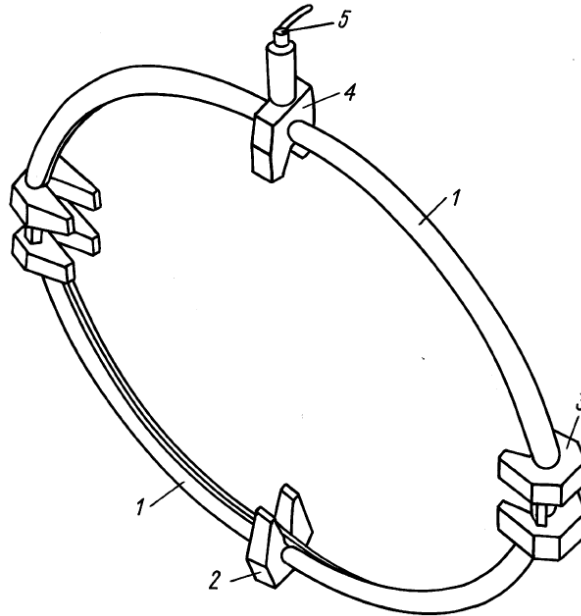
Таким образом, видно, что наиболее опасной и трудоемкой частью при "классическом" виде подготовки и ведения огневых работ является раскрытие торцов трубопровода.

Работы по решению задачи быстрой и безопасной резки трубопроводов возглавил ВНИИСПТнефть (ныне ИПТЭР). Уже в начале семидесятых годов сотрудниками этого института совместно с Институтом электросварки им. Е.О. Патона было найдено принципиальное решение — резка трубопроводов с использованием энергии взрыва. В последующем разработка шнуrowого кумулятивного заряда осуществлялась совместно с Казанским химико-технологическим институтом и другими организациями.

Сущность метода заключается в следующем: заряд, выполненный в виде медной трубки с кумулятивной выемкой, устанавливается по периметру трубы на расстоянии  $h = 10-21$  мм, в зависимости от размеров трубы. В момент взрыва создается направленное действие сфокусированной энергии, что мгновенно разрезает металл. Включение заряда в действие осуществляется дистанционно с помощью электроимпульса. Труборезы кумулятивные кольцевые наружные (ТрККН) предназначены для поперечной резки энергией взрыва стальных трубопроводов и

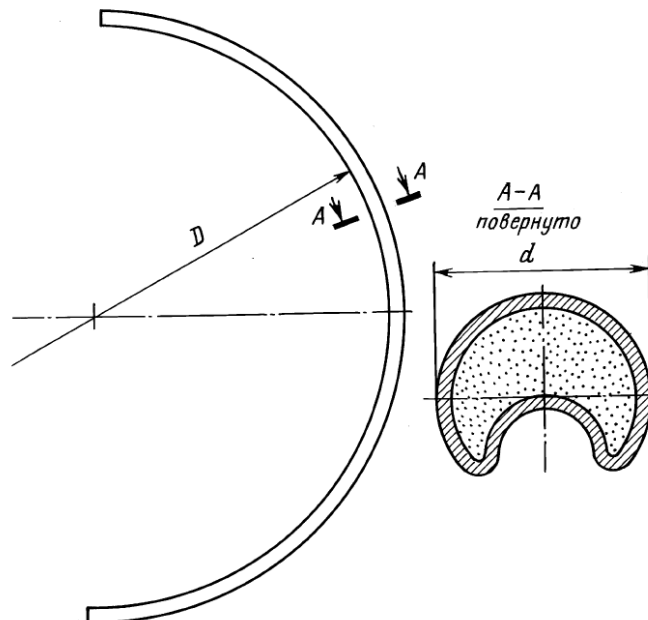
трубчатых конструкций диаметром от 152 до 1420 мм с толщиной стенки от 10 до 30 мм [15], они рассчитаны на разовое использование.

Труборез ТрККН разъемный, состоит из двух полуколец, двух соединительных замков, фиксатора и держателя электродетонатора (рис. 1.1.1- 1.1.2).



1 - полукольцо; 2 - фиксатор; 3 - замок; 4 - держатель электродетонатора; 5 - электродетонатор

Рисунок 1.1.1 – Труборез кумулятивный кольцевой наружный (ТрККН)



D - диаметр полукольца; d - диаметр кумулятивного заряда

Рисунок 1.1.2 – Полукольцо трубореза ТрККН

Труборезы ТрККН применяются при резке:

- трубопроводов и трубчатых конструкций, не содержащих горючих паров и газов;

- нефте- и нефтепродуктопроводов, очищенных и дегазированных или заполненных водой или высокократной пеной;

- трубопроводов, заполненных водой;

Применение ТрККН не допускается:

- в обводненных условиях;

- на местности, содержащей взрывчатые газы, в радиусе разлета осколков;

- на трубопроводах, частично или полностью опорожненных от нефти и нефтепродуктов, и в других случаях, где возможно образование внутри трубопровода смесей горючего с воздухом;

- ближе 5 м от закрытой задвижки.

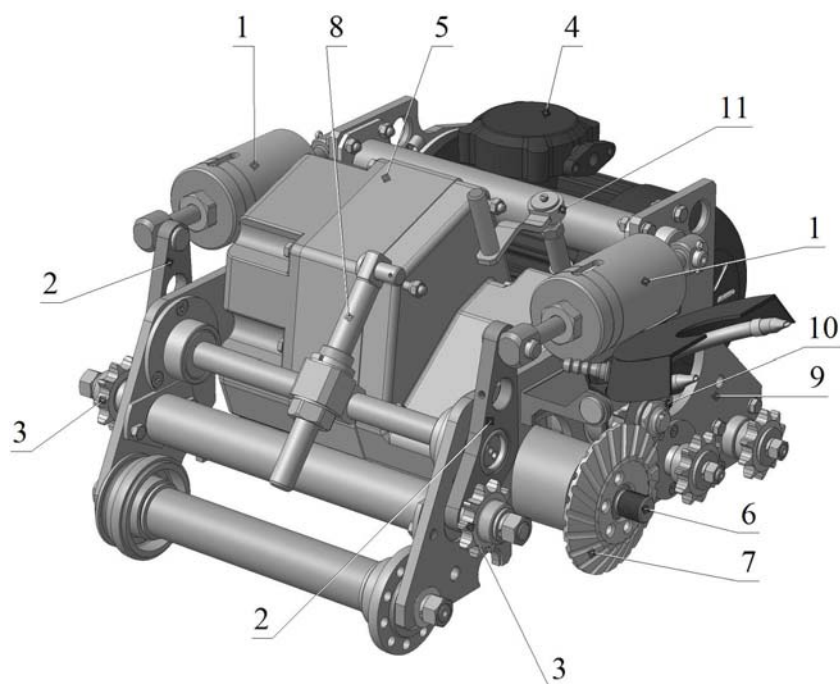
Опыт применения данного метода резки труб выявил ряд недостатков:

- концы труб после резки взрывом (стыки) не могут подвергаться сварке из-за наличия на кромках: омеднения, возможного расслоения металла, надрывов и шероховатостей поверхности кромок;

- требуется дополнительная обработка концов труб после резки ТрККН;

- при установке ТрККН непосредственно возле запорной арматуры необходимо принять меры по защите контрольно-измерительных приборов от осколков.

В силу технологических ограничений применения ТрККН и ряда недостатков выявленных в ходе эксплуатации трубореза наибольшее применение получил безогневой метод резки труб, который является более безопасным [52, 53, 55]. В этом случае механическая резка осуществляется с помощью специальных машин, оснащённых фрезой или резцами [81]. В настоящее время распространение получили машины, где в качестве режущего инструмента используется дисковая фреза [2, 3]. Одной из последних серийных моделей, получивших широкое применение в нашей стране, является машина «Волжанка 3М» [48], выпускаемая на предприятии ЦБПО АО «Транснефть-Приволга» г. Новокуйбышевск (рис. 1.1.3).



1 - натяжитель-амортизатор; 2 - рычаг; 3 - звёздочка; 4 – вал двигателя; 5 – редуктор; 6 - выходной вал редуктора; 7 – фреза; 8 – винтовой механизм подачи; 9 – корпус тележки; 10 - приводная звёздочка; 11 – рукоятка включения подачи

Рисунок 1.1.3 – Машина безогневой резки труб «Волжанка 3М»

Рез осуществляется за счёт перемещения машины по поверхности трубы. Машина позволяет осуществить резку труб диаметром 320..1440 мм при толщине стенки до 30 мм.

Вырезка дефектного участка производится труборезными машинами с приводами во взрывобезопасном исполнении с частотой вращения режущего инструмента не более 60 об/мин, и подачей не более 30 мм/мин. Вырезка дефектного участка осуществляться одновременно двумя труборезными машинами.

## 1.2 Обзор существующих конструкций машин для безогневой резки трубопроводов большого диаметра

Произведем анализ существующих конструкций машин с целью выявления их достоинств и недостатков.

Машины для безогневой резки труб большого диаметра «Волжанка» (МРТ 219..530, МРТ 530...1220, МРТ 219...820), выпускаемые ОАО «Приволжскнефтепровод», (рис. 1.2.1) содержат тележку с установленным на ней режущим инструментом с приводом его вращения, винтовой механизм врезания и механизм подачи инструмента (перемещение тележки по трубе), выполненный в виде редуктора с приводными звездочками и охватывающих разрезаемую трубу цепей. Привод вращения режущего инструмента содержит редуктор и коническую зубчатую передачу. Механизм подачи имеет редуктор, состоящий из двух червячных и зубчатой передач, и муфту включения рычажного типа. Закрепление цепи на трубе осуществляется за счет сил трения, обеспечиваемых натяжным устройством. Машины могут комплектоваться пневмо-, гидро- или электродвигателем взрывозащищенного исполнения.

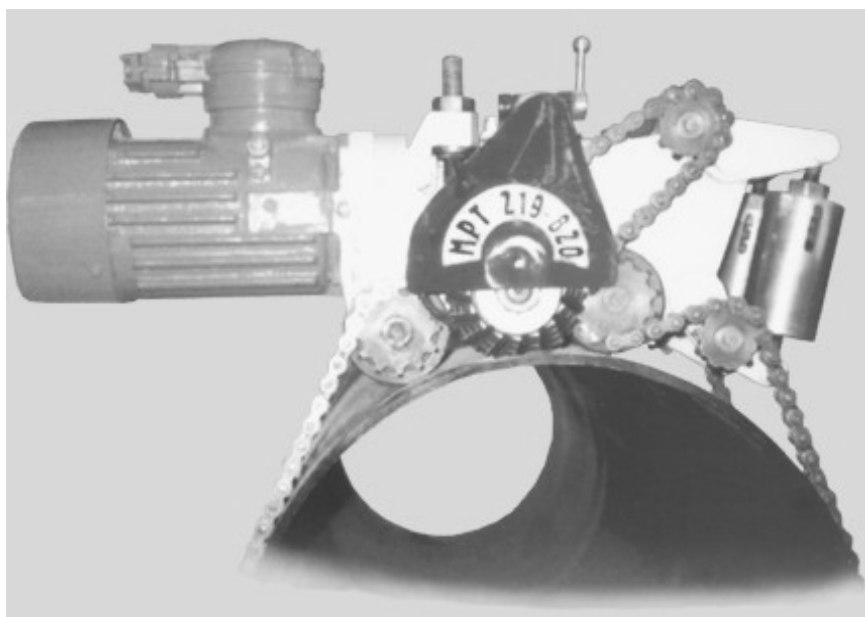


Рисунок 1.2.1 – Машина «Волжанка» (МРТ 219...820)

Машины МРТ имеют высокую надежность и хорошую сходимость реза (при резке труб диаметром 1220 мм — не более 3 мм), более низкую стоимость по сравнению с аналогичными машинами, выпускаемыми в России и за рубежом.

Существенным недостатком машин МРТ «Волжанка» является значительная масса (130 кг), и ограниченный диапазон разрезаемых труб (219...820 и 530...1220 мм соответственно) с толщиной стенки до 20 мм.

Машины для безогневой резки труб СМ 307, выпускаемые ООО «Пайперз» г. Пермь (рис. 1.2.2) имеют аналогичную конструкцию, ограниченный диапазон разрезаемых труб (315...1420 мм) с толщиной стенки до 20 мм, при меньшей массе (не более 95 кг) [80], но имеют большую длину, трудоемкость изготовления и стоимость чем машины МРТ. Машина комплектуется только с электрическим приводом.



Рисунок 1.2.2 – Машина СМ 307

Высокими эксплуатационными характеристиками обладают труборезы фирмы Файн (Германия) (рис. 1.2.3) – это высокая надежность, точность резания, широкий диапазон разрезаемых труб (250...3000 мм) с толщиной стенки до 45 мм [78], защита редуктора от перегрузки, но самым существенным недостатком этих машин является их высокая стоимость (более чем в два раза, чем машины МРТ), большой габарит по длине, что потребует значительно большего объема земляных работ при разрезке труб небольшого диаметра при выполнении ремонтных работ.





а)



б)

а) машина с гидроприводом

б) машина с электроприводом

Рисунок 1.2.3 – Машина фирмы «Файн»

Машина гидравлическая для безогневой резки труб 352-218, выпускаемая ОАО «Омскгидропривод», ОАО «Транссибнефть», ОАО «Сибтранснефтепродукт» г. Омск (рис. 1.2.4) обеспечивает ограниченный диапазон разрезаемых труб (352...1420 мм) с толщиной стенки до 20 мм, небольшую массу (до 50 кг), но снабжается только гидроприводом, что требует комплектования машины гидростанцией, масса которой составляет 120 кг. Машина малопригодна для работы в суровых климатических условиях, например, в районах Крайнего Севера и Сибири в зимних условиях.

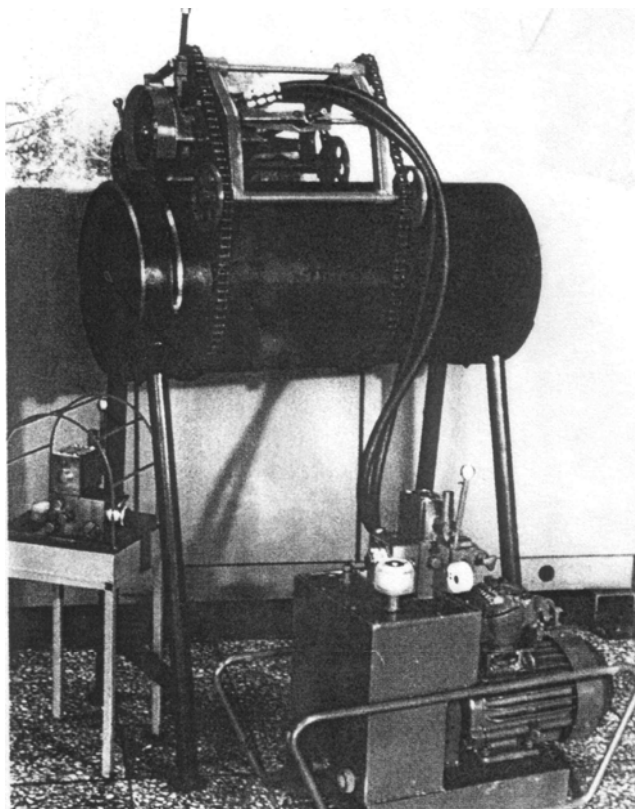


Рисунок 1.2.4 – Машина гидравлическая

Более совершенной и экономичной по сравнению с вышерассмотренными конструкциями является машина для безогневой резки труб МРТ 325-1420 «Волжанка-2».

Эта машина (рис. 1.2.5) отличается от машины МРТ «Волжанка» тем, что снабжается легким компактным надежным планетарным редуктором (патент № 39371), что позволяет снизить массу машины до 110 кг, блочная конструкция

привода повышает ремонтпригодность [17, 79]. Машина обеспечивает широкий диапазон разрезаемых труб (325...1420 мм), имеет более низкую стоимость.

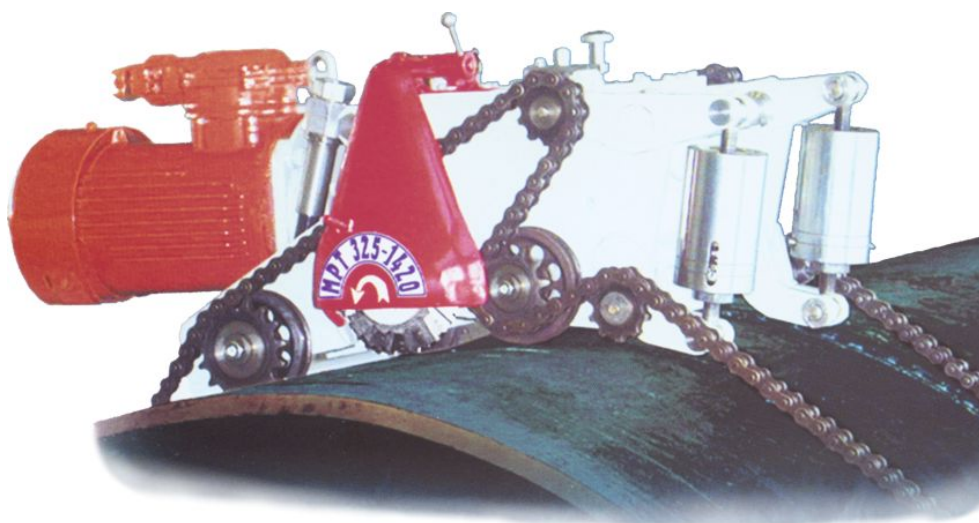


Рисунок 1.2.5 – Машина «Волжанка-2» (МРТ 325-1420)

Основными недостатками машины МРТ 325-1420 «Волжанка-2» являются большие габариты, обусловленные ортогональным расположением двигателя относительно оси трубы, что требует значительного свободного пространства вокруг трубы при ее резке, кроме того, отсутствие предохранительных устройств в кинематических цепях приводов инструмента и его подачи снижают их надежность. Наличие зубчатой муфты включения, конической и червячных передач усложняет конструкцию, снижает ее экономичность и долговечность. Кроме того, не обеспечена надежная смазка передач приводов в разных фазах движения тележки по трубе, что приводит к преждевременному выходу передач из строя.

Машина для безогневой резки труб больших диаметров МРТ 325-1420 «Волжанка 3» (рис. 1.2.6) является усовершенствованной машиной «Волжанка 2».



Рисунок 1.2.6 – Машины «Волжанка 3»

Преимущества данной машины по сравнению с «Волжанкой 2» являются меньшие масса и габариты, вследствие того, что двигатель расположен параллельно оси трубы, более высокая надёжность, увеличенный ресурс работы машины до 2000 ч., более высокий КПД привода, что позволяет снизить уровень энергопотребления до 10%, меньший уровень шума [18].

### 1.3 Особенности конструкции машины «Волжанка 3М»

В настоящее время в нашей стране наибольшее распространение имеют машины, где в качестве режущего инструмента используется дисковая фреза. Широкое применение получила машина для безогневой резки труб типа «Волжанка 3М».

Конструкция МРТ «Волжанка 3М».

Машина МРТ «Волжанка 3М» для резки труб (рис. 1.3.1, 1.3.2) содержит тележку с установленным на ней режущим инструментом с приводом его вращения, механизмом врезания и механизмом подачи инструмента, выполненном в ви-

де планетарного редуктора с приводной звездочкой и устройством его включения, содержит цилиндрический многоступенчатый редуктор привода режущего инструмента, входной вал которого расположен на одной оси с выходным валом планетарного редуктора привода подачи, а механизм включения привода подачи содержит фиксатор, жестко соединяющий при его включении центральное колесо планетарного редуктора привода подачи с корпусом привода. Фиксатор выполнен в виде зубчатого сектора входящего с помощью винта в соединение с зубчатым венцом, нарезанным на наружной поверхности центрального колеса планетарного редуктора привода подачи. Приводная звездочка привода подачи закреплена на выходном валу редуктора срезным штифтом, выполняющим роль предохранительного устройства при перегрузке привода.



Рисунок 1.3.1 – Машины «Волжанка 3М»

Применение цилиндрического редуктора в приводе вращения инструмента позволяет максимально повысить КПД привода, снизить шум при его работе и, как следствие, позволяет осуществлять резку за один проход труб с большей толщиной стенки. Применение жесткой фиксации центрального колеса планетарного

редуктора с корпусом привода при включении привода подачи повышает надежность и долговечность механизма включения.

Конструкция машины «Волжанка 3М» поясняется рис. 1.3.2, где изображен общий вид машины, а на рис. 1.3.4 разрез по сечению А-А.

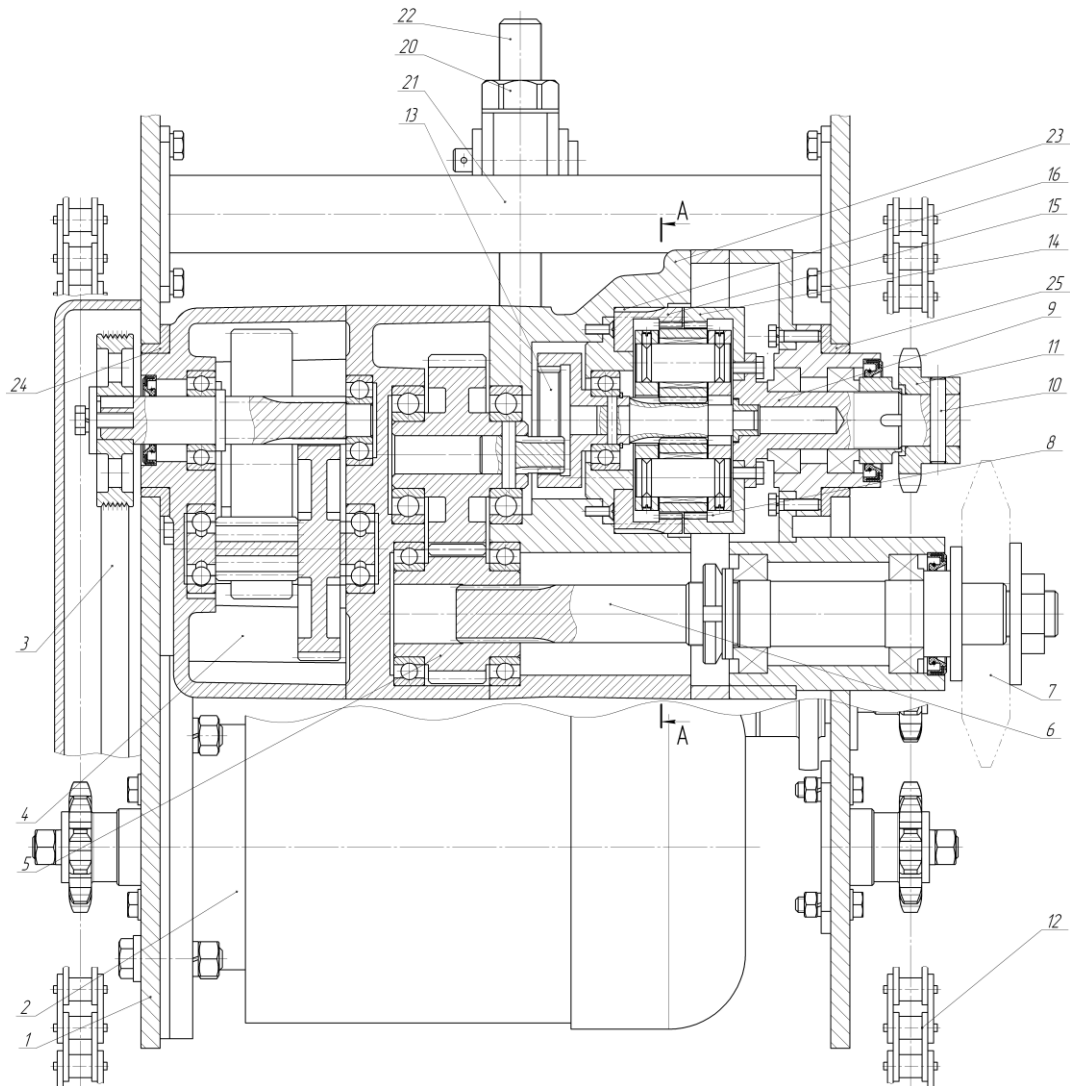


Рисунок 1.3.2 – Машина «Волжанка 3М»

Машина содержит тележку 1, привод режущего инструмента, состоящий из электродвигателя 2, ременной передачи 3, цилиндрического редуктора 4, цилиндрической зубчатой передачи 5, шпинделя 6 с установленным на нем режущим инструментом 7.

Привод подачи включает планетарный редуктор 8, на выходном валу 9 которого установлена с помощью срезного штифта 10 приводная звездочка 11, нахо-

дящаяся в зацеплении с неподвижной цепью 12. Ведущий вал планетарного редуктора привода подачи соединен со шпинделем 6 через цилиндрическую зубчатую передачу 5 и передачу внутреннего зацепления 13. Одно из центральных колес 14 планетарного редуктора соединено жестко с его выходным валом 9, а другое центральное колесо 15 установлено свободно. На наружной поверхности центрального колеса 15 нарезан зубчатый венец 16. Механизм включения привода подачи содержит фиксатор, выполненный в виде зубчатого сектора 17, винта 18 и ручки 19. Механизм врезания инструмента содержит гайку 20, опирающуюся на поперечину тележки 21 и винт 22, шарнирно соединенный с корпусом привода 23. Корпус установлен в тележке на втулках 24, 25 с возможностью поворота на них.

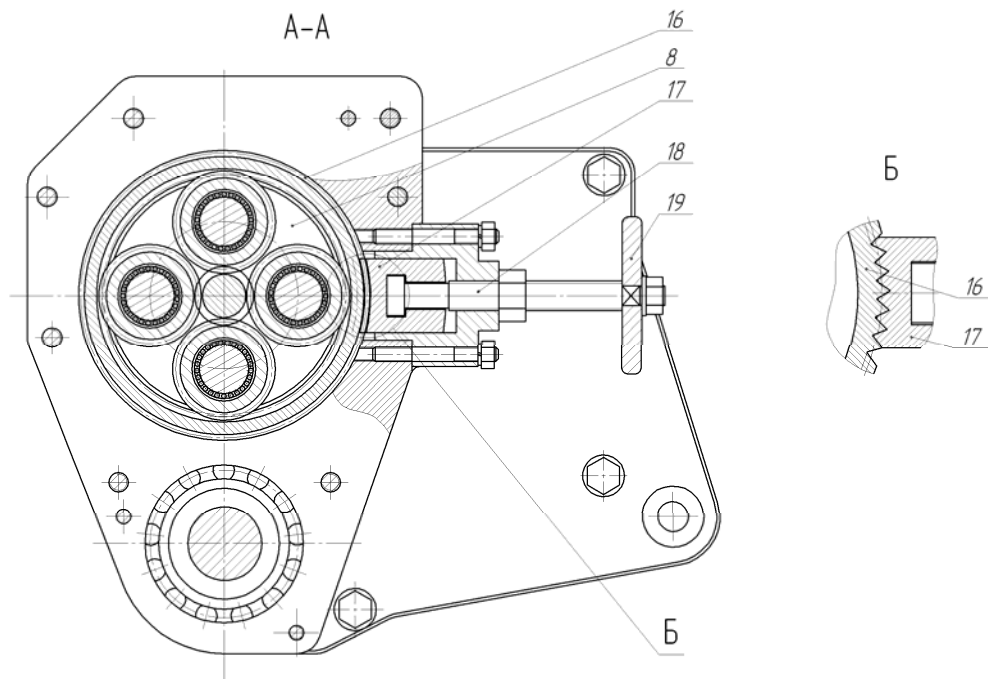


Рисунок 1.3.3 – Машины «Волжанка 3М»

Машина «Волжанка 3М» работает следующим образом.

Вращение от вала двигателя 2 через ременную передачу 3 передается на ведущий вал редуктора 4, от ведомого вала редуктора через цилиндрическую зубчатую передачу 5 на шпиндель 6 и установленный на нем режущий инструмент (фрезу) 7. Врезание режущего инструмента производится с помощью винтового

механизма путем вращения гайки 20, поворот которой вызывает перемещение винта 22 и поворот корпуса 23 на втулках 24, 25 корпуса тележки 1.

Подача инструмента (перемещение тележки 1 по трубе) производится приводом подачи, который приводится в движение от ведомого вала редуктора 4 привода вращения инструмента. Вращение от этого вала через передачу внутреннего зацепления 13 передается на ведущий вал планетарного редуктора 8. При остановленном центральном колесе 15 вращение передается ведомому валу 9 и установленной на нем с помощью срезного штифта 10 приводной звездочке 11. Звездочка 11, которая находится в зацеплении с неподвижной цепью 12, охватывающей разрезаемую трубу, приводит в движение тележку 1, а вместе с ней режущий инструмент 7. Включение механизма подачи осуществляется фиксацией центрального колеса 15 с корпусом привода 23 путем ввода зубчатого сектора 17 с помощью винта 18 в соединение с зубчатым венцом 16 центрального колеса 15. При отвинчивании винта 18 с помощью ручки 19 зубчатый сектор 17 выходит из зацепления с зубчатым венцом 16 центрального колеса 15 и передача вращения приводной звездочке 11 прекращается. В результате тележка 1 останавливается, подача (перемещение тележки по трубе) прекращается.

При аварийных перегрузках в приводе подачи происходит разрушение срезного штифта 10 и вращение на приводную звездочку 11 не передается, подача останавливается.

#### Недостатки МРТ «Волжанка 3М»

Главным недостатком машины для резки труб большого диаметра МРТ «Волжанка 3М» является жестко связанные кинематические цепи привода подачи и привода главного движения, что не позволяет регулировать скорость подачи.

Регулирование скорости подачи позволяет изменять силу резания. Например, при прохождении сварного шва глубина резания возрастает в 1,2-1,3 раза, что приводит к существенному увеличению сил резания. Вследствие чего происходит перегрузка двигателей и приводов машины. То же самое происходит при затуплении инструмента. В этих случаях как раз и нужно уменьшать подачу, чтобы сни-



зять силы резания и нагрузку на привод, чего не позволяет сделать существующая конструкция.

Анализ рынка машин МРТ показал, что все машины имеют два существенных недостатка:

– жесткая кинематическая связь привода перемещения и привода вращения инструмента;

–ручное врезание инструмента (фрезы).

Отсутствие регулировки режимов резания из-за жесткой кинематической цепи в приводе перемещения машины приводит к преждевременному износу инструмента, соответственно происходит увеличение силы резания, вследствие чего возрастает нагруженность привода, а в случае внезапной поломки инструмента возникают ударные нагрузки, что вызывает разрушение элементов машины.

Ручное врезание инструмента является небезопасным т.к. оператор осуществляет работу вблизи зоны резания. Особенно опасным является первое врезание инструмента т.к. в трубопроводе могут присутствовать горючие остатки нефтепродуктов [10, 11, 21].

В связи с вышеизложенным, актуальной задачей являлось совершенствование машины МРТ «Волжанка 3М», направленное на устранение указанных недостатков.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИВодОВ ВРЕЗАНИЯ ИНСТРУМЕНТА И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАШИНЫ ПО ТРУБЕ

### 2.1 Разработка новой кинематической схемы машины для безогневой резки труб большого диаметра

Эффективность использования металлорежущего оборудования зависит от рационального проведения процессов обработки металлов резанием, которое достигается в том случае, если: а) режущая часть инструмента имеет оптимальные геометрические параметры и качественную заточку лезвий; б) обработка ведётся с технически и экономически обоснованными подачами  $S$  и скоростями резания  $v$ ; в) кинематические и динамические возможности механизмов коробки подач и коробки скоростей позволяют реализовать обоснованные значения подач  $S$  и скорости резания  $v$  [16, 47]. Таким образом, для повышения технико-экономических показателей МРТ при резке труб с разной толщиной стенки (от 8мм до 30мм) необходимо обеспечить рациональные режимы резания. Как известно из теории резания, производительность фрезерования определяется объемом снятого слоя металла и находится из выражения:

$$Q = Bts_zzn, \quad (2.1.1)$$

где  $B$  – ширина фрезерования;

$t$  – глубина фрезерования;

$s_z$  – подача на зуб;

$z$  – число зубьев фрезы;

$n$  – частота вращения фрезы.

Ширина фрезерования  $B$  определяется геометрическими параметрами применяемого инструмента, которые обусловлены его прочностью. Глубина фрезерования  $t$  зависит от толщины стенки трубы, если резка осуществляется за один проход, то глубина фрезерования равна толщине стенки трубы. Частота вращения

режущего инструмента не должна превышать 60 об/мин [54]. Таким образом, параметры  $B$ ,  $t$  и  $n$  остаются постоянными на протяжении всего процесса резания конкретного трубопровода, в то время как величина подачи может меняться, следовательно, увеличение производительности работы МРТ можно обеспечить подбором рациональной подачи  $s_z$ . Ещё одним фактором, влияющим на производительность МРТ и её технико-эксплуатационных характеристик, является стойкость инструмента  $T$ . Как показано на рис. 2.1.1 где  $S_1 < S_2 < S_3 < S_4 < S_5$ , с уменьшением подачи  $S$  увеличивается количественное значение стойкости  $T$  инструмента [16, 19, 46]. Следовательно, для продления ресурса работы инструмента в момент его критического износа необходимо скорректировать подачу, уменьшив её до определённого значения, обеспечивая тем самым безостановочный рез трубы. Так как при критическом износе инструмента резко увеличивается сила резания, возрастает нагруженность машины, если не предпринять мер по её стабилизации, может произойти внезапная поломка инструмента [75]. Это в свою очередь приведёт к возникновению ударных нагрузок на машину, которые вызывают разрушение элементов машины и её остановку.

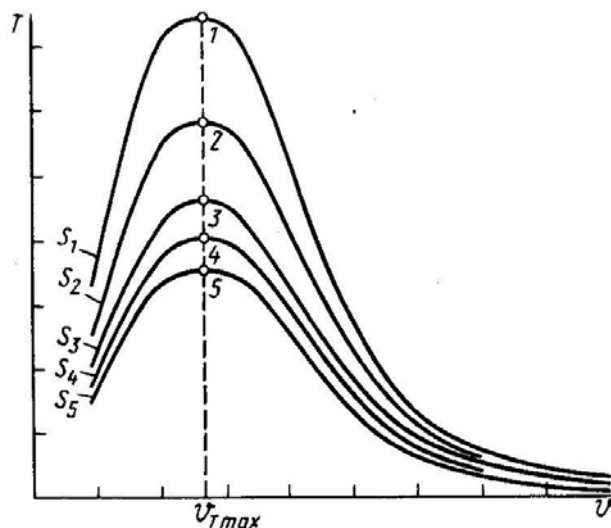
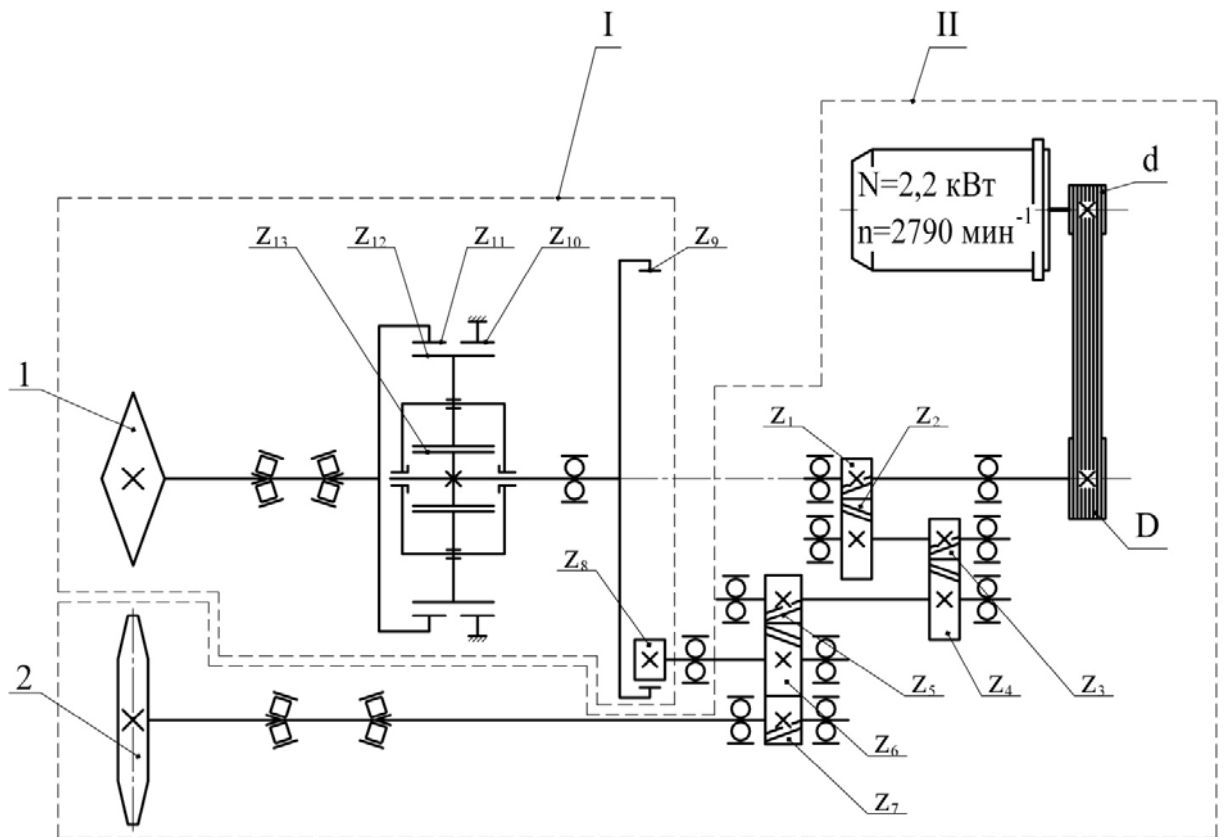


Рисунок 2.1.1 – График зависимости  $T(v)$  при различных значениях подачи

В ходе проектирования МРТ новой конструкции за прототип была выбрана машина «Волжанка 3М», кинематическая схема которой представлена на рисунке 2.1.2



I – привод перемещения машины, II – привод вращения инструмента

Рисунок 2.1.2 – Кинематическая схема машины «Волжанка 3М»

В основу машины новой конструкции положена техническая задача повышения надежности машины, снижение стоимости и времени ремонта трубопровода, а также повышение безопасности работы с машиной путём применения независимых приводов подачи инструмента [1, 7, 9, 40].

Кинематическая схема машины новой конструкции представлена на рисунке 2.1.3. В отличие от кинематической схемы машины «Волжанка 3М», где вращение инструмента и перемещение машины по трубе осуществлялось от одного электродвигателя при ручном врезании инструмента, предложенная схема включает в себя три независимых электромеханических привода, а именно: привод главного движения I, привод круговой подачи II и привод подачи врезания инструмента III. Привод главного движения осуществляет вращение фрезы с постоянной скоростью. Он содержит электродвигатель, ремённую передачу и зубчатые передачи. Привод круговой подачи служит для перемещения машины по трубе,

он состоит из электродвигателя, трёх последовательно расположенных планетарных передач и ведущей звёздочки цепной передачи. Привод подачи врезания, необходимый для перемещения фрезы перпендикулярно оси трубы

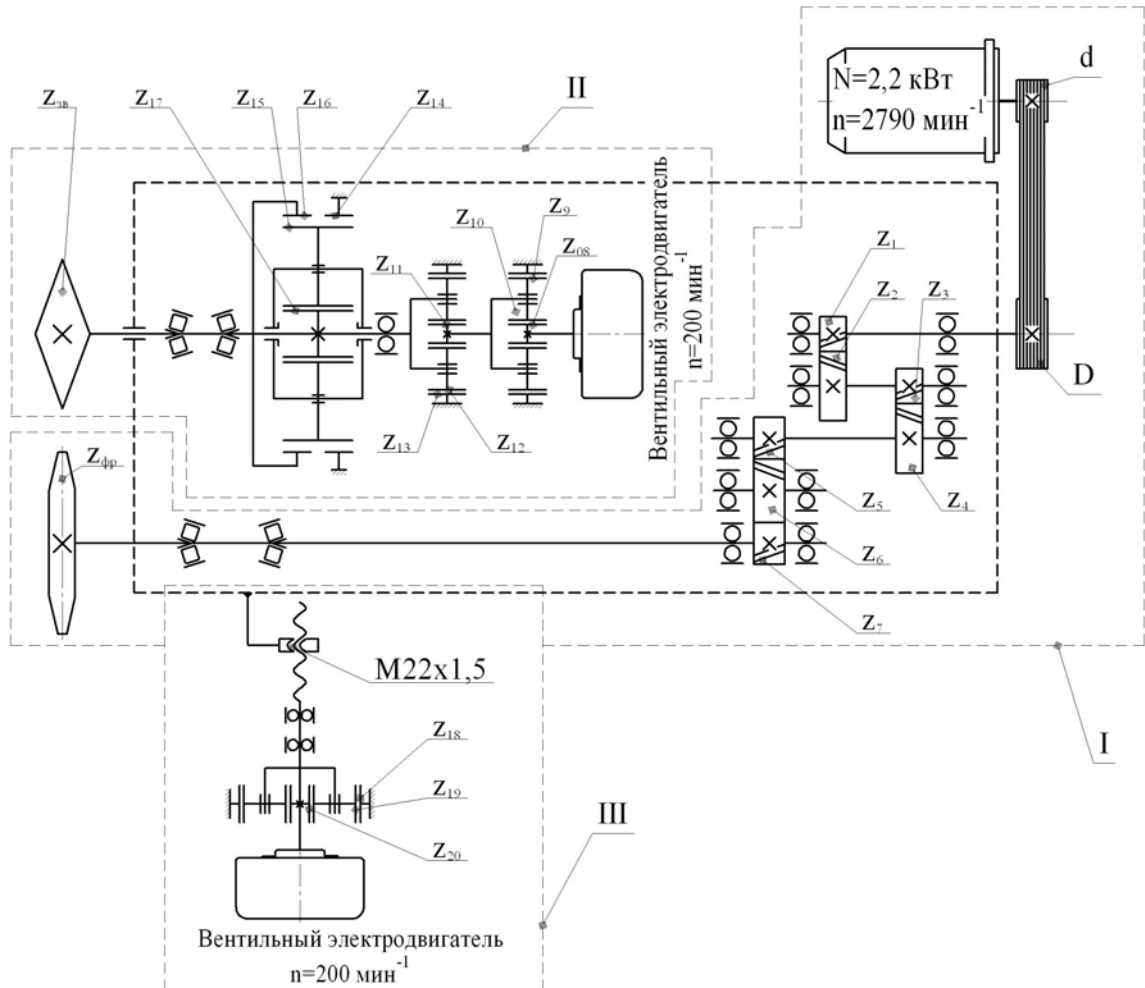


Рисунок 2.1.3 – Кинематическая схема машины новой конструкции

содержит мотор – редуктор и передачу винт – гайка. Применение независимых приводов подач инструмента позволяет использовать в них вентильные электродвигатели с системой управления [51], исключающей перегрузки приводов подач, поломку инструмента и элементов машины при резке труб.

## 2.2 Исследование нагруженности привода врезания инструмента при изменении параметров резания

Кинематическая схема машины позволяет реализовать три режима её работы: первый – одновременная работа главного привода (привод вращения инструмента) и привода подачи врезания; второй режим – одновременная работа главного привода и привода круговой подачи инструмента; третий режим - одновременная работа всех трёх приводов машины. Момент первоначального врезания в трубу проходит при первом режиме работы, в этом случае врезание фрезы обеспечивается приводом подачи врезания, а вращение фрезы - главным приводом. Соответственно нагрузка на главном приводе, обусловленная силой резания, возрастает с увеличением подачи врезания, в то время, как и на самом приводе подачи врезания наблюдается увеличение нагрузки.

Расчёт совместной нагруженности приводов является одной из основных задач проектирования новой конструкции МРТ. При проектировании привода подачи врезания был проведён анализ возможных эксплуатационных нагрузок, возникающих в процессе врезания инструмента. В процессе резания труб разного диаметра и толщины стенки наблюдается значительное изменение усилий действующих на машину. В первоначальный момент резания фреза располагается в верхнем положении, вследствие чего между трубопроводом и фрезой существует зазор  $Y_0$ , необходимый для безопасного подвода инструмента (рис. 2.2.1). Величина зазора зависит как от диаметра трубы, так и от диаметра фрезы. С увеличением диаметра трубопровода зазор  $Y_0$  увеличивается, в свою очередь увеличение диаметра фрезы приводит к уменьшению зазора  $Y_0$ . В этом случае возникает необходимость подбора инструмента при резании труб определённого диаметра и толщины стенки. Величина зазора определяется как:  $Y_0 = DO - R_{\phi p} - R_{Tp}$ , где  $R_{\phi p}$  – радиус фрезы,  $R_{Tp}$  – радиус трубы,  $DO$  – расстояние между осями трубы и фрезы. Из рис. 2.2.1 следует:

$$Y_0 = DO - R_{\text{Фр}} - R_{\text{Тр}} = \sqrt{(\sqrt{(R_{\text{Фр}} + r)^2 - (0,5L)^2} + b)^2 + a^2} - R_{\text{Фр}} - R_{\text{Тр}}. \quad (2.2.1)$$

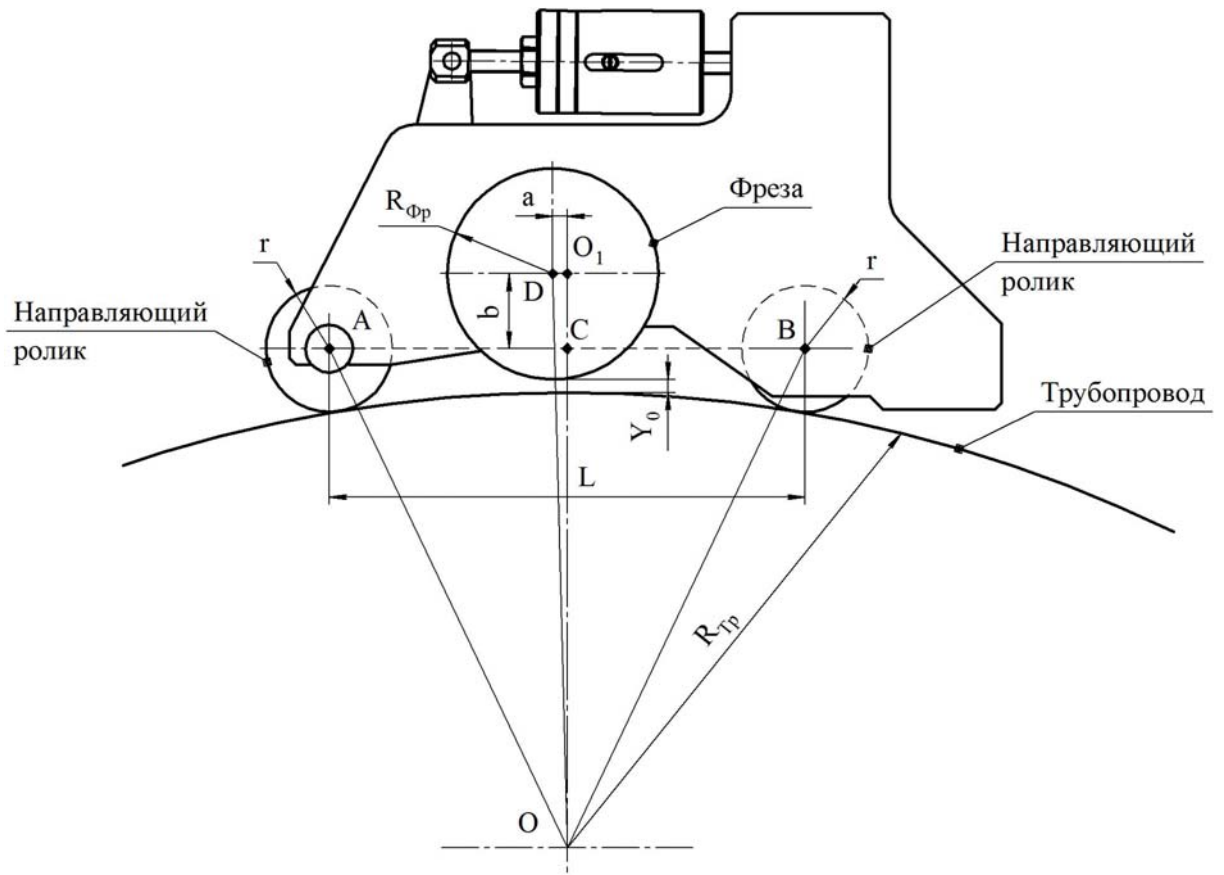


Рисунок 2.2.1 – К определению зазора  $Y_0$

Таким образом, из условия существования гарантированного зазора  $Y_0$  по выражению (2.2.1) можно определить максимальный диаметр фрезы при заданном диаметре разрезаемой трубы. Это позволит исключить проблему установки инструмента при монтаже машины на трубопроводе.

К режимным параметрам фрезерования относят: скорость резания  $V$ , подачу  $S$ , глубину  $t$  и ширину  $B$  фрезерования. Максимальные значения скорости вращения и подачи инструмента при работе отрезных машин регламентированы отраслевыми нормами [26, 54]. Ширина и глубина фрезерования определяется геометрическими параметрами инструмента (фрезы) и диаметром трубопровода. Для анализа режимных параметров фрезерования необходимо рассмотреть схему привода вращения инструмента (рис. 2.2.2). Врезание режущего инструмента производится с

помощью привода врезки, вращение от мотор – редуктора передаётся на винт врезки, который вызывает перемещение гайки и поворот корпуса на угол  $\varphi_{\Pi}$ , вследствие чего происходит вертикальное перемещение фрезы.

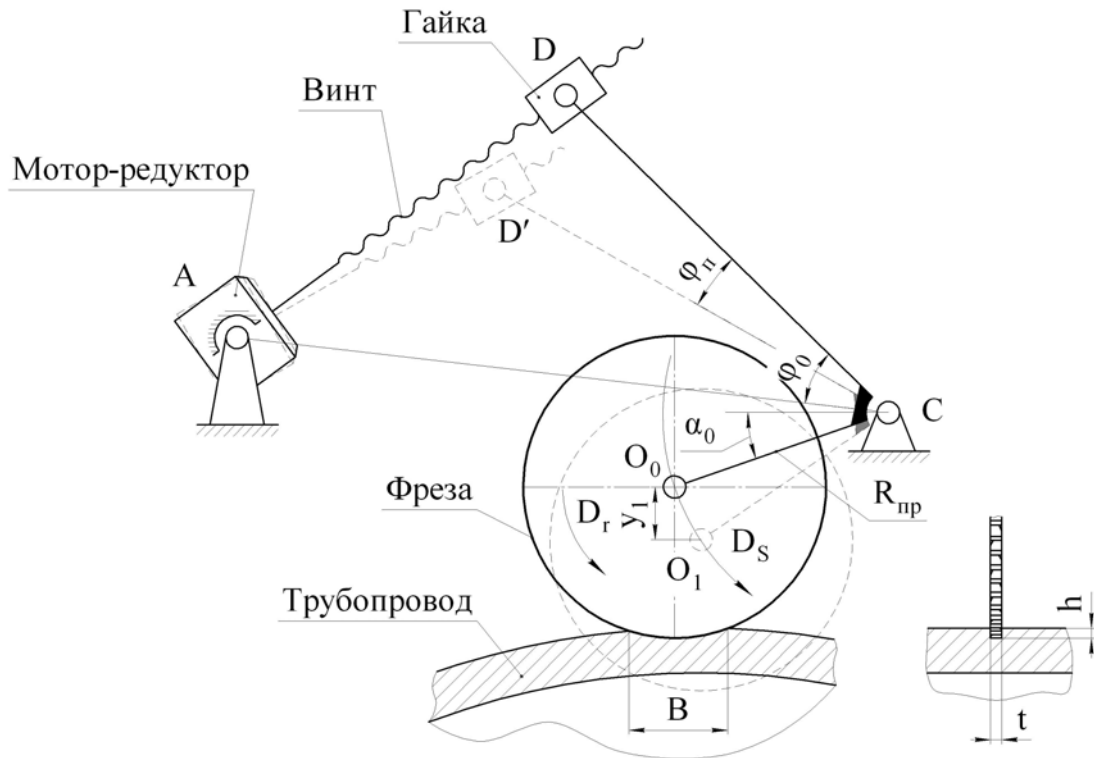


Рисунок 2.2.2 – Схема привода врезания инструмента

Для установления зависимости скорости вертикального перемещения  $y_1$  (подачи) фрезы от угла поворота  $\varphi_{BM}$  вала мотор-редуктора привода подачи врезания рассмотрим рисунок 2.2.2, где в  $\triangle ADC$  сторона  $AD = \sqrt{DC^2 + AC^2 - 2 \cdot DC \cdot AC \cdot \cos \varphi_0}$ , а в  $\triangle AD'C$  сторона  $AD' = \sqrt{D'C^2 + AC^2 - 2 \cdot D'C \cdot AC \cdot \cos(\varphi_0 - \varphi_{\Pi})}$ , разница отрезков  $AD$  и  $AD'$  есть величина перемещения гайки по винту врезки, следовательно  $AD - AD' = \frac{\varphi_{BM}}{360^0} p$ , где  $\varphi_{BM}$  - угол поворота вала мотор-редуктора,  $p$  - шаг резьбы винта врезки. Найдём угол поворота  $\varphi_{\Pi}$  корпуса привода:



$$\varphi_{II} = \varphi_0 - \arccos \left[ \frac{D'C^2 + AC^2 - \left[ \sqrt{DC^2 + AC^2 - 2 \cdot DC \cdot AC \cdot \cos \varphi_0} - \frac{\varphi_{BЭ}}{360^0} p \right]^2}{2 \cdot D'C \cdot AC} \right] \quad 2.2.2$$

Врезка инструмента осуществляется путем поворота корпуса привода перемещения на цапфах, скорость поворота обуславливает подачу врезания  $S$ . Определим вертикальное перемещение фрезы  $y_1$  из рисунка 2.2.2,

$$Y_1 = R_{II} (\sin(\varphi_{II} + \alpha_0) - \sin(\alpha_0)) \quad 2.2.3$$

где  $R_{II}$  – радиус поворота корпуса привода

Рабочая нагрузка привода подачи врезания обусловлена силой резания, которая в процессе врезания возрастает с увеличением глубины и ширины фрезерования. На рис. 2.2.3 изображены последовательные положения фасонной фрезы при её врезании. В начальном положении и при холостом ходе сила резания  $P_z = 0$ , т.к. между фрезой и трубопроводом существует зазор. По мере перемещения происходит врезание фрезы на расстояние  $h = Y_1 - Y_0$ , где  $Y_0$  – расстояние от трубопровода до фрезы в её начальном положении,  $Y_1$  – величина перемещения фрезы от её начального положения. Минутная подача инструмента при врезании определяется скоростью перемещения инструмента перпендикулярно оси трубы:

$$S_M = \frac{h}{t_{Bp}} \quad 2.2.4$$

где  $t_{Bp}$  – время врезания инструмента, тогда подача на зуб:

$$S_Z = \frac{S_M}{zn} \quad 2.2.5$$

где  $z$  – число зубьев фрезы;

$n$  – частота вращения фрезы.

Из рис. 2.2.3 видно, что при использовании фасонной фрезы глубина фрезерования определяется перемещением  $h$  и геометрическими параметрами фрезы, таким образом, на рабочей поверхности фрезы с углом профиля  $\alpha_1$  глубина фрезерования  $t_1 = t_1'' + 2h/\text{tg}\alpha_1$ , а при угле  $\alpha_2$  глубина  $t_2 = t_2'' + 2h/\text{tg}\alpha_2$ . При использовании

отрезной фрезы, глубина резания остаётся постоянной на всём протяжении процесса врезания, это обусловлено профилем инструмента.

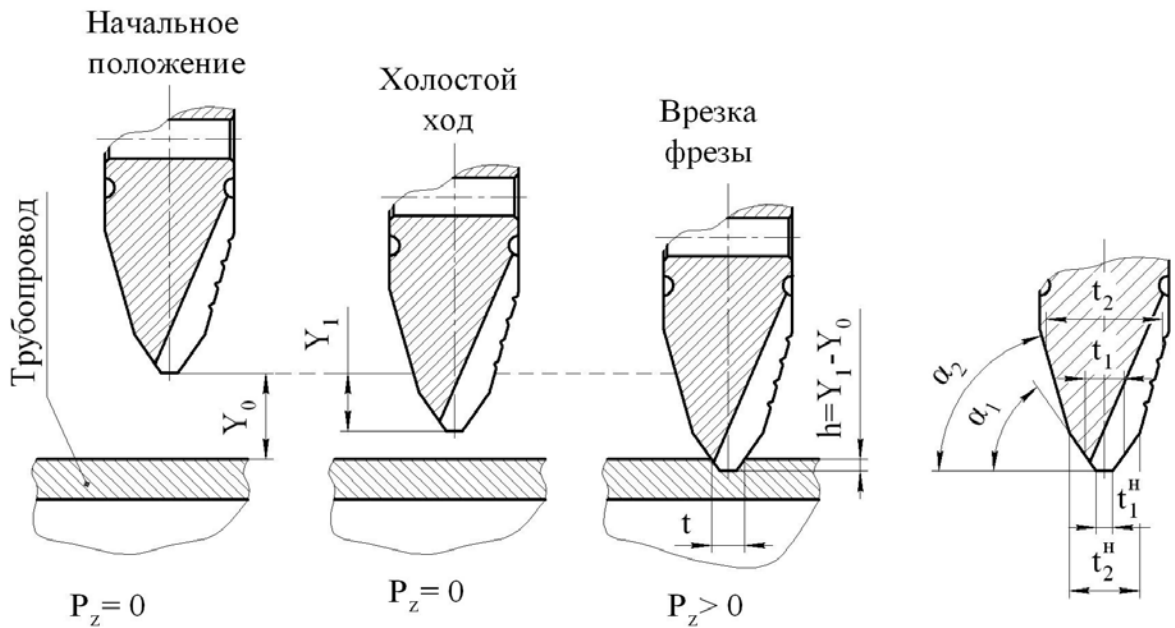
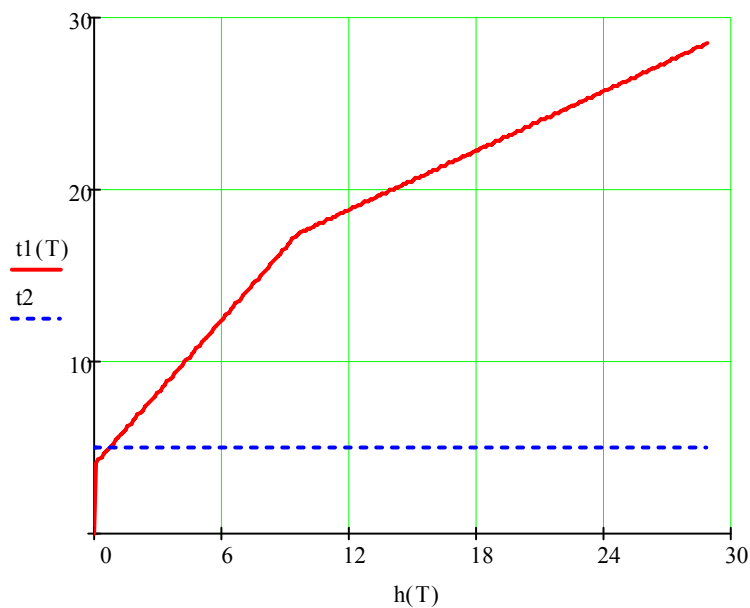


Рисунок 2.2.3 – Характерные положения фрезы

По установленной зависимости была определена глубина фрезерования. На рисунке 2.2.4 сплошной линией показан график изменения глубины фрезерования при использовании фасонной фрезы диаметром 170 мм, а прерывистой линией обозначена глубина фрезерования отрезной фрезы, она остаётся постоянной.



- а) при врезании фасонной фрезы  
б) при врезании отрезной фрезы

Рисунок 2.2.4 – График изменения глубины фрезерования  $t$ 

Ширина фрезерования  $B$  зависит не только от перемещения  $h$  и радиуса фрезы  $R_{\text{фр}}$ , но и от радиуса разрезаемой трубы  $R_{\text{тр}}$  [27]. По теореме косинусов в треугольнике ABC (рис. 2.2.5) имеем:  $\alpha = \arccos \left[ \frac{R_{\text{фр}}^2 + c^2 - R_{\text{тр}}^2}{2R_{\text{фр}}c} \right]$ , где  $c = R_{\text{фр}} + R_{\text{тр}} - h$ , а

ширина резания рассчитывается по выражению:

$$B = 2R_{\text{фр}} \sin \alpha. \quad (2.2.6)$$

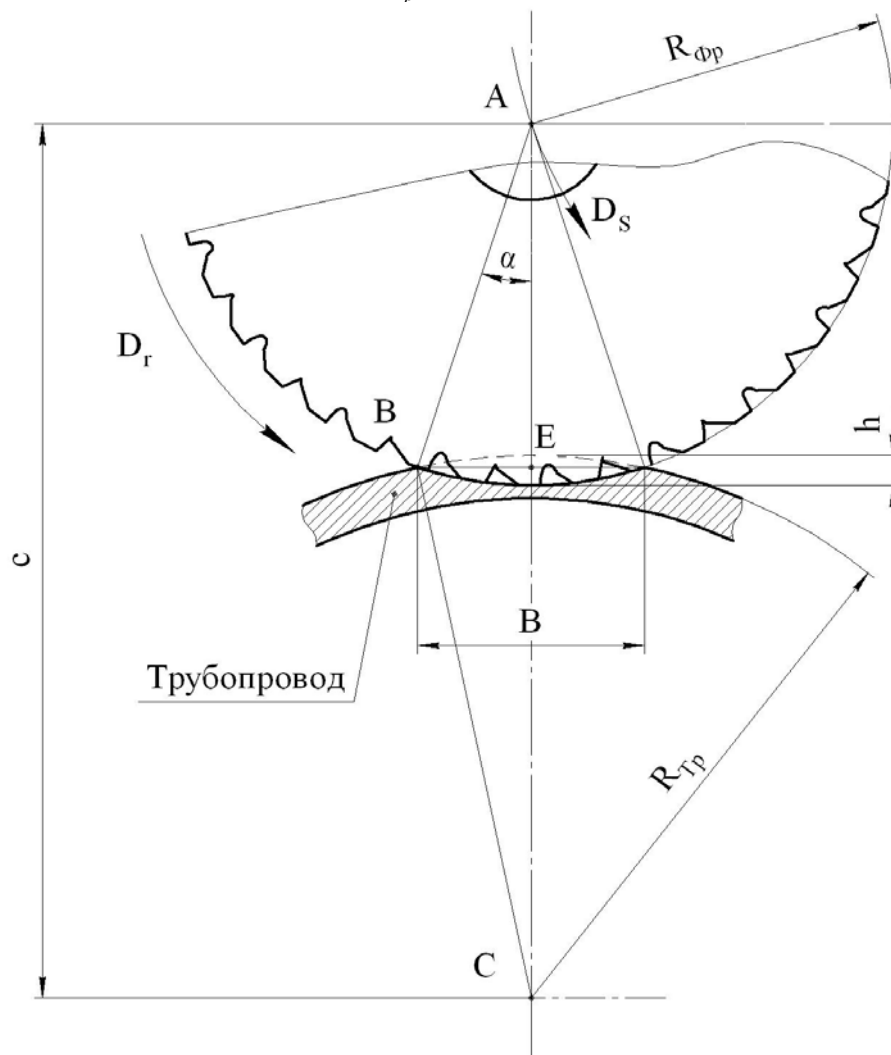


Рисунок 2.2.5 – К определению ширины фрезерования при врезании

На рисунке 2.2.6 изображён график изменения ширины фрезерования при врезании фрезы диаметром 170 мм в трубу диаметром 1420 мм с толщиной стенки 30 мм

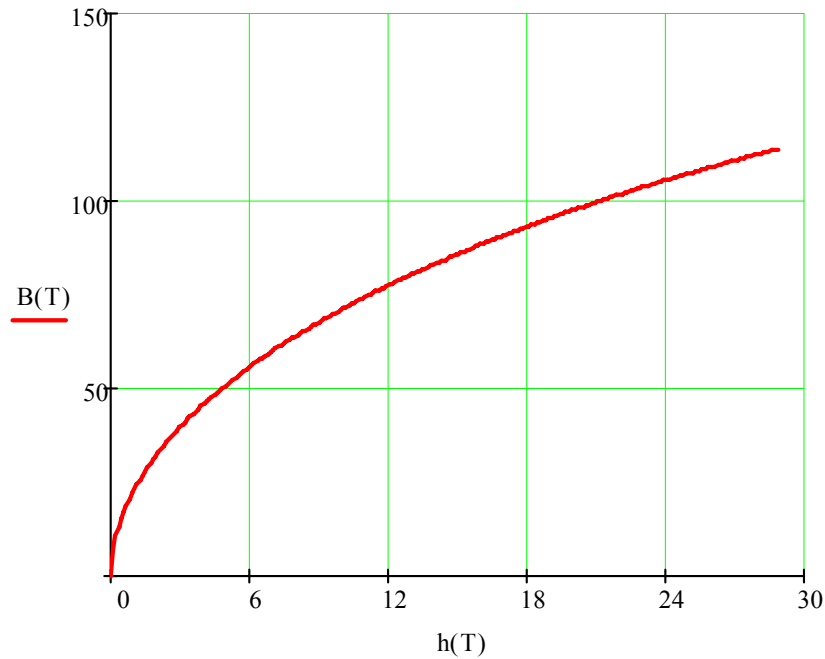


Рисунок 2.2.6 – График изменения ширины фрезерования при врезании

Для отрезки трубы за один проход, необходимо произвести врезание фрезы на расстояние чуть больше толщины трубы, т.е.  $h=t+2$ . Из графика на рисунке 2.2.6 видно, что при врезке фрезы на всю толщину трубы ширина фрезерования составляет около 125 мм.

Для определения силы резания при врезании не достаточно знать глубину и ширину фрезерования, так же необходимо определить величину подачи фрезы. Из выражений 2.2.4-2.2.5 определим величину подачи на зуб  $S_z$ , на рисунке 2.2.7 из графика видно как изменяется подача на зуб при врезании фрезы. Криволинейный характер графика обусловлен изменением соотношения плеч рычагов в приводе подачи врезания.

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,  $P_z$  [2, 57, 58, 69]:

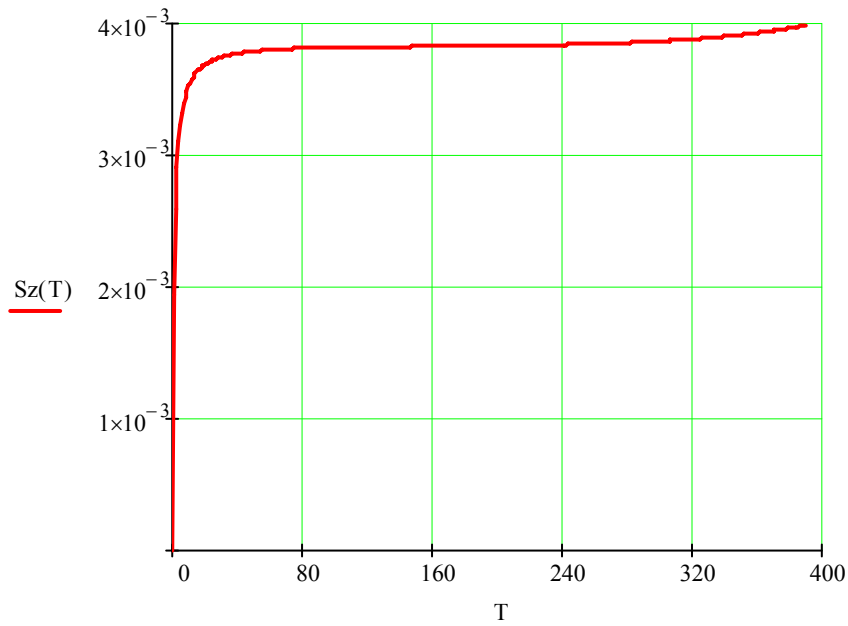


Рисунок 2.2.7 – График изменения подачи на зуб при врезании

$$P_Z = \frac{10 C_p t^x S_Z^y B^u z}{D^q n^w} K_{MP}, \quad (2.2.7)$$

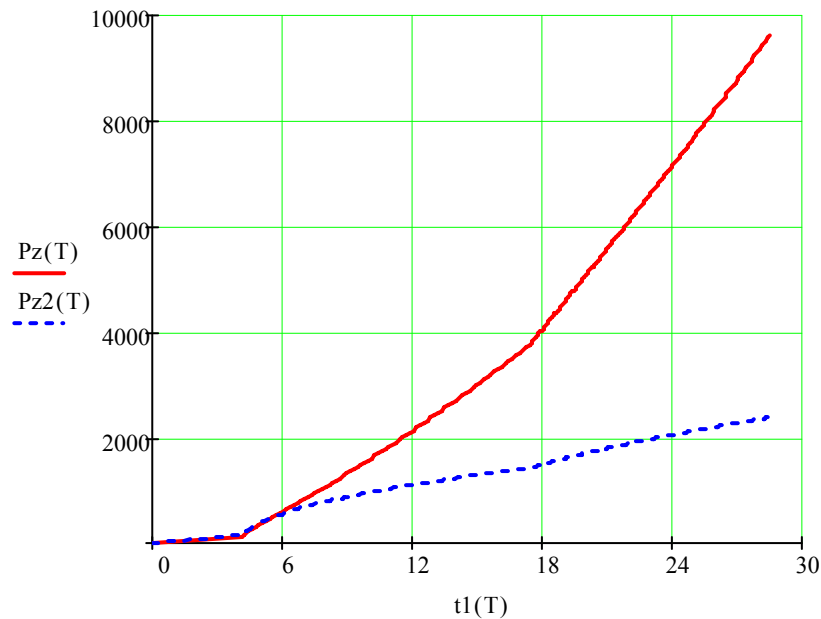
где  $C_p$  – коэффициент в формуле окружной силы  $P_Z$ ;

$x, y, u, q, w$  – показатели степени в формуле окружной силы  $P_Z$ ;

$K_{MP}$  – поправочный коэффициент на качество обрабатываемого материала. Необходимые коэффициенты и показатели степеней были взяты из справочной литературы по теории резания [16]. Установленные математические зависимости параметров фрезерования при врезании позволяют проанализировать изменение окружной силы резания. На рисунке 2.2.8 сплошной линией показан график изменения окружной силы резания при использовании фасонной фрезы диаметром 170 мм, а прерывистой – при использовании отрезной фрезы диаметром 160 мм и шириной 6 мм.

При сравнении графиков окружной силы резания видно, что при использовании фасонной фрезы величина сила резания значительно больше, следовательно, для дальнейшей оценки нагруженности привода подачи врезания анализ проводится из условия применения фасонной фрезы. Для исследования совместной нагруженности привода подачи врезания и привода главного движения кроме

окружной силы резания  $P_Z$  необходимо определить радиальную силу резания  $P_Y$  и вращающий момент  $M_{Pz}$ .



а) при врезании фасонной фрезы

б) при врезании отрезной фрезы

Рисунок 2.2.8 – График окружной силы резания  $P_Z$

Вращающий момент  $M_{Pz}$  создаётся приводом вращения инструмента и определяется как:  $M_{Pz} = P_Z \cdot R_{\phi p}$ , где  $R_{\phi p}$  – радиус фасонной фрезы. При проектировании привода вращения инструмента учитываются требования отраслевых норм, таких как РД 153-39.4-130-2002, где определена частота вращения инструмента (фрезы) не более 60 об/мин. Таким образом, зная нагрузку и требуемую частоту вращения инструмента можно определить необходимую мощность привода главного движения, потребляемую при врезании фрезы. В некоторых ситуациях реальная потребляемая приводом вращения мощность может увеличиваться по отношению к расчётной, например, при износе фрезы, в этом случае мощность растёт из-за возрастания силы резания, кроме того увеличение реальной потребляемой мощности наблюдается в момент прохождения фрезой сварного шва трубы, в этом случае наблюдается утолщение стенки разрезаемой трубы, следовательно и силы реза-

ния. Мощность привода вращения фрезы определяется из выражения:  $N = M \cdot \omega \cdot k$ , где  $\omega$  – частота вращения фрезы,  $k$  – коэффициент запаса мощности.

Как известно из теории резания радиальная сила по величине равна некоторой части от окружной силы резания [3, 8, 31]:

$$P_Y = (0,4 \div 0,6) P_Z \quad (2.2.8)$$

На рисунке 2.2.9 представлена схема привода подачи врезания инструмента. Для определения усилий в узлах машины привод разбит в точке  $B$  на две части. Для определения мощности мотор редуктора привода подачи врезания необходимо оценить осевую силу винта механизма врезания  $P_{oc}$ , для чего составлено уравнение равновесия относительно точки  $C$  из которого

$$P_{oc} = \frac{P_Z (0,5 l_2 \cos \beta - l_2 \cos(90^\circ - \beta) R_{\phi p})}{l_2 \cos \theta} \quad (2.2.9)$$

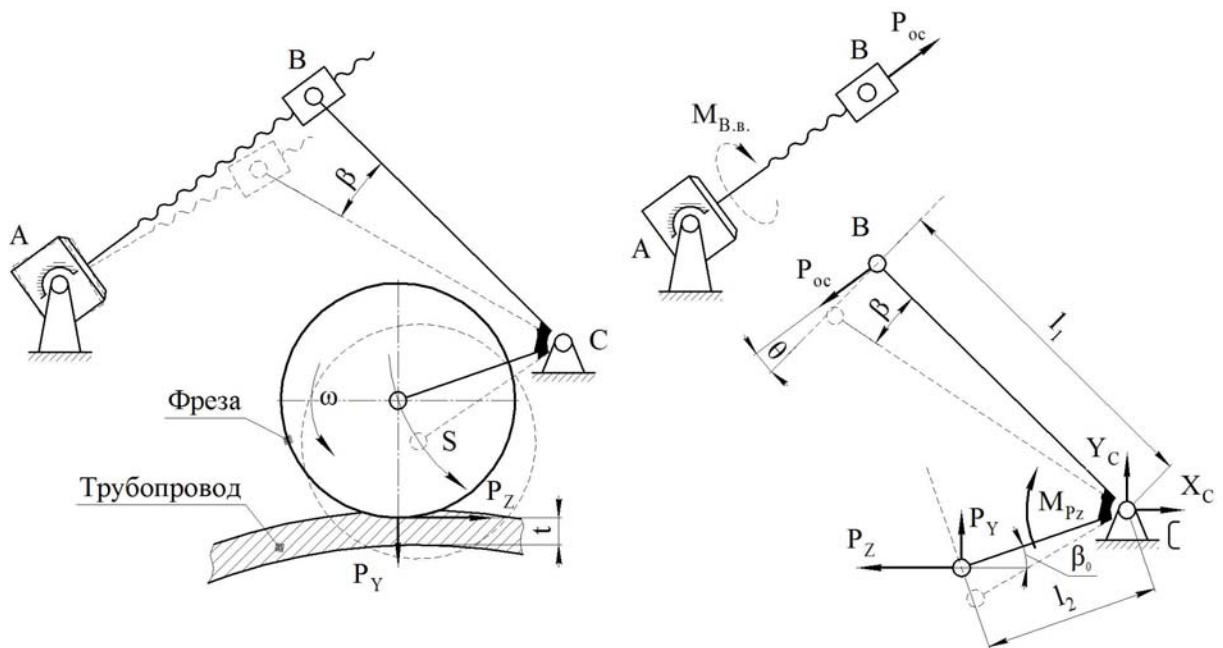


Рисунок 2.2.9 – Схема привода подачи врезания инструмента

Для обеспечения требуемой осевой силы к винту механизма врезания необходимо приложить вращающий момент  $M_{B.в}$  [28, 45]:

$$M_{B.в} = P_{oc} \frac{d}{2} \operatorname{tg}(\delta + \gamma) \quad (2.2.10)$$

где  $d$  – номинальный диаметр резьбы;

$\delta$  – угол подъёма витков резьбы;

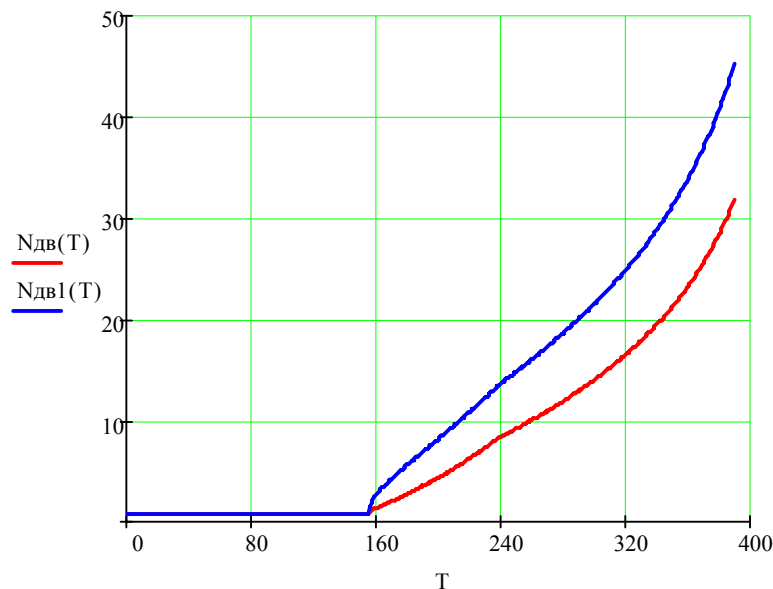
$\gamma$  – приведённый угол трения.

Требуемая мощность мотор – редуктора определяется по выражению:

$$N_{M,p} = M_{B,\epsilon} \omega_{B,\epsilon} \quad (2.2.11)$$

где  $\omega_{B,\epsilon}$  – угловая скорость вращения винта механизма врезания. В приложении «В» приведено полное описание исследования нагруженности привода врезания в среде математического моделирования Mathcad 14. А исходные данные для исследования приведены в приложении «А».

График требуемой мощности привода подачи врезания инструмента при врезании в трубу диаметром 1220 мм и толщиной стенки 30 мм с пределом прочности  $\sigma_s=600$  МПа фасонной фрезой приведён на рисунке 2.2.10. Из графика видно, что при холостом ходе (интервал времени от 0 до 156 с) потребляемая мощность постоянна, а с момента врезания и до выхода инструмента во внутреннюю полость трубы, потребляемая мощность плавно увеличивается (интервал времени от 156 до 390 с) после чего происходит остановка привода.



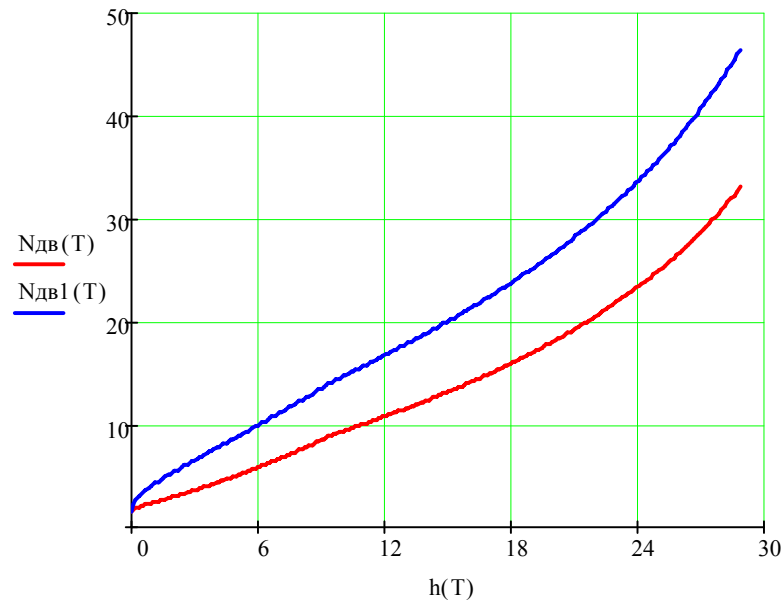
- а) при врезании фасонной фрезы с износом режущих кромок
- б) при врезании фасонной фрезы без износа режущих кромок

Рисунок 2.2.10 – График требуемой мощности привода подачи врезания с течением времени врезания инструмента

На рисунке 2.2.11 приведён аналогичный 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 не оказывает.



- а) при врезании фасонной фрезы с износом режущих кромок  
 б) при врезании фасонной фрезы без износа режущих кромок

Рисунок 2.2.11 – График требуемой мощности привода подачи врезания в зависимости от толщины разрезаемой трубы

### 2.3 Исследование нагруженности привода перемещения в зависимости от параметров разрезаемой трубы, типа инструмента, условий закрепления и углового положения машины на трубе

Анализ совместной нагруженности привода круговой подачи и привода главного движения также является одной из основных задач проектирования новой конструкции МРТ. В ходе исследования нагруженности приводов были проанализированы внешние нагрузки, действующие на машину в ходе её работы. Как известно из теории резания, для обеспечения процесса механической резки необходимо создать требуемую жесткость системы СПИД. Для

установки машины МРТ на трубопроводе применяются натяжные цепи, обеспечивающие надёжную фиксацию, 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 2.3.1 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 подач  $M_{ЗВ}$  равный сумме момента  $M_{P_{yz}}$  от силы резания  $P_{YZ}$ , момента  $M_G$  от веса машины  $G$ , а также моментов от сил трения  $M_{ТР}$  (рисунок 2.3.3). Таким образом, искомый момент будет равен [42, 70, 71]:

$$M_{ЗВ} = M_{ТР} + M_{P_{yz}} + M_G \quad (2.3.1)$$

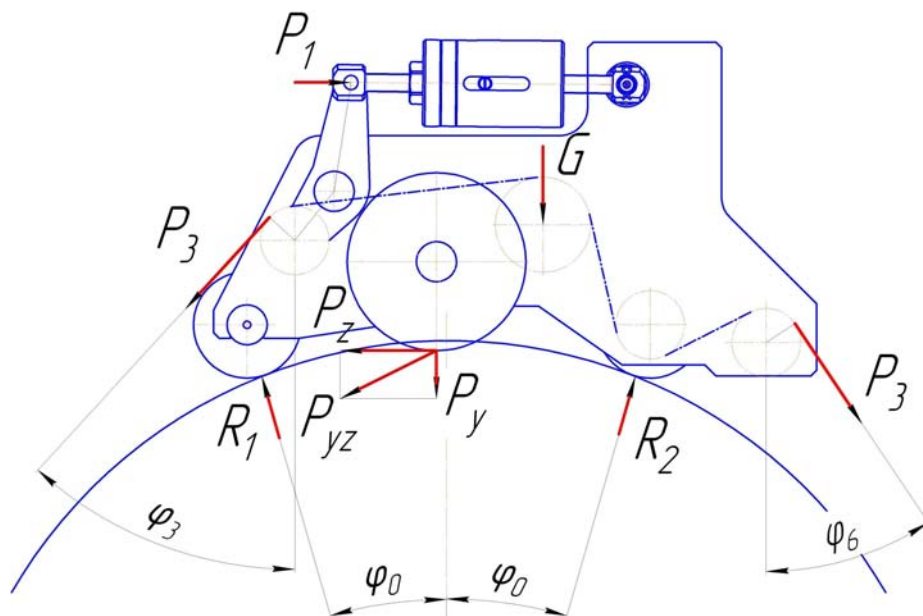


Рисунок 2.3.1 – Внешние силы

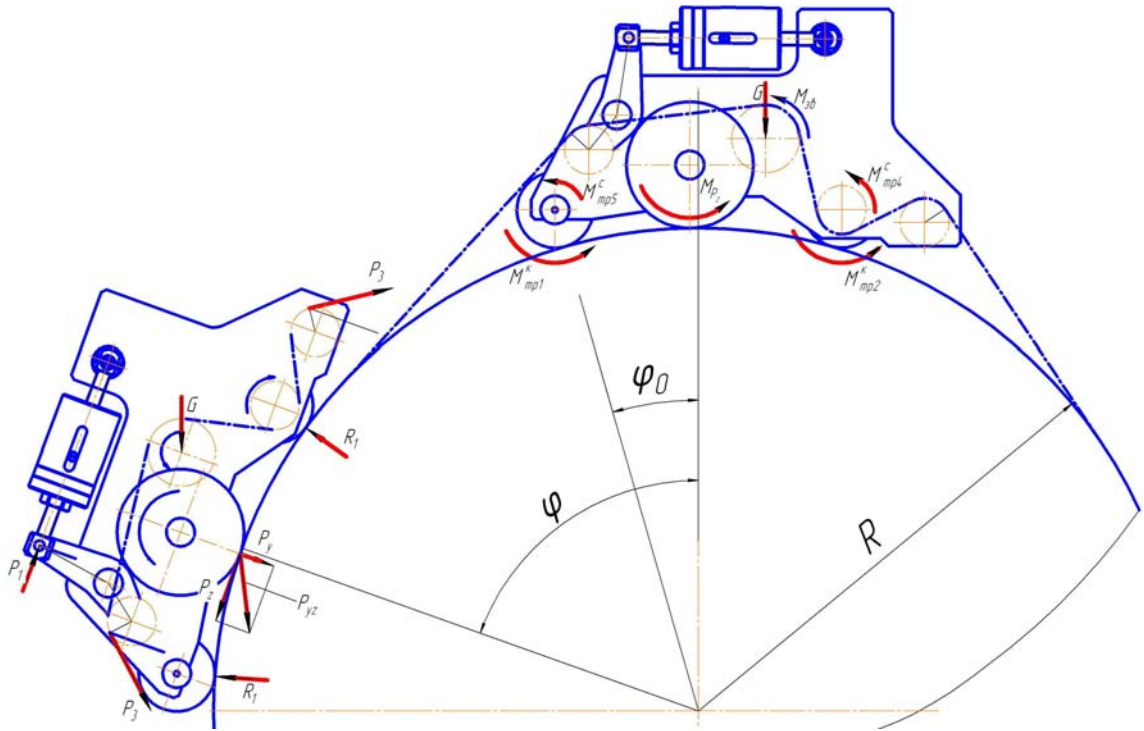


Рисунок 2.3.3 – К определению приведённого момента на ведущей звёздочке

В процессе резки машина совершает орбитальное движение вокруг трубопровода, вследствие чего вес машины оказывает существенное влияние на нагруженность привода перемещения машины [43]. Значение момента от веса машины меняет знак в зависимости от углового положения на трубе, находится по формуле:

$$M_G = G \cdot \sin(\varphi) \cdot r_{\text{вз}} \quad (2.3.2)$$

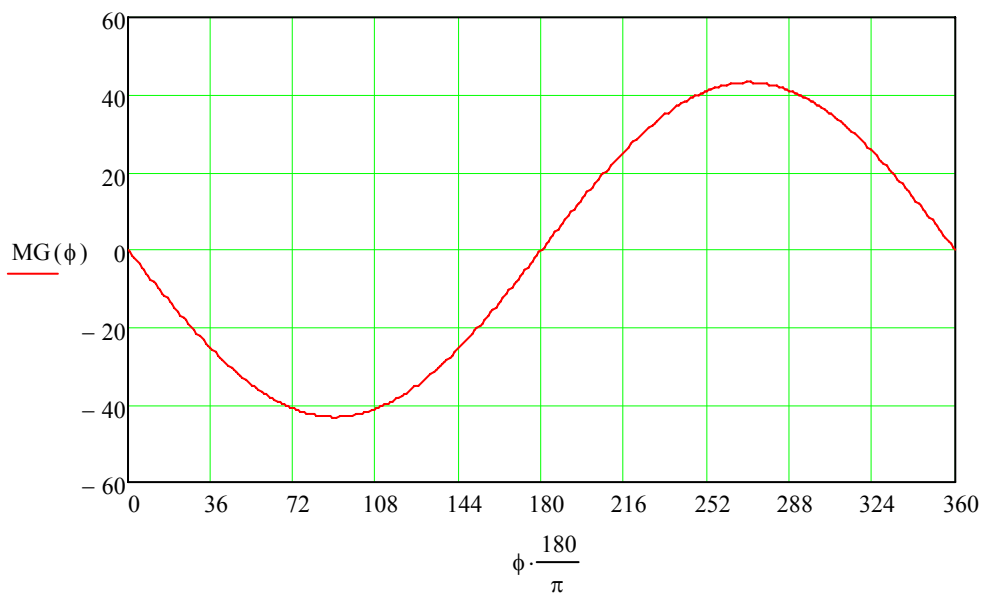


Рисунок 2.3.2 – График приведённого момента от действия веса машины

Как видно из графика на рисунке 2.3.2 при прохождении машиной  $\frac{1}{4}$  пути, это соответствует положению машины  $90^\circ$ , значение  $M_G$  имеет отрицательный знак, это обусловлено совпадением направления вектора силы тяжести машины и направления её движения. Вес машины помогает (способствует) её перемещению.

Кроме того, ещё одной из внешних сил является сила резания. После завершения врезки инструмента машина продолжает резку трубопровода во втором режиме работы приводов, когда привод подачи врезания остановлен и задействован привод круговой подачи при безостановочной работе привода вращения фрезы. В этом случае наблюдается изменение условий процесса резания, а именно: появляется перемещение машины по трубе, таким образом, сменяется направление подачи фрезы, движение по трубе осуществляется приводом круговой подачи, а вращение фрезы, как и прежде, обеспечивается приводом главного движения. На рисунке 2.3.4 приведена схема движения инструмента.

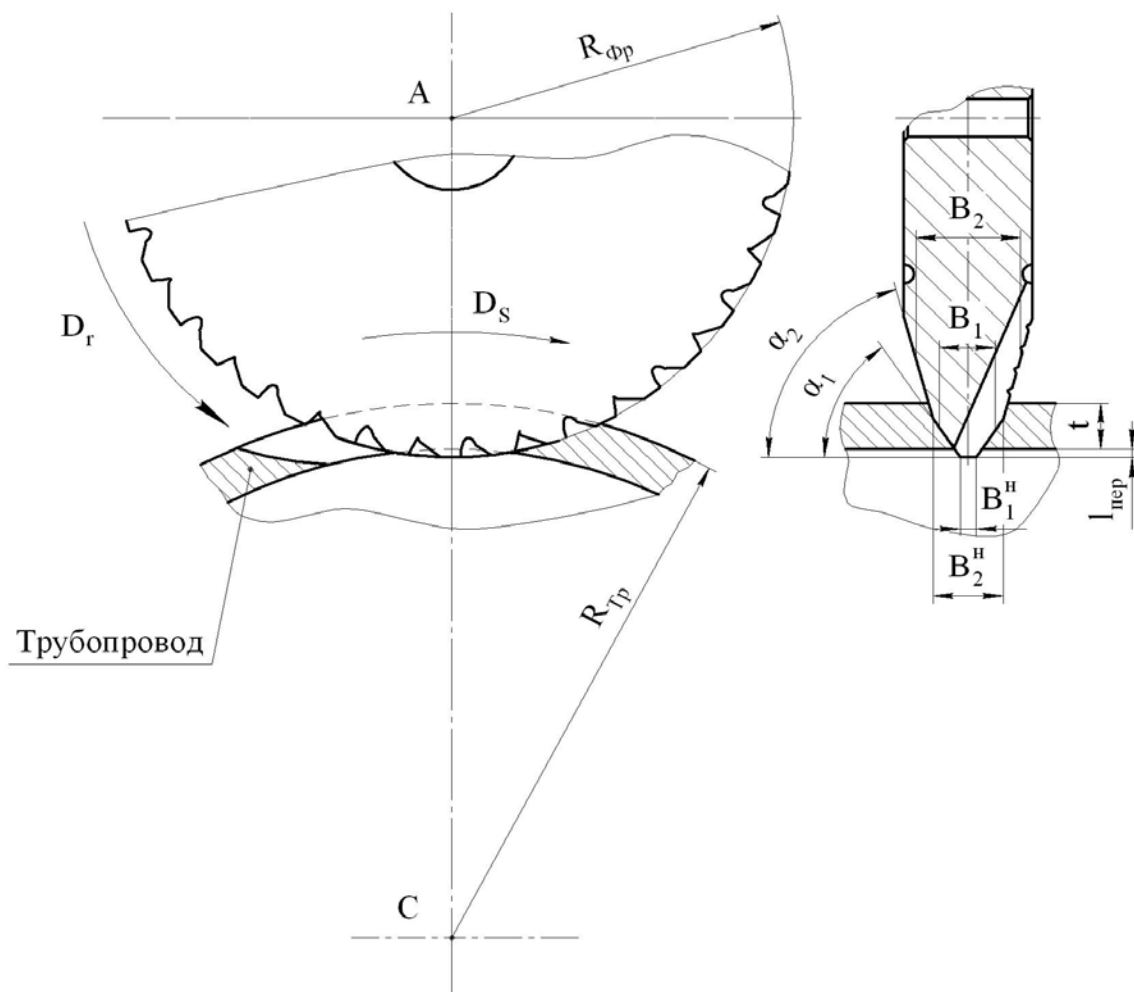


Рисунок 2.3.4 – Схема движения инструмента

Из рисунка 2.3.4 видно, что максимальная глубина фрезерования  $t$  определяется толщиной стенки трубопровода независимо от используемого инструмента [32]. При использовании фасонной фрезы ширина фрезерования по рабочей поверхности с углом профиля  $\alpha_1$  рассчитывается  $B_1 = B_1^h + 2t/\operatorname{tg}\alpha_1$ , а при угле  $\alpha_2$  ширина  $B_2 = B_2^h + 2t/\operatorname{tg}\alpha_2$  [34, 35]. Как и в процессе врезания инструмента, при использовании отрезной фрезы, ширина фрезерования остаётся постоянной, это обусловлено профилем инструмента. Для процесса резания труб безогневым методом, при использовании труборезных машин, регламентом [54] определена подача инструмента, которая составляет не более 30 мм/мин. После установления параметров глубины, ширины фрезерования и подачи инструмента по формулам 2.2.7-2.2.8 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 по формуле (9):

$$M_{P_z} = P_z r_{B3} \quad (2.3.3)$$

где  $P_z$  – круговая сила резания;

$r_{B3}$  – радиус ведущей звёздочки.

Для определения приведённого момента от действия сил трения, возникающих в узлах машины, необходимо проанализировать силы, действующие в этих узлах. Для процесса безогневой резки труб необходимо обеспечить надежное закрепление машины на трубе, силами, препятствующими этому, являются сила резания и вес машины, они стремятся оторвать машину от поверхности трубы. Неотрывность и перемещение машины по трубе осуществляются с помощью натяжных цепей, они же являются и приводными. Неотрывность при движении машины возможна только в том случае, когда силы натяжения приводных цепей уравновешивают вес машины и силу резания. Как известно, в магистральных трубопроводных системах используется широкая номенклатура труб, они отличаются как по диаметру, так и по толщине стенки. Изменение толщины стенки трубопровода влияет на величину силы резания, а от диаметра трубопровода зависит геометрическая схема действия сил натяжения цепей. Установление зависимостей

влияния диаметра трубопровода и его толщины стенки на силу натяжения цепей позволит оценить величину минимальной необходимой силы натяжения приводных цепей. Как показывает практика, сила натяжения приводных цепей устанавливается несколько больше по сравнению с минимально необходимой, это связано с увеличением силы резания, например, при износе инструмента или увеличении толщины стенки, а так же с вытяжкой цепи. При большей затяжке цепей, возникает реакции опор в опорных роликах машины, вследствие чего появляются силы трения скольжения и силы трения качения, вызывающие соответствующие моменты трения качения и скольжения без преодоления которых, невозможно движение машины по трубе.

На рисунке 2.3.5 показан боковой вид машины с указанием сил реакции в опорных роликах. Для анализа сил реакции в опорных роликах были составлены уравнения,

$$R_{x2}(\phi) := \frac{P_4 \cdot \sin(\phi_9 + \phi_0) + P_{yz} \cdot \sin(\beta_2 - \phi_0) + 0.5G \cdot \sin(\phi_0 - \phi) - P_4 \cdot \sin(\phi_3 - \phi_0)}{\sin(2 \cdot \phi_0)} \quad (2.3.4)$$

$$R_{x1}(\phi) := \frac{P_4 \cdot \cos(\phi_9) - P_{yz} \cdot \cos(\beta_2) - R_{x2}(\phi) \cdot \cos(\phi_0) + 0.5G \cdot \cos(-\phi) + P_4 \cdot \cos(\phi_3)}{\cos(\phi_0)} \quad (2.3.4)$$

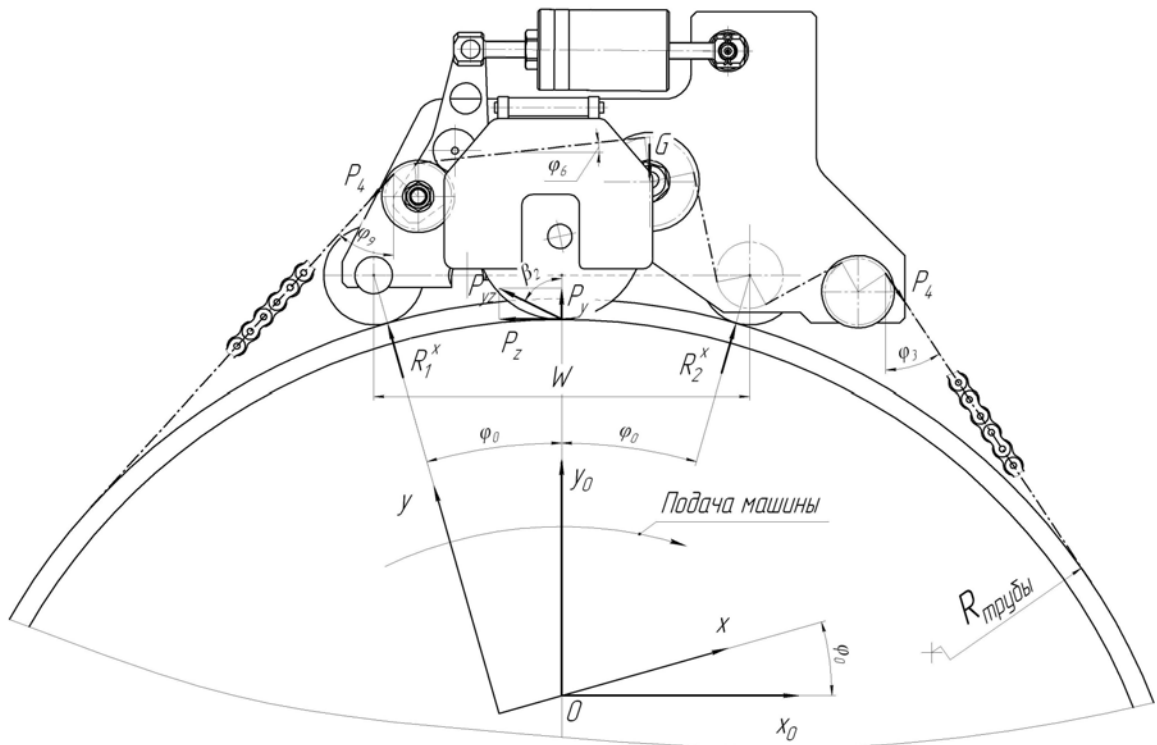


Рисунок 2.3.5 – К определению сил реакции опор

Установленные зависимости позволяют оценить изменение опорных сил  $R_1^X$  и  $R_2^X$  на протяжении всего пути перемещения машины по трубе, на рисунке 2.3.6 показаны графики изменения опорных сил. Из графиков видно, что опорные реакции меняются по мере передвижения машины по трубе, при этом передние опоры машины нагружены гораздо сильнее.

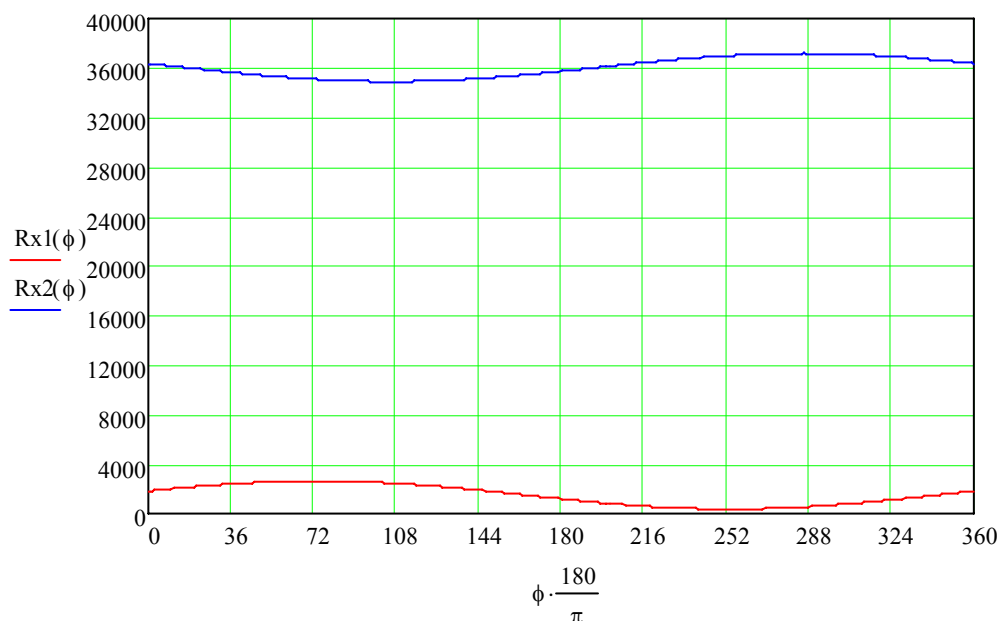


Рисунок 2.3.6 – Графики изменения опорных сил  $R_1^X$  и  $R_2^X$

Установленные зависимости изменения сил реакции опор позволяют определить моменты трения в узлах трения. Результирующий момент от сил трения вычисляется как сумма в элементарных узлах трения скольжения и качения [4].

$$M_{TP} = M_{TP1}^C + \dots + M_{TP5}^C + M_{TP1}^K + M_{TP2}^K \quad (2.3.5)$$

Момент трения скольжения  $M_{TP}^C$ , возникает между звёздочкой и осью звёздочки [2, 22, 56] (рис. 2.3.7).

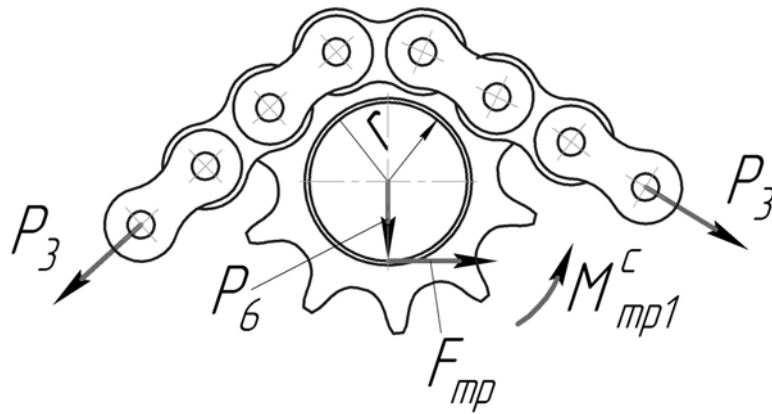


Рисунок 2.3.7 – Определение момента трения скольжения

$$M_{тр}^c = krP_6 \quad (2.3.6)$$

где  $P_6$  – нормальная сила в паре трения скольжения;

$r$  – радиус в паре трения скольжения;

$k$  – коэффициент трения скольжения.

Момент трения качения  $M_{тр}^k$  возникает между роликом и трубой (рис. 2.3.8) [20, 64].

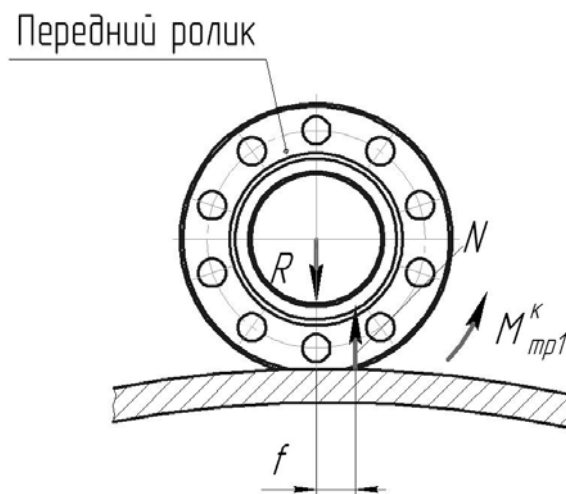


Рисунок 2.3.8 – Определение момента трения качения

$$M_{тр}^k = fR \quad (2.3.7)$$

где  $R$  – прижимная сила;

$f$  – коэффициент трения качения.

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 при натяжении приводных цепей с усилием 6600 Н. (рис. 2.3.9).

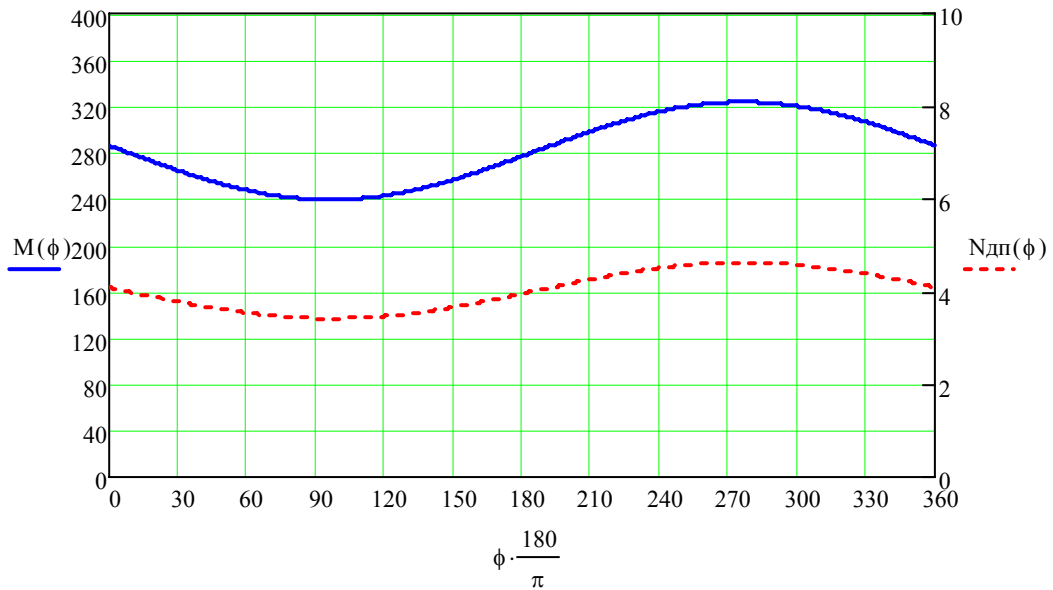


Рисунок 2.3.9 – График зависимости  $M_{ЗВ}(\phi)$  и  $N_{дп}(\phi)$

Из графиков на рисунке 2.3.9 видно, что при угловом расположении машины на трубе  $\frac{3}{4}$  пройденного пути ( $\phi=270^0$ ) максимальное значение приведённого момента около 330 Нм, а затрачиваемая мощность приводом перемещения составляет около 5 Вт. Полное описание исследования нагруженности привода перемещения от действия внешних факторов приведено в приложении «Б».

*Влияние толщины стенки трубопровода на потребляемую мощность привода перемещения машины*

При строительстве трубопроводов используются бесшовные горячедеформированные и электросварные шовные трубы с разной толщиной стенки [60, 61]. У электросварных труб наблюдается утолщение стенки трубы в месте сварного шва, при прохождении фрезой сварного шва увеличивается сила резания и как следствие возрастает потребляемая мощность приводом перемещения. На рисунке 2.3.10 представлены графики изменения мощности привода перемещения при резке труб с разной толщиной стенки. Из графика видно, что при резке трубы с толщиной стенки 30 мм, соответствует кривая  $N_{30}(\phi)$ , пиковое значение потребляемой мощности при прохождении сварного шва около 11 Вт

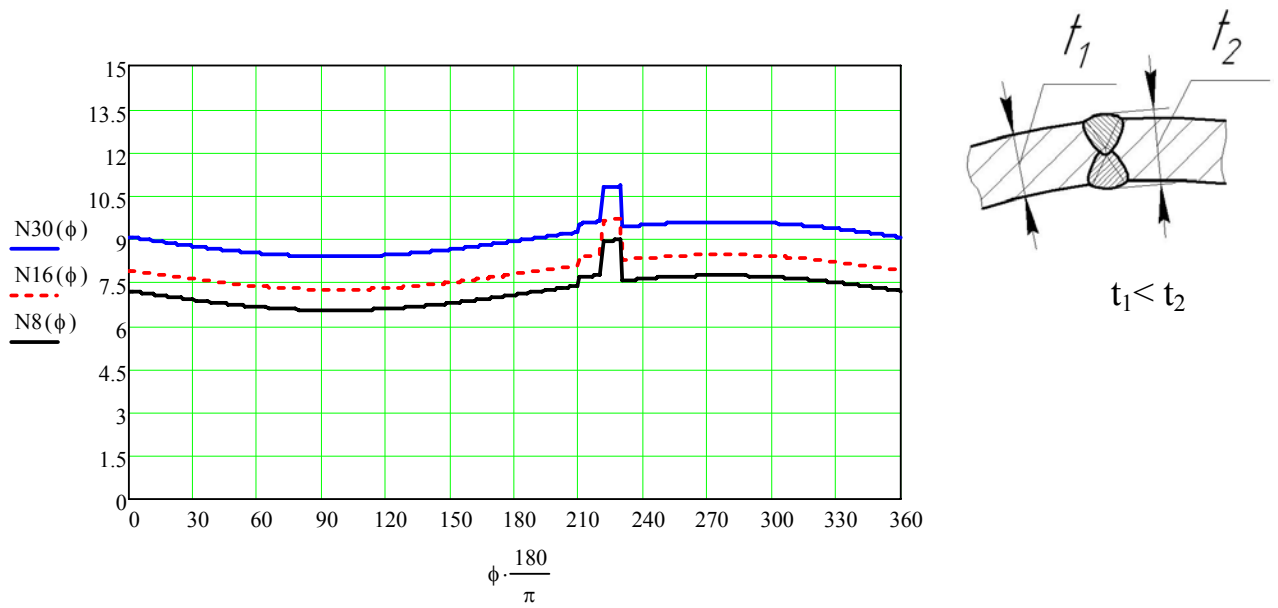


Рисунок 2.3.10 – График зависимости  $N30(\phi)$ ,  $N16(\phi)$  и  $N8(\phi)$

*Влияние износа инструмента на потребляемую мощность  
привода перемещения машины*

В процессе резания фрезы изнашиваются, как известно из теории резания, величина износа фрез описывается кривой износа [62], на рисунке 2.3.11 приведена

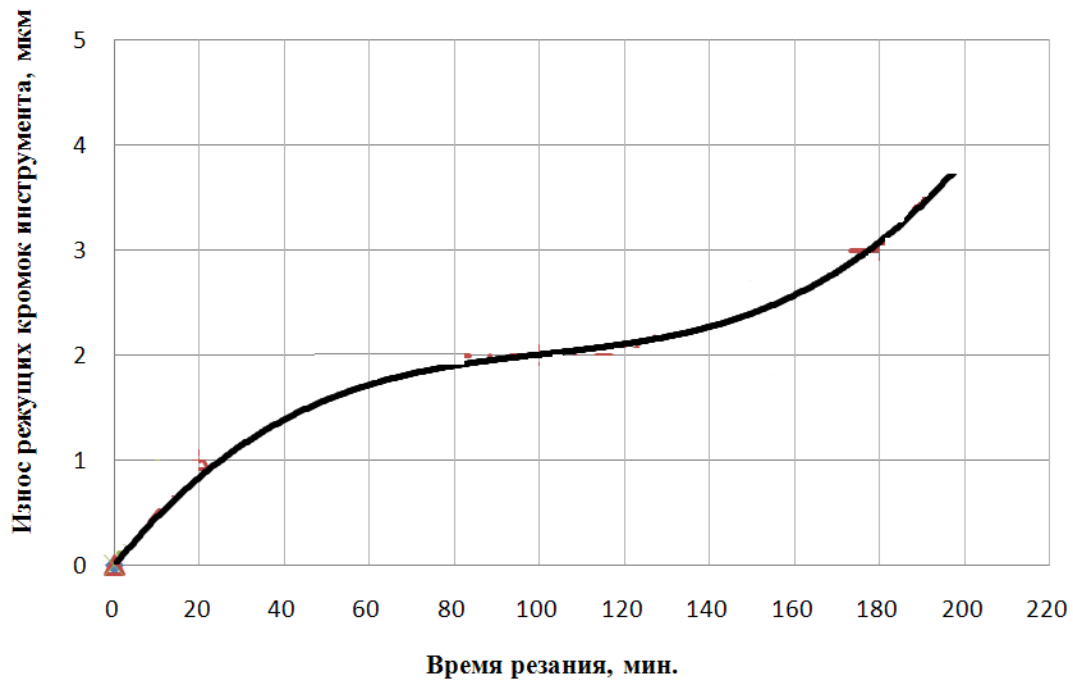
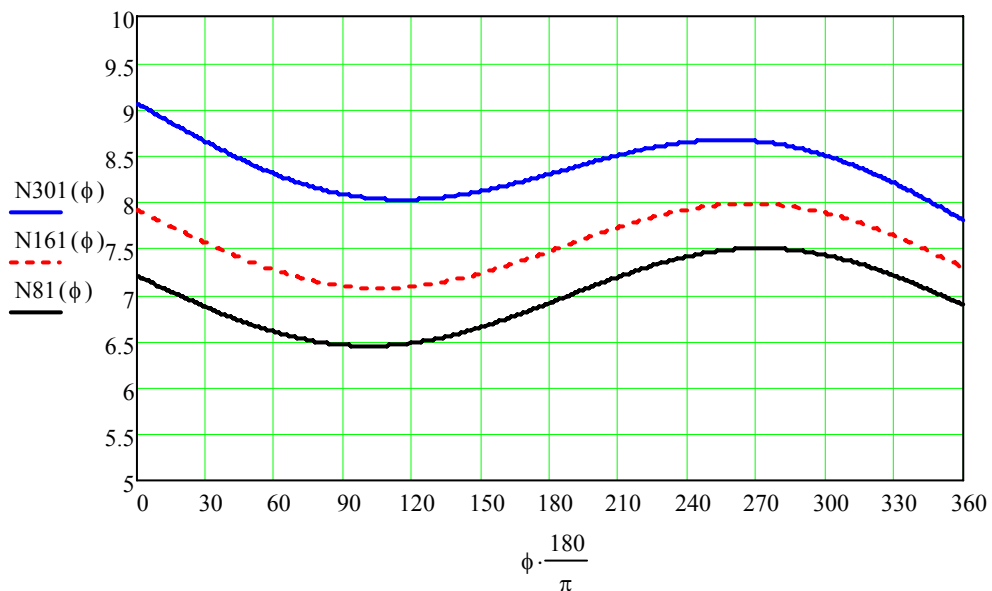


Рисунок 2.3.11 – График износа режущих кромок фрезы

кривая износа фасонной дисковой фрезы. По мере износа фрезы меняется геометрия режущих кромок [63], это приводит к увеличению силы резания, вследствие чего, возрастает потребляемая мощность привода перемещения машины.

*Влияние силы затяжки амортизаторов на потребляемую мощность привода перемещения машины*

Величина силы резания зависит от толщины разрезаемой трубы, для надёжного закрепления машины на трубе необходимо создать достаточное прижимное усилие к трубе с помощью приводных цепей, натягиваемых амортизаторами. В ходе анализа были установлены зависимости, позволяющие оценить минимально необходимую силу натяжения амортизаторов в зависимости от толщины стенки разрезаемой трубы. Так же была определена величина ослабления силы натяжения цепей в ходе движения машины по трубе, ослабление цепи обусловлено неравномерной затяжкой. Трение, возникающее между звеньями цепи и поверхностью трубы, препятствует натяжению всех звеньев цепи с одинаковой силой. На рисунке 2.3.13 видно сближение кривых мощностей при резке труб с разной толщиной стенки.



N301(φ) – мощность при резке трубы с толщиной 30 мм

N161(φ) – мощность при резке трубы с толщиной 16 мм

N81(φ) – мощность при резке трубы с толщиной 8 мм

Рисунок 2.3.13 – График зависимости N301(φ), N161(φ) и N81(φ)

### *Выводы*

В ходе исследований была предложена и обоснована новая структурная схема машины безогневой резки труб большого диаметра на основе применения системы независимых приводов вращения инструмента, его врезания и перемещения машины по трубе.

Для оценки требуемой мощности приводов машины проведены теоретические исследования нагруженности приводов машины в зависимости от параметров разрезаемой трубы, типа инструмента, условий закрепления машины на трубе, её углового положения и износа инструмента.

Было установлено, что 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 двух кратным увеличением силы резания возрастает на 15-30 %

### 3 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАБОТЫ ПРИВОДА ВРЕЗАНИЯ ИНСТРУМЕНТА, ПРИВОДА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАШИНЫ И ПРИВОДА ВРАЩЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

Установленные зависимости изменения нагрузки с течением времени при резке труб разного диаметра и толщины позволяют проанализировать нагруженность приводов. Следующим этапом при проектировании приводов подачи является разработка комплексной системы приводов и анализ их совместной работы.

#### 3.1 Выбор двигателей привода врезания инструмента, привода перемещения машины и привода вращения инструмента

Для привода подачи врезания и круговой подачи машины «Волжанка 4» рекомендован к применению вентильный управляемый двигатель серии ДВМ – 100, общий вид которого представлен на рисунке 3.1.1

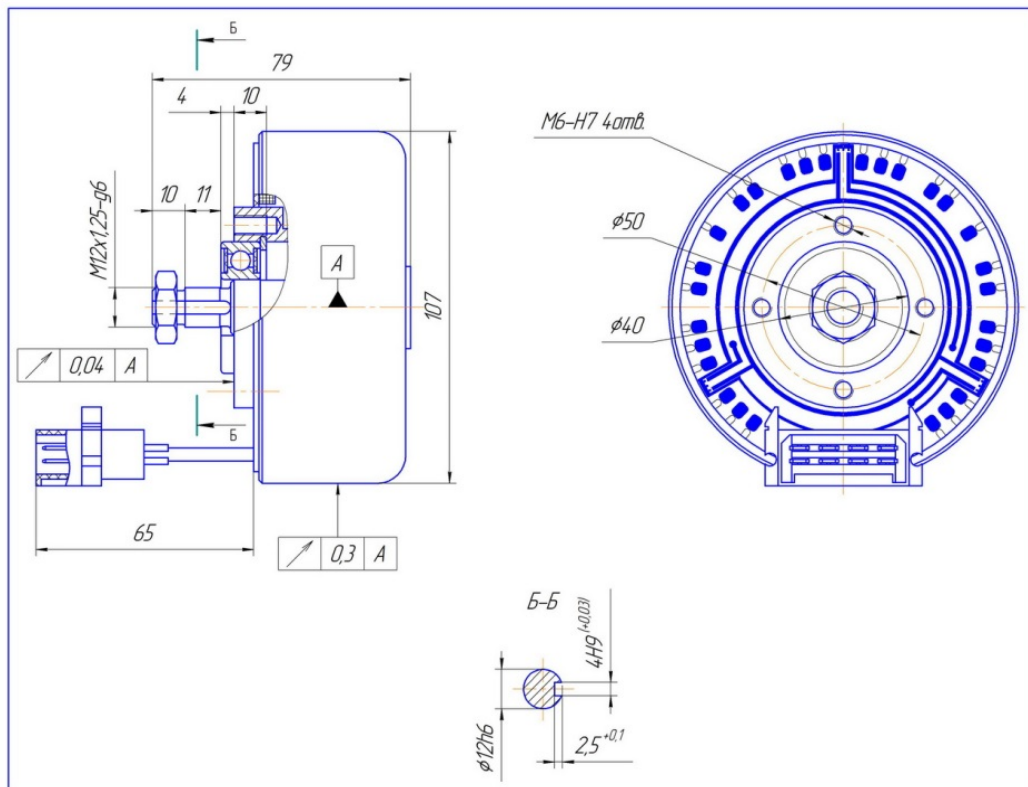


Рисунок 3.1.1 – Общий вид двигателя серии ДВМ – 100

Вентильный двигатель ДВМ – 100 имеет высокие эксплуатационные характеристики, выпускается серийно и используется в приводах дверей и дисковых тормозов трамваев, солнечных батарей и т. д.

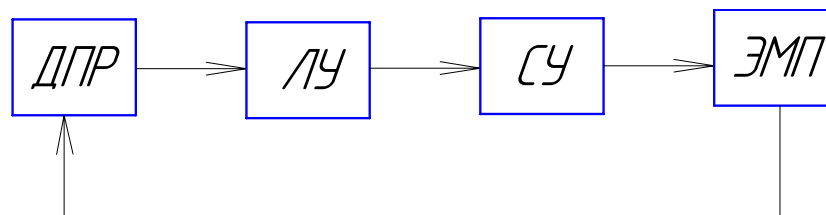
Двигатель вентильный моментный ДВМ – 100 предназначен для вращения, поворота и удержания механической нагрузки на выходном валу. Имеет встроенный датчик положения ротора, набранный из трех микросхем Холла TLE4935L. Наружный ротор двигателя выполнен в виде стакана, на внутренней поверхности которого закреплены редкоземельные магниты. Внутри ротора расположен статор с трехфазной обмоткой, соединенной в звезду. Двигатель снабжен валом и подшипниками, но не имеет собственного корпуса.

Двигатель выдерживает двукратное превышение момента. Сохраняет свою работоспособность в диапазоне температур окружающей среды  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ .

В состав схемы вентильного двигателя (ВД) входят следующие основные узлы:

- электромеханический преобразователь (ЭМП);
- датчик положения ротора (ДПР);
- полупроводниковый коммутатор (ПК).

Структурная схема вентильного двигателя представлена на рисунке 3.1.2



ДПР – датчик положения ротора; ЛУ – логическое устройство; СУ – система управления;  
ЭМП – электромеханический преобразователь.

Рисунок 3.1.2 – Структурная схема вентильного двигателя:

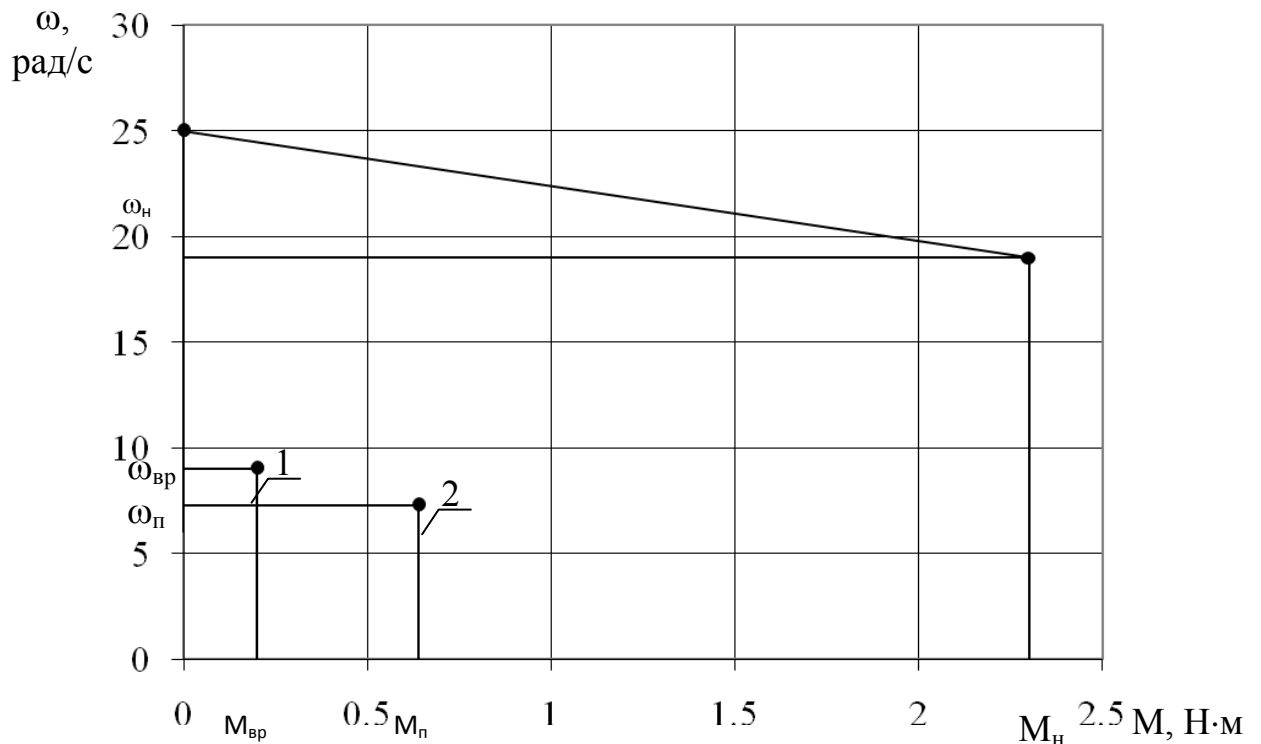
ЭМП представляет собой синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов на роторе и секционированной обмоткой якоря на статоре. Принцип действия ВД соответствует принципу действия классического двигателя постоянного тока независимого возбуждения: при повороте ротора к источнику питания подключаются те секции обмотки якоря, пропускают ток через которые, с точки зрения создания вращающего момента, наиболее выгодно. Отличие сводится к способу питания секций якоря: в классическом двигателе постоянного тока роль коммутирующего элемента выполняет щеточно-коллекторный узел, коммутация секций ВД обеспечивается ПК в зависимости от положения ротора, определяемого ДПР [36].

Для построения механической характеристики двигателя ДВМ – 100 используются паспортные данные двигателя, представленные в таблице 3.1.1

Таблица 3.1.1 – Паспортные данные двигателя ДВМ – 100

Параметры	Значение
Напряжение номинальное, В	24
Мощность номинальная, Вт	50
Ток номинальный, А	2,4
Момент номинальный, Н·м	2,3
Скорость номинальная, рад/с	19
Число пар полюсов	13
Сопротивление обмоток $R_{об}$ , Ом	1,547
Индуктивность обмоток $L_{об}$ , мГн	4,541
Момент инерции $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,00049
Габаритные размеры, мм	107×107×80

Механическая характеристика двигателя ДВМ – 100 приводов врезки и перемещения представлена на рисунке 3.1.3



1 – точка номинального режима работы двигателя привода врезания инструмента;

2 – точка номинального режима работы двигателя привода перемещения машины

Рисунок 3.1.3 – Механическая характеристика двигателя ДВМ – 100

Номинальный режим работы двигателя ДВМ – 100 отличается от расчетных номинальных режимов работы двигателей приводов врезки и подачи значительным запасом: двукратным по угловой скорости и четырехкратным по моменту. Запас по скорости для привода врезки позволяет возвращать фрезу в исходное состояние на повышенной скорости. Надежность работы, обусловленная значительным запасом, позволяет использовать данный двигатель в жестких условиях крайнего севера. Благодаря разработанной схеме управления вентильным двигателем, существует возможность обеспечить номинальный режим работы в требуемых точках, регулированием частоты вращения и тока (момента) двигателя.

В качестве двигателя главного привода используется двигатель АИМЛ80В2 [29], технические характеристики которого представлены в таблице 3.1.2



Таблица 3.1.2 – Технические параметры двигателя АИМЛ80В2

Наименование	Значение
Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ , кВт	2,2
Частота вращения вала двигателя $n$ , об/мин	3000
Коэффициент полезного действия $\eta$ , %	83
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,91
Номинальное скольжение $s$ , %	7
Кратность пускового тока $K_I$	6
Кратность пускового момента $K_M$	2,3
Перегрузочная способность двигателя $K_M$	2,5
Момент инерции ротора $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,00234

Используя технические данные двигателя главного привода, определяются основные параметры для построения естественной механической характеристики [6, 12, 74].

Механическая характеристика двигателя главного привода представлена на рисунке 3.1.4

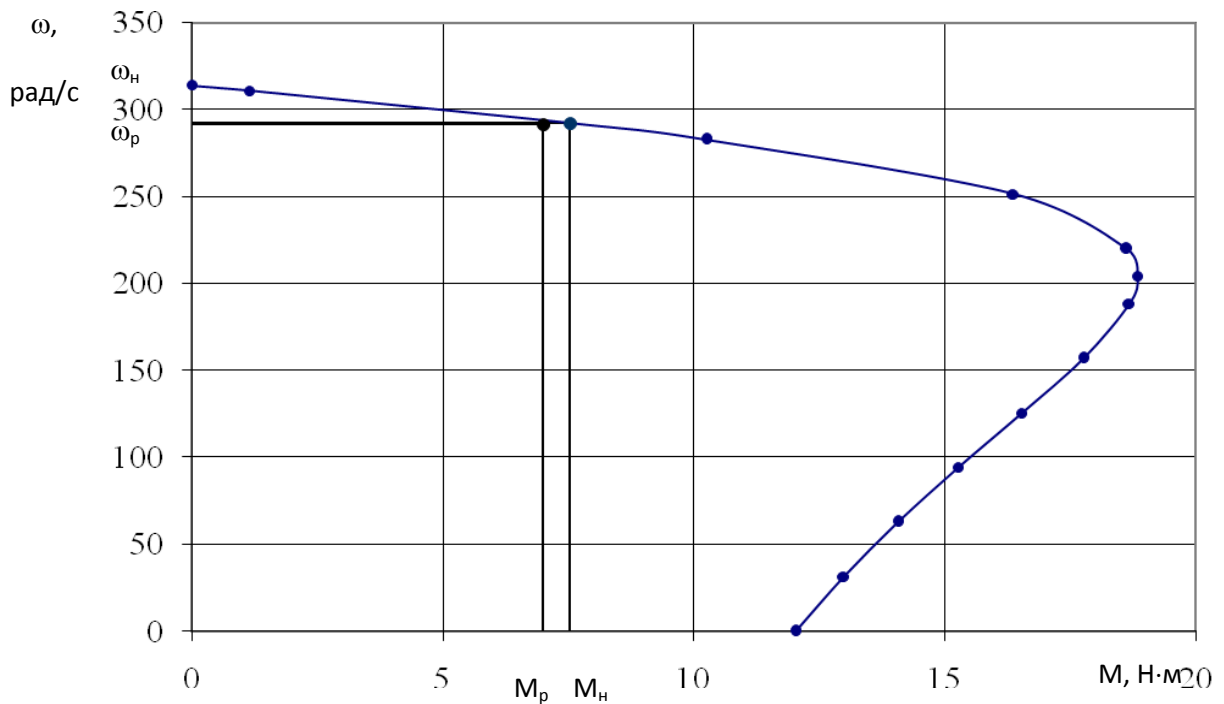


Рисунок 3.1.4 – Механическая характеристика двигателя главного привода

Зависимость угловой скорости от тока статора представлена на рисунке 3.1.5

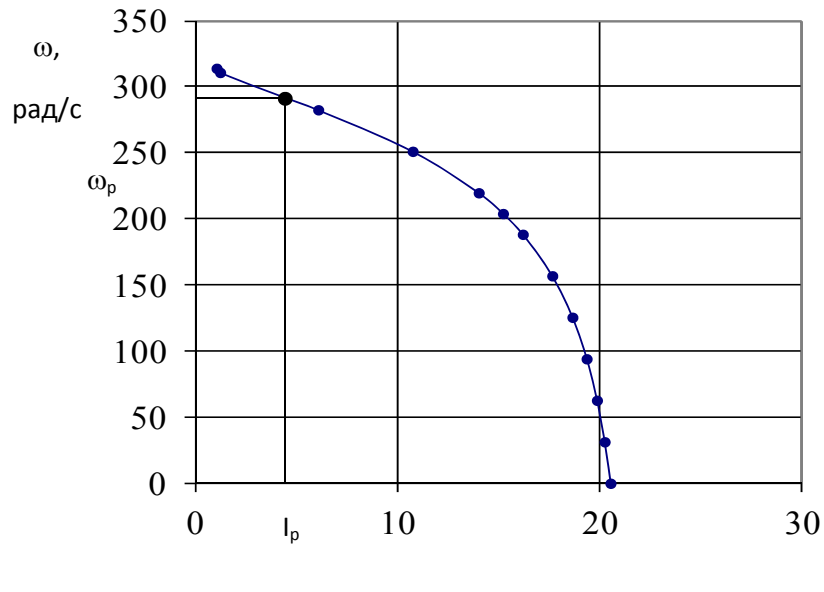


Рисунок 3.1.5 – Зависимость угловой скорости от тока статора

Зависимость момента от тока статора представлена на рисунке 3.1.6

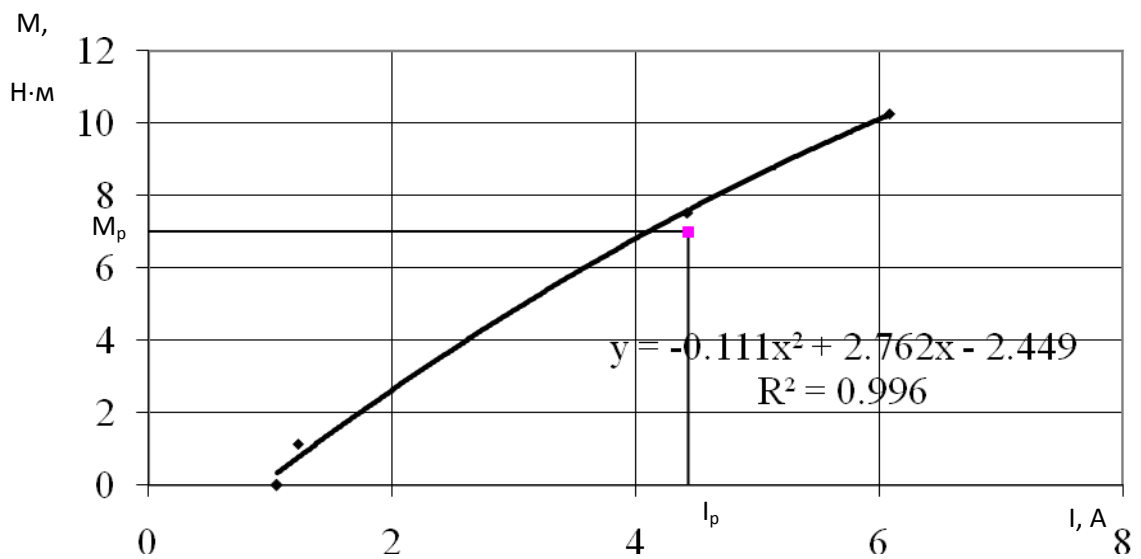


Рисунок 3.1.6 – Зависимость момента от тока статора

Линейная часть механической характеристики двигателя главного привода является рабочей частью. На этой части характеристики находятся точки соответствующие номинальным и расчетным данным угловой скорости и момента двига-

теля. Ввиду незначительной погрешности значений этих точек двигатель при расчетных номинальных значениях работает в установившемся режиме [30, 33, 67]

На графиках зависимостей угловой скорости и момента от тока статора определено рабочее номинальное значение тока статора  $I_p = 4,41$  А, Полученное значение тока меньше номинального значения тока статора, что характеризует правильность выбора двигателя.

По построению зависимости момента от тока статора, путем аппроксимации с помощью полиномов в программе Microsoft Excel, получено уравнение зависимости момента от тока статора.

### 3.2 Анализ совместной работы привода перемещения машины и привода вращения инструмента

Для обеспечения согласованной работы привода перемещения машины по трубе и привода вращения фрезы необходимо установить связь процесса резания и скорости перемещения [5, 44].

В уравнение  $M_{TP} + M_{Pz} + M_G \leq [M]$ , где  $[M]$  допустимый момент на приводной звёздочке, подставим выражения (2.3.2), (2.3.3) и (2.3.5) получим уравнение связи привода перемещения машины и привода вращения фрезы:

$$Gr_{3B} \sin\varphi + \frac{10C_p t^x S_z^y B^u z K_{MP}}{D^q n_\phi^w} r_{3B} + M_{TP1}^C + \dots + M_{TP5}^C + M_{TP1}^K + M_{TP2}^K = [M] \quad (3.2.1)$$

Угол  $\varphi$  увеличивается по мере перемещения машины по трубе, из рисунка 3.2.1 видно:

$$\varphi = \frac{L}{R_{TP}} \quad (3.2.2)$$

где  $L$  – длина дуги, пройденной машиной по поверхности трубы, мм;

$R_{TP}$  – радиус разрезаемой трубы, мм.

Длина дуги  $L$  зависит от скорости перемещения и времени:

$$L = S_m T \quad (3.2.3)$$

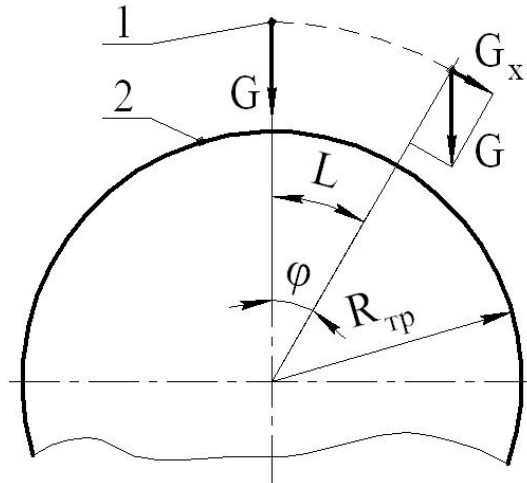
где  $S_m$  – минутная подача, мм/мин;

$T$  – время движения машины, сек.

Минутная подача инструмента определяется скоростью вращения приводной звёздочки:  $S_m = r_{зв} \omega_{зв}$ , учитывая передаточное число  $i_{ПП}$  редуктора привода

перемещения:  $S_m = \frac{r_{зв} \omega_{ДП}}{i_{ПП}}$ , тогда угол:

$$\varphi = \frac{r_{зв} \omega_{ДП} T}{R_{тр} i_{ПП}} \quad (3.2.4)$$



1 – центр тяжести машины, 2 – труба

Рисунок 3.2.1 – К определению угла  $\varphi$

Подача на зуб  $S_z$  в формуле силы резания определяется:

$$S_z = \frac{S_m}{z n_\phi} \quad (3.2.5)$$

где  $z$  – число зубьев фрезы;

$n_\phi$  – скорость вращения фрезы.

Скорость вращения фрезы определяется скоростью вращения вала электродвигателя и передаточным числом редуктора привода вращения:

$$n_\phi = \frac{30 \omega_{ПВ}}{i_{ПВ} \pi} \quad (3.2.6)$$

где  $\omega_{ПВ}$  – частота вращения вала электродвигателя привода вращения,  $i_{ПВ}$  – передаточное число привода вращения, тогда уравнение связи (3.2.7) примет вид:

$$Gr_{3B} \sin \left[ \frac{r_{3B} \omega_{ДП} T}{R_{TP} i_{ПП}} \right] + \frac{10C_p t^x \left[ \frac{r_{3B} \omega_{ДП} i_{ПВ} \pi}{30 i_{ПП} z \omega_{ПВ}} \right]^y B^u z K_{MP}}{D^q \left( \frac{30 \omega_{ПВ}}{i_{ПВ} \pi} \right)_\phi^w} r_{3B} + M_{TP} = [M] \quad (3.2.7)$$

Выражение (3.2.7) является трансцендентным уравнением, решение данного уравнения выполнено численным методом с помощью ЭВМ в программе визуального моделирования Vissim [24].

### *Модель привода перемещения машины*

Модель работы привода перемещения представляет собой совокупность математических соотношений (блоков), описывающих её поведение. В модели реализована обратная связь по нагрузке, позволяющая автоматически корректировать режимы работы привода [25, 41]. На рисунке 3.2.2 изображена общая схема электропривода подачи. На вход преобразователя «PR» подаётся питающее напряжение 24 В. С выхода блока «PR» питающее преобразованное напряжение идёт на вход блока электрической части двигателя «ЭЧ Дв». С выхода двигателя снимается момент двигателя и идёт на сумматор. На этот же сумматор поступает значение момента от силы резания, момент от трения в узлах трансмиссии машины, момент от веса машины. С сумматора сигнал идёт на блок механической части двигателя «МЧ Дв», с выхода которого снимается скорость двигателя привода перемещения машины. Скорость двигателя задаёт величину подачи инструмента, с увеличением скорости двигателя возрастает подача инструмента, вследствие чего увеличивается сила резания. Для стабилизации нагрузки на приводе перемещения реализована регулировка момента и скорости вращения электродвигателя. В блоке «ЭЧ Дв» реализовано ограничение по току, которое позволяет снизить значение выдаваемого двигателем момента путем автоматического регулирования скорости двигателя. Кроме того, на входе блока «PR» можно задавать напряжение, которое позволит изменять скорость двигателя. Благодаря регулировке нагрузка на приводе подачи стабилизируется на заданном уровне, исключается поломка элементов и деталей машины, увеличивается срок эксплуатации инструмента.

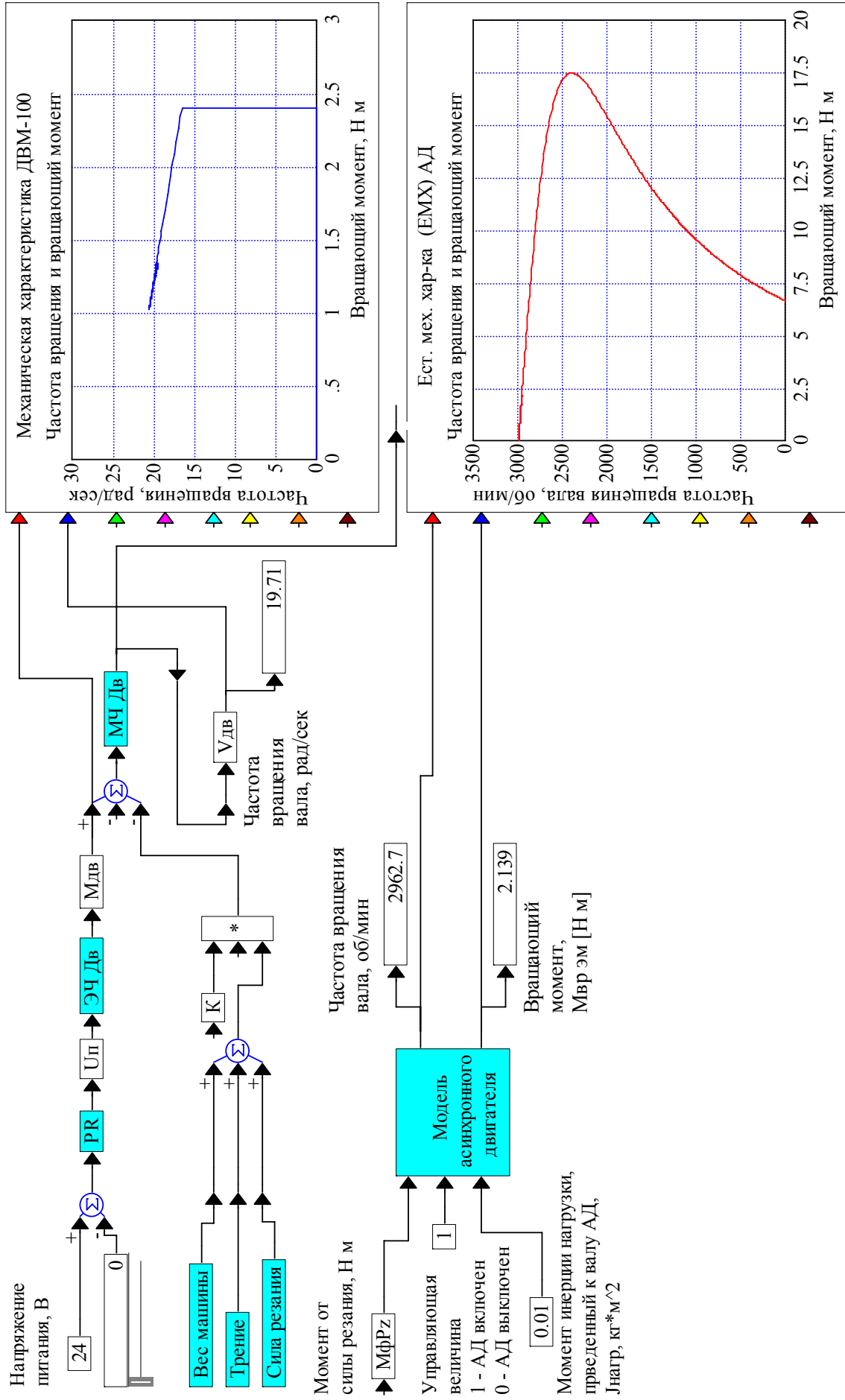


Рисунок 3.2.2 – Общая схема привода перемещения машины по трубе и привода вращения фрезы

Особенностью вентильного двигателя является зависимость магнитного потока от положения ротора. Ниже представлены уравнения, описывающие работу вентильного двигателя.

Момент двигателя  $M$ , Н·м, находится по формуле

$$M = k\Phi \cdot I_{\text{я}}, \quad (3.2.8)$$

где  $I_{\text{я}}$  – ток якоря, А;

$k\Phi$  – магнитный поток двигателя, Вб.

Ток якорной цепи определяется по формуле

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\partial}}{R_{\text{я}} + L_{\text{я}}}, \quad (3.2.9)$$

где  $U$  – напряжение питания двигателя, В;

$E_{\partial}$  – ЭДС двигателя, В;

$R_{\text{я}}$  – сопротивление якорной цепи двигателя, Ом;

$L_{\text{я}}$  – индуктивность якорной цепи двигателя, Гн.

Магнитный поток двигателя  $k\Phi$ , Вб определяется:

$$k\Phi = k\Phi_0 + (1 + Kn |\cos \alpha_{\partial}|), \quad (3.2.10)$$

где  $Kn$  – коэффициент пульсации потока;

$\alpha_{\partial}$  – угол поворота ротора двигателя, град. эл.

$$Kn = \frac{\Delta\Phi}{\Phi_0}, \quad (3.2.11)$$

$$K_{\partial} = \frac{1}{2mp}, \quad (3.2.12)$$

где  $m$  – число фаз двигателя;

$2p$  – число пар полюсов.

$$\omega_{\partial} = \frac{M - M_y}{Jp}, \quad (3.2.9)$$

где  $M$  – момент двигателя, Н·м;

$M_y$  – момент нагрузки, Н·м;

$J$  – момент инерции двигателя, кг·м<sup>2</sup>.

*Описание блока электрической части двигателя - «ЭЧ Дв»  
и блока якорная цепь - «ЯЦ»*

Входным сигналом для блока якорная цепь (далее ЯЦ) является разница сигналов напряжения питания  $U$  и ЭДС двигателя  $E_d$ , а выходным сигналом является ток  $I_{я}$ . Ток ЯЦ поступает на блок умножения, с помощью которого определяется момент  $M$  на валу двигателя за счет перемножения тока якоря и магнитного потока  $\kappa\Phi$ . Сигнал момента двигателя поступает на сумматор, где происходит его суммирование с сигналом момента от силы резания, момента трения и момента от веса машины. Разность сигналов поступает на блок механической части электродвигателя «МЧ Дв», с помощью которого в зависимости от момента инерции  $J$  двигателя определяется скоростью двигателя  $\omega_{\partial}$ . От скорости двигателя  $\omega_{\partial}$  зависит положение ротора  $\alpha_{\partial}$ , а в свою очередь, от положения ротора  $\alpha_{\partial}$  зависит магнитный поток  $\kappa\Phi$ .

Передаточная функция блока якорная цепь «ЯЦ»:

$$W = \frac{K_{я}}{T_{я}p + 1}, \quad (3.2.10)$$

где  $K_{я}$  – проводимость якорной цепи определяется по формуле



$$K_y = \frac{1}{R_y}, \quad (3.2.11)$$

Блок «ЭЧ Дв», реализующий двигатель представлен на рисунке 3.2.3 Блок «ЯЦ», реализующий якорную цепь представлен на рисунке 3.2.4

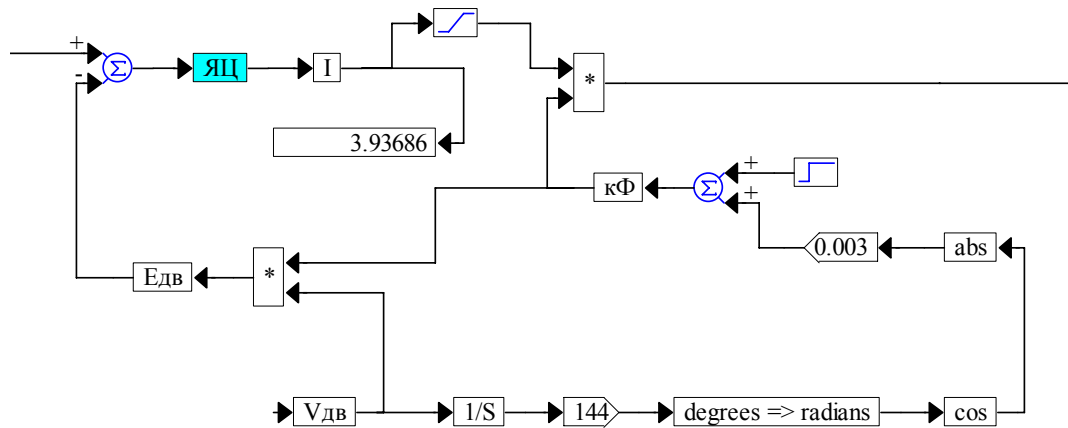


Рисунок 3.2.3 – Блок электрической части двигателя «ЭЧ Дв»

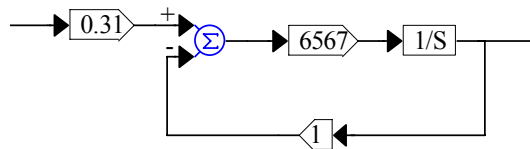


Рисунок 3.2.4 – Блок якорной цепи «ЯЦ»

### Описание блока преобразователя «PR»

Математическое описание системы управления составлено согласно рисунку 3.2.5 Основным элементом блока управления является микропроцессор (в дальнейшем МП), который выполняет функции регулятора и преобразователя. Сигналы задания  $U_v$  и  $U_{дм}$  с обратной связью с ДМ поступает на 8-разрядные аналого-цифровые преобразователи (в дальнейшем АЦП) МП. МП реализует пропорционально-интегральный закон регулирования [6, 65, 66].

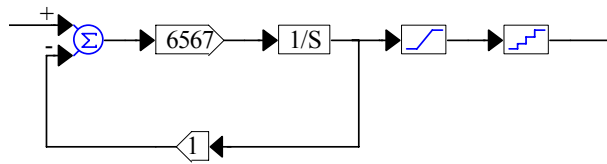


Рисунок 3.2.5 – Блок преобразователя «PR»

Передаточные функции преобразователя:

$$W = \frac{K_{\Pi}}{Tp + 1}, \quad (3.2.12)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент усиления преобразователя;

$T$  – постоянная времени преобразователя.

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\Pi}}{U_{Y}}, \quad (3.2.13)$$

$$T = \frac{1}{f}, \quad (3.2.14)$$

где  $f$  – частота широтно-импульсной модуляции реализуемой с помощью программы МП,  $f = 1,5$  кГц.

#### *Описание блока механической части двигателя «МЧ Дв»*

В данном блоке рассчитывается скорость двигателя  $V_{дв}$ . Блок «МЧ Дв» представлен на рисунке 3.2.6. Момент инерции двигателя ДВМ-100  $J=0,00049$  кг·м<sup>2</sup>. На выходе снимаем скорость двигателя  $V_{дв}$ , скорость изменяется в зависимости от установленного токоограничения в блоке «МЧ Дв» и заданного напряжения питания на входе в блок «PR»

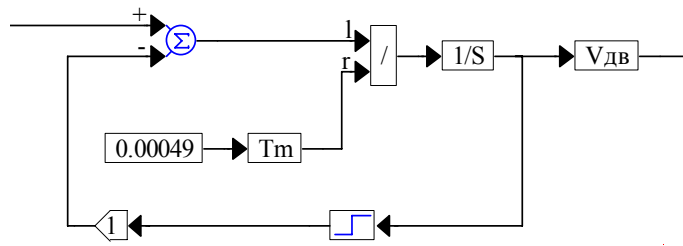


Рисунок 3.2.6 – Блок механической части двигателя «МЧ Дв»

### *Описание блока «Сила резания»*

В данном блоке рассмотрено воздействие на работу машины силы резания, возникающей в процессе резки трубопровода. На рисунке 3.2.7 представлен блок «Сила резания». На входе задаются необходимые параметры, а на выходе снимается момент от силы резания  $M_{Pz}$ . Рассчитывается сила резания по известной методике теории резания, такие параметры как: глубина и ширина резания, число оборотов и диаметр фрезы остаются постоянными на протяжении процесса резания, а величина подачи фрезы зависит от скорости двигателя  $V_{дв}$ . С увеличением скорости  $V_{дв}$  прямо пропорционально возрастает сила резания  $P_z$ , но в процессе длительного резания возникает износ инструмента, который приводит к изменению прямой зависимости скорости и силы резания.



### Описание блока «Износ инструмента»

В блоке «Износ инструмента» задаётся характер увеличения силы резания в ходе износа фрезы, рис. 3.2.8, как для фасонной дисковой фрезы, так и для дисковой отрезной фрезы.

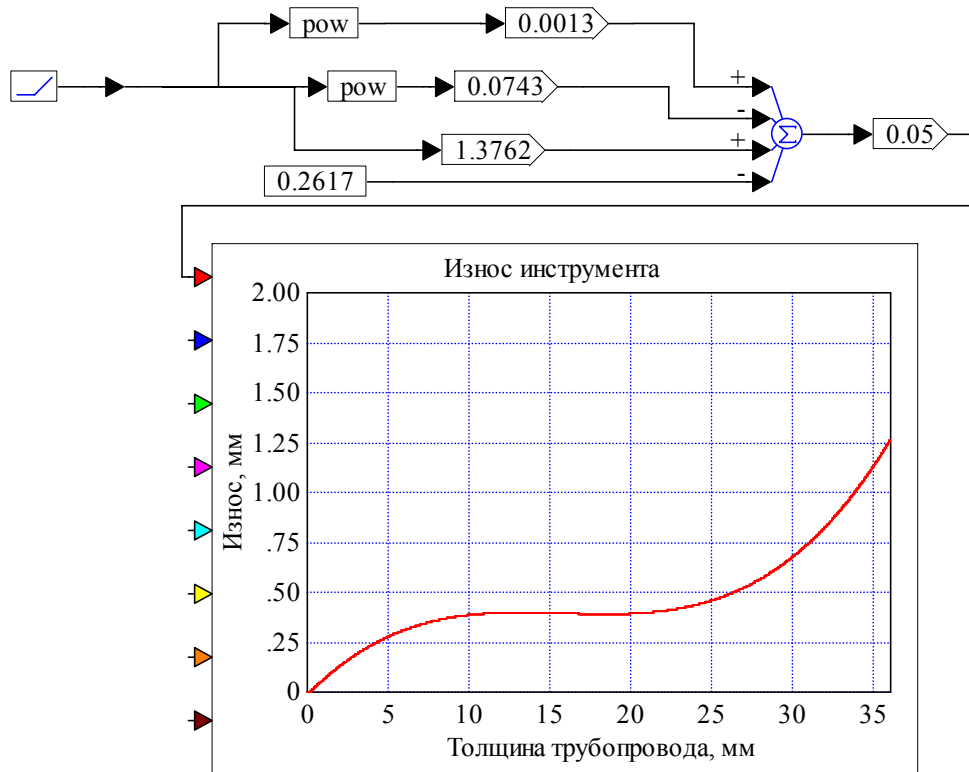


Рисунок 3.2.8 – Блок «Износ инструмента»

### Описание блока «Вес машины»

При движении машины по поверхности трубопровода, начиная с верхней точки, машина движется на спуск, в этом случае её вес способствует движению, после прохождения половины пути машина идёт на подъём, при этом вес препятствует движению. Действие веса машины на затрачиваемое усилие для перемещения машины по поверхности трубопровода носит синусоидальный характер. В блоке «Вес машины» задаётся характер изменения и вес машины, действующий на усилие перемещения машины, а на выходе блока момент для преодоления веса машины, рис. 3.2.9.

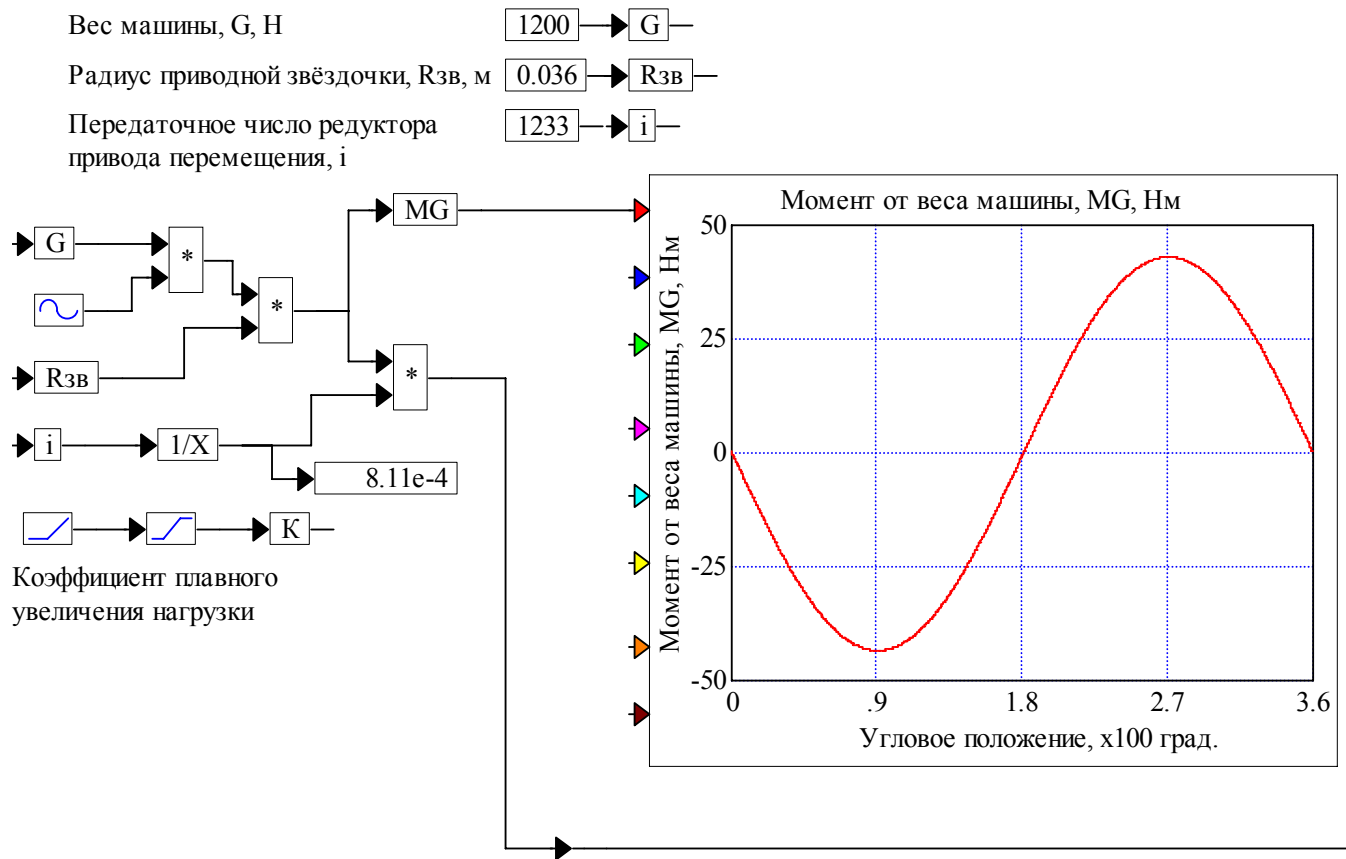


Рисунок 3.2.9 – Блок «Вес машины»

### Описание блока «Трение»

Закрепление машины на трубе осуществляется с помощью приводных цепей, цепи натягиваются амортизаторами с определенным усилием. При резке труб с толщиной стенки около 30 мм наблюдается значительная сила резания, вследствие чего затяжка амортизаторов достигает усилия 8800 Н. Сила трения, возникающая в элементах и узлах машины, оказывает существенное влияние на потребляемую мощность приводом перемещения. С помощью математического редактора Mathcad 14 были определены моменты трения во всех узлах трансмиссии машины в зависимости от усилия затяжки амортизаторов [23, 38]. В блоке «Трение» (рис. 3.2.10) входным сигналом является суммарный момент сил трения, на выходе через передаточное отношение редуктора привода перемещения получаем результирующий момент.

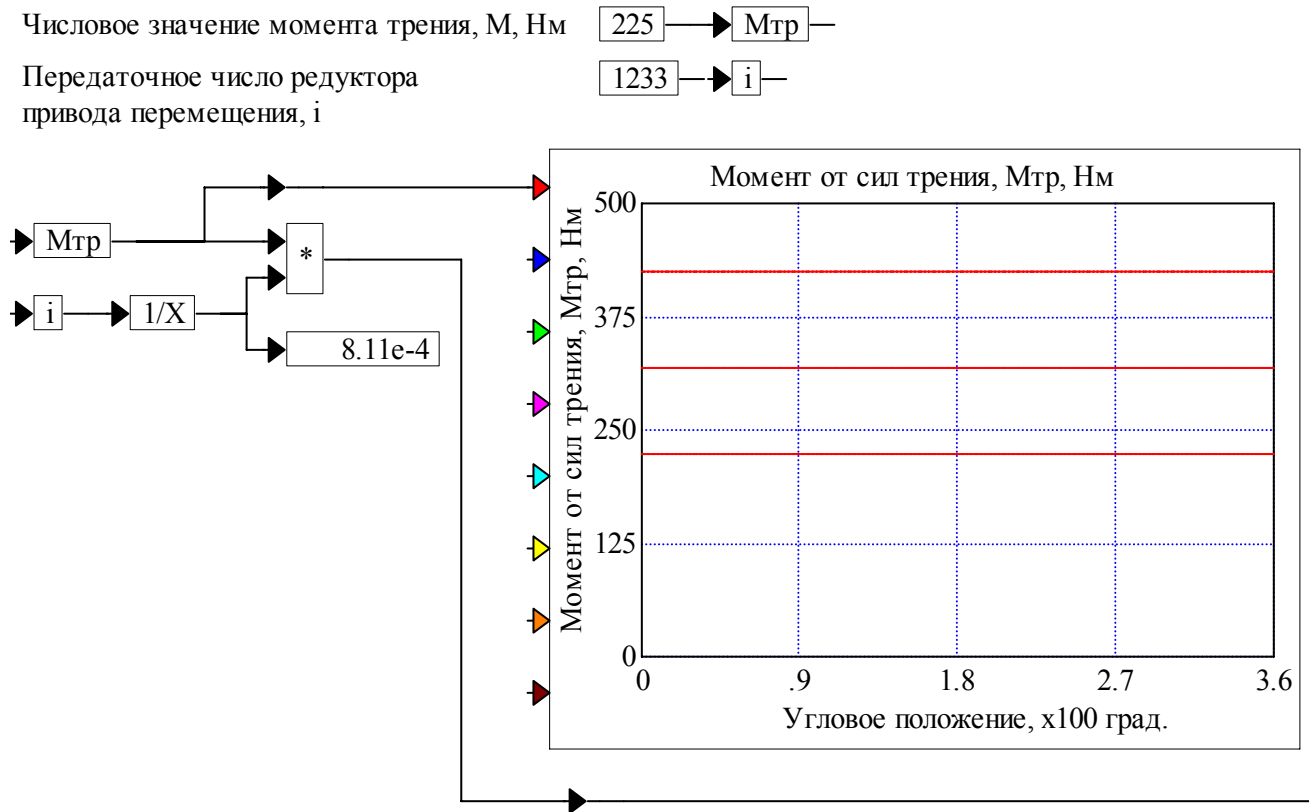


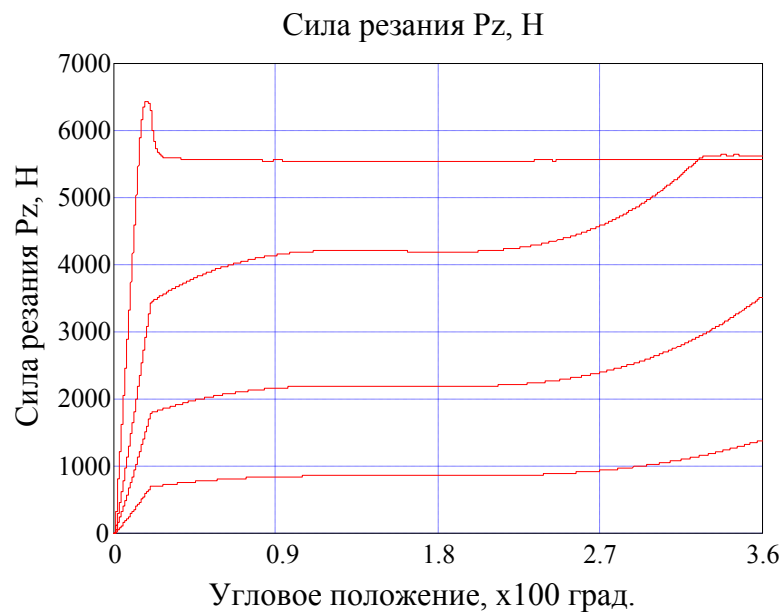
Рисунок 3.2.10 – Блок «Трение»

При исследовании математической модели совместной работы привода перемещения машины и привода врезания инструмента был проведён анализ факторов, влияющих на потребляемую мощность [76]. К таким факторам относятся: толщина стенки разрезаемого трубопровода, вид инструмента (фасонная дисковая и отрезная фреза), износ инструмента, вес машины, угловое положение машины на трубе и сила натяжения приводных цепей, все эти факторы изменяются в ходе процесса резания в независимости друг от друга [72]. Блочная структура построения математической модели позволяет оценить влияние каждого фактора, как в отдельности, так и в совокупности с другими.

Важной характеристикой труборезных машин является толщина разрезаемых труб, предложенная конструкция машины применима при резке труб толщиной до 30 мм. Таким образом, в ходе анализа использовались два значения толщины разрезаемых труб  $t_1=10$  мм и  $t_2=30$  мм и два вида фрез: фасонная дисковая фреза с шириной  $B=30$  мм и дисковая отрезная фреза с шириной  $B=6$  мм. Были

построены графики силы резания с ограничением момента выдаваемого двигателем, ограничение реализовано путём выставления максимально допустимой силы тока на двигателе привода, рисунок 3.2.11.

Из графика на рисунке 3.2.11 видно, что кривые 1, 2 имеют увеличение значений силы резания, а кривые 3, 4 имеют участки с постоянными значениями, это обусловлено работой привода в режиме ограничения нагрузки на допустимом уровне. Увеличение силы резания может быть связано с износом инструмента. Стабилизация нагрузки на заданном уровне обеспечивается регулировкой скорости перемещения машины (подачей инструмента).



1.  $t=10$  мм,  $B=6$  мм; 2.  $t=30$  мм,  $B=6$  мм; 3.  $t=10$  мм,  $B=30$  мм; 4.  $t=30$  мм,  $B=30$  мм

Рисунок 3.2.11 – Сила резания при при токоограничении  $I=1,4$  А

С учётом трения в узлах и элементах трансмиссии машины общая нагрузка на привод перемещения увеличивается, к моменту для преодоления силы резания добавился момент от сил трения. В процессе резания момент от сил трения остаётся постоянным, следовательно, для стабилизации общей нагрузки на определённом уровне необходимо корректировать силу резания. График стабилизированного момента нагрузки приведён на рисунке 3.2.12, величина стабилизированного момента на двигателе привода перемещения  $M_{CT}=0,7$  Нм.



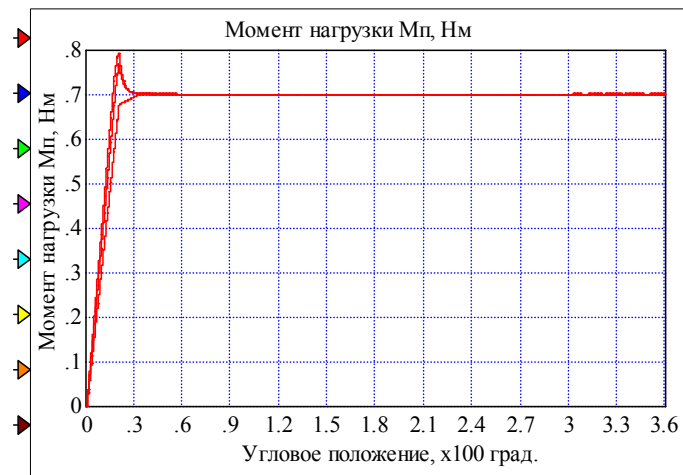


Рисунок 3.2.12 – Стабилизированный момент нагрузки

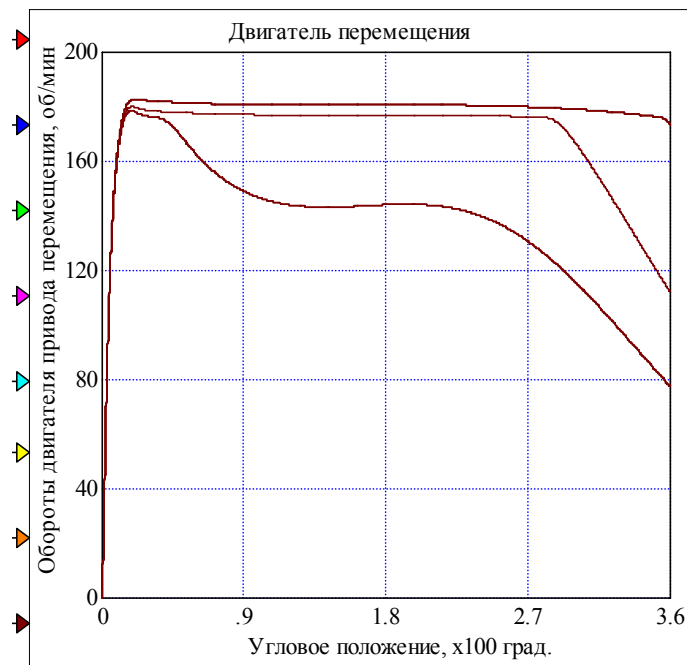
1.  $P_1=4400$  Н;  $P_2=6600$  Н;  $P_3=8800$  Н

Рисунок 3.2.13 – Скорость двигателя при стабилизации момента

1.  $P_1=4400$  Н;  $P_2=6600$  Н;  $P_3=8800$  Н

Анализ математической модели показал, что существенное влияние на потребляемую мощность приводом перемещения оказывает вес машины, были проанализированы зависимости момента нагрузки на двигателе привода перемещения и привода вращения инструмента от углового положения машины на трубе с учётом износа инструмента и трения в узлах трансмиссии. Было установлено, что при движении машина на подъём в положении 270 градусов при силе затяжке амортизаторов  $P_3=8800$  Н сила резания не более 150Н, это

обусловлено тем, что вес машины препятствует движению и действует в строго противоположном направлении. На рисунке 3.2.14 показаны графики моментов и скоростей вращения привода перемещения машины по трубе и привода вращения инструмента, при следующих параметрах: толщин разрезаемой трубы  $t=30$  мм – кривая 1,  $t=25$  мм – кривая 2; использовалась дисковая фасонная фреза; подача инструмента 25 мм/мин; усилие на амортизаторах приводных цепей  $P=8800$  Н.

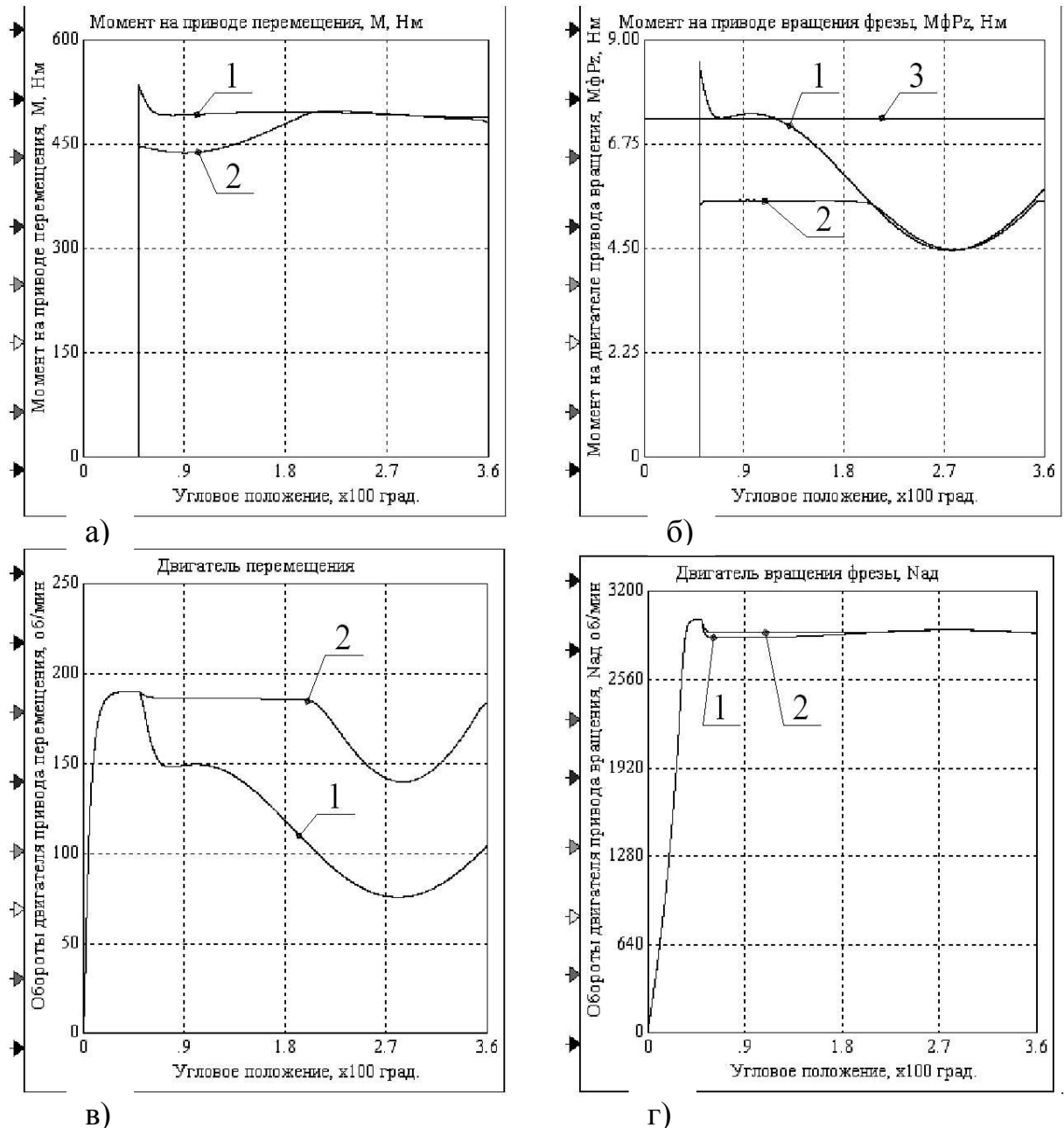


Рисунок 3.2.14 – Вращающие моменты и скорости вращения привода перемещения машины и привода вращения фрезы

### **3.3 Анализ совместной работы привода врезания инструмента и привода вращения инструмента**

Реализация модели совместной работы привода врезания инструмента и привода его вращения в программе Vissim представлена на рисунке 3.3.1, модель состоит из следующих блоков: преобразователя «PR», электрической части двигателя «ЭЧ Двр», механической части двигателя «МЧ Двр», силы резания «Сила резания» и блока модели асинхронного двигателя привода вращения инструмента. Входным сигналом на приводе врезания является напряжение, а выходным сигналом скорость двигателя.

Блок «Сила резания» описывающий силовую характеристику процесса резания, представлен на рисунке 3.3.2. Наряду с постоянными входными сигналами на блок перемножителя подаются зависимые сигналы, такие как глубина фрезерования, ширина фрезерования и подача инструмента, абсолютные значения этих сигналов нарастают в процессе врезания инструмента. Скорость нарастания зависит от оборотов двигателя привода врезания.

При настройке системы управления рассматривались два варианта стабилизации нагрузки на приводе врезания: регулировка момента и регулировка скорости вращения двигателя [77].

Структура блока регулировки по моменту представлена на рисунке 3.3.3, где с помощью ограничения потребляемого тока можно установить максимальный выдаваемый крутящий момент электродвигателем.

Структура блока регулировки скорости вращения электродвигателя привода врезания представлена на рисунке 3.3.4, где с помощью изменения напряжения питания на входе блока «PR» можно изменять скорость вращения [68].

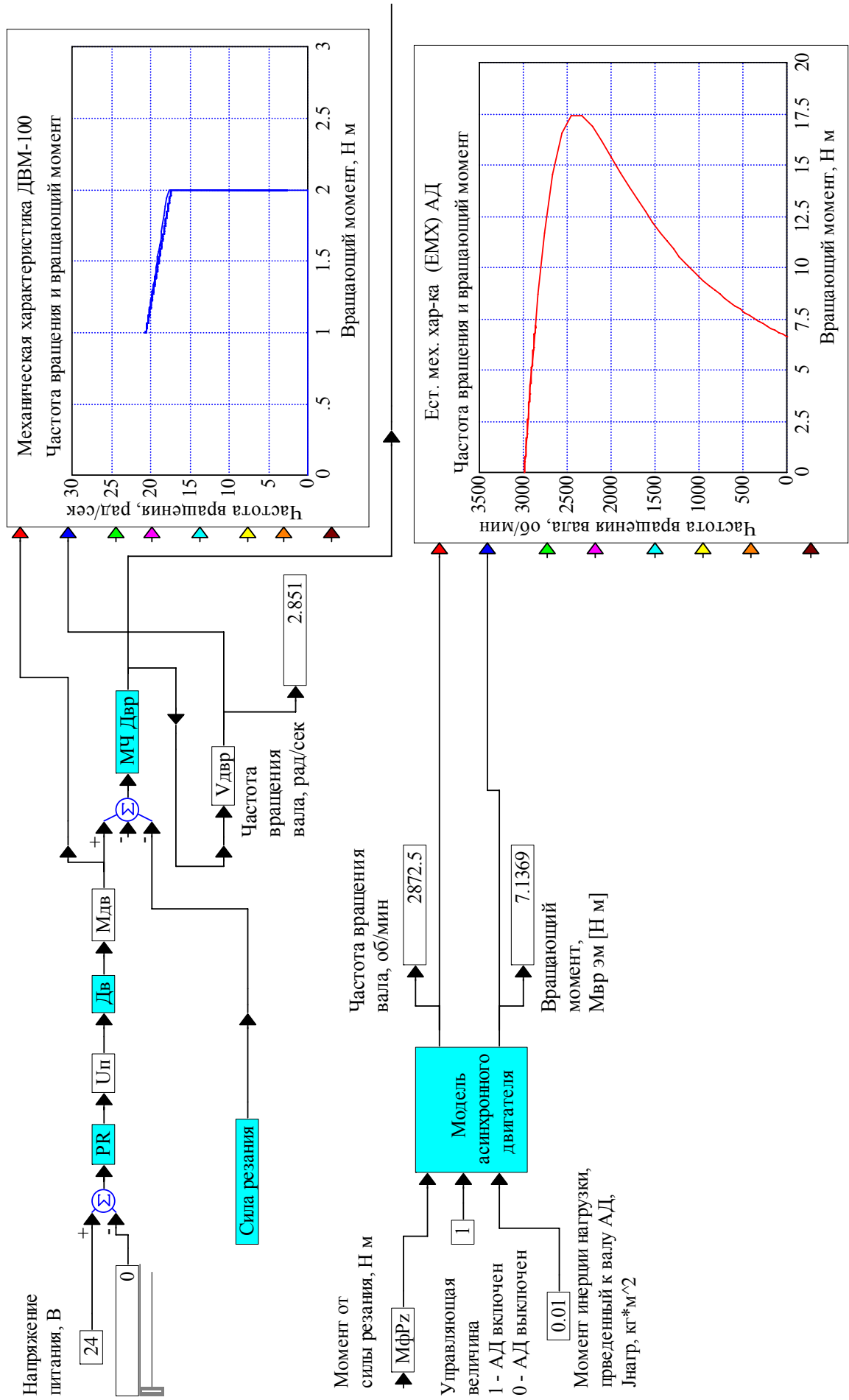


Рисунок 3.3.1 – Модель привода врезки

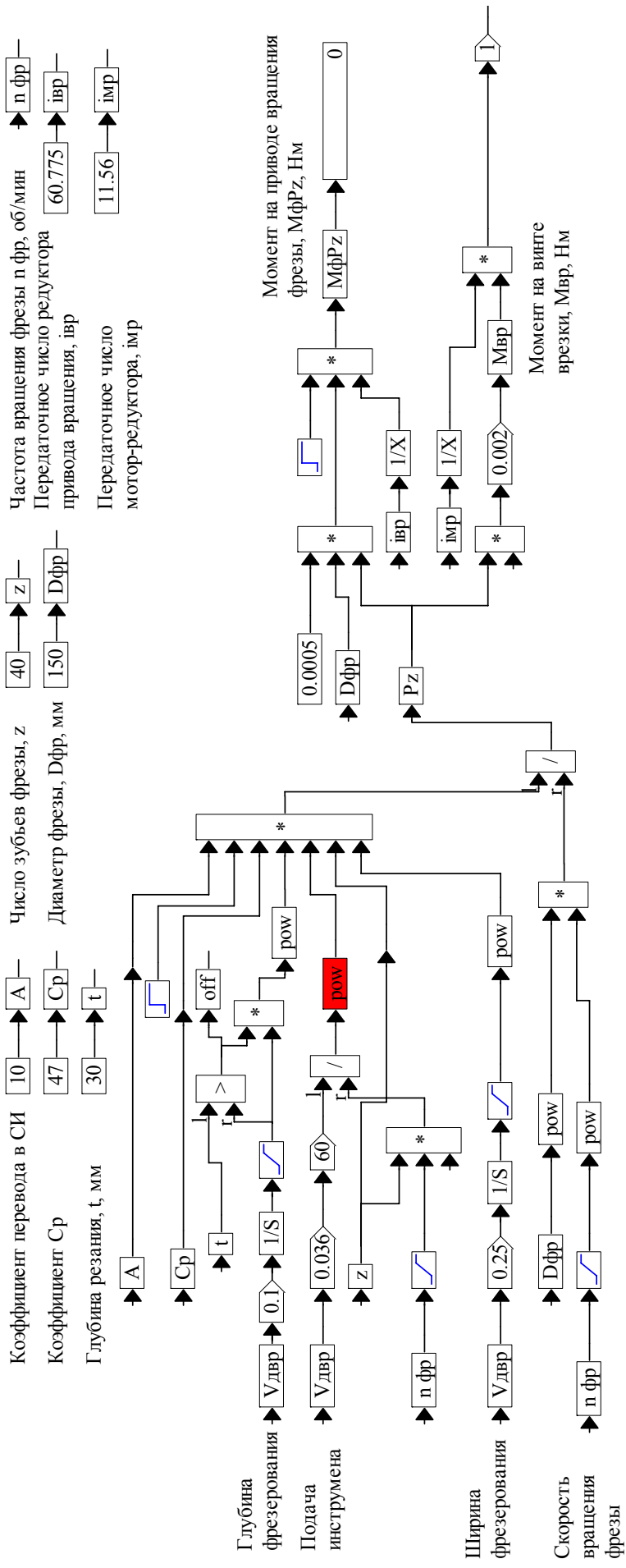


Рисунок 3.3.2 – Блок «Сила резания»

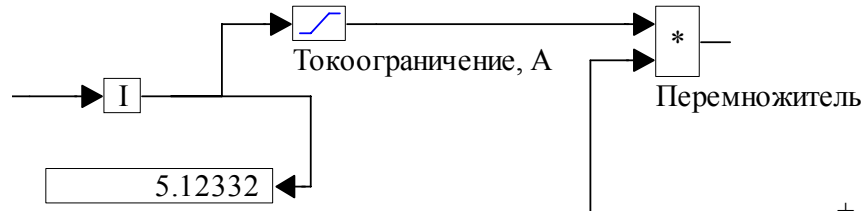


Рисунок 3.3.3 – Блок ограничения по току

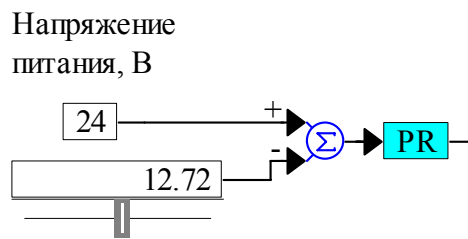


Рисунок 3.3.4 – Блок регулировки напряжения

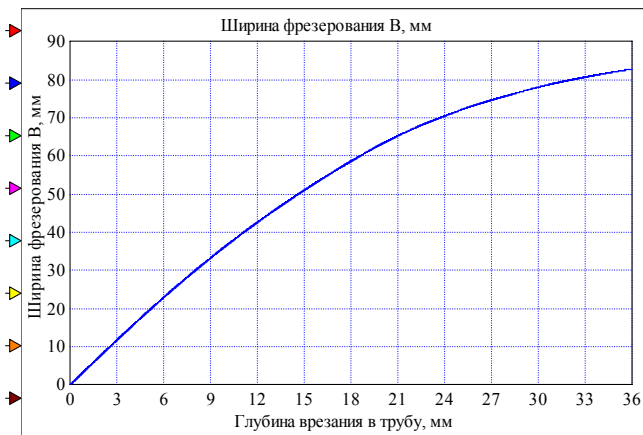


Рисунок 3.3.5 – Ширина фрезерования

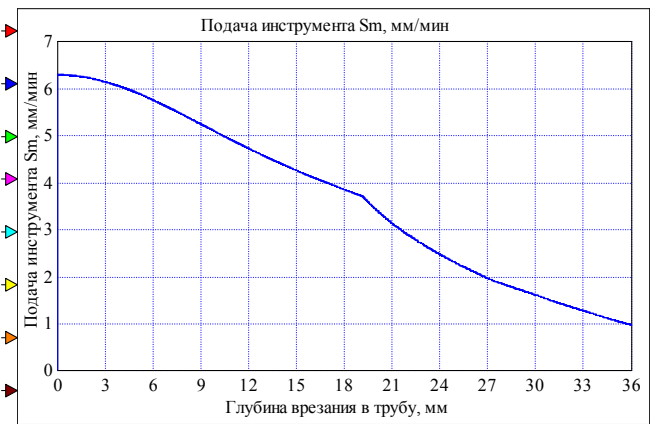
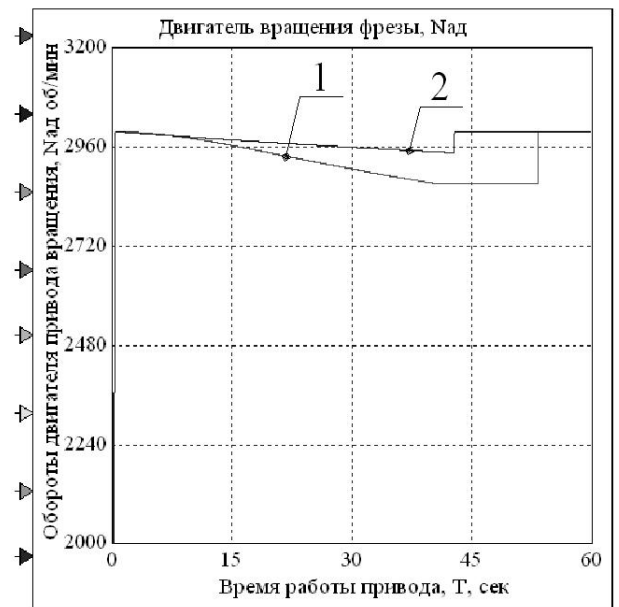
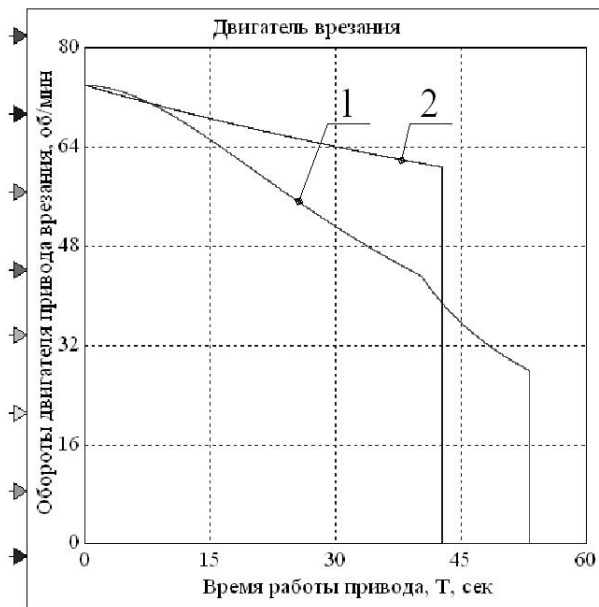
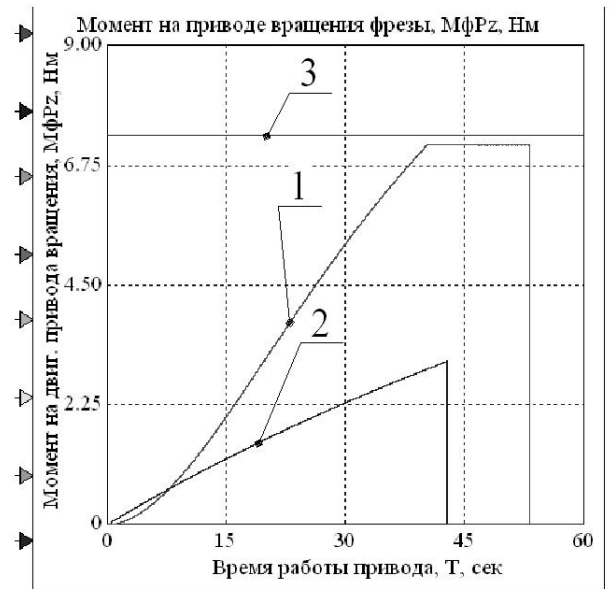
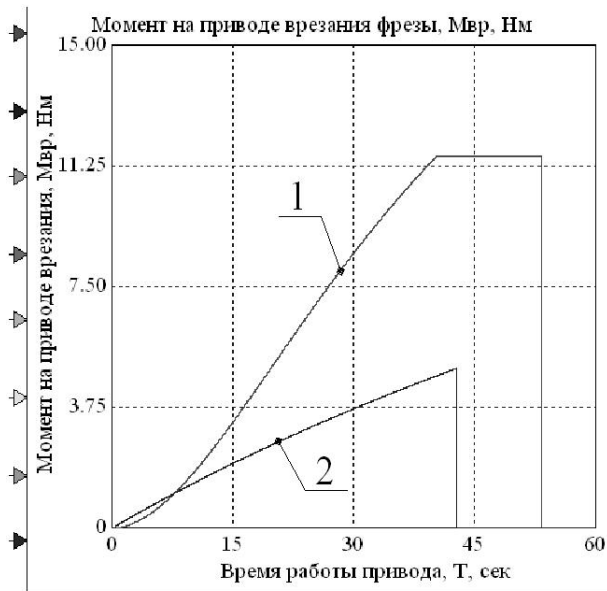


Рисунок 3.3.6 – Подача инструмента



1-  $t=30\text{мм}$ , 2 -  $t=6\text{мм}$

Рисунок 3.3.7 – Вращающие моменты и скорости вращения привода врезания инструмента и привода вращения инструмента

### Выводы

В ходе исследований получены математические модели совместной работы привода врезания инструмента и привода его вращения, привода перемещения и привода вращения инструмента с применением современных средств компьютер-

ного моделирования на основе теоретических исследований нагруженности приводов машины.

На основе полученных зависимостей можно прогнозировать работу машины с учетом износа фрезы, увеличения нагрузки, регулирования токоограничения.

Было установлено, что мощность привода перемещения инструмента не превышает 25 Вт, а мощность привода врезания не более 35 Вт. 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.

Анализ работы приводов показал, что использование двух способов стабилизации нагрузки на приводах перемещения и врезания позволяет подобрать оптимальные режимы резания труб с разной толщиной стенки различным инструментом. Способ ручной регулировки скорости вращения двигателя позволяет до начала процесса резания задать требуемую величину подачи инструмента, при которой не будет превышения нагрузки в случае отсутствия непредвиденных ситуаций. Способ автоматической регулировки момента двигателя обеспечивает стабилизацию нагрузки непосредственно в ходе процесса резания и даже в случае резкого увеличения нагрузки на приводе, например поломка зубьев фрезы. Таким образом, обеспечивается стабилизация нагрузки на приводах и предотвращается поломка элементов машины.



## 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МАШИНЫ

Новая конструкция привода позволяет оценивать нагрузки на приводах по току и мощности двигателей косвенным методом.

Испытания привода перемещения МРТ проводятся с целью проверки соответствия зависимостей полученных в результате теоретических расчетов.

### 4.1 Стендовые испытания привода перемещения машины

Испытания проводятся в несколько этапов. На начальном этапе привод устанавливался на тарировочный стенд и с помощью тормоза нагружался. Определяется зависимость тока на двигателе от момента на приводной звездочке.

На втором этапе привод устанавливался в тележку машины на трубу и испытывался на холостом ходу. Работа привода проверялась при различной затяжке амортизаторов и угловом расположении машины на трубе.

На третьем этапе привод испытывался в работе с установкой различных фрез и на трубах с различной толщиной стенки.

Перечень используемого оборудования и измерительной аппаратуры приведен ниже.

Тарировка привода подач:

- Для нагружения привода используется магнитный порошковый тормоз ПТ - 400 с чувствительностью динамометра по индикатору  $1 \text{ кгм} = 0.1 \text{ мм}$ ;
- Индикатор часового типа с чувствительностью  $0.01 \text{ мм}$ ;
- Муфта соединительная, зубчатая, компенсирующая;
- Блок управления напряжением на порошковым тормозе с диапазоном регулирования  $0 \dots 50 \text{ В}$ ;
- Блок управления двигателем БУД – 100;
- Блок питания для БУД – 100 напряжением  $30 \text{ В}$ ;

- Для измерения тока на двигателе подач используется амперметр типа Ц-4311.

Испытания на трубе на холостом ходу:

- Труба диаметром 700 мм;

- Блок управления двигателем БУД – 100;

- Блок питания для БУД – 100 напряжением 30 В;

- Для измерения тока на двигателе подач используется амперметр типа Ц-4311;

- Секундомер часового типа;

- Штангенциркуль с ценой деления 0.05 мм;

- Распределительный ящик напряжением 380 В.

Испытания на рабочем ходу:

- Труба диаметром 700 мм, толщина стенки равна 8 мм;

- Блок управления двигателем БУД – 100;

- Блок питания для БУД – 100 напряжением 30 В;

- Для измерения тока на двигателе подач используется амперметр типа Ц-4311;

- Фреза фасонная Ø168x32

- Измерительный модуль МИМс10.

Все замеры проводятся по три раза с целью минимизировать погрешность, появляющуюся из-за влияния случайных факторов [39, 59].

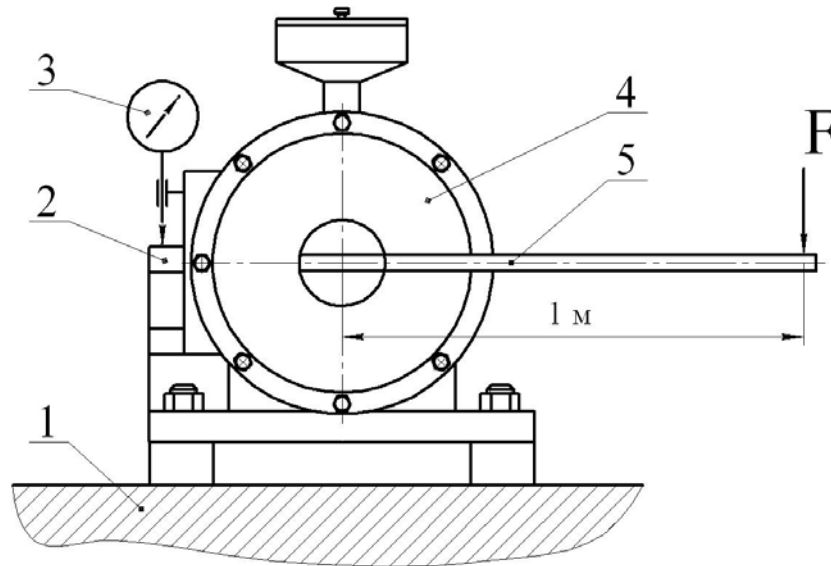
#### **4.1.1 Тарировка привода перемещения машины**

Тарировка привода подач проводится с целью определения зависимости тока на двигателе от момента на приводной звездочке, что в последующем позволит оценивать по току двигателя крутящий момент на выходном валу привода подачи.

Для определения диапазона нагрузок на тормозе проводится тарировка динамометра.

Одним концом на тормоз устанавливается рычаг длиной 1 м. К противоположному концу подвешиваются груз различной массы. С индикатора снимаются показания (рис. 4.1.1.1).

Таким образом, определяется зависимость показаний индикатора 3 от момента на тормозе 4



1- Станина, 2- Динамометрическая скоба, 3- Индикатор, 4- Тормоз, 5- Рычаг

Рисунок 4.1.1.1 – Схема тарировки порошкового тормоза ПТ-400

Результаты замеров сведены в таблицу 4.1.1.1. По результатам замеров строится тарировочный график зависимости показаний индикатора от момента на тормозе (рис. 4.1.1.2).

Таблица 4.1.1.1- Показания индикатора в зависимости от нагрузки на тормозе

№ замера	$M = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$	$M = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$	$M = 300 \text{ Н}\cdot\text{м}$
1	100	220	325
2	103	225	321
3	110	200	331
Среднее значение	104.3 дел	215 дел	325.7 дел

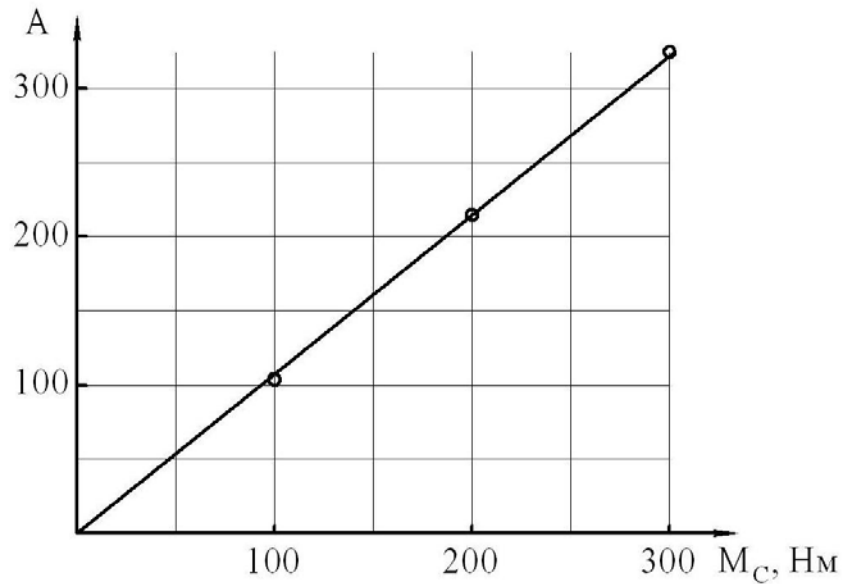


Рисунок 4.1.1.2 – Тарировочный график порошкового тормоза ПТ-400

После определения зависимости показаний индикатора от момента на тормозе проводится тарировка привода подач МРТ с помощью тормоза ПТ-400. Схема включения измерительной аппаратуры показана на рисунке 4.1.1.3.

Привод подач устанавливается на станину вместе с тормозом (рис. 4.1.1.3). Вал тормоза соединяется с приводной звездочкой зубчатой компенсирующей муфтой. Привод подачи включается в работу.

Увеличение тормозного момента осуществляется увеличением напряжения питания на блоке управления тормозом от 0 до 50 В.

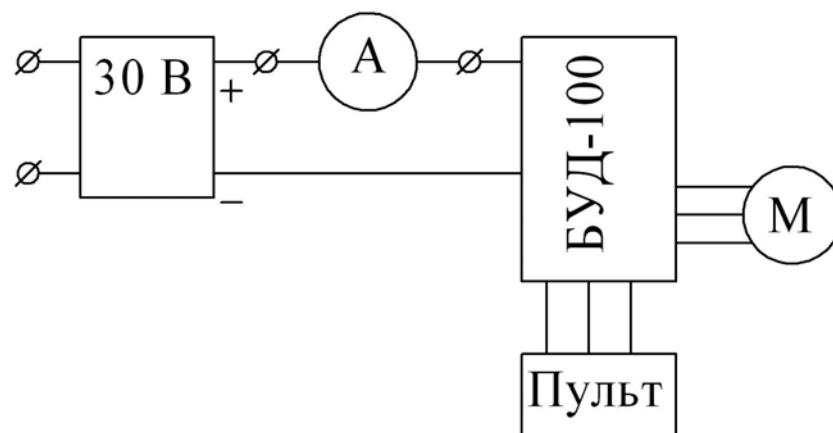
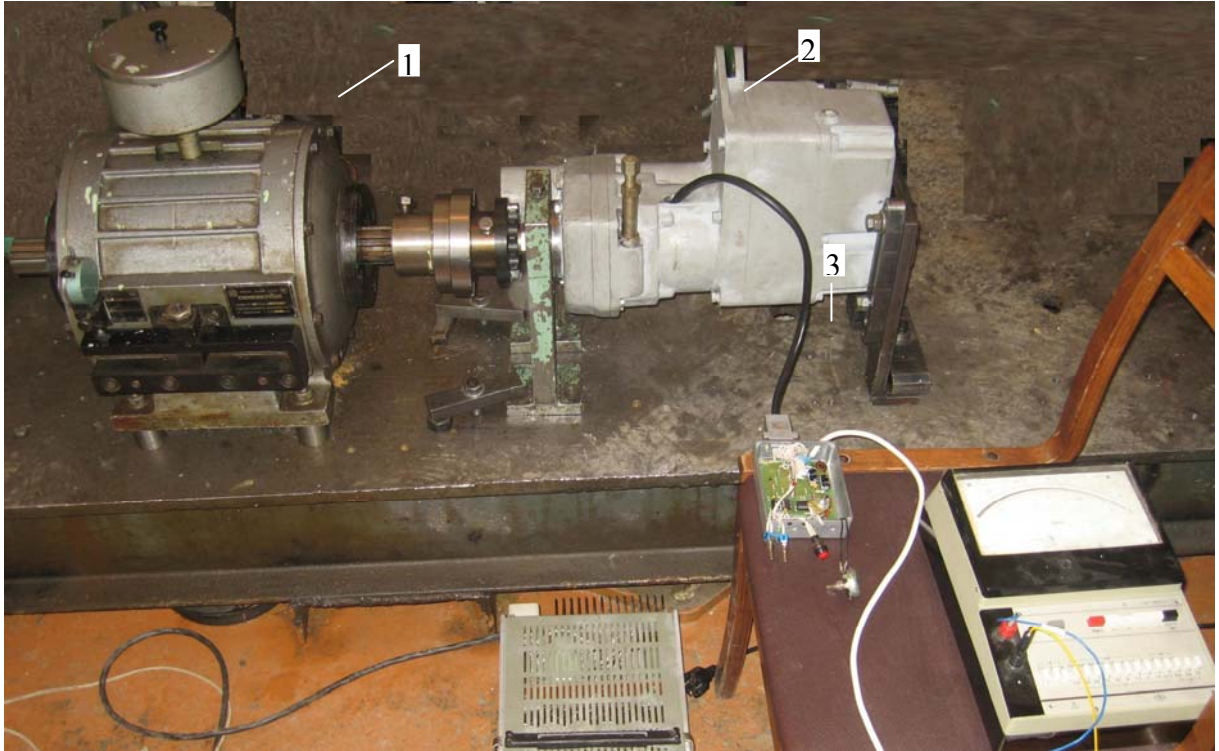


Рисунок 4.1.1.3 – Схема включения амперметра для измерения тока двигателя



1 – Порошковый тормоз; 2 – Привод перемещения; 3 - Амперметр

Рисунок 4.1.1.4 - Тарировочный стенд для привода перемещения

Результаты замеров сведены в таблицу 5.2.2.

Таблица 5.2.2 - Показания амперметра при нагружении привода перемещения

Момент, Н·м	Ток, А	Средний ток, А
0	0.25	0.25
50	0.35	0.4
	0.43	
100	0.42	0.5
	0.54	
	0.56	
150	0.4	0.62
	0.64	
	0.61	
200	0.61	0.77
	0.8	
	0.7	
	0.81	

Продолжение таблицы 5.2.2

Момент, Н·м	Ток, А	Средний ток, А
250	0.82	0.86
	0.83	
	0.93	
300	0.95	1.0
	1.05	
	1.0	
350	1.09	1.15
	1.2	
	1.16	
400	1.24	1.25
	1.27	
	1.24	

По результатам замеров строится тарифовочный график зависимости тока двигателя перемещения машины от момента на приводной звездочке (рис. 4.1.1.5), который необходим для оценки момента на ведущей звёздочке по значениям тока на двигателе перемещения.

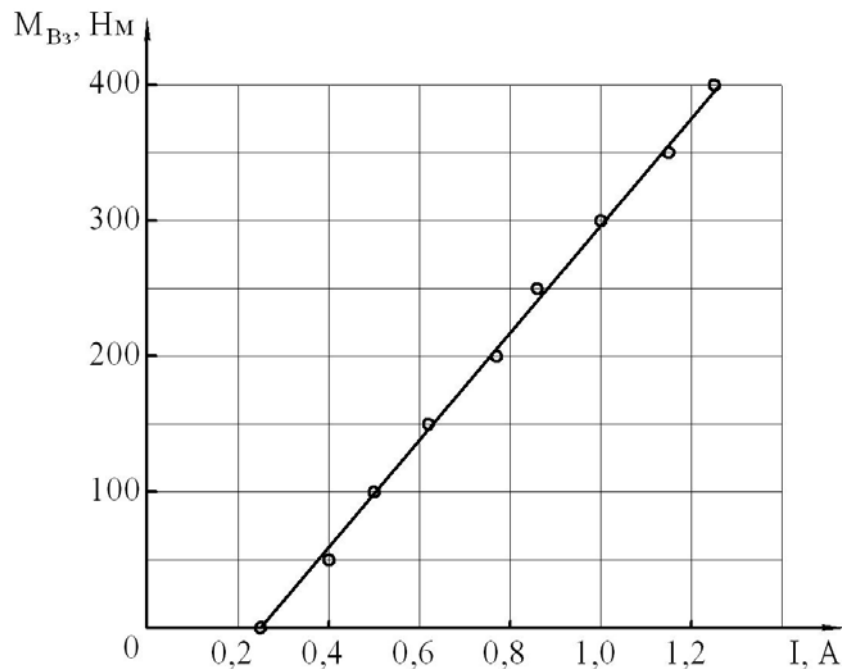


Рисунок 4.1.1.5 – Тарифовочный график привода перемещения

С помощью тарировочного стенда был построен график КПД редуктора привода перемещения, рисунок 4.1.1.6.

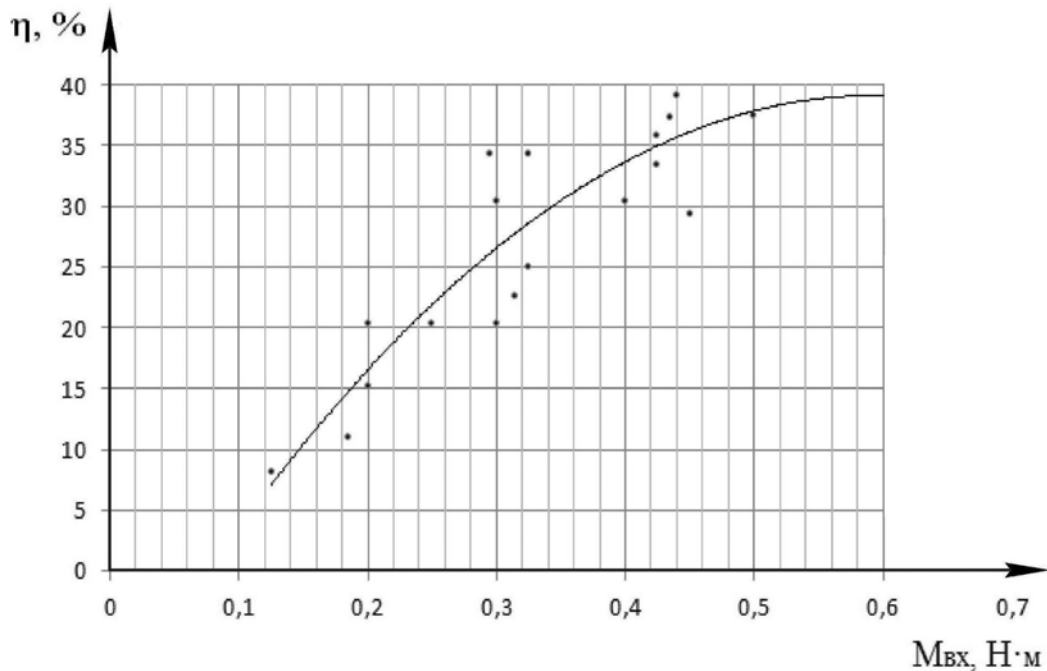


Рисунок 4.1.1.6 – Экспериментальный график КПД редуктора привода перемещения машины по трубе

Как видно из рисунка 4.1.1.6 экспериментальное значение КПД составило около 40%, когда теоретическое значение КПД составляет 76%. Такое различие обусловлено, тем, что эмпирические формулы не учитывают всех условий процесса работы машины [14, 37, 73].

#### **4.1.2 Определение зависимости момента на двигателе привода перемещения от силы затяжки амортизаторов на холостом ходу**

Для определения зависимости момента на двигателе привода подач от силы затяжки амортизаторов необходимо произвести тарировку амортизаторов. Пружины амортизаторов тарируются на вертикальной разрывной машине (рис. 4.1.2.1).

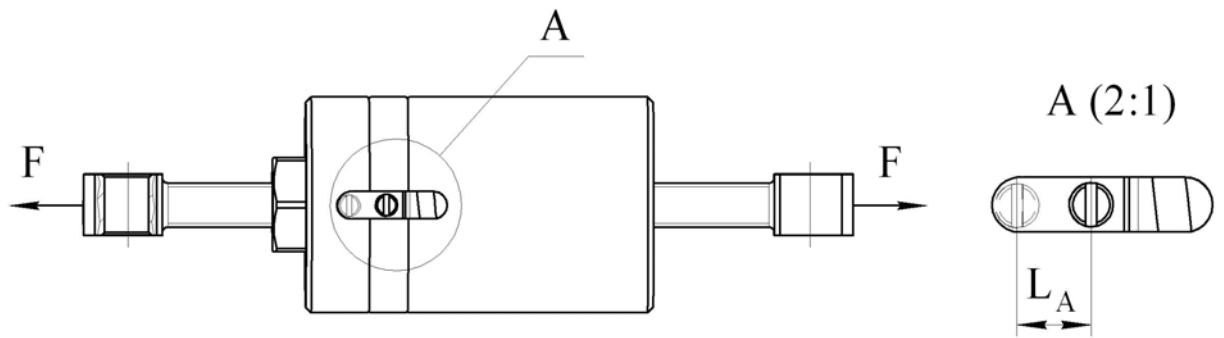


Рисунок 4.1.2.1 – Схема тарировки амортизатора

Результаты тарировки сведены в таблицу 4.1.2.1. По результатам тарировки строится тарировочный график пружин амортизаторов (рис. 4.1.2.2).

Таблица 4.1.2.1 - Зависимость момента на двигателе привода подач от силы затяжки амортизаторов

Сила затяжки, Н	Положение пружины, мм	Среднее положение пружины, мм
2200	4	5
	4.5	
	6.5	
4400	9	10
	10.5	
	10.5	
6600	14.5	15
	15.5	
	15	
8800	19.1	20
	21	
	20	



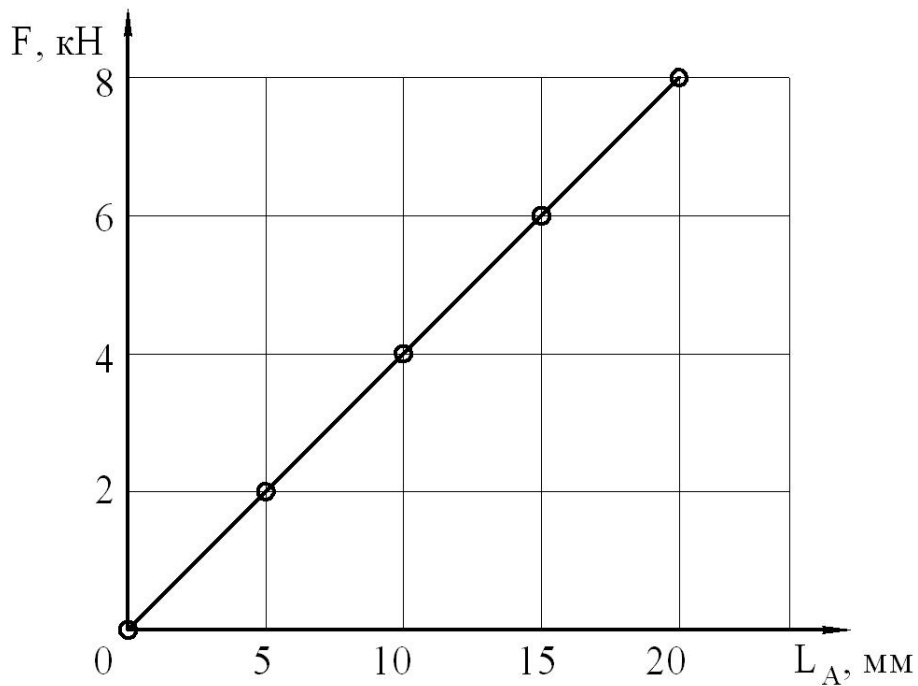
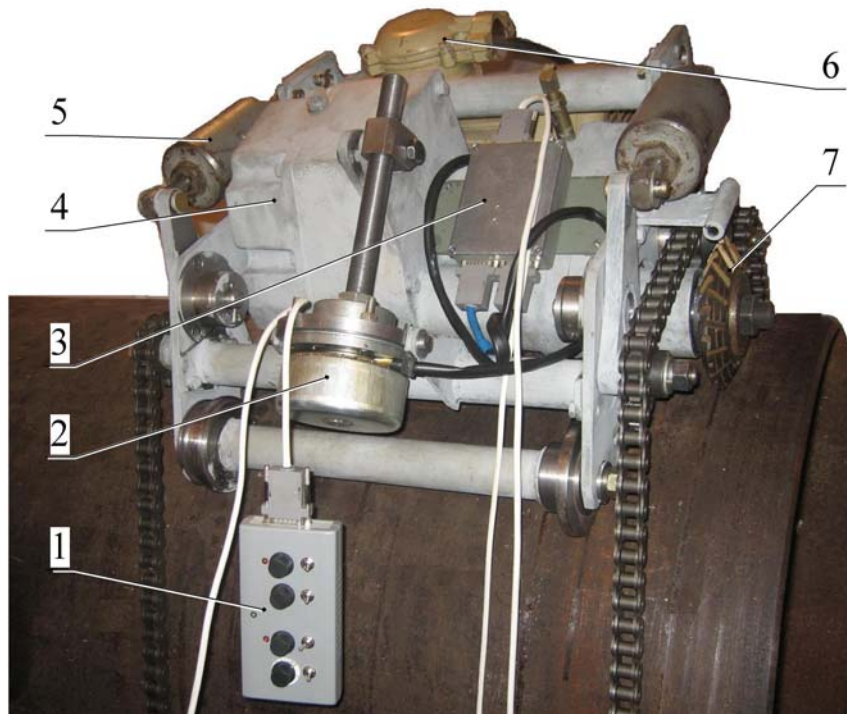


Рисунок 4.1.2.2 – Тарировка пружин амортизаторов

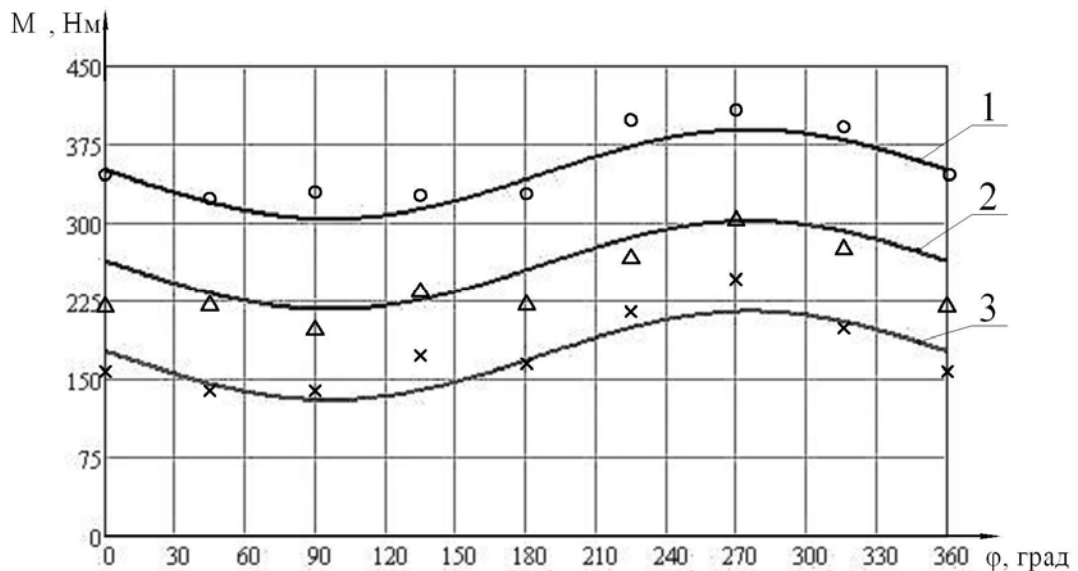
После проведения тарировки пружин амортизаторов привод был установлен в тележку машины, после чего машина надёжно закреплялась на трубе приводными цепями и испытывалась на холостом ходу. Проверялась работа привода при различной затяжке амортизаторов и угловом расположении машины на трубе. На рисунке 4.1.2.3 изображён лабораторный образец машины для резки труб диаметром 315-1440 мм и толщиной стенки до 30 мм [49].

По полученным графикам зависимостей был построен график зависимости момента на приводной звездочке от силы затяжки амортизаторов в номинальном режиме работы двигателя привода перемещения:  $n = 200$  об/мин (рис. 4.1.2.4); пользуясь графиком тарировки для приводной звездочки, полученным ранее (Рисунок 5.3.2).



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



Теоретические значения: 1-  $P_1=8800$  Н; 2 -  $P_2=6600$  Н; 3 -  $P_3=4400$  Н

Экспериментальные значения: «О»-  $P_1=8800$  Н; «Δ» -  $P_2=6600$  Н; «х» -  $P_3=4400$  Н

Рисунок 4.1.2.4 – Зависимость момента на приводной звездочке от силы затяжки амортизаторов  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и углового расположения  $\phi$  машины на трубе

## 4.2 Испытание привода перемещения машины при резке труб

Измерение момента на двигателе привода подачи проводится для определения влияния положения машины на трубе на момент приводной звездочки, т.е. следует определить крутящий момент на ведущей звездочке путём замера тока.

На рисунке 4.2.1 показано положение машины, в котором нагрузка на привод подачи максимальна, т.к. векторы всех сил, действующих в системе машина-труба, направлены против движения машины.

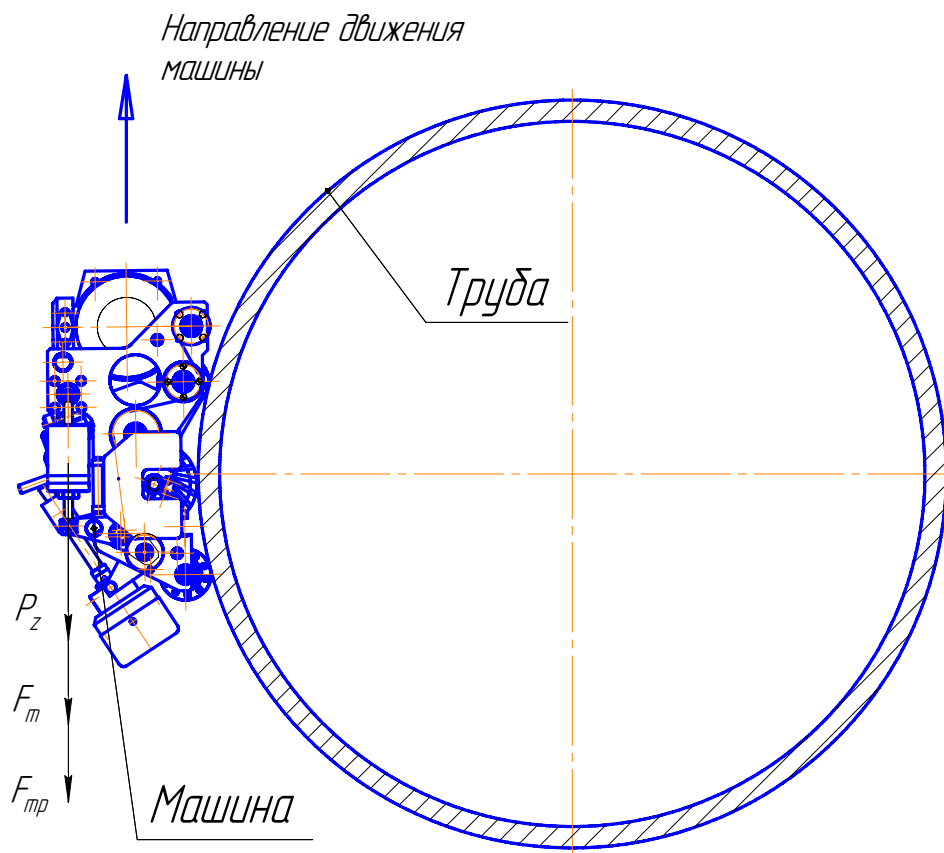


Рисунок 4.2.1 – Схема действия сил на машину в крайнем левом положении

Испытания проводились в номинальном режиме работы машины, т.е. подача равна  $S = 25$  мм/мин.

В качестве примера на рисунке 4.2.2 приведены экспериментальные и теоретические данные момента на ведущей звездочке привода перемещения при раз-

ной затяжке приводных цепей в ходе резки трубы диаметром 720 мм с толщиной стенки 8 мм и подачей инструмента 25 мм/мин.

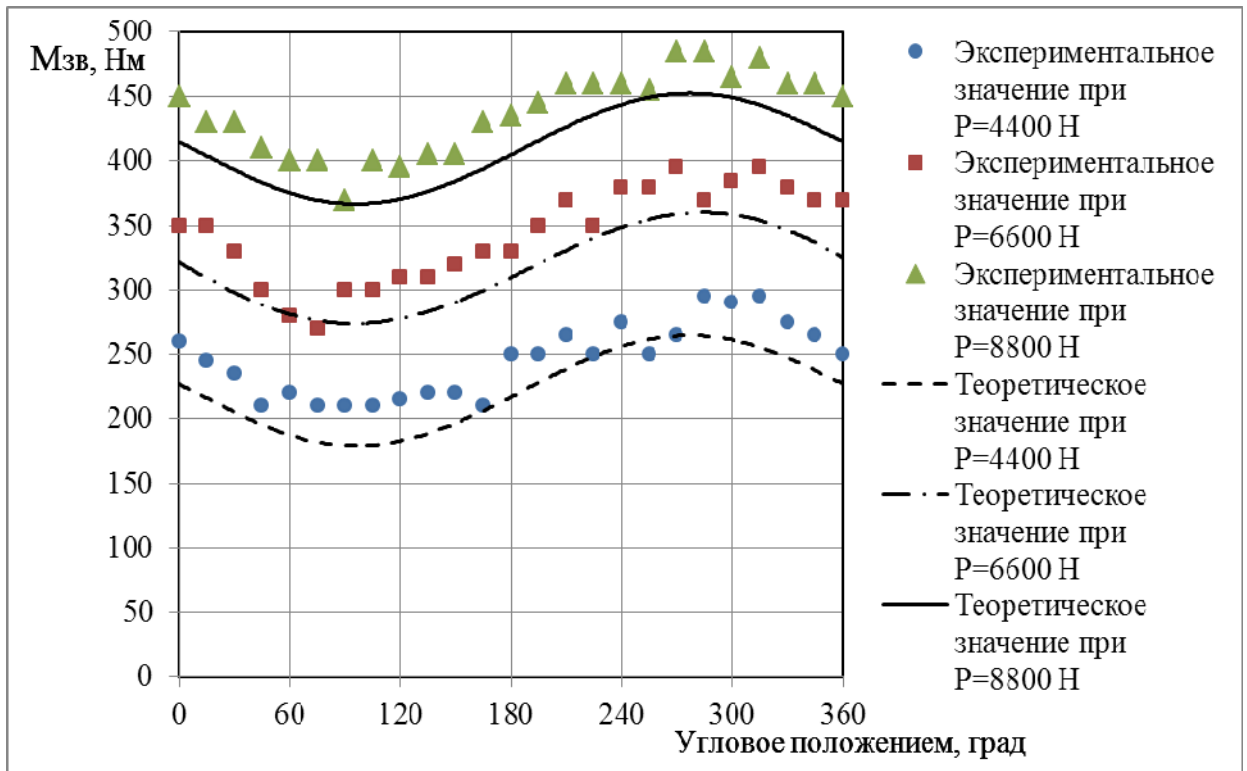


Рисунок 4.2.2 - График момента на ведущей звёздочке Мзв при различном натяжении приводных цепей;  $t=8$ ;  $S=25$  мм/мин

Из графиков на рисунке 4.2.2 видно, что теоретические значения момента на ведущей звёздочке меньше экспериментальных на 10-15%. Это связано с тем, что реальный КПД привода перемещения меньше теоретического.

### 4.3 Испытание привода врезания инструмента при резке труб

Испытания проводятся в несколько этапов. На начальном этапе по аналогичной приводе перемещения схеме, но с меньшим тормозом привод устанавливался на тарировочный стенд и нагружался. Тарировка привода подач проводится с целью определения зависимости тока на двигателе от момента на винте врезки, что в последующем позволит оценивать по току двигателя крутящий момент на винте врезки (рис. 4.3.1).

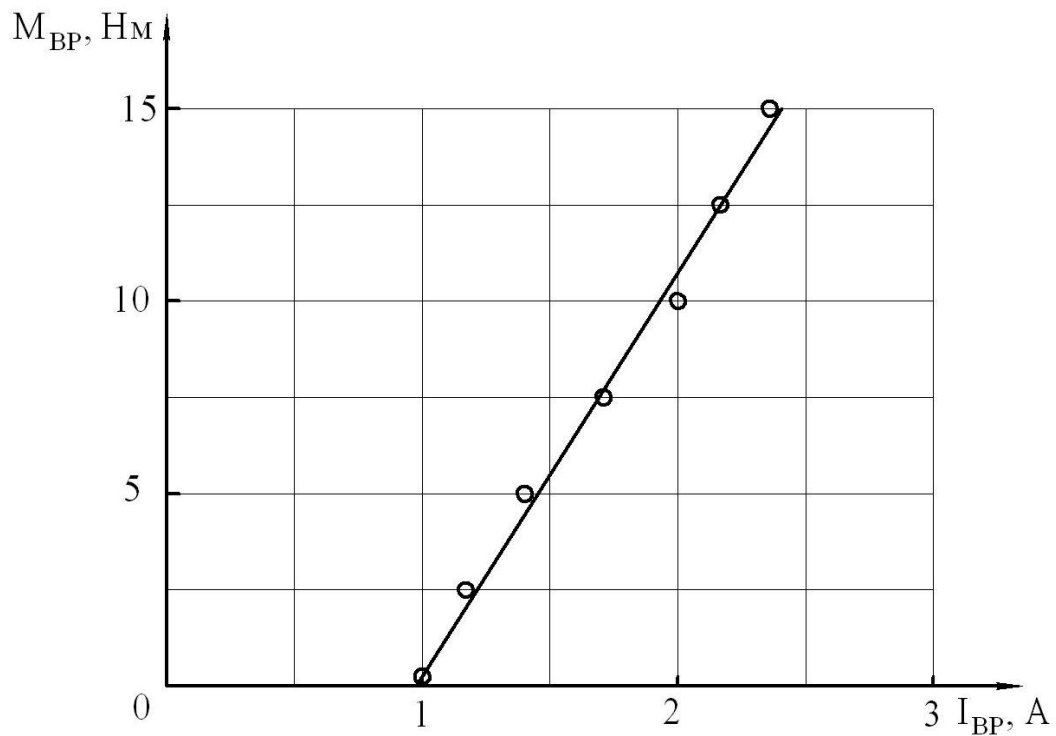


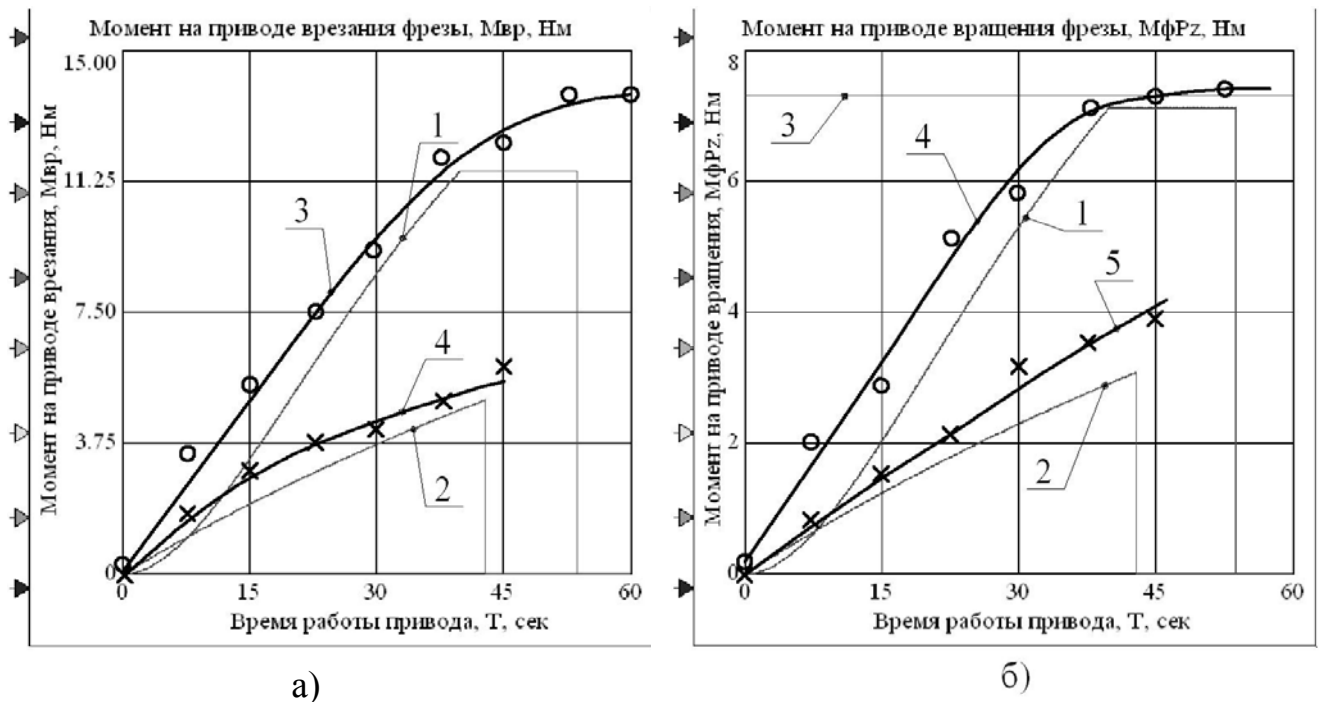
Рисунок 4.3.1 – Тарировочный график привода врезания

На втором этапе в составе машины привод испытывался на холостом ходу.

Проверялись следующие параметры привода врезания инструмента:

- перемещение фрезы при разных подачах;
- проверяется работа привода в режиме ускоренного подвода и отвода фрезы;
- оценивается расположение фрез в верхнем и нижнем положении с установкой на трубах разного диаметра.

На третьем этапе привод испытывался в работе при резке труб разной толщины при различных подачах с установкой дисковой фасонной и отрезной фрез.



1 – Теоретические значения момента при врезании фасонной фрезы в трубу с толщиной стенки  $t=20$  мм; 2 - Теоретические значения момента при врезании отрезной фрезы в трубу с толщиной стенки  $t=30$  мм; 3 – Номинальное значение момента на двигателе привода вращения фрезы,  $M_{ном}=7,53$  Нм; 4 – Экспериментальные значения момента при врезании фасонной фрезы в трубу с толщиной стенки  $t=20$  мм; 5 - Экспериментальные значения момента при врезании отрезной фрезы в трубу с толщиной стенки  $t=30$  мм

а) привод врезания фрезы; б) привод вращения фрезы

Рисунок 4.3.2 – Моментные нагрузки на приводах

### Выводы

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 40..45%. Установлена зависимость момента на выходном валу от тока двигателя, данная зависимость необходима для выставления величины токоограничения на двигателе привода перемещения.

Был спроектирован и изготовлен лабораторный образец машины для безогневой резки труб большого диаметра, позволяющий оценивать совместную работу приводов и их нагруженность во время работы.

В ходе практических исследований получены данные по работе машины с независимыми приводами врезания инструмента, перемещения машины и вращения инструмента.

Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность машины и достоверность математической модели совместной работы приводов.

## **5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Проведенные в данной работе исследования были использованы при создании опытного образца машины МРТ 325-1420 мм с независимым приводом врезания инструмента и приводом его вращения. Данная машина для безогневой резки труб с электрическим приводом МРТ 325-1420 мм предназначена для резки труб диаметром 325-1420 мм с помощью специального лезвийного инструмента (фрезы). При работе машина обеспечивает вырезку поврежденных участков трубопроводов и линейной арматуры при истечении нефти без избыточного давления. Машина эксплуатируется в условиях умеренного климата климатическое исполнение УХЛ, категория размещения I по ГОСТ 15150-69, кроме того работа машины возможна во взрывоопасных зонах [13].

В результате работы в рамках хоз. договора № 201450087 от 14.05.2014 г. «Модернизация машины для безогневой резки труб «Волжанка-3М» с АО «Транснефть-Приволга» было выполнено:

- разработка конструкторской документации;
- разработка и согласование эксплуатационной документации;
- разработка и согласование программы и методики типовых испытаний;
- изготовление опытного образца машины;
- проведение типовых испытаний;
- доработка конструкторской документации по результатам испытаний.

Технические характеристики сведены в таблице 5.1



Таблица 5.1

Наименование основных параметров	Показатели
1 Частота вращения режущего инструмента, об/мин	не более 54,5
2 Подача режущего инструмента, мм/мин	28±2,0
3 Время реза трубы, мин., не более (при толщине стенки до 30 мм), диаметром, мм	
325	130
1420	150
4 Глубина резания максимальная (за один проход), мм	
а) Фасонной фрезой 160 x 32	30
б) Отрезной фрезой 140 x25	20
5 Несовпадение контура реза при использовании направляющих, мм	0
6 Тип привода резки машины электрическая сеть	электрический 380 в ± 10% 50 Гц
электродвигатель во взрывозащищенном исполнении 4ВР80В4	УХЛ1
Мощность, кВт	1,5
Число оборотов, об/мин	1410
7 Тип привода врезки машины электрическая сеть	Электрический – 24 в ± 2%,
мотор-редуктор МР 120.80.2 – 25ВТ	
Мощность, Вт	40
Число оборотов, об/мин	10
8 Габаритные размеры машины, мм, не более	
длина	700
ширина	530
высота	420
9 Габаритные размеры пульта управления, мм, не более	
длина	500
высота	1400
ширина	600
10 Масса машины, кг, не более	100
11 Масса пульта управления, кг, не более	35

### *Конструкция машины для безогневой резки труб*

Машина состоит из электродвигателя, редуктора, тележки, мотор-редуктора, фрезы фасонной конусной, цепей для крепления машины к трубе, пульта управления.

Машина для резки труб (рис. 5.1, 5.2) содержит тележку 1, привод режущего инструмента, состоящий из электродвигателя 2, ременной передачи 3, планетарного редуктора 4, цилиндрической зубчатой передачи 5, шпинделя 6 с установленным на нем режущим инструментом 7.

Привод подачи включает планетарный редуктор 8, на выходном валу 9 которого установлена с помощью срезного штифта 10 приводная звездочка 11, находящаяся в зацеплении с неподвижной цепью 12. Выходной вал планетарного редуктора 4 привода вращения фрезы жестко соединен с ведущей шестерней 13 редуктора 8 привода подачи. Одно из центральных колес 14 планетарного редуктора соединено жестко с его выходным валом 9, а другое центральное колесо 15 установлено свободно. На наружной поверхности центрального колеса 15 нарезан зубчатый венец 16. Механизм включения привода подачи содержит фиксатор, выполненный в виде зубчатого сектора 17, винта 18 и ручки 19. Механизм врезания инструмента содержит мотор-редуктор 20 с электродвигателем постоянного тока 21, опорную поперечину 22 тележки 1, винт 23. Гайку 24, шарнирно соединенную с корпусом 25, который установлен в тележке 1 на втулках 26, 27 с возможностью поворота на них.

### *Описание работы отрезной машины*

Вращение от вала двигателя 2 через ременную передачу 3 передается на ведущий вал редуктора 4, от ведомого вала этого редуктора через цилиндрическую зубчатую передачу 5 на шпиндель 6 и установленный на нем режущий инструмент (фрезу) 7. Врезание режущего инструмента производится с помощью механизма врезки. При этом вращение от мотор-редуктора 20 передается на винт 23, который вызывает перемещение гайки 24 и поворот корпуса 25 на втулках 26, 27 корпуса тележки 1.

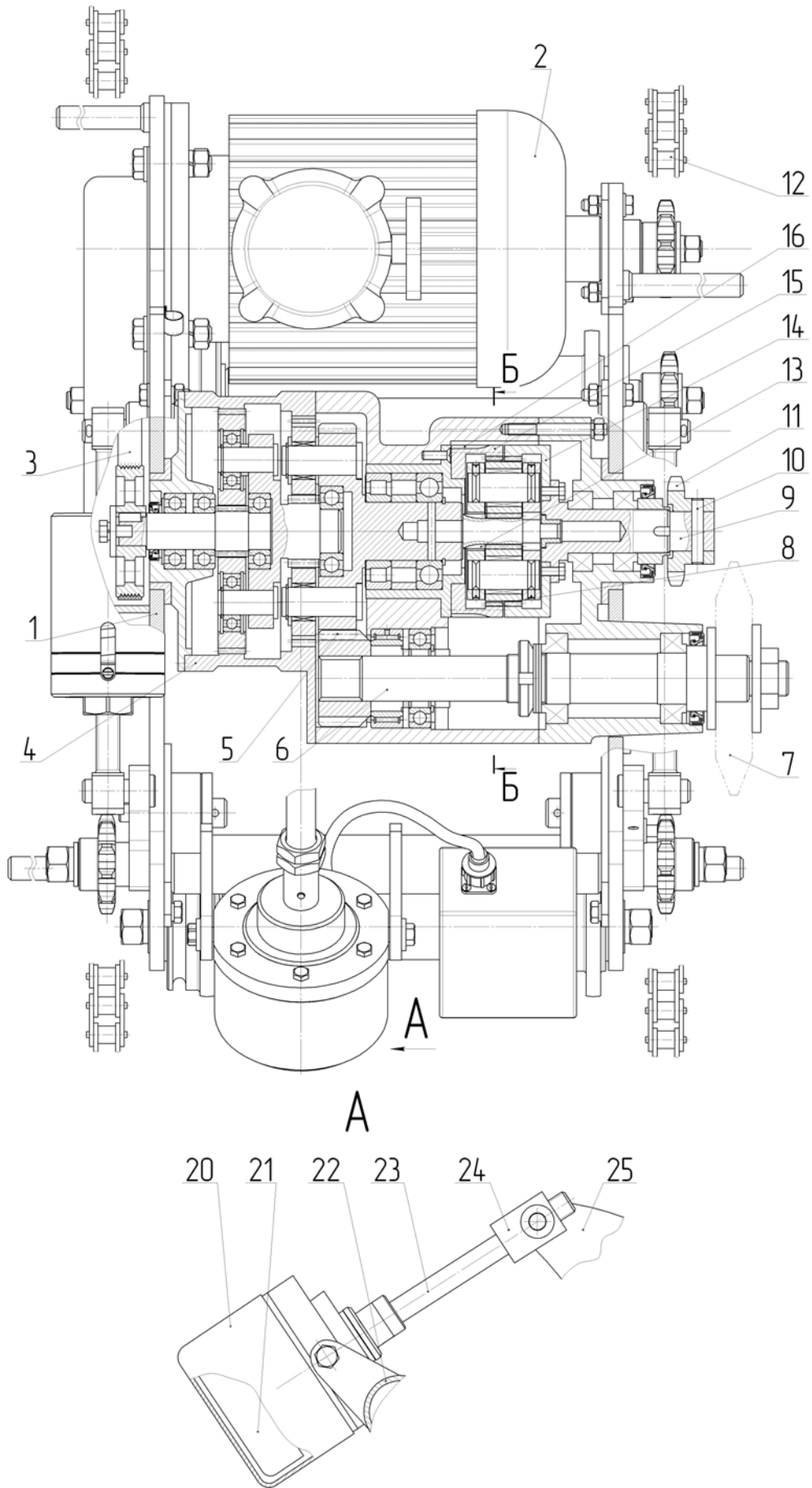


Рисунок 5.1 – Конструкция машины

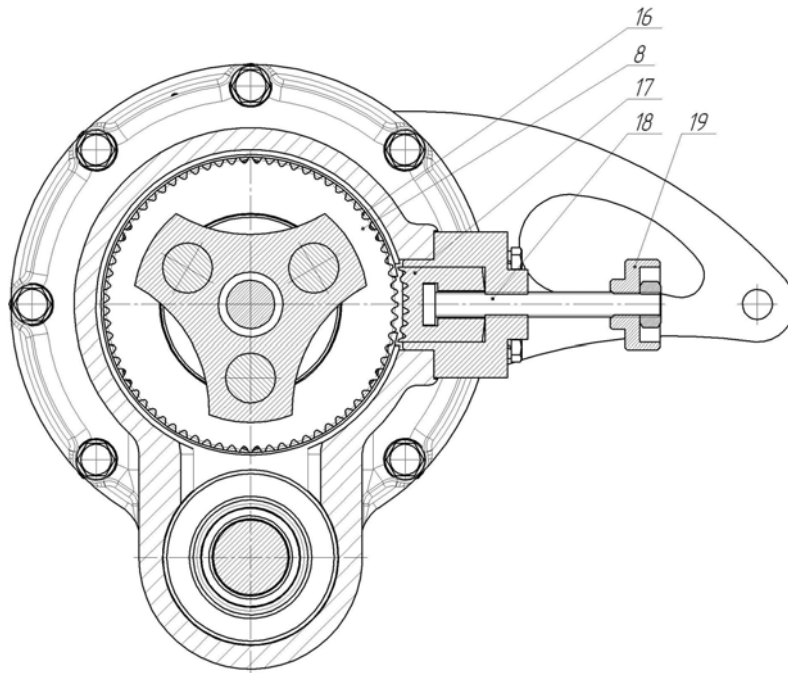


Рисунок 5.2 – Разрез по сечению Б-Б

Подача инструмента (перемещение тележки 1 по трубе) производится приводом подачи, который приводится в движение от ведомого вала редуктора 4 привода вращения инструмента. Вращение от этого вала передается на ведущую шестерню 13 планетарного редуктора 8. При остановленном центральном колесе 15 вращение передается ведомому валу 9 и установленной на нем с помощью срезного штифта 10 приводной звездочке 11. Звездочка 11, которая находится в зацеплении с неподвижной цепью 12, охватывающей разрезаемую трубу, приводит в движение тележку 1, а вместе с ней режущий инструмент 7. Включение механизма подачи осуществляется фиксацией центрального колеса 15 с корпусом привода 25 путем ввода зубчатого сектора 17 с помощью винта 18 в соединение с зубчатым венцом 16 центрального колеса 15. При отвинчивании винта 18 с помощью ручки 19 зубчатый сектор 17 выходит из зацепления с зубчатым венцом 16 центрального колеса 15 и передача вращения приводной звездочке 11 прекращается. В результате тележка 1 останавливается, подача прекращается.

При аварийных перегрузках в приводе подачи происходит разрушение срезного штифта 10 и вращение на приводную звездочку 11 не передается, подача останавливается.

Подача охлаждающей жидкости на режущий инструмент осуществляется шлангом из бачка.

Для резки труб с большой точностью схождения реза предусмотрены направляющие, а на машине установлены, на стороне противоположной режущему инструменту, колеса с желобами для движения по направляющей, которая крепится на трубе с противоположной стороны от фрезы.

Пульт управления предназначен для управления работой привода вращения инструмента и мотор-редуктора привода врезания инструмента и представляет собой шкаф, содержащий пусковую, защитную арматуру, с вынесенным наружу кнопочным блоком, выполненным во взрывозащищенном исполнении.

В ходе модернизации машина (рис. 5.3) оснащена независимым приводом



Рисунок 5.3 – Опытный образец машины для резки труб диаметром 315-2000 мм и толщиной стенки до 30 мм

врезания инструмента, уменьшена энергоёмкость машины, улучшены массо-габаритные показатели [50].

На предприятии ЦБПО АО «Транснефть-Приволга» планируется серийный выпуск машины в 2017 году.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом настоящей диссертационной работы являются следующие научные и практические результаты:

1. На основе анализа известных конструкций и методов безогневой резки труб большого диаметра предложена новая конструкция машины на основе применения независимых приводов вращения инструмента, его врезания и перемещения машины по трубе. Такая конструкция машины позволяет обеспечить рациональную регулировку режимов резания, предохраняет элементы машины от поломок и перегрузок, кроме того автоматический привод врезки позволяет исключить присутствие оператора в опасной зоне резания трубопровода.

2. Проведены теоретические исследования и получены математические зависимости для оценки нагруженности приводов врезания инструмента и перемещения машины по трубе в зависимости от параметров разрезаемой трубы, условий закрепления, 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 %

3. На основе теоретических исследований нагруженности приводов машины разработана математическая модель работы системы приводов врезания инструмента и перемещения машины по трубе. При компьютерном моделировании использованы средства MathCad и Vissim. Модель позволяет оценить нагруженность приводов при различных условиях работы машины, условий 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.

4. Разработана структурная схема управления системой приводов перемещения и врезания инструмента с использованием обратной связи и ограничения максимального крутящего момента. Ограничение нагрузки на приводах позволит 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.

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 независимых электромеханических приводов. 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 при установленных параметрах не более 10-15%.

8. На основе опытного образца разработан промышленный образец машины на базе машины «Волжанка 3М» с независимым приводом врезания инструмента (патент на полезную модель № 150471).

9. Повышена безопасность работы оператора при врезании инструмента

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



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аверьянов, О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ.– М.: Машиностроение, 1987.– 232 с.
2. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: /В.И. Анурьев в 3 т. 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – Т.1 784 с.
3. Барановский, Ю.В. Режимы резания металлов: Справочник Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман, А.И. Гдалевич и др. М.: НИИТавтопром, 1995.– 456 с.
4. Бейзельман, Р.Д. Подшипники качения./ Р.Д. Бейзельман, Б.В. Ципкин, Л. Я. Перель – М.: Машиностроение, 1975.– 572 с.
5. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. Учебник для высших учебных заведений / М.П. Белов, А.Д. Новиков, Л.Н. Рассудов – 3-е изд. — М.: Академия, 2007. – 576 с.
6. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования, издание третье исправленное / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М.: 1975. – 768 с.
7. Бобрик, Л.П. Анализ компоновок станков, построенных по модульному принципу / Л.П. Бобрик. Станки и инструмент. – 1982 - №6.– 251 с.
8. Воронцов, А.Л. Разработка новой теории резания / А.Л. Воронцов, Н.М. Султан-заде, А.Ю. Албагачиев. Вестник машиностроения. – Вып. 2010. – С. 184-186
9. Врагов, Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компо넒тики) / Ю.Д. Врагов. – М.: машиностроение, 1978. – 208 с.
10. ВСИ 014—89. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Охрана окружающей среды. — М.: ВНИИСТ, 1990.
11. ВСН 51-1-97. Правила производства работ при капитальном ремонте магистральных газопроводов: утв. РАО «Газпром» 20.02.97: ввод. в действие с 01.05.97. – М.: ЭНАС, 1997. – 85 с.

12. Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник. В 4-х т. / В.Г. Герасимов – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 696 с.
13. ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: «ИПК Издательство стандартов», 2004. – 57 с.
14. ГОСТ 21354-75. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Расчёт на прочность. – М.: издательство стандартов, 1982. – 61с.
15. ГОСТ Р 55784-2013 Труборезы кумулятивные. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2014. – 14 с.
16. Грановский, Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В. Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
17. Грешняев, В.А. Машина для безогневой резки труб МРТ 325 – 1420 «Волжанка – 2» / В.А. Грешняев. Приложение к журналу «Трубопроводный транспорт нефти». –2001.– №6. С.3 – 4.
18. Грешняев, В.А. Машина для безогневой резки труб «Волжанка – 3М» / В.А. Грешняев. Журнал «Трубопроводный транспорт нефти». –2009.– №8. С.18 – 20.
19. Григорьев, С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента / С.Н. Григорьев – М.Машиностроение, 2011. – 368 с.
20. Гузенков, П.Г. Детали машин: Учеб. Пособие для студентов вузов / П.Г. Гузенков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1982. – 351 с.
21. Гумеров, А.Г. Капитальный ремонт подземных нефтепроводов / А.Г. Гумеров, А.Г. Зубаиров, М.Г. Векштейн, Р.С. Гумеров, Х.А. Азметов – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 1999. – 525 с.
22. Дунаев, П. Ф. Конструирование узлов и деталей машин / П. Ф. Дунаев, О. П. Лёликов. – М.: Высшая школа, 1998. – 371 с.
23. Дьяконов В.М. MathCAD 2000: Учебный курс/ В.М. Дьяконов.– Сиб.: Питер, 2000. – 503 с.

24. Дьяконов, В. П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384 с.
25. Ерофеев, А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов.– 2-е изд., перераб. и доп.– СПб.: Политехника, 2002. – 302 с.
26. Железнов, Г.С. Процессы механической и физико-химической обработки материалов: учебник / Г.С. Железнов, А.Г. Схиртладзе – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 456 с.
27. Зорев, Н.Н. Вопросы механики резания металлов. / Н.Н. Зорев – М.: Машгиз, 1956. – 367 с.
28. Иванов, М.Н. Детали машин: учебник для студентов высших учебных заведений / М.Н. Иванов. – М.: Высшая школа, 1991. – 383 с.
29. Каталог электрооборудования Промэлектроника // <http://www.promelec.ru>
30. Кацман М.М. Электрические машины / М.М. Кацман.–М.: Высш. шк., 1993.
31. Клушин, М.И. Резание металлов. Элементы теории пластического деформирования срезаемого слоя. / М.И. Клушин - М.: "Машгиз", 1958 – 480 с.
32. Кожевников, Д.В. Режущий инструмент / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов и др. М.: Машиностроение, 2005.– 527 с.
33. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов.– М.: Энергоатомиздат, 1986.– 257 с.
34. Корытный, Д.М. Фрезы/ Д.М. Корытный.– М., Машгиз, 1963.– 120 с.
35. Косилова, А.Г. Справочник технолога машиностроителя. В 2 ч. Ч. 2 / А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков.– М.: Машиностроение, 1985. – 655 с.
36. Крупович, В. И. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / В. И. Крупович, Ю. Г. Барыбина, М.Л. Самовера. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с.
37. Кудрявцев, В.Н. Планетарные передачи: /В.Н. Кудрявцев.– Л.: Машиностроение, 1977. – 526с.
38. Кудрявцев, Е.М. MathCAD 2000 Pro. – М.: ДМ К Пресс, 2001.–352 с.

39. Кузнецова, В.А. Измерения в электронике/ В.А. Кузнецова.– М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.
40. Кучер, А. М. Металлорежущие станки./ А. М. Кучер, М. М. Киватицкий, А.А. Покровский. – Л.: Машиностроение, 1972. – 308 с.
41. Лазарева, Т.Я. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004.– 352 с.
42. 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. –№1.– С. 28-35.
43. Лопатин, Б.А. Машина для безогневой резки труб большого диаметра / Б.А. Лопатин, Т.Р. Хазиев // Вестник машиностроения. –2014. –№1. – С. 84-87.
44. Лопатин, Б.А. Моделирование режимов работы отрезной машины Волжанка-4 / Наука ЮУрГУ. Секция технических наук. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. – Т 3. – С. 227-230.
45. Нефёдов, Н.А. Дипломное проектирование в машиностроительных техниках: Учебное пособие для техникумов. – М.: Высшая школа, 1976. – 192 с.
46. Общие машиностроительные нормативы стойкости режущего инструмента // Научно-исследовательское бюро технических нормативов (НИБТН). – М.: Машиностроение, 1959. – 678 с.
47. Панов, А.А. Обработка металлов резанием: Справочник технолога/ А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм
48. 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.
49. 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.
50. 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.

51. Попов, Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. пособие для вузов.– 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.– 304 с
52. Правила капитального ремонта МН РД 39-00147105-015-98
53. Правила устройства электроустановок ПУЭ – 7 изд., перераб. и доп./ Главгосэнергонадзор России. – Челябинск: АТОКСО, 2003.–237 с.
54. РД 153-39.4-130-2002. Регламент по вырезке и врезке катушек соединительных деталей, заглушек, запорной и регулирующей арматуры и подключению участков магистральных нефтепроводов. М.: Нефть и газ, 2002.– 286 с.
55. РД 39-30-779-82. Инструкция по вырезки "катушки" из трубопроводов Уфа: ВНИИСПТнефть, 1983.–172 с.
56. Решетов, Д.Н., Детали машин: учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов /Д.Н. Решетов 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
57. Розенберг, Ю.А. Силы резания и методы их определения. Часть 1. Общие положения: учеб. пособие. / Ю.А. Розенберг, С.И. Тахман – Курган: КМИ, 1995. – 128 с.
58. Розенберг, Ю.А. Силы резания и методы их определения. Часть 2. Расчет сил резания при различных видах обработки: учеб. пособие. / Ю.А. Розенберг, С.И. Тахман – Курган: КМИ, 1995. – 104 с.
59. Румшицкий, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. / Л.З. Румшицкий – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971. – 192 с.
60. СНиП 2.05.06-85\* Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция. – М.: Минрегион России, 2012. – 86 с.
61. СНиП III-42-80\* Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция. – М.: Минстрой России, 1997. – 43 с.
62. Солоненко, В.Г. Резание металлов и режущие инструменты: учебн. пособие для вузов. / В.Г. Солоненко, А.А. Рыжкин – М.: Высш. Шк., 2007. – 414 с.

63. Старков, В.К. Физика и оптимизация резания материалов. / В.К. Старков – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
64. Тарабарин, В.Б. Исследование момента сил трения во вращательной паре / В.Б. Тарабарин, Ф.И. Фурсяк, З.И. Тарабарииа. Теория Механизмов и Машин. 2012. №1. Том 10.
65. Теория автоматического управления. Учебник для вузов. Под ред. В.Б. Яковлева, 2003.–568 с.
66. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов / Под ред. Ю.С. Усынина. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 261 с.
67. Федосов, Б.Т. Пособие по курсовому и дипломному проектированию на тему: Идентификация объектов управления. Примеры моделей технических объектов управления с подробными пояснениями порядка построения и исследования. Асинхронный двигатель. Рудный 2008 г.
68. Федосов, Б.Т. Руководство по курсовому и дипломному проектированию на тему: "Идентификация объекта управления. Построение, оптимизация и исследование моделей САР с использованием современных программных средств. Рудный 2007 г.
69. Филоненко, С.Н. Резание металлов. / С.Н. Филоненко – М.: МАШГИЗ, – 1963. – 212с.
70. Хазиев, Т.Р. Исследование нагруженности отрезной машины при резке труб большого диаметра / Т.Р. Хазиев // Новые материалы и технологии НМТ-2010 Сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции т.3- Москва, «МАТИ» – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского.
71. Хазиев, Т.Р. Оценка мощности привода перемещения отрезной машины в процессе резания труб большого диаметра // Наука ЮУрГУ. Секция технических наук.– Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011.– Т3.–с. 292-295.
72. 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».– Вып. 2016. – С. 27-30.
73. Чернавский, С. А. Проектирование механических передач: учебно-справочное пособие для вузов / С. А. Чернавский, Г. А. Снесарев, Б. С. Козинцов и др. – 5-е изд., перераб. и доп. –М.: Машиностроение, 1984. – 560 с.
74. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981.– 576 с.
75. Ящерицын, П. И. Учебник для машиностроител. спец. вузов / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко.– 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Выш. школа, 1981. – 560 с.
76. Khosravi, A. Tuning of Pulse-Width Pulse-Frequency Modulator using PSO: An Engineering Approach to Spacecraft Attitude Controller Design / Alireza Khosravi, Pouria Sarhadi. *Automatika* 57(2016) 1, 212–220.
77. N Ma and G Song. Control of shape memory alloy actuator using pulse width modulation. Smart Materials and Structures Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Houston, Houston, TX 77204, USA.
78. Газнефтеоборудование // Каталог оборудования. 2016. URL: [http://gazneftspb.ru/category\\_truborezi\\_FEIN.html](http://gazneftspb.ru/category_truborezi_FEIN.html) (дата обращения 12.12.2016).
79. Газовик Пайп // Оборудование для монтажа трубопровода. 2016 URL: <http://gazovik-pipe.ru/index.php?id=104> (дата обращения 15.12.2016).
80. Труборез (Машина безогневой резки труб СМ-307) // URL: <http://www.neftegazotruboprovod.ru/> (дата обращения 12.12.2016).
81. Олимп-Металл // Оборудование для металлообработки. 2016 URL: [http://www.olimp-metal.ru/truborez\\_sd.html](http://www.olimp-metal.ru/truborez_sd.html) (дата обращения 10.12.2016)

## Приложение А – Исходные данные для исследования нагруженности приводов врезания инструмента и перемещения машины по трубе в среде математического моделирования Mathcad 14

### Исходные данные

$n1 := 40$	Число оборотов в минуту двигателя ДВМ привода врезания, об/мин
$n2 := 200$	Число оборотов в минуту двигателя ДВМ привода перемещения, об/мин
$T := 0..390$	Время работы привода врезания инструмента, сек
$Pr := 6600$	Сила натяжения правого амортизатора, Н
$PL := 6600$	Сила натяжения левого амортизатора, Н
$Lr := 247$	Длина правого амортизатора, мм
$LL := 247$	Длина левого амортизатора, мм
$R_{тр} := 360$	Радиус трубы, мм
$t := 30$	Толщина стенки трубы, мм

### Угловое положение машины на трубе

$$\phi := 0 \cdot \frac{\pi}{180}, 1 \cdot \frac{\pi}{180} .. 360 \cdot \frac{\pi}{180}$$

$R_{фр} := 75$	Радиус фрезы, мм
$B0 := 32$	Ширина фрезы, мм
$z := 40$	Число зубьев фрезы
$N := 45$	Частота вращения фрезы, об/мин
$b1 := 4$	Ширина кромки фрезы при угле профиля 55 градусов, мм
$b2 := 11.94$	Ширина кромки фрезы при угле профиля 74 градуса, мм

### Коэффициенты в формуле резания

$$C_p := 47 \quad x := 0.86 \quad y := 0.72 \quad u := 1 \quad q := 0.86 \quad w := 0 \quad K_{mp} := 1.2$$

### Конструктивные характеристики машины

$G := 1200$	Вес машины, Н
$L1 := 98.9$	Длина большего плеча натяжного рычага, мм
$L2 := 56.42$	Длина меньшего плеча натяжного рычага, мм
$L3 := 279$	Расстояние между опорой рычага и опорой амортизатора, мм
$W := 361$	Расстояние между осями роликов, мм
$r := 48$	Радиус ролика, мм
$R2 := 32$	Делительный радиус звёздочки рычага, мм
$R3 := 32$	Делительный радиус звёздочки переднего ролика, мм
$L_{зц} := 19.05$	Длина звена цепи, мм
$k1 := 0.15$	Коэффициент трения скольжения между трубой и звеном цепи
$kс := 0.1$	Коэффициент трения скольжения



$k := 0.002$	Коэффициент трения качения, м
$r1 := 12 \cdot 10^{-3}$	Радиус втулки передней звёздочки, м
$r2 := 12 \cdot 10^{-3}$	Радиус втулки звёздочки рычага, м
$r3 := 20 \cdot 10^{-3}$	Радиус втулки заднего ролика, м
$r4 := 14 \cdot 10^{-3}$	Радиус втулки звёздочки переднего ролика, м
$r5 := 23 \cdot 10^{-3}$	Радиус втулки переднего ролика, м
$r6 := 35$	Радиус втулки цапф привода перемещения, мм
$Rz := 36$	Радиус ведущей звёздочки, мм
$\alpha01 := 69.9$	Угол при большем плече рычага, градусы
$\alpha02 := 29.867$	Угол между меньшим плечём рычага и вертикальной осью, градусы
$W1 := 284.5$	Расстояние от передней звёздочки до вертикальной оси, мм
$R1 := 32$	Делительный радиус передней звёздочки, мм
$K1 := 16$	Разница высот переднего ролика и передней звёздочки, мм
$K2 := 30$	Разница высот осей поворота рычага и ведущей звёздочки, мм
$K3 := 187$	Горизонтальное расстояние между осями поворота рычага и ведущей звёздочки, мм
$K4 := 120$	Конструктивный размер, мм
$K5 := 102.5$	Конструктивный размер, мм
$\beta1 := 63.435$	Угол между векторами сил резания $Pz$ и $Py$ , в градусах
$\kappa1 := 12.067$	Угол между вертикальной осью и ведущей ветвью цепи у приводной звёздочки, в градусах
$\kappa2 := 106.67$	Угол между векторами сил звёздочки переднего ролика, в градусах
$\kappa3 := 61.28$	Угол между вертикальной осью и ведомой ветвью цепи передней звёздочки, в градусах
$K6 := 307.4$	Расстояние от оси звёздочки рычага до оси звёздочки переднего ролика с левой стороны, мм
$K7 := 283$	Расстояние по горизонтали от оси звёздочки рычага до оси звёздочки переднего ролика с левой стороны, мм
$\kappa4 := 67$	Угол между ветвью цепи от звёздочки рычага до звёздочки переднего ролика и вертикальной осью с левой стороны, в градусах
$\kappa5 := 62.883$	Угол натяжения ветви цепи звёздочки переднего ролика с левой стороны в градусах
$\kappa6 := 83.38$	Угол между ветвями цепи передней звёздочки с левой стороны, в градусах
$i := 4.25$	Передаточное отношение планетарной передачи привода врезания
$i1 := 106.7$	Передаточное отношение планетарной передачи 2К привода перемещения
$d2 := 22 \cdot 10^{-3}$	Диаметр резьбы винта врезки, м
$p := 1.5$	Шаг резьбы винта врезки, мм
$\kappa7 := 55$	Угол профиля фрезы, градусы
$\kappa8 := 74$	Угол профиля фрезы, градусы
$\eta := 0.76$	КПД привода перемещения

## Приложение Б – Исследование нагруженности привода перемещения машины по трубе в среде математического моделирования Mathcad 14

### Расчёт мощности привода перемещения

Расчёт параметров машины со стороны фрезы (правая сторона)

Определение угла между меньшим плечём рычага и вертикальной осью, градусы

$$\alpha 1 := (\alpha 01 + \alpha 02) \cdot \frac{\pi}{180} - \arccos\left(\frac{L1^2 + L3^2 - Lr^2}{2 \cdot L1 \cdot L3}\right)$$

Определение угла между роликом машины и вертикальной осью, градусы

$$\phi 0 := \arcsin\left[\frac{W}{(r + R_{тр}) \cdot 2}\right] \quad \Phi 0 := \frac{180}{\pi} \cdot \phi 0 = 26.257$$

$$\phi 1 := \arctan\left[\frac{W1}{(R_{тр} + r) \cdot \cos(\phi 0) - K1}\right] \quad \Phi 1 := \phi 1 \cdot \frac{180}{\pi} = 39.114$$

$$\phi 2 := \arcsin\left(\frac{R_{тр} - R1}{\frac{W1}{\sin(\phi 1)}}\right) \quad \Phi 2 := \phi 2 \cdot \frac{180}{\pi} = 46.663$$

Определение угла натяжения цепи передней звёздочки, угол  $\phi 3$

$$\phi 3 := \phi 2 - \phi 1 \quad \Phi 3 := \phi 3 \cdot \frac{180}{\pi} = 7.549$$

Определение угла натяжения цепи между звёздочкой рычага и ведущей звёздочкой, угол  $\phi 6$

$$\phi 4 := \arctan\left(\frac{L2 \cdot \cos(\alpha 1) - K2}{L2 \cdot \sin(\alpha 1) + K3}\right) \quad \Phi 4 := \phi 4 \cdot \frac{180}{\pi} = 3.629$$

$$\phi 5 := \arcsin\left[\frac{Rz - R2}{\sqrt{(L2 \cdot \sin(\alpha 1) + 187)^2 + (L2 \cdot \cos(\alpha 1) - 30)^2}}\right] \quad \Phi 5 := \phi 5 \cdot \frac{180}{\pi} = 1.029$$

$$\phi 6 := \phi 5 + \phi 4 \quad \Phi 6 := \phi 6 \cdot \frac{180}{\pi} = 4.659$$

Определение угла натяжения цепи между трубой и звёздочкой рычага, угол  $\phi_9$

$$\phi_7 := \operatorname{asin} \left[ \frac{R_{\text{тр}} - R_2}{\sqrt{(K_5 + L_2 \cdot \sin(\alpha_1))^2 + [(K_4 + (R_{\text{тр}} + r) \cdot \cos(\phi_0)) - L_2 \cdot \cos(\alpha_1)]^2}} \right]$$

$$\Phi_7 := \phi_7 \cdot \frac{180}{\pi} = 45.136$$

$$\phi_8 := \operatorname{atan} \left[ \frac{K_5 + L_2 \cdot \sin(\alpha_1)}{K_4 + (R_{\text{тр}} + r) \cdot \cos(\phi_0) - L_2 \cdot \cos(\alpha_1)} \right] \quad \Phi_8 := \phi_8 \cdot \frac{180}{\pi} = 17.311$$

$$\phi_9 := \phi_7 - \phi_8 \quad \Phi_9 := \phi_9 \cdot \frac{180}{\pi} = 27.825$$

Определение силы натяжения цепи, сила P4

$$\alpha_2 := \operatorname{acos} \left( \frac{L_3^2 - L_1^2 - L_r^2}{-2 \cdot L_1 \cdot L_r} \right) \quad A_2 := \alpha_2 \cdot \frac{180}{\pi} = 98.298$$

$$\alpha_3 := \alpha_2 - \frac{\pi}{2} \quad A_3 := \alpha_3 \cdot \frac{180}{\pi} = 8.298$$

$$\phi_{12} := \frac{\frac{\pi}{2} - 2 \cdot \alpha_1 - \phi_6 + \phi_9}{2} \quad \Phi_{12} := \phi_{12} \cdot \frac{180}{\pi} = 17.984$$

Определение силы P3 приложенная к оси звёздочки правого рычага, H

$$P_3 := \frac{Pr \cdot \cos(\alpha_3) \cdot L_1}{L_2 \cdot \cos(\phi_{12})}$$

$$\phi_{13} := \frac{\pi}{2} - \phi_9 - \phi_6 \quad \Phi_{13} := \phi_{13} \cdot \frac{180}{\pi} = 57.516$$

$$P_4 := \sqrt{\frac{P_3^2}{2 \cdot (1 - \cos(\phi_{13}))}}$$

Определение угла действия силы резания Puz, угол  $\beta_2$

$$\beta := \operatorname{asin} \left( \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{\text{фр}}}} \right) \quad B := \beta \cdot \frac{180}{\pi} = 26.565$$

$$\beta_2 := \beta_1 \cdot \frac{\pi}{180} + \operatorname{asin} \left( \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{\text{фр}}}} \right) \quad B_2 := \beta_2 \cdot \frac{180}{\pi} = 90$$

Определение ширины фрезерования при перемещении машины,  $B_{\pi}$ , мм

$$B_{\pi} := \begin{cases} b1 + \frac{2 \cdot t}{\tan\left(\kappa7 \cdot \frac{\pi}{180}\right)} & \text{if } 0 \leq t \leq 9.6 \\ b2 + \frac{2 \cdot t}{\tan\left(\kappa8 \cdot \frac{\pi}{180}\right)} & \text{if } 9.6 < t < 35 \\ 32 & \text{if } t \geq 35 \end{cases}$$

Определение частоты вращения двигателя привода перемещения,  $\omega_{дп}$ , рад/сек

$$\omega_{дп} := \frac{\pi \cdot n2}{30} = 20.944$$

Определение частоты вращения ведущей звёздочки привода перемещения,  $\omega_{зв}$ , рад/сек

$$\omega_{зв} := \frac{\omega_{дп}}{i1 \cdot i^2} = 0.0109$$

Определение величины подачи на зуб при перемещении машины,  $S_{z\pi}$ , мм/зуб

$$S_{m\pi} := \omega_{зв} \cdot R_z \cdot 60 = 23.473 \quad \text{минутная подача}$$

$$S_{z\pi} := \frac{S_{m\pi}}{z \cdot N} = 0.013$$

Расчёт силы резания,  $P_{yz}$ , Н

$$P_z := \frac{10 \cdot C_p \cdot (t)^X \cdot (S_{z\pi})^Y \cdot (B_{\pi})^U \cdot z}{(2 \cdot R_{\phi p})^Q \cdot N^W} \quad 3490.03$$

$$P_y := 0.5 \cdot P_z$$

$$P_{yz} := \sqrt{(P_y)^2 + (P_z)^2} = 6746.412$$

Определение сил реакции опоры,  $R_{x1}$  и  $R_{x2}$ , Н

$$R_{x2}(\phi) := \frac{P4 \cdot \sin(\phi9 + \phi0) + P_{yz} \cdot \sin(\beta2 - \phi0) + 0.5G \cdot \sin(\phi0 - \phi) - P4 \cdot \sin(\phi3 - \phi0)}{\sin(2 \cdot \phi0)}$$

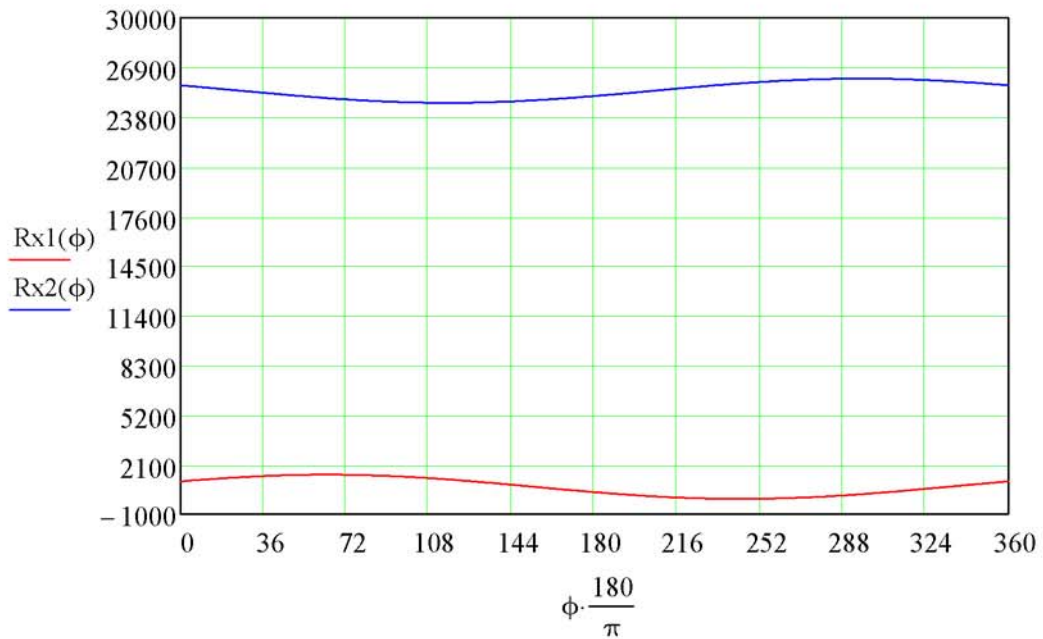
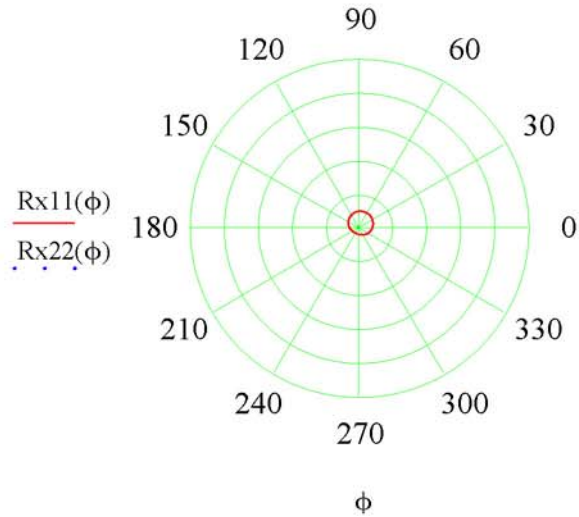
$$R_{x1}(\phi) := \frac{P4 \cdot \cos(\phi9) - P_{yz} \cdot \cos(\beta2) - R_{x2}(\phi) \cdot \cos(\phi0) + 0.5G \cdot \cos(-\phi) + P4 \cdot \cos(\phi3)}{\cos(\phi0)}$$

Rx1( $\phi$ ) =

1049.22
1061.01
1072.68
1084.25
1095.71
1107.05
1118.27
1129.37
1140.34
1151.18
1161.89
1172.47
1182.9
...

Rx2( $\phi$ ) =

25782.09
25770.21
25758.22
25746.14
25733.97
25721.72
25709.38
25696.96
25684.46
25671.89
25659.26
25646.55
25633.79
...

Rx11( $\phi$ ) := Rx1( $\phi$ ) + 1000Rx22( $\phi$ ) := Rx2( $\phi$ ) + 1000

Определение результирующей силы в опоре ведущей звёздочки, сила P5, Н

$$\phi_{14} := \pi - \left( \frac{\pi}{2} + \kappa_1 \cdot \frac{\pi}{180} - \phi_6 \right) \quad \Phi_{14} := \phi_{14} \cdot \frac{180}{\pi} = 82.592$$

$$P_5 := \sqrt{2 \cdot P_4^2 - 2 \cdot P_4^2 \cdot \cos(\phi_{14})} = 16510.21$$

Определение результирующей силы в опоре звёздочки переднего ролика, сила P6, Н

$$P6 := \sqrt{2 \cdot P4^2 - 2 \cdot P4^2 \cdot \cos\left(\kappa2 \cdot \frac{\pi}{180}\right)} = 20067.51$$

Определение результирующей силы в опоре передней звёздочки, сила P7, Н

$$\phi15 := \pi - \left(\kappa3 \cdot \frac{\pi}{180} + \phi3\right)$$

$$P7 := \sqrt{2 \cdot P4^2 - 2 \cdot P4^2 \cdot \cos(\phi15)} = 20638.7$$

Определение момента трения скольжения в заднем ролике от силы Rx1, момент McRx1, Н\*м

$$McRx1(\phi) := Rx1(\phi) \cdot r3 \cdot kc$$

Определение момента трения качения в заднем ролике от силы Rx1, момент MRx1, Н\*м

$$MRx1(\phi) := Rx1(\phi) \cdot k$$

Определение момента трения скольжения в звёздочке правого рычага от силы P3, момент McP3, Н\*м

$$McP3 := P3 \cdot r2 \cdot kc = 14.443$$

Определение момента трения скольжения в звёздочке передней оси от силы P6 и Rx2, момент McP6, Н\*м

$$McP6(\phi) := (P6 + Rx2(\phi)) \cdot r4 \cdot kc$$

Определение момента трения качения в переднем ролике от силы Rx2, момент MRx2(φ), Н\*м

$$MRx2(\phi) := Rx2(\phi) \cdot k$$

Определение момента трения скольжения в передней звёздочке от силы P7, момент MP7, Н\*м

$$MP7 := P7 \cdot r1 \cdot kc$$

Определение момента для преодоления веса машины, момент MG(φ), Н\*м

$$MG(\phi) := G \cdot \sin(-\phi) \cdot \frac{Rz}{1000}$$

Определение момента для преодоление силы резания, момент MPz, Н\*м

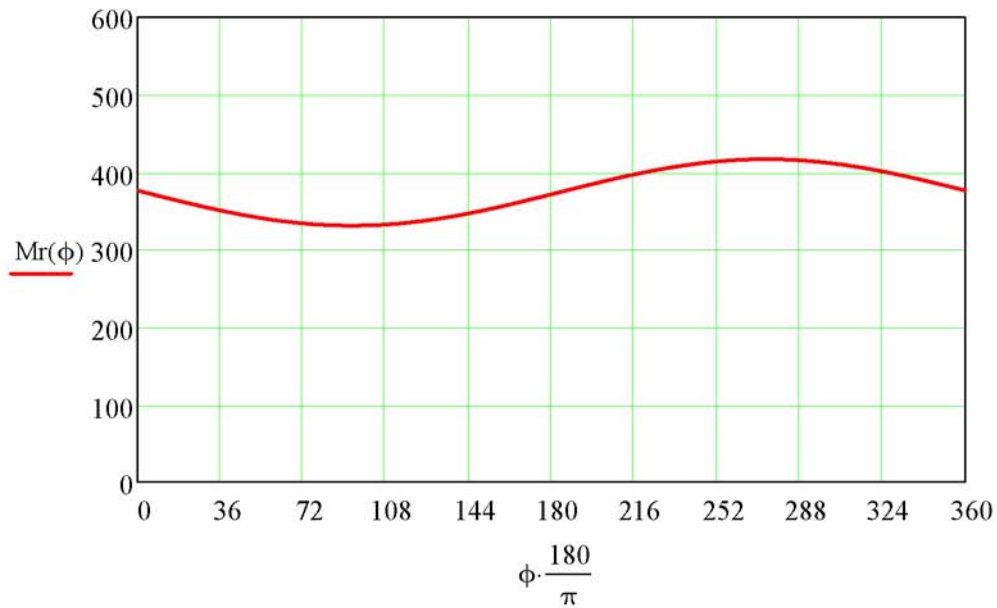
$$MPz := Pz \cdot \frac{Rz}{1000} \quad MPz = 217.23$$

Определение результирующего момента трения с правой стороны, момент  $M_r(\phi)$ , Н\*м

$$M_r(\phi) := M_{cRx1}(\phi) + M_{Rx1}(\phi) + M_{cP3} + M_{cP6}(\phi) + M_{Rx2}(\phi) + M_{P7} + M_G(\phi) + M_{Pz}$$

Определение результирующего момента машины момент  $M(\phi)$ , Н\*м

$$M(\phi) := M_r(\phi) + M_L(\phi)$$



Определение частоты вращения двигателя привода перемещения,  $\omega_{дп}$ , рад/сек

$$\omega_{дп} := \frac{\pi \cdot n^2}{30} = 20.944$$

Определение частоты вращения ведущей звёздочки привода перемещения,  $\omega_{зв}$ , рад/сек

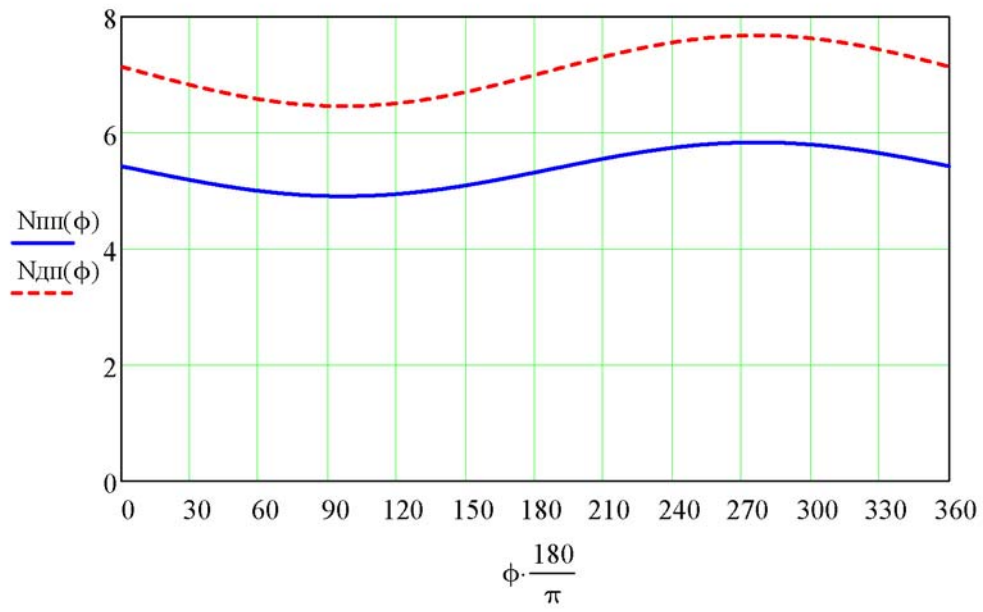
$$\omega_{зв} := \frac{\omega_{дп}}{i1 \cdot i^2} = 0.0109$$

Определение мощности на звёздочке привода перемещения,  $N_{пп}$  Ватт

$$N_{пп}(\phi) := M(\phi) \cdot \omega_{зв}$$

Определение мощности двигателя привода перемещения,  $N_{дп}$  Ватт

$$N_{дп}(\phi) := \frac{N_{пп}(\phi)}{\eta}$$



Расчёт допустимого момента на приводе перемещения

$$S := 100 \cdot 10^{-6} \quad r1 := 13.5 \cdot 10^{-3}$$

$$M1 := 502$$

$$F := \frac{M1}{r1}$$

$$\tau := \frac{F}{S \cdot 10^6} = 372 \quad \text{для стали 40X } \tau = 440 \text{ МПа}$$



Определение угла натяжения цепи между трубой и звёздочкой рычага, угол  $\Psi_9$

$$\psi_7 := \operatorname{asin} \left[ \frac{R_{\text{тр}} - R_2}{\sqrt{(K_5 + L_2 \cdot \sin(\omega_1))^2 + [(K_4 + (R_{\text{тр}} + r) \cdot \cos(\phi_0)) - L_2 \cdot \cos(\omega_1)]^2}} \right]$$

$$\Psi_7 := \psi_7 \cdot \frac{180}{\pi} = 45.136$$

$$\psi_8 := \operatorname{atan} \left[ \frac{K_5 + L_2 \cdot \sin(\omega_1)}{K_4 + (R_{\text{тр}} + r) \cdot \cos(\phi_0) - L_2 \cdot \cos(\omega_1)} \right] \quad \Psi_8 := \psi_8 \cdot \frac{180}{\pi} = 17.311$$

$$\psi_9 := \psi_7 - \psi_8 \quad \Psi_9 := \psi_9 \cdot \frac{180}{\pi} = 27.825$$

Определение силы натяжения цепи, сила  $T_4$

$$\omega_2 := \operatorname{acos} \left( \frac{L_3^2 - L_1^2 - L_2^2}{-2 \cdot L_1 \cdot L_2} \right) \quad \Omega_2 := \omega_2 \cdot \frac{180}{\pi} = 98.298$$

$$\omega_3 := \omega_2 - \frac{\pi}{2} \quad \Omega_3 := \omega_3 \cdot \frac{180}{\pi} = 8.298$$

Определение угла натяжения цепи между звёздочкой рычага и звёздочкой переднего ролика с левой стороны, угол  $\phi_{19}$

$$O_{1O2} := \sqrt{K_6^2 + L_2^2 - 2 \cdot K_6 \cdot L_2 \cdot \cos \left( \kappa_4 \cdot \frac{\pi}{180} + \omega_1 \right)} = 327.117$$

$$\phi_{16} := \operatorname{asin} \left( \frac{2 \cdot R_2}{O_{1O2}} \right) \quad \Phi_{16} := \phi_{16} \cdot \frac{180}{\pi} = 11.283$$

$$\phi_{17} := \operatorname{acos} \left( \frac{K_7 + L_2 \cdot \sin(\omega_1)}{O_{1O2}} \right) \quad \Phi_{17} := \phi_{17} \cdot \frac{180}{\pi} = 13.41$$

$$\phi_{18} := \phi_{17} + \phi_{16} \quad \Phi_{18} := \phi_{18} \cdot \frac{180}{\pi} = 24.692$$

$$\phi_{19} := \frac{\pi}{2} - (\phi_{16} + \phi_{17}) \quad \Phi_{19} := \phi_{19} \cdot \frac{180}{\pi} = 65.308$$

$$\phi_{20} := \left( \frac{\phi_{19} - \phi_9}{2} \right) \quad \Phi_{20} := \phi_{20} \cdot \frac{180}{\pi} = 18.741$$

$$\phi_{21} := \frac{\pi}{2} - \omega_1 - \phi_{20} \quad \Phi_{21} := \phi_{21} \cdot \frac{180}{\pi} = 32.66$$

$$\phi_{22} := \frac{\pi}{2} - \phi_{18} + \phi_9$$

$$\phi_{13} := \phi_{13} \cdot \frac{180}{\pi} = 57.516$$

Определение силы T3 приложенная к оси звёздочки левого рычага, Н

$$T_3 := \frac{PL \cdot \cos(\omega_3) \cdot L_1}{L_2 \cdot \cos(\phi_{21})} = 13598.165$$

Определение силы натяжения цепи с левой стороны, сила T4, Н

$$T_4 := \sqrt{\frac{T_3^2}{2 \cdot (1 - \cos(\pi - \phi_{22}))}} = 9889.352$$

Определение результирующей силы приложенной к оси звёздочки переднего ролика, сила T5, Н

$$\phi_{23} := \frac{\pi}{2} + \phi_{18} - \kappa_5 \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$\phi_{23} := \phi_{23} \cdot \frac{180}{\pi} = 51.809$$

$$T_5 := \sqrt{2 \cdot T_4^2 - 2 \cdot T_4^2 \cdot \cos(\phi_{23})} = 8640.82$$

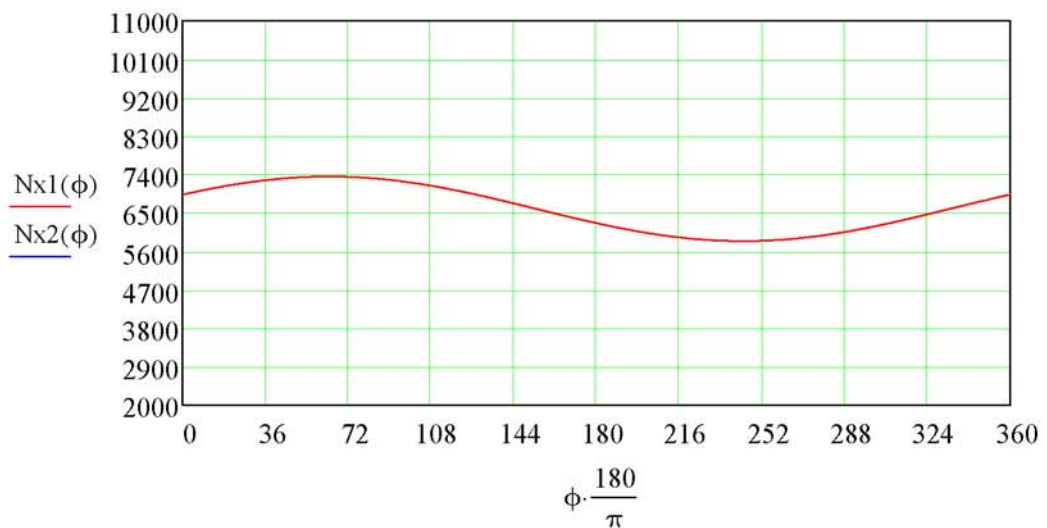
Определение результирующей силы приложенной к оси передней звёздочки с левой стороны, сила T6, Н

$$T_6 := \sqrt{2 \cdot T_4^2 - 2 \cdot T_4^2 \cdot \cos(\kappa_6)} = 14850.15$$

Определение сил реакции опоры, Nx1 и Nx2, Н

$$N_{x1}(\phi) := \frac{T_4 \cdot \sin(\phi_3 + \phi_0) + 0.5G \cdot \sin(\phi_0 + \phi) - T_4 \cdot \sin(\psi_9 - \phi_0)}{\sin(2 \cdot \phi_0)}$$

$$N_{x2}(\phi) := \frac{T_4 \cdot \cos(\phi_3) + 0.5G \cdot \cos(\phi) - N_{x1}(\phi) \cdot \cos(\phi_0) + T_4 \cdot \cos(\psi_9)}{\cos(\phi_0)}$$



Определение момента трения скольжения в заднем ролике от силы  $N_{x1}$ , момент  $M_{cN_{x1}}$ , Н\*м

$$M_{cN_{x1}}(\phi) := N_{x1}(\phi) \cdot r_3 \cdot k_c$$

Определение момента трения качения в заднем ролике от силы  $N_{x1}$ , момент  $M_{N_{x1}}$ , Н\*м

$$M_{N_{x1}}(\phi) := N_{x1}(\phi) \cdot k$$

Определение момента трения скольжения в звёздочке левого рычага от силы  $T_3$ , момент  $M_{cT_3}$ , Н\*м

$$M_{cT_3} := T_3 \cdot r_2 \cdot k_c = 16.318$$

Определение момента трения скольжения в звёздочке передней оси от силы  $T_5$  и  $N_{x2}$ , момент  $M_{cT_5}$ , Н\*м

$$M_{cT_5}(\phi) := (T_5 + N_{x2}(\phi)) \cdot r_4 \cdot k_c$$

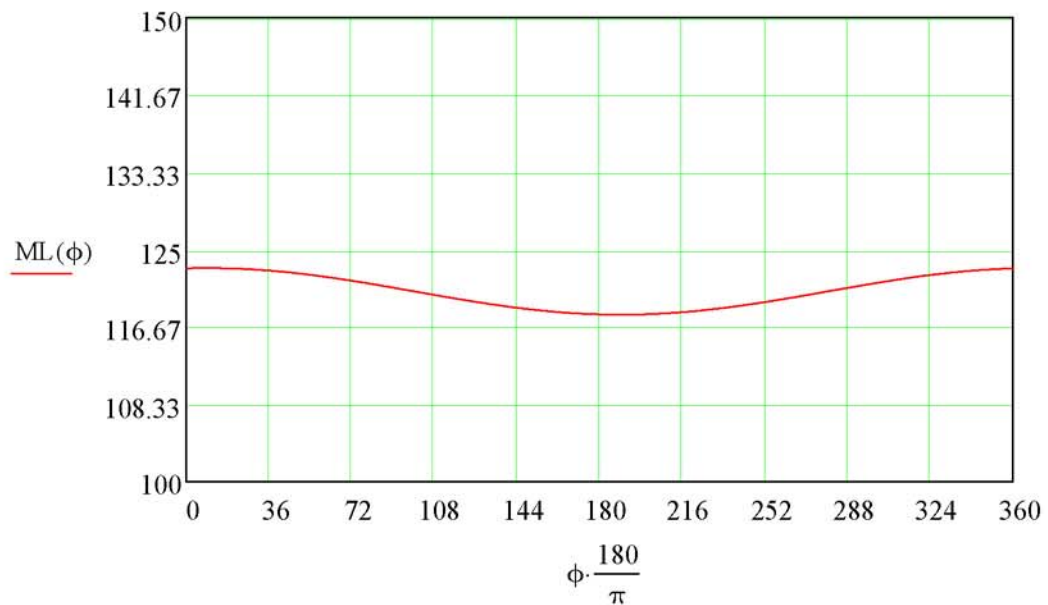
Определение момента трения качения в переднем ролике от силы  $N_{x2}$ , момент  $M_{N_{x2}}$ , Н\*м

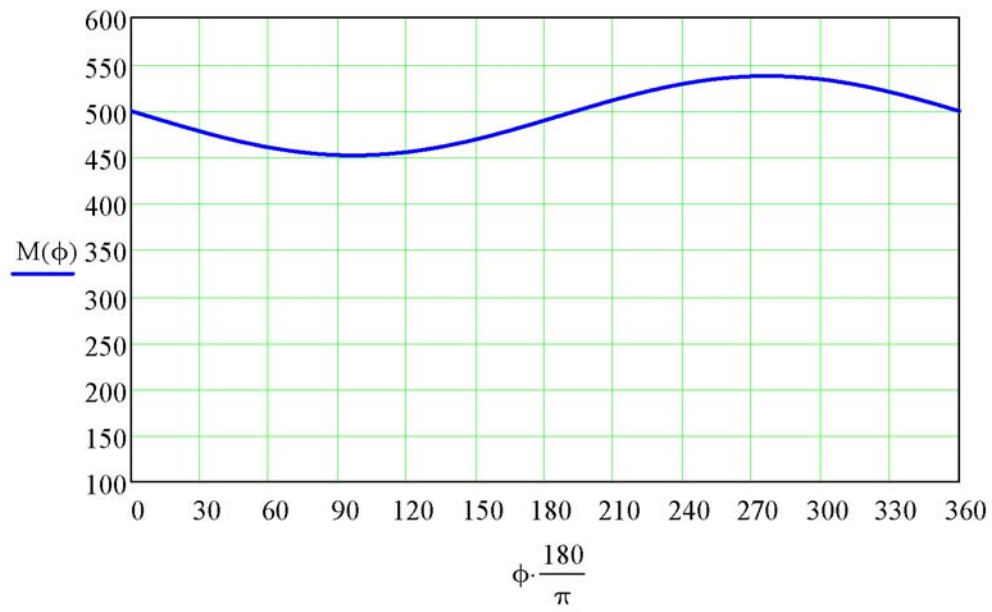
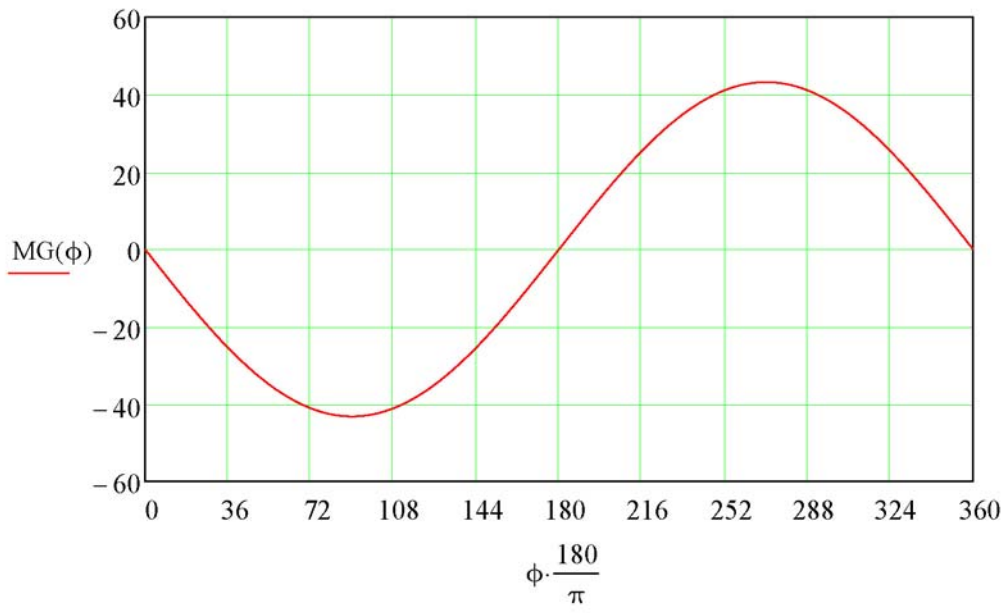
$$M_{N_{x2}}(\phi) := N_{x2}(\phi) \cdot k$$

Определение момента трения скольжения в передней звёздочке от силы  $T_6$ , момент  $M_{T_6}$ , Н\*м

Определение результирующего момента трения с левой стороны, момент  $M_L(\phi)$ , Н\*м

$$M_L(\phi) := M_{cN_{x1}}(\phi) + M_{N_{x1}}(\phi) + M_{cT_3} + M_{cT_5}(\phi) + M_{N_{x2}}(\phi) + M_{T_6}$$





## Приложение В – Исследование нагруженности привода врезания инструмента в среде математического моделирования Mathcad 14

### Расчёт мощности привода врезания

Определение угла поворота двигателя ДВМ-100, радианы

$$\phi_{\text{ДВМ}}(T) := \frac{2 \cdot 3.14 \cdot n1}{60} \cdot T$$

Определение угла поворота винта врезки, градусы

$$\phi_{\text{винта}}(T) := \frac{\phi_{\text{ДВМ}}(T) \cdot 180}{i \cdot \pi}$$

Определение угла поворота корпуса привода перемещения, радианы

$$\phi_{\text{пп0}}(T) := \frac{42}{180} \cdot \pi - \arccos \left[ \frac{K8^2 + K9^2 - \left( \sqrt{K8^2 + K9^2 - 2 \cdot K8 \cdot K9 \cdot \cos \left( \frac{42}{180} \cdot \pi \right)} - \frac{\phi_{\text{винта}}(T)}{360} \right)}{2 \cdot K8 \cdot K9} \right]$$

$$\phi_{\text{пп}}(T) := \begin{cases} \phi_{\text{пп0}}(T) & \text{if } 0 \leq \phi_{\text{пп0}}(T) \leq 0.7 \\ 0 & \text{if } \phi_{\text{пп0}}(T) > 0.7 \end{cases} \quad \begin{array}{l} 0.7 \text{ угол в радианах больше} \\ \text{которого не может} \\ \text{вернуться привод подачи} \end{array}$$

Определение зазора между трубой и фрезой в начальный момент времени, мм

$$y0 := \sqrt{\left[ \sqrt{\left( R_{\text{тр}} + r \right)^2 - \left( \frac{W}{2} \right)^2} + K10 \right]^2 + 15.5^2 - R_{\text{фр}} - R_{\text{тр}}}$$

$$y0 = 1.177$$

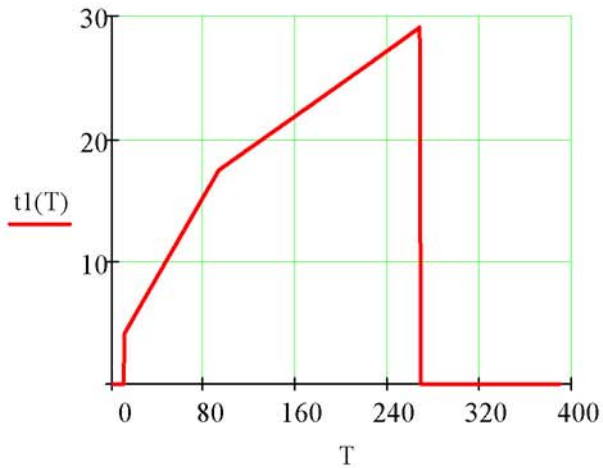
Определение вертикального перемещения фрезы  $y1(T)$ , мм

$$y1(T) := 101.98 \cdot \left( \sin \left( \frac{11.183}{180} \cdot \pi + \phi_{\text{пп}}(T) \right) - \sin \left( \frac{11.183}{180} \cdot \pi \right) \right)$$

$$h(T) := y1(T) - y0$$

Определение глубины фрезерования  $t1(T)$ , мм

$$t1(T) := \begin{cases} 0 & \text{if } h(T) < 0 \\ b1 + \frac{2 \cdot h(T)}{\tan \left( \kappa7 \cdot \frac{\pi}{180} \right)} & \text{if } 0 \leq h(T) \leq 9.6 \\ b2 + \frac{2 \cdot h(T)}{\tan \left( \kappa8 \cdot \frac{\pi}{180} \right)} & \text{if } 9.6 < h(T) < t \\ 0 & \text{if } h(T) \geq t \end{cases}$$

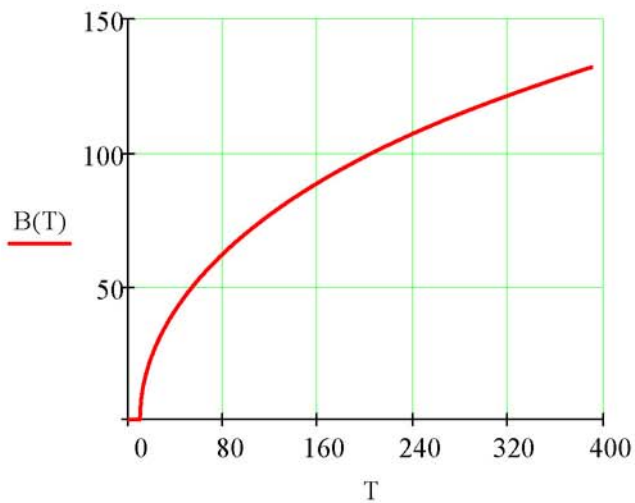


Определение ширины фрезерования  $B$ , мм

$$\alpha(T) := \arccos \left[ \frac{R_{\phi p}^2 + (R_{\phi p} + R_{\Gamma p} - h(T))^2 - R_{\Gamma p}^2}{2 \cdot R_{\phi p} \cdot (R_{\phi p} + R_{\Gamma p} - h(T))} \right]$$

$$B1(T) := 2 \cdot R_{\phi p} \cdot \sin(\alpha(T))$$

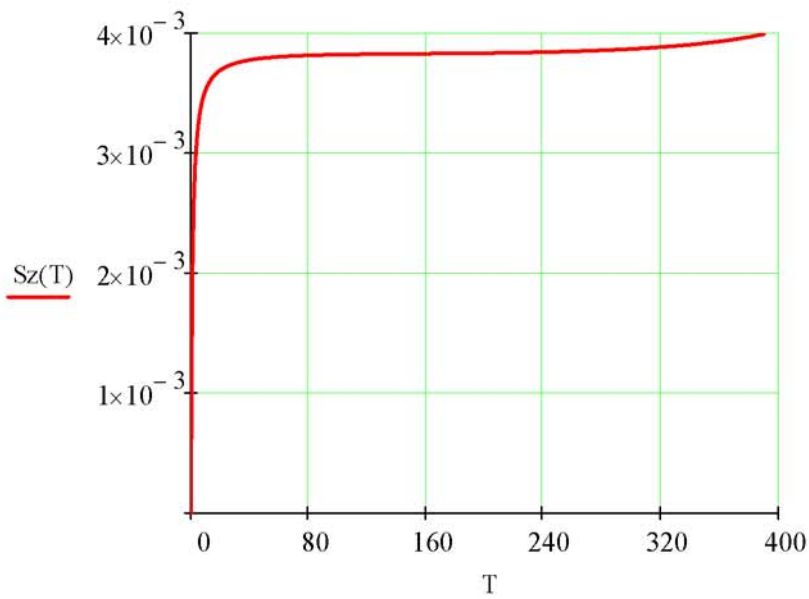
$$B(T) := \begin{cases} 0 & \text{if } h(T) < 0 \\ 2 \cdot R_{\phi p} \cdot \sin(\alpha(T)) & \text{if } h(T) \geq 0 \end{cases}$$



Определение подачи инструмента, подача на зуб  $S_z$

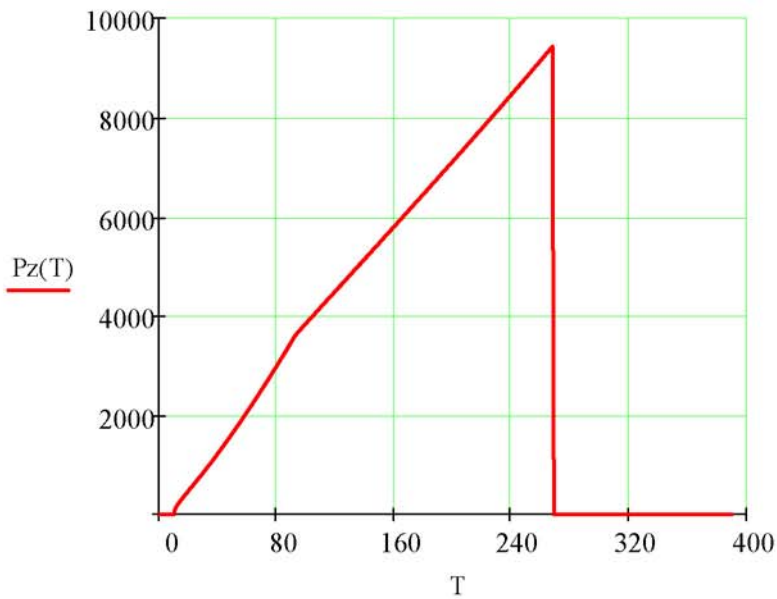
$$S_m(T) := \frac{y1(T) \cdot 60}{T + 1} \quad \text{минутная подача}$$

$$S_z(T) := \frac{S_m(T)}{z \cdot N}$$



Определение силы резания Pz, Н

$$Pz(T) := \frac{10 \cdot Cp \cdot (t1(T))^x \cdot (Sz(T))^y \cdot (B(T))^u \cdot z}{(2 \cdot R\phi p)^q \cdot N^w}$$

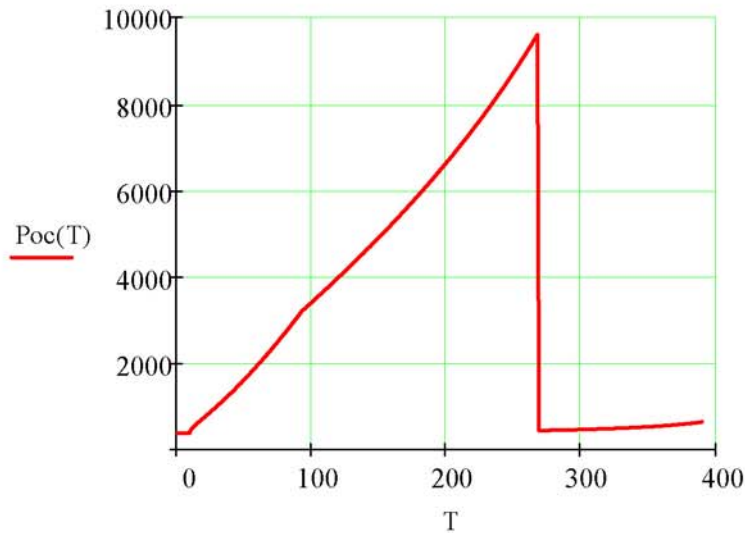


$$K11(T) := \sqrt{(K8)^2 + (K9)^2 - 2 \cdot K8 \cdot K9 \cdot \cos\left(\frac{42}{180} \cdot \pi - \phi_{\text{mm}}(T)\right)}$$

$$\beta(T) := \arccos\left[\frac{(K11(T))^2 + K8^2 - K9^2}{2 \cdot (K11(T)) \cdot K8}\right]$$

$$\theta(T) := \beta(T) - \frac{\pi}{2}$$

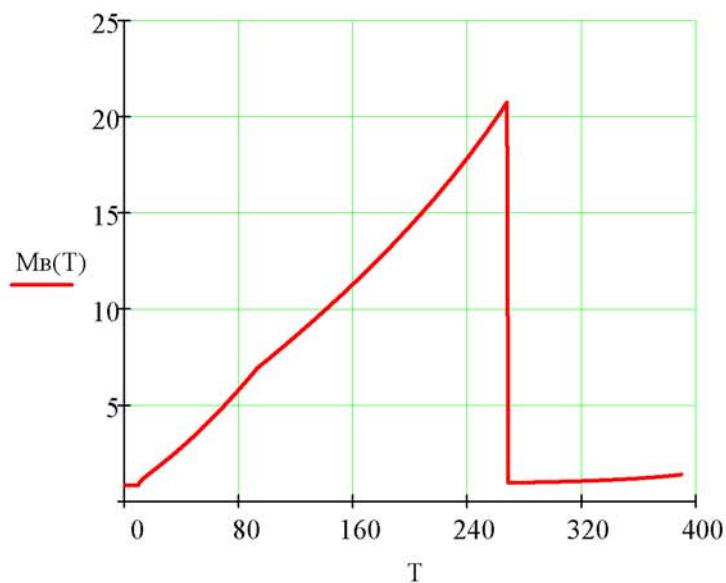
$$P_{oc}(T) := \frac{P_z(T) \cdot 102 \cdot \left( 0.5 \cos\left(\frac{11}{180} \cdot \pi + \phi_{\text{III}}(T)\right) + \cos\left(\frac{79}{180} \cdot \pi - \phi_{\text{III}}(T)\right) + \frac{R\phi p}{102} \right) + P5 \cdot k}{\cos(\theta(T)) \cdot K8}$$



Определение крутящего момента на винте врезки, Мв, Н\*м

$$\beta := \text{atan}\left(\frac{p}{\pi \cdot d2 \cdot 1000}\right) = \blacksquare$$

$$M_B(T) := P_{oc}(T) \cdot \frac{d2}{2} \cdot \left( \tan\left(9.87 \cdot \frac{\pi}{180} + \beta\right) \right)$$



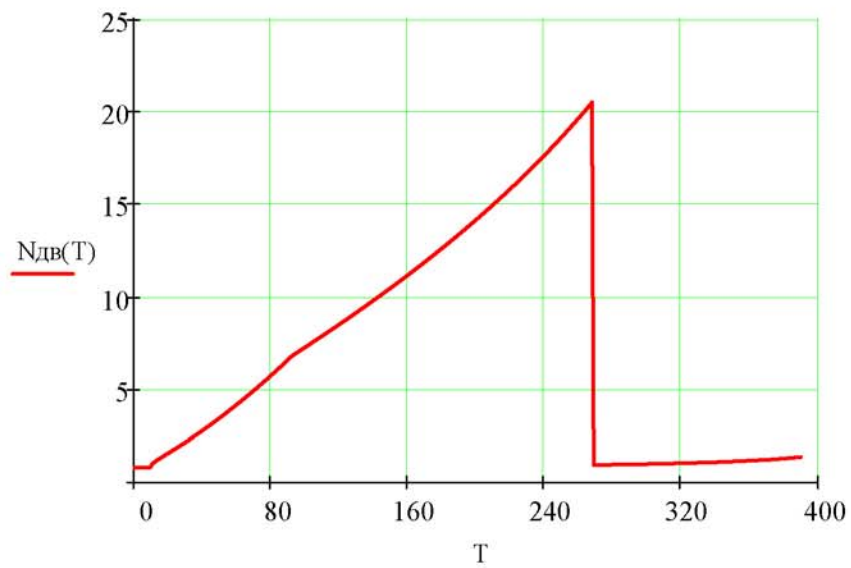


Определение мощности двигателя привода врезки,  $N_{дв}$ , Ватт

$$M_{дв}(T) := \frac{M_B(T)}{i}$$

$$\omega_{дв} := \frac{n1 \cdot 2 \cdot \pi}{60}$$

$$N_{дв}(T) := M_{дв}(T) \cdot \omega_{дв}$$



УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер ЦБПО

АО «Транснефть-Приволга»

И.С. Андриец



7 октября 2016 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

по Договору № 201450087 от 14.05.2014 г.

*«Модернизация машины для безогневой резки труб «Волжанка-3М»*

наименование работы

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г. Комиссия в составе: представителей Заказчика

начальника конструкторско-технологического отдела ЦБПО АО«Транснефть-Приволга» Орлова С.В. и инженера конструктора 2 категорииконструкторско-технологического отдела ЦБПО АО «Транснефть-Приволга»Панченкова Е.Н.

должность, ф.и.о

и представителей Исполнителя ФГБОУ ВПО «Южно-Уральского

государственного университета» (НИУ) зам. директора по научной работед.т.н., проф. Лопатина Б.А., к.т.н. доцента кафедры технической механикиПолужктова Е.А. и инженера кафедры технической механики Хазиева Т.Р.

кафедра, должность, ф.и.о.

составила настоящий акт о том, что на основе теоретических иэкспериментальных исследований работы машины безогневой резки трубтипа МРТ и нагруженности её элементов, проведенных сотрудникамикафедры технической механики филиала ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) в г.Златоусте, для предприятия ЦБПО АО «Транснефть-Приволга» выполненаработа по проектированию машины МРТ с улучшенными техниче-эксплуатационными характеристиками


В процессе проектирования использованы:

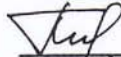
- методика определения нагруженности элементов приводов машины;
- математические модели работы приводов врезания и вращения инструмента;
- результаты экспериментальной оценки работы приводов машины;
- методы компьютерного моделирования при геометрическом и силовом расчёте элементов машины.

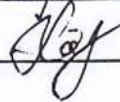
В результате работы: разработана кинематическая схема машины, проведена оценка напряжённо-деформированного состояния элементов машины, разработан полный комплект конструкторской и эксплуатационной документации на машину.

Технико-экономические показатели внедрения: машина имеет меньшую энергоёмкость и улучшенные массогабаритные характеристики.


Представители

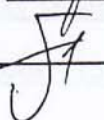
ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ):  Б.А. Лопатин

 Е.А. Полуэктов

 Т.Р. Хазиев

Представители

ЦБПО АО «Транснефть-Приволга»:  С.В. Орлов

 Е.Н. Панченков

УТВЕРЖДАЮ:



Главный инженер

ООО НПП «Механика»

канд. техн. наук

Е.А. Полуэктова

« 15 » ноября 2016 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов, полученных в диссертационной работе Хазиева Тимура Равиловича на соискание ученой степени кандидата технических наук, в разработку конструкции машины для безогневой резки труб на предприятии ООО НПП «Механика». Применение результатов исследований Хазиева Т.Р. обеспечит предохранение конструкции машины от поломок и перегрузок путем рационального регулирования режимов резания и исключит присутствие оператора в опасной зоне резания.

Инженер-конструктор

ООО НПП «Механика»

канд. техн. наук

С.В. Плотникова