

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество  
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

кафедра Электропривод и автоматизация промышленных установок

«Допущен к защите»

Заведующий кафедрой д.т.н.  
профессор Сагитов Э.И.  
(Ф.И.О., ученая степень, звание)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.  
(подпись)

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

На тему: Электропривод вращающего момента

Специальность 5В 071800 - Электроэнергетика

Выполнил (а) Бондаренко Ю.С. ЭАТ 12-3  
(Фамилия и инициалы) группа

Научный руководитель Цыба Ю.А. к.т.н. профессор  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

Консультанты:

по экономической части:

Жакупов А.А. к.э.н. профессор  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
« 14 » 04 2016 г.  
(подпись)

по безопасности жизнедеятельности:

Дюсбаев М.К. д.т.н. профессор  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
Дюсбаев М.К. « 13 » мая 2016 г.  
(подпись)

Нормоконтролер: ст. н. пр. каф. ЭАТЭС Кудымкин Ю.В.  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
« 24 » 05 2016 г.  
(подпись)

Рецензент: \_\_\_\_\_  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.  
(подпись)

Алматы 2016г.

Некоммерческое акционерное общество  
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Факультет \_\_\_\_\_  
Специальность \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Студент Бондаренко Юрий Станиславович  
(фамилия, имя, отчество)

Тема проекта Электропривод волокильного стана

утверждена приказом ректора № \_\_\_ от «\_\_\_» октября 20\_\_ г.  
Срок сдачи законченной работы «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.  
Исходные данные к проекту требуемые параметры результатов проектирования (исследования) и исходные данные объекта

1. Технические характеристики электроприводов прядильных и петлевых волокильных станков.
2. Техническая документация на оборудование прядильных волокильных станков В.П.В. 3-4/550. Число волокильных барабанов 3. Маршрут волокильный 8-6.06-4.59-3.48 м.

Перечень подлежащих разработке дипломного проекта вопросов или краткое содержание дипломного проекта:

1. Обзор существующих систем управления электроприводами волокильных станков их достоинств и недостатков. Разработка технических требований.
2. Разработка системы стабилизации противокатящихся на прядильных волокильных станках и основные принципы построения дикких систем.
3. Разработка самонастраивающейся системы управления приводами электроприводов или сравнения по параллельной схеме питания и ее анализ в сравнении с существующими системами.
4. Расчет мощности привода электропривода и выбор ТП.
5. Разработка математической и виртуальной модели системы ТП-ДПТ на базе.
6. Результаты исследования предлагаемой системы в среде Matlab.
7. Технико-экономические обоснование модернизации электропривода стана.
8. Разработка мероприятий по обеспечению безопасности жизнедеятельности обслуживающего персонала.



Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Обработка металла в сборе. Структурный чертеж системы электропривода прямоугольного вальцовочного станка
2. Основограмма кинематической в системе с саморегулированием
3. Функциональный чертеж системы автоматического регулирования электропривода станка
4. Функциональный и структурный чертежи саморегулирующей системы управления вальцовочным станком
5. Блок-схема и упрощенный чертеж системы оптимального управления кинематикой вальцовочного станка
6. Реализованный в среде Matlab на компьютере модель структурной схемы станка ВТЦ-3-41550

Рекомендуемая основная литература

1. Сунда Ю. А., Смагулова Г. К., Бегеркова А. Н. Основы проектирования систем регулирования электроприводов прямоугольных вальцовочных станков // Вестник КазНТУ. - Алматы, 2014. - №3. - с. 1-5
2. Котел А. М. Математическое моделирование вальцовочных и металлургических процессов. - М.: Металлургия, 1964. - 311 с.
3. Тережин В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink Matlab. Учебное пособие. - Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2008. - 320 с.

Консультанты по проекту с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Сроки	Подпись
Эксплуатационная часть	Жакупов А. А.	14.04.2016	
Б. Ж. Д	Досебаев М. К.	02.05 - 13.05.16	
Спец. часть	Сунда Ю. А.	27.05.2016	

**Г Р А Ф И К**  
подготовки дипломного проекта

№ п/п	Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления руководителю	Примечание
1.	Технические аспекты процесса валютной проводки и управление электронными валютными ставками	25.01.2016	
	Подготовка задания на разработку	15.02.2016	
2.	Разработка системы стабилизации противонапряжений на промышленной валютной ставке		
3.	Работы по монтажу привода электродвигателей и подбор основного оборудования	7.03.2016	
4.	Математическое моделирование системы стабилизации противонапряжений промышленной валютной ставки ВТБ 341550 на компьютерном моделировании	29.03.2016	
5.	Безопасность эксплуатации	13.04.2016	
6.	Технико-экономическая обоснование модернизации валютной ставки	2.05.2016	

Дата выдачи задания «    »    20    г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Руководитель \_\_\_\_\_  
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Задание принял к исполнению студент Бондаренко Ю.С. Бондаренко Ю.С.  
(подпись) (Фамилия и инициалы)

## Аннотация

В данном дипломном проекте, в качестве проведения модернизации на прямоточном волочильном стане ВПЦ 3-4/550, предложена система управления электроприводом стана со стабилизацией противонатяжения проволоки по ходу волочения. Произведен расчет и выбор мощности приводных электродвигателей, в соответствии с заданным маршрутом волочения и силовыми параметрами волочения. Разработана структурная и виртуальная модели электропривода, которая исследована в среде MatLab. Исследования на модели показали, что предложенная система устойчива и удовлетворяет требованиям технологического процесса в рабочих режимах стана.

В разделе безопасность жизнедеятельности дается описание рабочего помещения волочильного цеха и анализ условий труда в нем для обслуживающего персонала. Также, приводится подробный расчет теплового баланса для летнего и зимнего периодов, и решается задача нормирования параметров микроклимата в рабочей зоне.

В экономической части дано технико-экономическое обоснование проведения модернизации стана, доказывающее его эффективность, за счет увеличения производительности.

## Аңдапта

Бұл дипломдық жобада тең ағымдағы ВПЦ 3-4/550 сым созатын станды жанарту үшін электр жетекке сым созу кезінде сымның кері тартыуын тұрақтындарудың басқару жүйесі ұсынылған. Берілген сым созу процессінің бығыты мен күштік параметрлеріне сәйкес жетектік электр қозғалтқыштарының қуатын таңдау есебі жүргізілді. MatLab ортасында зерттелген электр жетегінің құрылымдық және виртуалдық моделдері құрастырылған. Модельдерді зерттеу барысында станның жұмыс режимінің технологиялық процесс талаптарына сай екендігі және ұсынылған жүйенің тұрақтылығы аңқталады.

Өміртіршілік қауіпсіздігі бөлімінде қызмет көрсету персоналның еңбек жағдайының сым созу цехында талдау келтірілген. Сондай-ақ, жазғы және қысқы кезеңдер үшін жылу балансының толық есептеу қамтамасыз етеді, және жұмыстыңаумақтың микроклиматтың қалпына келтіру мәселесі шешелді.

Экономикалық бөлімінде станды жаңғыртылуын жүргізудің техника-экономикалық негіздемесі берілген. Негізінде өнім өнімділігін артыру арқылы оның тиімділігін дәлелдейді.

## **Annotation**

In this thesis project, for upgrading to a co-current draw bench VPC 3-4 / 550, proposed drawing machine control system with stabilization counterstrain wire during the drawing. Calculated and selected of the power of the drive motors in accordance with a predetermined route and force parameters of drawing. Developed the structural and the virtual model of the drive, which was studied in MatLab environment. Research on the model showed that the proposed system is stable and satisfies the requirements of the technological process in the mill operating modes.

In the life safety is given the working of the drawing room description and analysis of plant labor conditions for its staff. Also provides a detailed calculation of the heat balance for summer and winter periods, and solves the problem of normalization of microclimate in the work area.

In the economic part of the given feasibility study for the modernization of the drawing machine, proving its efficiency by increasing productivity.

## Содержание

Введение.....	10
Глава 1. Технологические особенности процесса волочения проволоки и управление электроприводами прямоточных станов. Постановка задачи исследований .....	11
1.1 Технологические особенности процесса волочения проволоки .....	11
1.2 Требования к автоматическим системам управления электроприводами волочильных станов.....	13
1.3 Системы управления электроприводами волочильных станов.....	15
1.4 Постановка задачи исследований.....	24
Глава 2. Разработка системы стабилизации противонатяжений на прямоточных волочильных станах.....	25
2.1 Основные принципы построения систем стабилизации противонатяжения на прямоточных волочильных станах.....	25
2.2 Система стабилизации противонатяжения проволоки в прямоточных станах с параллельной схемой питания двигателей.....	32
2.3 Система стабилизации противонатяжений проволоки в прямоточных волочильных станах с индивидуальной схемой питания двигателей .....	36
2.4 Система с косвенным контролем и регулированием противонатяжений проволоки.....	39
2.5 Самонастраивающаяся система управления тяговым приводом.....	44
2.6 Система оптимального управления прямоточным волочильным станом...50	
2.7 Расчет мощностей приводных электродвигателей и выбор основного оборудования .....	55
3 Математическое моделирование системы ТП – ДПТ НВ.....	68
3.1 Реализованный в виде виртуальной модели двигатель постоянного тока..68	
3.2 Нереверсивный мостовой трёхфазный тиристорный преобразователь .....	69
3.3 Синтез регуляторов тока и скорости в электроприводе стана с САУ подчиненного регулирования .....	72
3.4 Исследование электропривода волочильного стана в среде MatLab.....	75
3.5 Исследование стабилизации противонатяжения прямоточного волочильного стана ВПЦ 3-4/550 на компьютерной модели .....	78
4 Безопасность жизнедеятельности.....	81
4.1 Анализ условий труда обслуживающего персонала в волочильном цехе ..81	
4.2 Расчет теплового баланса в волочильном цехе.....	84
4.3 Расчет системы вентиляции в волочильном цехе.....	88
5 Техничко-экономическая часть .....	91
5.1 Целесообразность проведения модернизации системы управления электропривода прямоточного волочильного стана.....	91
5.2 Расчёт производительности волочильных станов .....	91
5.3 Расчёт производительности волочильного стана до модернизации .....	92
5.4 Расчёт производительности волочильного стана после модернизации .....	94
5.5 Затраты на оборудование и модернизацию волочильного стана.....	95



5.6	Определение затрат на текущий и капитальный ремонт .....	96
5.7	Проведем расчет текущих годовых издержек у потребителя .....	97
5.8	Рассчитаем производимые затраты на возмещение потерь элетроэнергии	98
	Заключение .....	101
	Список литературы .....	102

## Введение

Широкое распространение в волочильном производстве получили волочильные станы прямоточного и петлевого типа. Станы таких типов находят широкое применение при производстве проволоки из стали и цветных металлов.

Петлевые и прямоточные станы относятся к группе станов многократного волочения, работающих с автоматическим регулированием скоростей промежуточных барабанов без накопления и скольжения проволоки на них. Проволока при волочении на прямоточном волочильном стане с противонатяжением, из-за его конструктивной особенности, после прохождения через первую волоку поступает напрямую на первый барабан, далее, не образуя петли, идет на вторую волоку, с нее на второй барабан и т.д.,

Современные волочильные цехи оснащают высокопроизводительным оборудованием, предназначенным для производства высококачественной продукции повышенной точности. С повышением требований к точности размеров волочильной проволоки повышаются требования к электромеханическому оборудованию волочильных станов [14]. Значительное внимание уделено эксплуатации электрооборудования и мероприятиям по увеличению срока службы основного оборудования стана и его деталей, а также рассмотрены возможные пути усовершенствования действующего оборудования (системы управления электропривода) с целью повышения его производительности.

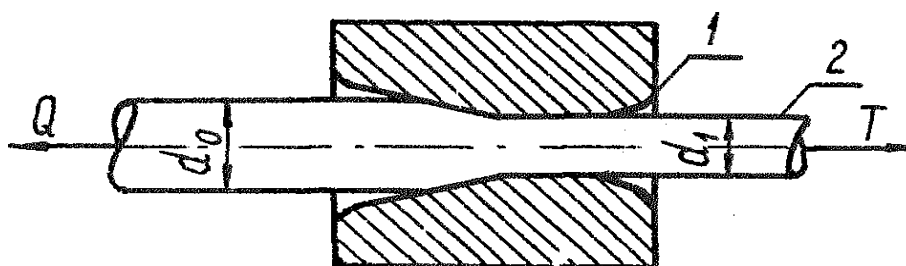
Технико-экономические показатели разных станов заводов метизного производства при их исследовании показали, что у волочильных станов коэффициент технического использования может составлять меньше 0.5 [2]. Обрывность проволоки и проведение вспомогательных операций (заправка стана, остановка для замены катушек намоточных аппаратов) с большими затратами времени являются основными факторами, снижающими производительность станов. Применение станов прямоточного типа позволяет повысить эффективность процесса волочения. Однако основным недостатком эксплуатируемых прямоточных волочильных станов, является высокая вероятность обрыва проволоки, и по этой причине появляется потеря рабочего времени, которая в некоторых случаях достигает 44% [3].

Основной причиной высокой вероятности обрывов проволоки в процессе волочения является нестабильность величины противонатяжения, зависящей от большого числа технологических параметров, затрудняющих задачу волочильщиков в выборе режимов работы электропривода. Для решения задачи стабилизации противонатяжения, необходимо наличие эффективной и надежной системы автоматического регулирования электропривода. Вопросу создания надёжной системы автоматического регулирования электропривода волочильного стана посвящена значительная часть данного дипломного проекта.

# Глава 1. Технологические особенности процесса волочения проволоки и управление электроприводами прямоточных станов. Постановка задачи исследований

## 1.1 Технологические особенности процесса волочения проволоки

По сложности физических явлений процесс волочения значительно превышает родственные ему процессы холодной прокатки и производства бумаги. Процесс волочения объединяет в себе вопросы, которые связаны с обоими перечисленными процессами. Деформация материала при волочении, как и в холодной прокатке, осуществляется за счет прохождения его через калибровочное отверстие (рисунок 1.1).



1 - волока, 2 - проволока,  $T$  - усилие волочения,  $Q$  – противонапряжение,  $d_0, d_1$  - диаметры проволоки до и после волочения

Рисунок 1.1 – Обработка металла в волоке

Однако если в случае холодной прокатки перемещение материала осуществляется за счет трения между прокатываемым материалом и вращающимися валками, то в случае волочения, как и при производстве бумаги, перемещение обрабатываемого материала достигается за счет усилия, прикладываемого к самому обрабатываемому материалу. Таким образом, деформация материала осуществляется не только за счет давления стенок калибровочного отверстия на волочильный материал, но и за счет осевого истечения материала под действием силы волочения. На процесс волочения оказывают влияния как механические, так и физические свойства протягиваемого материала, материал волоки, степень деформации, качество трущихся поверхностей, форма профиля волочильного канала, уровень противонапряжения, скорость деформации [6], скорость волочения является одним из самых важных параметров.

Основным эффектом от скоростного волочения, является повышение производительности волочильных станов [8]. Помимо этого снижается обрывность, уменьшается удельный расход энергии и волок. Волочение на высокой скорости оказывает положительное влияние на физико-механические свойства стальной проволоки [7]. Однако при высокой скорости волочения появляется необходимость решения двух основных проблем: снизить

температуры волок и проволоки, а также снизить уровень вибраций и шума, которые превышают допустимые нормы при высокой скорости волочения.

К волочильным станам предъявляют повышенные требования при скоростном волочении:

- 1) легкие и низкие барабаны и при этом постоянно должно быть небольшое количество проволоки на них;
- 2) ввод проволоки прямой;
- 3) плавный пуск;
- 4) между соседними барабанами тонкое и автоматическое регулирование скорости (для станков без скольжения проволоки по барабану);
- 5) в работе должна быть безопасность;
- 6) быстрая и автоматическая остановка [6].

Волочение с противонатяжением занимает важное место в технологии волочения [7]. Если волочение с противонатяжением то повышается и стойкость волоки, производительность и снижается расход энергии.

В системах с автоматическим регулированием силовых параметров волочения, работающих с противонатяжением, очень важно поддерживать противонатяжения максимально возможно постоянными.

Производительность волочильных станков снижается за счет обрывов проволоки в процессе пуска, заправки и остановки стана и волочения с постоянной скоростью. Проволока обрывается в основном из-за дефектов структуры металла, наличия больших остаточных напряжений и неправильного режима волочения [7]. Режим волочения нарушается как износом волок, так и электроприводом волочильного стана. При проведении исследований, проведенных автором, рабочих режимов различных волочильных станков, было показано, что около 20% всех обрывов происходили по вине электропривода [8].

Наибольший процент обрывов происходит в динамическом режиме работы станков. Усилие волочения стана в пусковом моменте всегда выше чем при установившемся режиме, причем отношение давления  $P_{\max}$  на волоку в пусковом режиме к давлению  $P_0$  на волоку в установившемся режиме  $P_{\max} / P_0$  увеличивается от первого барабана к последнему по мере увеличения скорости [5]. Усилие волочения повышается в момент пуска стана, объясняется это различием коэффициента трения скольжения и покоя в период неустановившегося движения проволоки.

По Пальмову возникшее в период ускорения дополнительное усилие:

$$P_{\text{доп}} = P_0(V_1 - V_0) / g \cdot t; \quad (1.1)$$

где  $P_0$  – усилие волочения постоянно действующее в установившемся процессе, которые не зависят от скорости волочения, Н;

$V_1$  – в установившемся процессе скорость волочения, м/с;



$V_0$  – скорость в процессе заправки, м/с;

$g$  - 9,81 – постоянная величина ускорения тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$t$  – время в процессе ускорения стана от заправочной скорости до номинальной, с.

При исследованиях, проведенных с участием автора, было показано, что в пусковых режимах усилия волочения проволоки в значительно степени превосходят усилия, рассчитанные по формуле Пальмова. Образование зазоров в кинематической передаче и «слабины» проволоки на участке волока-тяговый барабан при останове стана, вероятно, является одной из причин этого. В начальный момент при пуске стана, процесс волочения проволоки отсутствует. Это приводит к тому, что перед началом волочения якорь двигателя, кинематическая схема и тяговый барабан успевают накопить некоторый запас кинетической энергии.

Рассмотрим причины возникновения этого явления.

Под действием упругих сил проволоки и кинематической передачи, при полной остановке стана, вал двигателя успевает повернуться на некоторый угол в обратном направлении. Происходит образование провисания проволоки на участке волока-барабан и расслабление проволоки.

Вал двигателя, обладая большим моментом инерции, чем звенья кинематической передачи с тяговым барабаном, поворачивается на больший угол, чем последние, что приводит к раскрытию зазоров, которые имеют место в любой кинематической передаче. Движение вала двигателя, при повторном пуске, начинается с выбора зазоров. Этот процесс заканчивается упругим ударом в кинематической передаче, затем выбирается "слабина" проволоки, и вновь происходит упругий удар, но уже в волочимой проволоке.

К повышенной обрывности в пусковых режимах, снижению надежности оборудования и повышенному износу в кинематической передаче приводит возникновение ударных нагрузок при пуске стана. Эти явления особенно выражены на однократных станах с электроприводом на переменном токе [7].

## **1.2 Требования к автоматическим системам управления электроприводами волочильных станов**

Сформулировать основные требования (описание которых приводится ниже) к системам управления электроприводами волочильных станов, позволяет анализ экспериментальных и теоретических исследований технологии процесса волочения.

1) Для того чтобы избежать несчастных случаев с обслуживающим персоналом в результате возможных обрывов проволоки и отрывов вытяжных клещей, необходимо получение пониженных скоростей (0,5-1,0 м/с) волочения.

Обрыв проволоки может произойти вследствие превышения предела прочности протягиваемой проволоки из-за усилия волочения в период заправки, так как они в некоторых случаях значительно превышают усилия

волочения при установившемся режиме на рабочей скорости [8]. Это объясняется тем, что в начальный момент волочения поступление смазки в канал волокна может быть неравномерным, и еще одним объяснением может быть различия коэффициента трения покоя и скольжения. Провисание вытяжных клещей и наличие зазора в кинематической передаче также являются одними из причин обрывов проволоки при заправке.

Таким образом, наличие вытяжных клещей и натяжения проволоки перед началом заправки является одним из условий безобрывной заправки стана.

2) Для исключения возможных обрывов проволоки и необходимой при этом трудоемкой заправки стана и снижения его производительности за счет потери времени, необходимо осуществить плавный разгон стана до рабочей скорости.

Усилия волочения в пусковых режимах подобно усилиям при заправке, значительно выше установившегося значения усилия волочения, поэтому наличие натяжения проволоки перед пуском, которое способствует снижению динамических нагрузок в проволоке, является одним из условий безобрывного пуска [9]. Для прямоточных станов с последовательным соединением якорей электродвигателей это условие является особенно важным.

На первых блоках таких станов, обычно, происходит образование зазоров в кинематической передаче и провисание проволоки на участке между волокой и барабаном, так как величины, способствующие этому, достаточны для проворачивания тянущего барабана, якоря двигателя и кинематической цепи в обратном направлении. На последнем блоке подобного не происходит, так как образованию провисания проволоки между последним барабаном и катушкой намоточного аппарата препятствует натяжение проволоки.

На прямоточных станах, обычно, наматывают 5-6 витков проволоки на барабан, которые обеспечивают необходимое сцепление проволоки и барабана, для нормального течения процесса волочения. Исчезает сцепление проволоки с барабаном и разрушаются намотанные на барабан витки проволоки вследствие возникновения провисания проволоки на каком-либо блоке стана.

Пуск стана в таких условиях, даже при плавном увеличении питающего напряжения, приводит к следующему:

Ток якоря и момент, развиваемый всеми двигателями, будут одинаковыми, так как якоря двигателей соединены последовательно.

Якоря двигателей, на которых меньшая нагрузка начинают вращение первыми, т.е. блоки на которых произошло распушение витков проволоки на барабане. Частота вращения якорей ненагруженных двигателей возрастает в результате дальнейшего повышения питающего напряжения, и валы нагруженных двигателей начинают проворачиваться при определенном значении тока якоря. В результате, на барабанах где произошло распушение витков проволоки, происходит постепенное затягивание витков. В итоге

происходит интенсивный износ поверхности барабана и самой проволоки из-за увеличения трения между витками проволоки и барабаном. Наконец, сила трения между барабаном и витками проволоки достигает величины, при которой происходит «схватывание». При этом должно произойти мгновенное изменение линейной скорости проволоки от нуля до линейной скорости поверхности вращающегося барабана. В большинстве случаев при таком пуске обрывается проволока.

Таким образом, при наличии натяжения проволоки на участке волокоотяговый барабан, должен осуществляться плавный переход на рабочую скорость волочения.

3) Соблюдение постоянства секундных объемов протягиваемой проволоки на всех барабанах является необходимым условием безобрывной работы станов многократного волочения без скольжения [6]:

$$S_1 V_1 = \dots = S_i V_i = \dots = S_n V_n ; \quad (1.2)$$

где  $S_i$  – поперечное сечение проволоки;

$V_i$  – скорость волочимой проволоки;

4 Должна происходить автоматически остановка стана, вызванная окончанием заданной программы волочения с сохранением натяжения протягиваемой проволоки между отдельными блоками.

### **1.3 Системы управления электроприводами волочильных станов**

В производстве проволоки применяются барабанные волочильные станы различных типов и конструкций.

От материала проволоки и ее кратности, размеров, способа согласование скоростей между соседними барабанами и вида смазки зависит конструкция волочильных станов.

Независимо от деления на различные группы, все станы состоят из основных узлов: создающего усилие волочения тягового барабана, электропривода к нему, состоящего из редуктора, через который передается вращение от электродвигателя к барабану, приводного электродвигателя переменного или постоянного тока, сочлененного с редуктором посредством системы автоматического управления и клиноременной передачи или муфты.

Могут применять станы однократного или многократного волочения, в зависимости от особенностей технологического процесса.

Станы многократного волочения от станов однократного волочения выгодно отличаются высоким коэффициентом технологического использования и высокой производительностью. Проволока в станах многократного волочения без скольжения одновременно протягивается через несколько волок (в пределах 2 до 15).

Требуемое сохранение постоянства секундных объемов, в станах без скольжения согласования скоростей, осуществляется изменением частоты вращения барабанов (прямоточные и петлевые станы), а также при помощи запаса проволоки на промежуточных барабанах (станы магазинного типа). Для работы станков используют сухой мыльный порошок. Ограниченная скорость волочения из-за отсутствия прямолинейности движения проволоки при волочении является одним из недостатков петлевых станков и станков магазинного типа. Кроме того физико-механические свойства готовой продукции значительно снижают многократные скручивания [8].

Прямоточные станы многократного волочения с противонатяжением, а также многократные станы со скольжением, о которых будет сказано ниже, являются наиболее перспективными.

Высокой универсальностью и производительностью отличаются станы многократного волочения. Установлено исследованием Е.В.Пальмова и М.К.Гурьяновой [5], что производительность станков с противонатяжением на 44% выше, стойкость волок при волочении стальной проволоки в два раза больше, расход энергии меньше, коэффициент технического использования на 14-20% больше, чем на станах, работающих без противонатяжения.

В станах данного типа применяют двигатели постоянного тока в системе автоматического регулирования для регулирования скорости, позволяющие работать с противонатяжением. Универсальными эти станы делают то, что широкий диапазон регулирования скорости позволяет вести процесс волочения с различными обжатиями. С отсутствием скольжения поверхность барабанов и проволоки сохраняется от истирания. Повышению производительности и сохранению качества готовой продукции способствует снижение нагрева проволоки на этих станках при помощи применения регулируемого противонатяжения.

Питание электродвигателей постоянного тока, которыми оснащены почти все прямоточные и петлевые станы, осуществляется от регулируемых выпрямителей (тиристорных преобразователей) или генераторов постоянного тока.

Применяются параллельное и последовательное подключение якорей двигателей к источнику питания в приводе стана с двигателями постоянного тока. Также последнее время стали применять станы, в которых двигатели постоянного тока подключаются к индивидуальным источникам питания, которые получили название станков с блочным приводом [8].

Последовательное соединение якорей двигателей редко применяется в петлевых станах, чаще в приводе прямоточных волочильных станков, параллельное и блочное соединение наиболее часто применяют в приводе петлевых станков [9].

Последовательное соединение якорей электродвигателей применяются в электроприводе стана с саморегулированием. Величинами потоков возбуждения двигателей устанавливается требуемое соотношение скоростей в стане. Необходимое соотношение скоростей поддерживается автоматическим



перераспределением напряжения на якорях двигателей при изменении нагрузки на одном из двигателей. Саморегулируемая система в работе стана описывается уравнениями [23].

$$\begin{aligned}
 M_i &= c_i \Phi_i J_i; \\
 L_i \frac{dw_i}{dt} &= M_i - M_{ci}; \\
 M_{ci} &= \frac{R}{\alpha_i} (P_i - Q_{i-1} - Q_i); \\
 P_i &= \int_{t_1}^{t_2} (\xi_{i+1} w_{i+1} - \xi_i w_i) dt + P_{0i}.
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

где  $M_i$  - развиваемый электродвигателем, вращающий электромагнитный момент,  $H \cdot m$ ;

$c_i$  - коэффициент конструкции двигателя;

$\Phi_i$  - поток возбуждения электродвигателя,  $Вб$ ;

$J_i$  - ток якоря,  $A$ ;

$R$  - радиус тягового барабана,  $m$ ;

$L_i$  - суммарный момент инерции электропривода, приведённый к валу двигателя,  $H \cdot m \cdot c^2$ ;

$w_i$  - частота вращения двигателя,  $рад/с$ ;

$\alpha_i$  - передаточное число редуктора;

$P_i$  - давление на  $i$  волоку,  $H$ ;

$P_{0i}$  - постоянно действующее давление на  $i$ -ю волоку в установившемся режиме,  $H$ ;

$M_{ci}$  - момент сопротивления двигателя  $i$ -го блока,  $H \cdot m$ ;

$\xi$  - постоянный коэффициент;

$Q_{i-1}$  - противонапряжение перед  $i$ -ой волокой,  $H$ ;

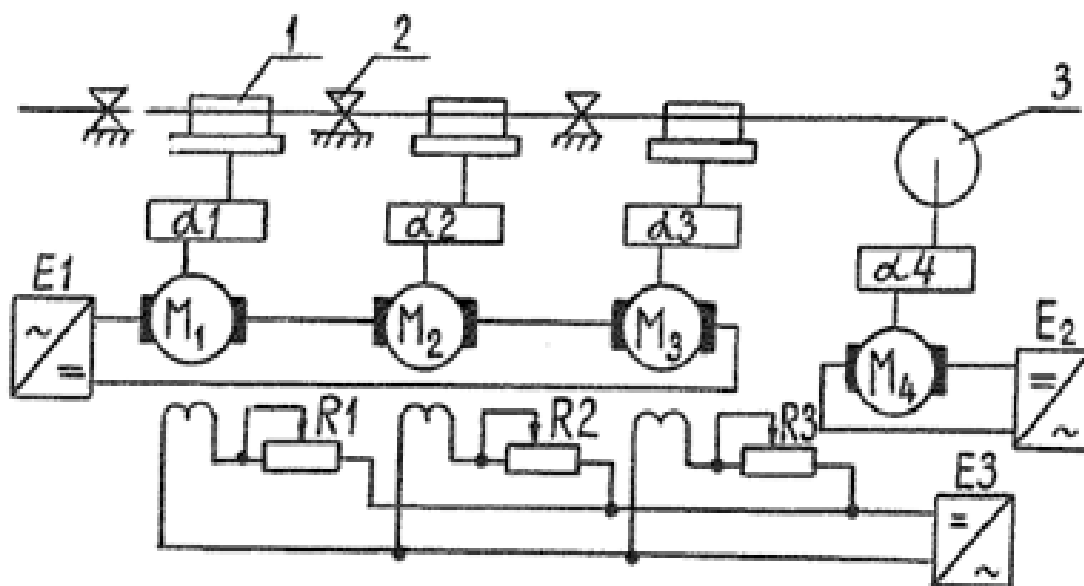
$Q_i$  - противонапряжение перед  $i+1$ -ой волокой,  $H$ .

Разгон, торможение и регулирование скорости волочения производится соответствующим изменением напряжения на якорях двигателей.

На рисунке 1.2 показана структурная схема трехкратного стана с последовательным соединением якорей двигателей и с намоточным аппаратом.

Якори двигателей стана  $M_1 - M_3$  последовательно подключены к источнику тока  $E_1$  (типа ПУБ-3501), а обмотки возбуждения двигателей через регулирующие резисторы  $R_1 - R_3$  параллельно подсоединены к источнику тока  $E_3$  (неуправляемый выпрямитель). Электродвигатель намоточного аппарата подключен к отдельному источнику тока  $E_2$ . Заданное натяжение проволоки

между волочильным станом 1 и намоточным аппаратом 3 поддерживается схемой ограничения момента на валу двигателя  $M_4$ .



1 - волочильный барабан, 2 – волокна, 3 – катушка намоточного аппарата,  $M_1$ - $M_4$  – электродвигатели,  $E_1$  – блок питания якорей двигателей,  $E_2$  – блок питания намоточного аппарата,  $E_3$  – блок питания обмоток возбуждения,  $R_1$ - $R_3$  – регулирующие резисторы

Рисунок 1.2 – Структурная схема электропривода трехкратного стана с последовательным соединением якорей двигателей и намоточным аппаратом

Изменением потоков возбуждения двигателей поддерживается необходимое соотношение скоростей в петлевых станах с параллельным подключением якорей двигателей  $M_1$ - $M_4$  (рисунок 1.3) к одному управляемому выпрямителю  $E_1$ . Петля 3, соединенная с резистором  $R_1$  ( $R_2$ ,  $R_3$ ), является датчиком рассогласования скоростей между блоками 1.

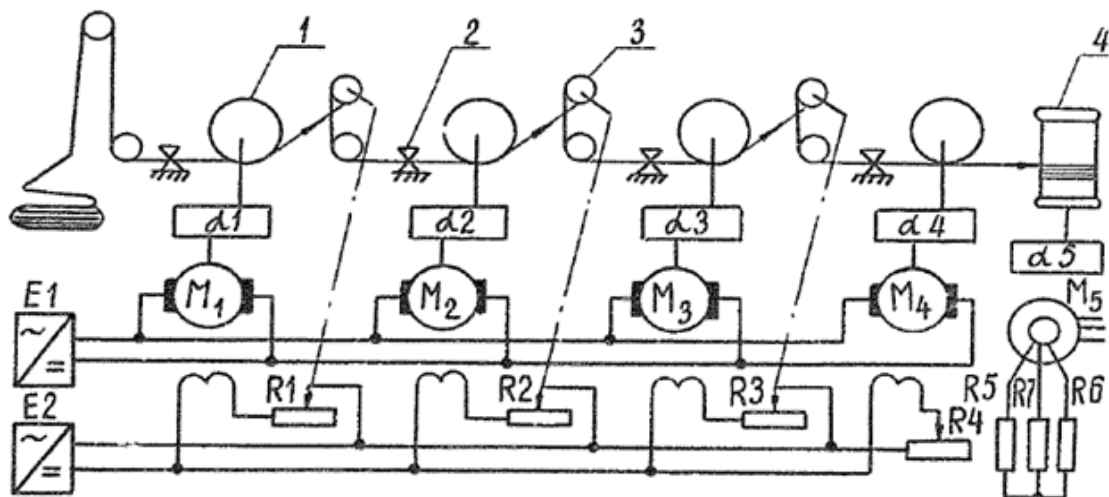
Пружиной, установленной на петле, задается противонатяжение не регулируемое и не изменяемое в процессе волочения. Измененной скоростью предыдущего блока регулируется положение петли, в петлевых станах. Через регулирующие резисторы  $R_1$ - $R_3$  подключены обмотки возбуждения к выпрямителю  $E_2$ . Для двигателя чистового блока, задающего скорость волочения, поток возбуждения не регулируется и устанавливается вручную перед волочением.

Двигателем  $M_5$  переменного тока с фазным ротором, момент на валу которого ограничен балластными сопротивлениями  $R_5$ - $R_7$ , включенными в цепь ротора, обычно оснащен намоточный аппарат петлевых станов.

Ту же конструкцию, что и стан с параллельным подключением якорей, имеют петлевые станы с блочным приводом. В количестве источников тока, применяемых для питания якорей двигателей, заключается их отличие.

Вышеописанным способом осуществляется регулирование скоростей блоков стана.

Управляемыми выпрямителями, БУВ 3601 - БУВ 3608 и ШУВ 3501 - ШУВ 3505, БУВ 3501- БУВ 3508, ШУВ 3601 - ШУВ 3605, выпускаемыми Чебоксарским электроаппаратным заводом, а типов БУ 3509 (1+6) Пржевальским электроаппаратным заводом, оснащен электропривод многократных волочильных станов. Блоком, который называется задатчиком интенсивности, для регулирования ускорения в переходных режимах оснащены тиристорные преобразователи.



1 - волочильный барабан, 2 – волока, 3 – петля,  
4 – катушка намоточного аппарата

Рисунок 1.3 – Электропривод петлевого стана, представленный в виде структурной схемы

Для обеспечения сохранения постоянства секундных объемов, в настоящее время волочильные станы оснащаются системой регулирования частоты вращения двигателей [3].

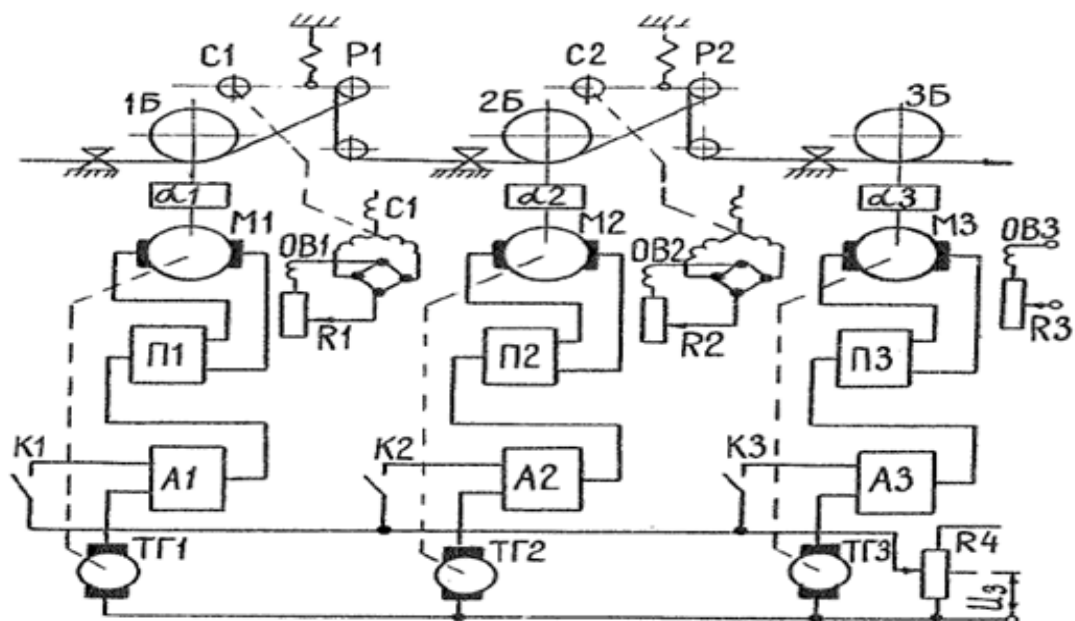
В петлевых волочильных станах, петля является датчиком, реагирующим на отклонение скорости предыдущего блока от требуемой.

Заданное натяжение проволоки перед волокой (противонатяжение), зависящее от положения петли обеспечивает механическое устройство, которым снабжена петля [3]. Натяжением пружины петлерегулятора устанавливается величина противонатяжения.

На рисунке 1.4 показана структурная схема петлевого стана, описание системы регулирования скорости которого представлено ниже [9].

Питание электродвигателей волочильных блоков 1Б-3Б осуществляется от статических преобразователей П1-П3. Изменением на входах преобразователей П1-П3 выходного напряжения усилителей А1-А3 производится регулирование частоты вращения двигателей М1 – М3.

От общего задатчика - переменного резистора R4 осуществляется задание частоты вращения двигателя стана. Изменением частоты вращения двигателя соответствующего блока, которая определяется током обмоток возбуждения 0В1-0В3, регулируется положение петли. Положением сельсинов С1-С2, связанных с петлерегуляторами Р1 и Р2 и задатчиками R<sub>1</sub>-R<sub>3</sub> задается напряжение на обмотках возбуждения. На каждом блоке имеется обратная связь по скорости (ТГ1-ТГ3).



Р1-Р2 – петлерегулятор, 1Б-3Б - волоочильные блоки, С1-С2 – сельсин, 0В1-0В3 – обмотка возбуждения, П1-П3 – статический преобразователь, R1-R3 – задатчик напряжения на 0В, А1-А3 – усилитель, К1-К3 – реле, ТГ1-ТГ3 – тахогенератор, R – задатчик скорости

Рисунок 1.4 – Регулируемый петлевой стана, представленный в структурной схеме

Выражение, определяющее частоту вращения двигателя:

$$W = \frac{U_0 - J_y R_\Sigma}{K} \quad (1.4)$$

где  $U_0$  - эталонное напряжение;

$J_y$  - ток усилителя;

$K$  - коэффициент тахогенератора;

$R_\Sigma$  - суммарное сопротивление цепи.

К основным недостаткам САР скорости блоков волоочильного стана можно отнести: отсутствие регулирования технологических параметров

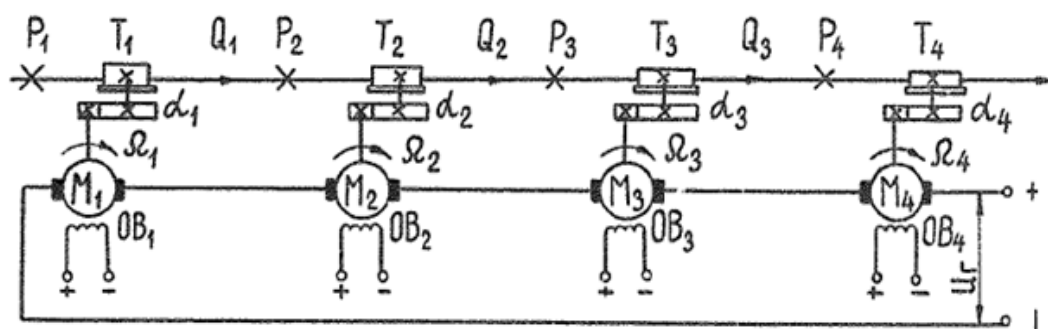


процессов волочения, что не дает возможность использовать преимущества волочения с противонатяжением, регулирование скорости блоков петлевого стана производится без учета положения петель (скоростей) на других блоках и их управляющих воздействий; отсутствует учет упругих связей в электромеханической системе стана и упругости проволоки.

Предложена система многосвязного регулирования скоростей блоков петлевого стана, использующая многополюсник для учета положения всех петель и устранения тем самым лишних возмущений, уменьшая отклонение петли от заданного положения. Система многосвязного регулирования была исследована в статических и динамических режимах [9]. Однако до настоящего времени система многосвязного регулирования не применяется, и не была испытана в производственных условиях (см. номенклатуру АЭТМ).

Прямоточные волочильные станы не имеют датчиков, дающих информацию о процессе волочения. Поэтому эти станы оснащены системой регулирования моментов на волочильных блоках.

Структурная схема стана с системой регулирования моментов на валу барабанов показана на рисунке 1.5.



$P_1-P_4$  – давление на волоку,  $T_1-T_4$  – усилие волочения,  $Q_1-Q_3$  – противонатяжение,  $M_1-M_4$  – электродвигатели,  $OB_1-OB_4$  – обмотка возбуждения

Рисунок 1.5 – Структурная схема с системой регулирования моментов на валу барабанов

В стане якоря всех электродвигателей соединены последовательно, вследствие чего сумма ЭДС двигателей постоянна. Соотношение скоростей и величины моментов двигателей  $M_1$  и  $M_4$  задаются потоками возбуждения (током обмоток возбуждения  $OB_1-OB_4$ ). При изменении нагрузки на одном из волочильных барабанов, величина ЭДС на этом двигателе меняется, момент уменьшается или увеличивается в зависимости от знака приращения  $\Delta P$ , что соответственно меняет скорость блока, а затем и всего стана.

Исследование прямоточных станов с саморегулированием приведено в [8]. Там же даны соотношения, показывающие изменение противонатяжения при изменении скорости одного блока стана, уравнение моментов двигателей

и уравнения электрического и механического равновесия двух блоков с учетом упругости проволоки.

$$\begin{aligned}
 M_1 &= c_1 \Phi_1 J_{я} = \frac{(P_1 - Q_{01})}{2\alpha} + M_{xx1} - \frac{D\Delta Q}{2\alpha} + L \frac{dw}{dt}; \\
 M_2 &= \frac{(P_2 - Q_{02})D}{2\alpha} + M_{xx1} + \frac{D\Delta Q}{2\alpha} + L_2 \frac{dw_2}{dt}; \\
 Q_2 &= \frac{ES}{l} \int_{t_1}^{t_2} (w_{1l} - w_1) dt + Q_{02}.
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

где  $M_{xx}$  - моменты холостого хода на валу двигателя, Н;

$D$  - диаметр волочильного барабана, м;

$\Delta Q$  - изменения противонатяжения, Н;

$E$  - модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>;

$S$  - площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

$l$  - длина проволоки на участке барабан-волока, м.

В процессе исследований показано, что упругость проволоки в переходном режиме создает колебательный затухающий переходный процесс. Причем колебания происходят относительно экспоненты. Тем не менее, авторы считают, что в исследованных ими режимах учет упругости проволоки не обязателен.

Скачкообразное изменение напряжения якорей двигателей вызывает колебания противонатяжения, что может приводить к обрыву проволоки. Поэтому разгон стана должен производиться постепенным увеличением напряжения на двигателях.

Однако, не исследовано влияние изменений давлений на волоку и на величину противонатяжений, не исследован пуск стана при наличии "слабины" проволоки на участке волока-тяговый барабан.

В [10] рассматривается стабилизация тяговых усилий на волочильных барабанах. Структурная схема с системой стабилизации тяговых усилий показана на рисунке 1.6. Момент на валу двигателя определяется из выражения

$$M_i = c\Phi_i J_{яi}; \tag{1.6}$$

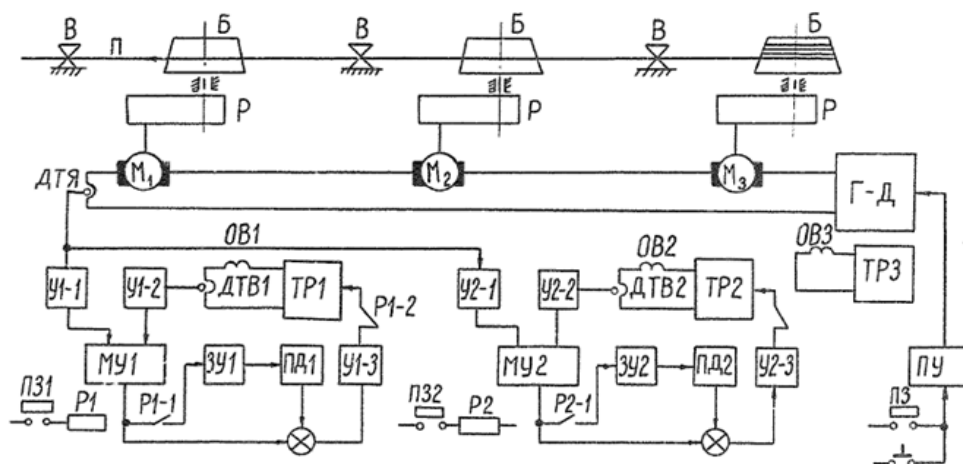
Для этого измеряются токи якоря  $J_{яi}$  и обмотки возбуждения  $J_{ei}$ , причем предполагается, что  $\Phi_i = \kappa J_{ei} f$  где  $\kappa$  - постоянный коэффициент. Перемножение производится множительными устройствами МУ<sub>i</sub>. При заправке стана проволокой блоками памяти ЗУ<sub>i</sub> запоминаются моменты на двигателях  $M_i$ , которые служат уставкой при стабилизации моментов во время работы стана.

Выше приведенные системы регулирования обладают следующими основными недостатками:

а) Величина противонатяжений не регулируется и может колебаться от нуля до максимальной, при которой происходит обрыв проволоки ;

б) не учитывается при регулировании динамическая составляющая момента, вследствие чего значения величин  $Q_i$  могут превзойти допускаемые.

В работе [7], написанной при участии автора, рассматривается вопрос аналитического построения оптимальной системы стабилизации противонатяжений прядильного станка методом динамического программирования.



П – проволока, В – волока, Б – тянущий барабан,  $M_1$ - $M_3$  – электродвигатели, ОВ1-ОВ3 – обмотки возбуждения, Р – редуктор, Г-Д – генератор-двигатель, У1, У2 – усилители, МУ1-2 – множительные устройства, ПЗ – педаль заправки, Р1-2 – реле, ЗУ – запоминающее устройство, ТР – тиристорный преобразователь, ДТ – датчик тока, ПУ – панель управления

Рисунок 1.6 – Структурная схема системы стабилизации моментов

Для обеспечения требуемого качества регулирования по противонатяжению предложен критерий оптимальности в виде:

$$J(U) = \int_0^{\infty} (q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + cU^2) dt. \quad (1.7)$$

где  $U$  - функция управления (входное напряжение тиристорного преобразователя);

$q_1, q_2, c$  - постоянные коэффициенты;

$x_1$  - отклонение частоты вращения двигателя;

$x_2$  - отклонение давления на волоку.

В результате решения уравнения динамического программирования и нахождения функции Ляпунова определен закон регулирования, показана схема построения оптимальной системы стабилизации противонатяжения.

Для получения информации о противонатяжении в этой системе используется датчик давления на волоку.

Однако до настоящего времени предложенная система не применяется в производственных условиях из-за отсутствия достаточно надежных датчиков.

#### **1.4 Постановка задачи исследований**

На основании анализа литературно-патентных материалов позволительно сделать следующие выводы:

1) Прямоточные многократные волочильные станы без скольжения и со скольжением являются наиболее перспективными станами. По сравнению с другими видами волочильных машин эти станы имеют ряд преимуществ: более высокая производительность, за счет возможности волочения с повышенными скоростями; получение проволоки с более высокими механическими характеристиками из-за отсутствия скручиваний; возможность волочения проволоки с противонатяжением на этих станах, способствует повышению стойкости волок, что также повышает производительность, и снижению энергозатрат на единицу продукции.

2) Стабильную работу станов в установившихся режимах обеспечивают существующие системы автоматического регулирования электроприводов волочильных станов.

3) В системах автоматического регулирования отсутствует обоснованная методика выбора коэффициентов усиления обратных связей.

4) Обрывность проволоки и значительные динамические нагрузки в пусковых и тормозных режимах снижают производительность и надежность станов. Различные, не компенсируемые системами автоматического регулирования, возмущения, действующие на волочильный стан, являются причинами данных недостатков.

Возмущающие воздействия, действующие на волочильный стан, можно поделить на следующие группы:

а) работа, связанная с устройствами размотки и намотки проволоки на соответствующие катушки, вызывает возмущающие воздействия;

б) возмущающие воздействия, связанные с технологическим процессом волочения, образующиеся из-за нагрева проволоки и ее неоднородности по длине волочения, износов рабочих инструментов, неравномерное поступление смазки в очаг деформации и т.д.;

в) также в последней группе можно выделить возмущающие воздействия, вызываемые упругими связями, которые имеются в электромеханической системе, приведенных различных моментов инерции отдельных блоков, в многократных волочильных машинах, кинематических погрешностях и конструкцией волочильного стана.

Достаточно большое количество работ посвящено оценки влияния первых двух групп возмущающих воздействий на работу волочильного стана, а работы, связанные с последней группой возмущающих воздействий, практически отсутствуют, кроме того, наличие кинематических погрешностей в редукторе стана, вызывают повышенный уровень шума и вибраций.

Основной задачей, характеризующей цель дипломного проекта, является исследование, проведение модернизации и разработка системы управления электроприводом прямоточного волочильного стана, обеспечивающей стабилизацию величины противонатяжения в динамическом режиме волочения, что приводит к повышению производительности, за счет снижения обрывов проволоки в процессе волочения, а также улучшения условий труда путем нормирования параметров микроклимата рабочей зоны.

## **Глава 2. Разработка системы стабилизации противонатяжений на прямоточных волочильных станах**

### **2.1 Основные принципы построения систем стабилизации противонатяжения на прямоточных волочильных станах**

Анализ конструктивных и технологических особенностей волочильных машин позволил сделать вывод о том, что наиболее перспективными волочильными машинами являются прямоточные станы. Большой опыт создания прямоточных волочильных станов на территории бывшего Советского Союза принадлежит Алма-атинскому заводу тяжелого машиностроения (сегодня город Алматы Республика Казахстан АЗТМ) [1].

Эти станы, первоначально разработанные, для волочения высокоуглеродистой стали, особенно для диаметров свыше 2 мм, а также проволоки из напряженного железобетона, поскольку такая проволока не может волочиться на станах с накоплением, пригодны для скоростного волочения любых материалов благодаря простому прямоточному направлению проволоки с барабана на барабан.

Основными факторами, снижающими коэффициент технического использования, а следовательно, и производительность данных волочильных станов, являются: повышенная обрывность проволоки, большие затраты времени на подготовительные операции, связанные с подачей и выдачей обрабатываемого материала, заменой волок, настройкой противонатяжений проволоки на заданном маршруте волочения во время заправки стана и следующие перезаправки из-за обрывов. Поэтому, задачу повышения производительности за счет увеличения скорости волочения необходимо решать в комплексе с мероприятиями, обеспечивающими непрерывность технологического процесса, иначе повышение производительности за счет увеличения скорости малоэффективно.

Частота обрывов проволоки определяется уровнем и стабильностью величин противонатяжений проволоки между волочильными барабанами и изменением силовых параметров в процессе волочения вследствие износа волочильного инструмента, который является медленно изменяющимся и постоянно действующим на электромеханическую систему стана, в результате чего величины давления на волоку  $a$ , следовательно, и противонатяжения могут меняться значительно.

Выполнение технологического требования по стабилизации величины противонатяжения может быть осуществлено при оснащении станом системой автоматического регулирования, техническая реализация которой возможна при наличии информации о нем. Эта информация может быть получена двумя способами - путем непосредственного измерения, либо с помощью косвенной оценки.

Поэтому с целью дальнейшего усовершенствования существующих систем, которые не всегда дают должного результата следует провести анализ качества регулирования в системах как с использованием датчиков непосредственного измерения силовых параметров волочения, так и с косвенной оценкой величины противонатяжения.

Первоначально прямоточный волочильный стан (ПВС) производства АЗТМ имел электропривод постоянного тока с последовательным соединением якорей двигателей, который нашел широкое применение в метизной промышленности при производстве стальной проволоки. Главной особенностью такой схемы является обеспечение саморегулирования процесса волочения при наличии механической связи по проволоке между барабанами (схема электрического дифференциала). Функциональная схема данного электропривода, который состоит из  $n$  волочильных блоков, представлена на рисунке 2.1, где 1 - проволока; 2 – волока; 3 – волочильный барабан; 4 – редуктор с передаточным числом  $\alpha$ ; Д - приводные электродвигатели с угловой скоростью вращения  $\omega$ ; ОБ – обмотки возбуждения электродвигателей;  $P$  - давление на волоку;  $Q$  - противонатяжение (заднее натяжение);  $Q_0$  – натяжение заготовки между размоткой и первым барабаном;  $N$  - усилие волочения (переднее натяжение);  $T$  - тяговое усилие;  $U_n$  - напряжение на электродвигателях.

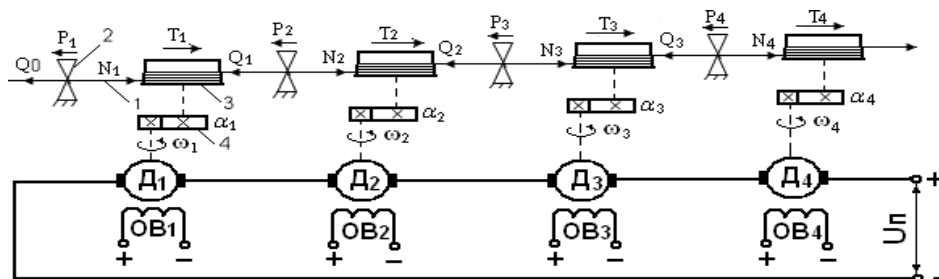


Рисунок 2.1 – Структурная схема прямоточного стана с системой саморегулирования

Основная особенность технологического процесса на ПВС заключается в том, что волочение производится при наличии задних натяжений (противонатяжений) проволоки в межбарабанных промежутках до волокна, величины которых в широких пределах можно задать изменением потока возбуждения соответствующих приводных двигателей.

Регулирование скорости волочения осуществляется изменением подводимого к последовательно включенным якорям напряжения. При изменении подводимого напряжения происходит параллельное смещение механических характеристик электродвигателей, и противонатяжение сохранит своё значение. При изменении момента нагрузки соответственно меняется и противонатяжение, поддерживая соотношение скоростей. Так, например, в случае изменения усилий волочения вследствие износа волок или неоднородности механических свойств обрабатываемой проволоки произойдет соответствующее изменение тока нагрузки в силовой цепи а, следовательно, и противонатяжений, что приведет к перераспределению напряжений на якорях двигателей. Перераспределение напряжений на зажимах двигателей происходит в таком направлении, что скорости вращения устанавливаются в соответствии с новым режимом обжатия. Благодаря тому, что скорости вращения двигателей автоматически устанавливаются в соответствии с удлинениями проволоки после обжатия ее в волоках, схема управления станом становится достаточно гибкой. Она позволяет осуществлять волочение проволоки с различными маршрутами волочения. На практике с применением таких систем удалось поднять скорость волочения до 15...25 м/с.

Однако экспериментальные исследования показывают, что в случае реализации системы с саморегулированием ошибка в поддержании противонатяжения в статическом режиме достигает  $\pm 50\%$  (рисунок 2.2) [4].

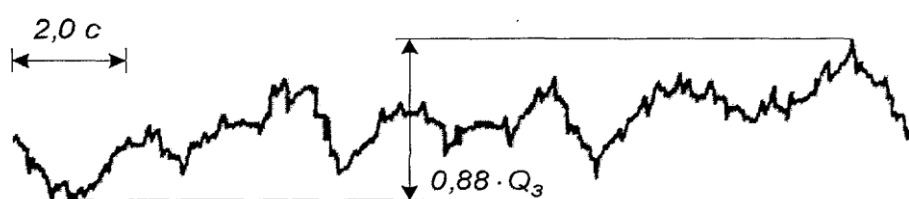


Рисунок 2.2 - Осциллограмма противонатяжения в системе с саморегулированием

В динамическом режиме противонатяжение может быть полностью потеряно, либо может превысить предел текучести обрабатываемого металла, что неизбежно приведет к аварийному режиму и, в конечном счете, к обрыву обрабатываемой проволоки. Обрывность уменьшает производительность и коэффициент технического использования, который на станах этого типа находится в пределах – 0,44-0,5.



По изложенным причинам значительно сократить число обрывов проволоки и время переходных процессов можно, если взамен системы саморегулирования предложить систему автоматического регулирования электроприводом стана.

Для построения системы автоматического регулирования необходимы датчики величин: тока якоря  $I_{яi}$  и потока возбуждения  $\Phi_i$  двигателя постоянного тока или электромагнитного момента  $M_{\delta i}$ ; скорости  $\omega_i$  и силы волочения  $N_i$ . Для измерения величин  $N_i$  требуются специальные датчики. В целях упрощения, силу волочения  $N_i$  целесообразно определять через величину противонатяжения проволоки  $Q_i$  в каждом отдельно взятом межбарабанном промежутке и давление на волоку  $P_i$ .

Величина  $N_i$  связана с давлением на волоку, противонатяжением и тяговым усилием  $T_i$  следующими соотношениями

$$\left. \begin{aligned} N_i &= P_i + Q_{i-1}; \\ N_i &= T_i + Q_i; \\ Q_i &= \sum_{j=1}^i P_j + \sum_{j=1}^i T_j + Q_0; \\ T_i &= \frac{\alpha_i M_{\delta i}}{R} - \frac{\alpha_i}{R} J_i p_i \omega_i. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Величина  $T_i$  определяется моментом на валу двигателя, передаточным числом редуктора  $\alpha_i$ , радиусом волочильного барабана  $R$  и дополнительным моментом инерции  $J_i$  привода волочильного блока в переходных режимах работы стана, который имеет отрицательную величину при торможении и положительную при разгоне, что в свою очередь увеличивает вероятность обрыва проволоки.

На прямоточных станах силу давления на волоку и противонатяжение целесообразно определять контактными датчиками. Датчик давления на волоку, который встраивается в кассету волокодержателя, показан на рисунке 2.3, а, где 1 – измерительная пластина; 2 – мембрана; 3 – волока; 4 – кассета. Схема установки датчика противонатяжения показана на рисунке 2.3, б, где 1 – силоизмерительный ролик с датчиком; 2 – волочильный барабан; 3 – волокодержатель; 4 – кассета с волокой.

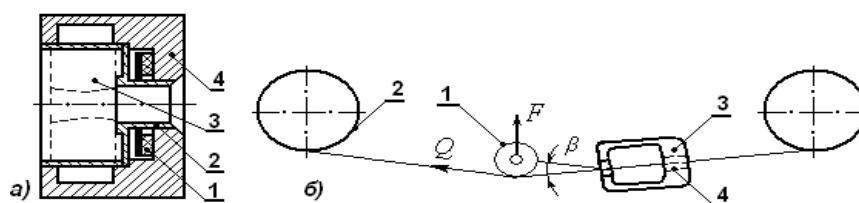


Рисунок 2.3 - Схема установки датчиков давления на волоку и противонатяжения

При использовании датчика давления сила волочения определяется из выражения

$$N_i = \sum_{j=1}^i P_j - \sum_{j=1}^{i-1} T_j + Q_0, \quad (2.2)$$

а при измерении противонатяжения – по второму уравнению системы (2.1).

Система регулирования, построенная по уравнениям (2.1) и (2.2), представляет собой систему с полной информацией и обеспечивает необходимое качество регулирования [10]. При этом величины отклонений силы волочения  $\Delta N_i$  для стана с системой регулирования не превышают допустимых значений во всех режимах работы стана, и чем больше коэффициент усиления контура системы  $k_i$ , тем меньше статическая и динамическая погрешности. Тогда как на станах с системой саморегулирования величина отклонения силы волочения имеет тот же порядок, что и величина изменения давления на волоку, зависящего от величины противонатяжения, допуска на заготовку, смазки, качества волоки и т.д. В связи с чем, изменение давления на волоку на одном из блоков или на нескольких вызывает существенное отклонение величины силы волочения от допустимого значения, что в большинстве случаев приводит к обрыву проволоки.

В волочильном стане для измерения частоты вращения двигателей достаточно использовать датчик (тахогенератор), установленный на один из двигателей стана, так как скорости двигателей связаны соотношением

$$\omega_j = \frac{\alpha_j}{\alpha_i} \omega_i \prod_{m=1}^{j-1} \mu_m \prod_{k=j+1}^i \mu_k, \quad (2.3)$$

где  $\mu_k$  – вытяжка проволоки на  $k_i$  – м блоке;  $i > j$ .

При установке тахогенератора на последнем блоке стана, сигнал с него подается на все контуры регулирования с соответствующими коэффициентами.

Все контуры регулирования системы имеют одинаковую структуру и состоят из множительного блока  $MZ_i$ , где определяется величина момента на валу двигателя  $M_i$  и тяговое усилие  $T_i$ ; четырех сумматоров  $\Sigma$ , в которых определяются величины противонатяжения  $Q_{i-1}$ , сила волочения  $N_i$ , разность между уставкой  $N_{0i}$  и  $N_i$  управляющий сигнал;  $Z_i$  – задатчика значения величины  $N_{0i}$ ; дифференцирующего звена  $\Phi_i$ , определяющего величину  $pN_i$ , и усилителя мощности  $A_i$ . При измерении противонатяжения  $Q_i$  система регулирования остается прежней, меняется лишь схема измерения величин  $N_i$ . Регулирование осуществляется изменением тока возбуждения двигателей в

электроприводе постоянного тока при последовательном соединении якорных цепей [10]. На практике для повышения быстродействия системы целесообразно применять регулирование по току якоря в электроприводе с индивидуальным питанием электродвигателей [11].

Известны также системы с неполной информацией с косвенным контролем и регулированием силовых параметров [27], в которых текущие значения  $N_i$  заменяются постоянной величиной  $N_{0i}$ , а регулируемая величина должна быть стабилизирована и равна

$$T_{0i} = N_{0i} - Q_{0i} = B_i = const. \quad (2.4)$$

Значения  $N_{0i}$  и  $Q_{0i}$  выбираются из условий прочности проволоки и режимов волочения, в частности в данном случае используется режим мягкой стабилизации тяговых усилий [28].

В волочильном стане с системой регулирования с неполной информацией, построенной по уравнениям (2.1) и (2.4), регулируемые величины принимают следующие значения

$$\left. \begin{aligned} Q_i &= \sum_{j=1}^i P_j - \sum_{j=1}^i B_j - \sum_{j=1}^i \frac{1}{k_j} \Delta T_j + Q_0; \\ N_i &= \sum_{j=1}^i P_j - \sum_{j=1}^{i-1} B_j - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{1}{k_j} \Delta T_j + Q_0, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где  $\Delta T_i = T_i - T_{0i}$  - отклонение тягового усилия от заданного;

$T_i = Mi/R = \alpha_i M_{0ei}/R$ ; – момент на валу электродвигателя.

Как видно из уравнения (2.5), величины  $Q_i$  и  $N_i$  являются функциями уставок  $B_i$  и возмущающих воздействий  $P_i$  и могут принимать различные значения в определенных пределах. Выбирая значения величин  $B_i$  так, чтобы усилия волочения не выходили из допускаемых пределов при изменении возмущающего воздействия  $P_i$ , можно обеспечить работу стана без обрывов.

Система регулирования с неполной информацией состоит из идентичных контуров стабилизации тягового усилия. В контур включены блок определения момента на валу двигателя  $M_i$ , задатчик  $Z_i$ , два сумматора для определения величины  $\Delta Mi$  и управляющего сигнала, дифференцирующее звено  $\Phi_i$  и усилитель  $A_i$  для усиления управляющего сигнала и подачи его в якорную цепь двигателя в электроприводе постоянного тока с индивидуальным питанием приводных электродвигателей [27]. В асинхронном электроприводе с индивидуальными преобразователями частоты на каждый двигатель, управляющий сигнал подается в цепь управления преобразователя частоты.

Учет динамической составляющей осуществляется так же, как и в системе управления с полной информацией.

Как видно из уравнения (2.5), в стане с этой системой регулирования величины силы волочения и противонатяжений могут принимать любые значения. Здесь ограничена только разность сумм  $N_i$  и  $Q_i$

$$\sum_{i=1}^n B_i = \sum_{i=1}^n N_i - \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (2.6)$$

где при  $\sum_{i=1}^n Q_i \rightarrow 0$  сумма  $\sum_{i=1}^n N_i \rightarrow \sum_{i=1}^n B_i$ ,

это вносит некоторую неопределенность в физическую сущность процессов, происходящих в электромеханической системе стана и, усложняет сформулировать условия записи уравнений для однозначного определения  $N_i$  и  $Q_i$  в связи, с чем отдельные значения силы волочения  $N_i$  могут достигать предельных величин. Поэтому, косвенная оценка величины противонатяжения в каждом отдельно взятом межбарабанном промежутке с использованием бесконтактных датчиков электромагнитного момента (тяговых усилий) будет иметь некоторую погрешность. Кроме того, поскольку величины  $Q_i$  и  $P_i$  взаимозависимы (2.5) и с увеличением  $P_i$  значение  $Q_i$  уменьшаясь, дополнительно увеличивает  $P_i$ , что приводит к еще большему уменьшению величины  $Q_i$ . Следовательно, в данной системе имеется положительная обратная связь по проволоке, которая также может оказывать не благоприятное воздействие на технологический процесс.

Несмотря на указанные недостатки, система с неполной информацией при меньшем числе элементов и отсутствии контактных датчиков силовых параметров удовлетворительно регулирует процесс волочения в станах с числом блоков не более четырех, где вероятность появления значений  $N_i$ , превышающих допустимые значения, мала [27]. При этом повышается надежность системы, а также упрощаются процедуры по обслуживанию и заправке станов.

В станах с большим числом блоков вероятность обрывов значительно увеличивается и система управления уже не может обеспечить процесс волочения. В этом случае целесообразно применение системы с полной информацией, которая обеспечит стабилизацию силы волочения  $N_i$ . Однако данные системы не всегда эффективны из-за отсутствия простых и надежных датчиков силовых параметров, способных работать в экстремальных условиях волочильного производства.

Так, например, установка датчиков, контролирующих давления на волокна в непосредственной близости от очага деформации, в зоне действия высоких температур и повышенного уровня вибрации, где наряду с этим происходит забивание смазкой контактной поверхности между волоком и датчиком, усложняет данный способ контроля величины давления на волоку (рисунок 2.3, а). По конструктивным соображениям наиболее просто вести автоматическое регулирование противонатяжений, используя непосредственный замер датчиками с помощью силоизмерительных роликов

вне очага деформации (рисунок 2.3, б). В тоже время силоизмерительные ролики, снижают эксплуатационную надежность стана в связи с большой скоростью их вращения, вызывают дополнительные изгибы проволоки, что нарушает принцип прямоточности и увеличивает вероятность обрыва. Тем ни менее, несмотря на технические трудности связанные с измерением силовых параметров, все же перспективно применять системы с контактными датчиками, используя более совершенные конструкции, которые будут лишены большинства вышеуказанных недостатков.

Таким образом, теоретически, системы управления с полной информацией обладают рядом преимуществ по сравнению с другими системами. На их базе ведутся работы в области создания электропривода станов с программным и адаптивным управлением с широким использованием микропроцессорной техники. При этом необходимо отметить, что современные средства вычислительной техники позволяют расширить область применения и систем с косвенной оценкой силовых параметров, в которых необходимое соотношение скоростей поддерживается за счет обратной связи по скорости, току или моменту с учетом взаимосвязи технологических и электромеханических параметров стана [12]. Аналогичные системы разрабатываются в прокатном и бумагоделательном производстве.

Таким образом, показано что, несмотря на технические трудности с непосредственным измерением противонатяжения, целесообразно применять системы регулирования с полной информацией которые обеспечат стабилизацию сил волочения и противонатяжений особенно в станах с большим числом волочильных блоков. Системы с неполной информацией с косвенной оценкой силовых параметров при меньшем числе элементов и отсутствии контактных датчиков, удовлетворительно регулируют процесс волочения в станах с числом блоков не более четырех, где вероятность появления значений противонатяжений, превышающих допустимые значения, мала.

## **2.2 Система стабилизации противонатяжения проволоки в прямоточных станах с параллельной схемой питания двигателей**

Система стабилизации противонатяжения проволоки в прямоточных станах с параллельной схемой питания двигателей, обеспечивает снижение обрывности проволоки путем точного поддержания статистических противонатяжений проволоки между блоками многократного прямоточного волочильного стана на заданном уровне независимо от установившейся скорости волочения, определяемой напряжением питания цепи якоря, и от изменения усилий волочения в блоках стана [11].

Это достигается тем, что система стабилизации межблочных противонатяжений на стане, содержащая электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения, регулируемый усилитель мощности для питания цепи якорей двигателей, вход которого соединен через усилитель с выходом

здатчика линейно-изменяющегося напряжения, 3 регулируемых усилителей мощности для питания обмоток возбуждения двигателей, дополнительно содержит 3 нелинейных зависимостей, обратных к кривым намагничивания двигателей, выходы которых соединены с входами усилителей мощности для питания обмоток возбуждения двигателей, входы соединены с выходами устройств вычисления моментов на валах двигателей, вторые входы соединены с выходами 3 устройств умножения, первые входы которых соединены с положительным полюсом цепи якорей двигателей, а вторые с соответствующими выходами 3 вычислительных устройств, первые входы которых соединены с выходами устройства вычисления момента нагрузки на валу первого двигателя, а вторые соединены с выходами остальных  $(n-1)$  устройств вычисления моментов нагрузки на валу соответствующих двигателей, первые входы которых соединены с выходами  $(n-1)$  задатчиков противонапряжений проволоки перед волоками, вторые соединены с выходами датчиков усилий волочения, а третьи соединены с выходами задатчиков противонапряжений проволоки за барабанами соответствующих блоков стана. При этом достигается следующая зависимость магнитного потока  $\Phi_k [Вб]$   $K$ -го двигателя от напряжения  $U [В]$  цепи якоря и усилий волочения  $F_k$  ( $k=1, n$ ) во всех блоках волочения:

$$\Phi_k = \frac{\gamma_k}{(1 - \xi_k) \cdot U}, \quad k = 1, n \quad (2.7)$$

где

$$\gamma_k = 2 \cdot \frac{r_k \cdot M_k}{c_k}, \quad k = 1, n \quad (2.8)$$

$$\xi_k = \sqrt{1 - \alpha_k} \cdot r_k \cdot M_k \cdot (1 - \xi^2), \quad k = 2, n \quad (2.9)$$

$$M_k = R_k \cdot j_k \cdot (F_k + T_k^0 - T_{k+1}), \quad k = 1, n \quad (2.10)$$

Параметр для первого двигателя выбирается из условий

$$\xi_k \in (0, \xi_m) \quad (2.11)$$

где  $\xi_m$  - максимально допустимое значение параметра поля, определяемое из формулы:

$$\xi_m = 1 - \min_{1 \leq k \leq n} \frac{2 \cdot r_k \cdot M_{kmin}}{c_k \cdot \Phi_{kmax}} \quad (2.12)$$

Изменение магнитных потоков  $\Phi_k$  ( $k=1, n$ ) (2.7) двигателей в соответствии с зависимостью (2.7) обеспечивает постоянные значения противонапряжений проволоки

$$T_k = T_k^0 = const, \quad k = 2, n \quad (2.13)$$

независимо от установившихся значений скорости и усилий волочения  $F_k(k=1, n)$ .

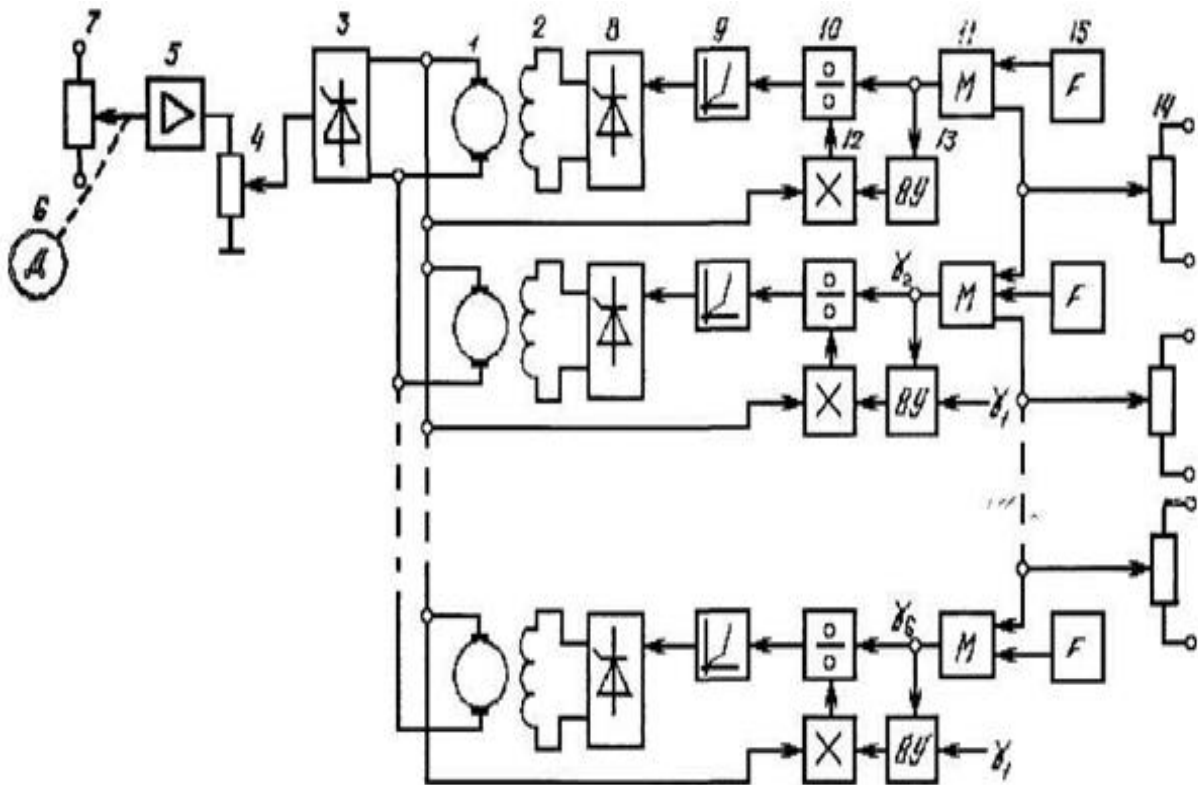


Рисунок 2.4 – Функциональная блок-схема системы

На рисунке 2.4 представлена функциональная блок-схема предлагаемой системы для шестикратного волочильного стана. Система содержит шесть двигателей 1 постоянного тока с независимым возбуждением 2. Питание якорных цепей двигателей 1 осуществлено от регулируемого усилителя мощности 3, вход которого соединен с выходом регулируемого вручную потенциометра 4, вход которого соединен через усилитель 5 с выходом задатчика линейно — изменяющегося напряжения, например, приводимого двигателя 6 потенциометра 7. Обмотки возбуждения двигателей соединены с выходами шести регулируемых усилителей мощности 8, входы которых соединены с выходами шести нелинейных преобразователей 9 для воспроизведения нелинейной зависимости тока возбуждения от магнитного потока. Входы нелинейных преобразователей 9 соединены с выходом шести устройств деления 10, первые входы которых соединены с выходами



устройств вычисления моментов 11, вычисляющих величины  $\gamma_k$  по формулам (2.8) и (2.10), вторые входы соединены с выходами шести устройств умножения 12, первые входы которых соединены с положительным полюсом якорей двигателей, а вторые с выходами шести вычислительных устройств 13, вычисляющих величины  $(1-\xi)$  и  $(1-\xi_k)$  ( $k=2, 6$ ) по формулам (2.9) первые входы которых соединены с выходами шести устройств вычисления моментов нагрузки 11 на валу соответствующих двигателей, вторые входы соединены с выходом устройства вычисления момента нагрузки 11, на валу первого двигателя.

Первые входы устройств вычисления моментов 11 соединены с выходами пяти датчиков противонатяжений проволоки 14 перед соответствующей волокой (считаем, что  $T_1=T_7=0$ ), вторые соединены с выходами шести датчиков усилий волочения 15, например, емкость датчиков преобразования давления на волоку в электрический сигнал, третьи соединены с выходами датчиков противонатяжений проволоки 14 за соответствующим барабаном стана.

Система стабилизации работает следующим образом.

Перед заправкой проволоки в стан выход потенциометра 7 устанавливается на 10 - 20% от своего максимального значения так, что в соответствии с зависимостями (2.7) магнитные потоки двигателей максимальны. Процесс заправки волочильщик начинает с накоплением 5-6 витков проволоки на первом барабане: нажав педаль заправки первого блока, (барабан и педаль не показаны) и регулируя вращающий момент первого двигателя 1 с помощью ручного потенциометра 4. Во время заправки второго барабана датчик противонатяжения проволоки 14 перед вторым блоком установлен таким образом, чтобы получить заданное противонатяжение проволоки между первым и вторым блоками. Аналогичного время заправки  $(k+1)$ -го барабана движки первых  $k$  датчиков 14 установлены таким образом, чтобы получить заданные натяжения проволоки между всеми  $(k+1)$  блоками волочения. Наконец, когда заправлены все барабаны, включается двигатель 6 движка потенциометра 7, который обеспечивает плавное нарастание во времени напряжения цепи якорей двигателей 1 по линейному закону. Одновременно с линейным ростом напряжения цепи якорей двигателей 1 в обратно-пропорциональной зависимости (2.7) уменьшаются магнитные потоки двигателей, обеспечивая постоянство вращающих моментов двигателей при постоянных усилиях волочения. При изменении усилий волочения измеряемых датчиками 15, в соответствии с формулой (2.9) изменяются сигналы на выходах устройств вычисления момента на валу 11 соответствующего двигателя, подаваемые на первые входы устройства деления 10, одновременно с чем вычислительные устройства 13 по формуле (2.8) рассчитывают требуемые значения параметров полей и, в конечном итоге, вычисляются такие новые значения магнитных потоков  $\Phi_k$  ( $k=1, n$ ), что значения противонатяжений остаются неизменными, равными первоначально заданным.

### 2.3 Система стабилизации противонатяжений проволоки в прямоточных волочильных станах с индивидуальной схемой питания двигателей

Система стабилизации противонатяжений проволоки в прямоточных волочильных станах с индивидуальной схемой питания [11] содержит  $n$  электродвигателей постоянного тока, 3 регулируемых усилителя мощности для питания цепи якорей двигателей, вход первого среди которых соединен с выходом регулируемого вручную потенциометра, вход которого соединен через усилитель с выходом задатчика линейно-изменяющегося напряжения, регулируемый усилитель мощности для питания обмоток возбуждения двигателей, дополнительно содержит задатчик момента нагрузки на валу первого двигателя, устройство деления, первый вход которого соединен с положительным полюсом цепи якоря двигателя, и нелинейный преобразователь для воспроизведения нелинейной зависимости, обратной к кривой намагничивания двигателей, вход которого соединен с выходом устройства деления, а выход соединен со входом усилителя мощности для питания обмоток возбуждения двигателей  $(n-1)$  устройств умножения, выходы которых соединены со входами  $(n-1)$  усилителей мощности для питания цепей якоря двигателей, начиная со второго, первые входы соединены с положительным полюсом цепи якоря первого двигателя, вторые соединены с выходами  $(n-1)$  вычислительных устройств, первые входы которых соединены с выходом устройства вычисления момента нагрузки на валу первого двигателя, а вторые соединены с выходами остальных  $(n-1)$  устройств вычисления моментов нагрузки на валу соответствующих двигателей, первые входы которых соединены с выходами  $(n-1)$  задатчиков противонатяжений проволоки перед волоками, вторые соединены с выходами 3 датчиков усилий волочения, а третьи соединены с выходами задатчиков противонатяжений проволоки за барабанами соответствующих блоков стана. При этом достигается следующая зависимость магнитного потока  $\Phi_k$  [Вб], ( $k=1, n$ ) и напряжения питания цепи якоря  $U_k$  [В], ( $k=2, n$ ) - го двигателя от напряжения  $U_1$  [В] цепи якоря первого двигателя и усилий волочения  $F_k$  ( $k=1, n$ ) во всех блоках волочения:

$$\Phi_k = \frac{\gamma_1}{U_1}, \quad k = 1, n \quad (2.14)$$

$$U_k = U_1 \cdot \sqrt{a_k} \cdot \frac{r_k \cdot M_{Hk} \cdot (1 - \xi_1^2)}{r_1 \cdot M_{H1} \cdot (1 - \xi_k^2)}, \quad k = 2, n \quad (2.15)$$

$$\xi_k = \frac{a_k \cdot M_{H1} - M_{Hk}}{a_k \cdot M_{H1} + M_{Hk}}, \quad k = 2, n \quad (2.16)$$

$$a_k = a_k \cdot \frac{c_k \cdot r_l}{c_l \cdot r_k} \cdot \left( \frac{1 + \xi_l}{1 - \xi_l} \right), \quad k = 2, n$$

где

$$\gamma_l = 2 \cdot \frac{r_l \cdot M_l}{c_l \cdot (1 - \xi_k)},$$

$$\xi_l = 1 - \frac{2 \cdot r_l \cdot M_{lmin}}{c_l \cdot \Phi_l}$$

$$M_{Hk} = R_k \cdot j_k \cdot (F_k + T_k^{max}), \quad k = 1, n$$

$$a_k = \prod_{i=2}^k \mu_i \cdot \frac{R_l \cdot j_l}{R_k \cdot j_k} \quad k = 2, n \quad (2.17)$$

Изменение магнитных потоков двигателей  $\Phi_k$  ( $k=1, n$ ) в соответствии с зависимостью (2.14) и напряжений питания цепи якоря  $U_k$  ( $k=2, n$ ) двигателей, начиная со второго, в соответствии с зависимостью (2.15) обеспечивает постоянные значения противонапряжений проволоки:

$$T_k = T_k^0 = const, \quad k=2, 3 \quad (2.18)$$

независимо от установившихся значений скоростей и усилий волочения. На рисунке 2.5 представлена функциональная блок - схема предлагаемой системы для шестикратного волочильного стана.

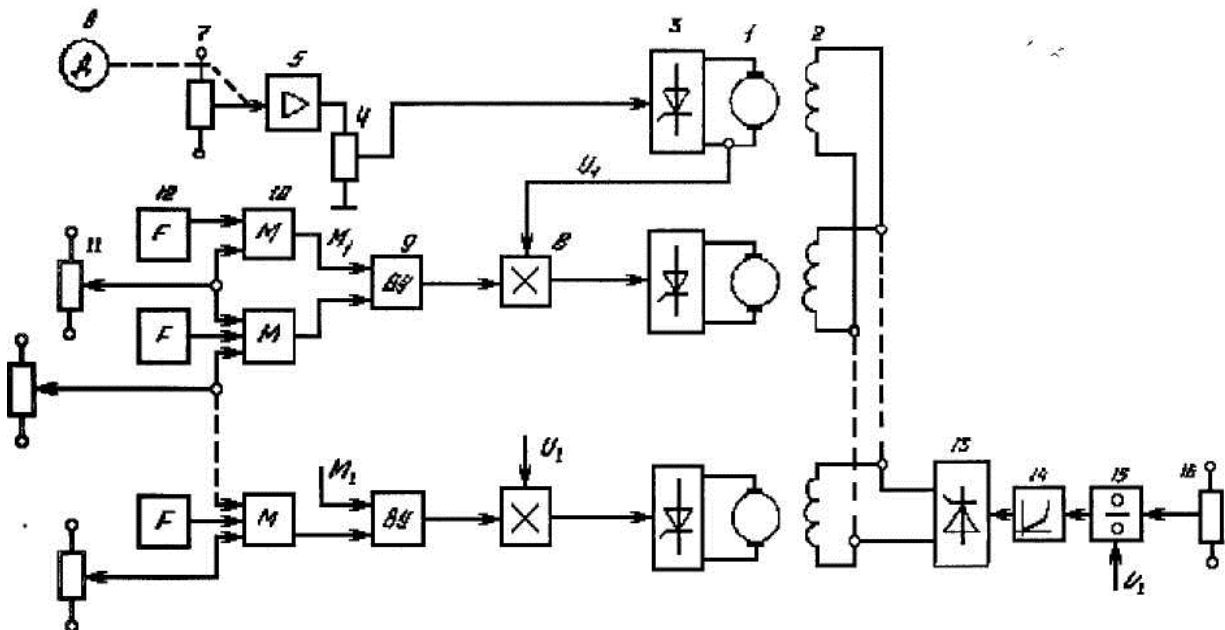


Рисунок 2.5 – Функциональная блок-схема системы

Система содержит шесть двигателей 1 постоянного тока с независимыми обмотками возбуждения 2. Питание якорных цепей двигателей 1 осуществляется от шести регулируемых усилителей мощности 3, вход первого среди которых соединен с выходом регулируемого вручную потенциометра 4, вход которого соединен через усилитель 5 с выходом задатчика линейно-изменяющегося напряжения, например приводимого двигателем 6 потенциометра 7. Входы остальных пяти усилителей мощности 3 соединены с выходами пяти устройств умножения 8, первые входы которых соединены с положительным полюсом цепи якоря первого двигателя, вторые входы соединены с выходом устройства вычисления момента нагрузки 10 на валу двигателя, а вторые соединены с выходами устройств вычисления моментов нагрузки 10 на валу соответствующих двигателей, начиная со второго. Первые входы шести устройств вычисления моментов нагрузки 10 соединены с выходами пяти задатчиков 11 противонапряжений проволоки перед соответствующей волокой (считаем, что  $T_1 = T_7 = 0$ ), вторые соединены с выходами шести датчиков 12 усилий волочения, например, емкостных датчиков преобразования давления на волоку в электрический сигнал, третьи соединены с выходами задатчиков 11 противонапряжений проволоки за соответствующим барабаном стана. Обмотки возбуждения 2 двигателей соединены с выходом регулируемого усилителя мощности 13, вход которого соединен с выходом нелинейного преобразователя 14 для воспроизведения нелинейной зависимости тока возбуждения от магнитного потока. Вход нелинейного преобразователя 14 соединен с выходом устройства деления 15, первый вход которого соединен с выходом момента нагрузки 16 на валу первого двигателя, а второй соединен с положительным полюсом цепи якоря первого двигателя.

Система стабилизации работает следующим образом.

Перед заправкой проволоки в стан потенциометр 7 устанавливается на 10 - 20% от своего максимального значения так, что в соответствии с зависимостью (2.14) магнитные потоки двигателей максимальны. Процесс заправки волочильщик начинает с накопления 5 - 6 витков проволоки на первом барабане, нажав педаль заправки первого блока (барабан и педаль не показаны) и регулируя вращающий момент первого двигателя 1 с помощью ручного потенциометра 4. Во время заправки второго барабана движок первого задатчика 11 установлен таким образом, чтобы получить заданное противонапряжение проволоки между первым и вторым блоками стана. Аналогично, во время заправки  $(k+1)$ -го барабана движки предыдущих  $k$  задатчиков 11 установлены таким образом, чтобы получить заданные противонапряжения проволоки между всеми предыдущими блоками стана. Наконец, когда заправлены все барабаны, включается двигатель 6 движка потенциометра 7, который обеспечивает плавное нарастание во времени напряжений цепи якорей двигателей 1 по линейному закону. Одновременно с линейным ростом напряжений цепи якорей двигателей 1 в обратно пропорциональной зависимости (2.14) уменьшаются магнитные потоки

двигателей, обеспечивая постоянство вращающих моментов двигателей при постоянных усилиях волочения. При изменении усилий волочения, измеряемых датчиками 12, в соответствии с формулой (2.17) изменяются сигналы на выходах устройств вычисления момента 10 на валу соответствующего двигателя в соответствии с которыми по формулам (2.15) вычислительные устройства 9 рассчитывают требуемые значения подкоренного выражения и тем самым с учетом устройств умножения 8 рассчитываются такие значения напряжения питания  $U_k$  ( $k=2, n$ ) цепи якорей двигателей 1, что значения противонатяжений остаются неизменными, равными первоначально заданным.

Предлагаемые системы позволяют в сравнении с прототипами [68, 91] повысить производительность волочильного стана более чем на 11% за счет снижения обрывности проволоки путем точного поддержания заданного значения статистического противонатяжения проволоки, снизить объем продукции низкого качества и потерь сырья с 20% на 14% за счет снижения обрывности проволоки, уменьшить износ волок, расход энергии и температуры проволоки на выходе из волоки за счет поддержания оптимальных величин противонатяжений проволоки, повысить качество проволоки за счет снижения температуры проволоки, облегчить условия и производительность труда оператора-волочильщика за счет автоматизации процесса волочения от момента запуска до остановки волочильного стана. Результаты математического моделирования стана с системой стабилизации показали, что динамические составляющие противонатяжений проволоки составили не более 6% от статистических составляющих при изменении скорости и усилий волочения вдвое от номинальных значений за 30 секунд по линейному во времени закону, а время отслеживания ступенчатого изменения усилия волочения составило 0,5 секунды.

#### **2.4 Система с косвенным контролем и регулированием противонатяжений проволоки**

Возмущающими воздействиями, которые влияют на натяжение проволоки в процессе её волочения, являются: износ волок, изменение реологии волочимой проволоки по ее длине и участки различной твердости, изменяющие давление на волоку и как следствие величину натяжения, а также динамические моменты привода в переходных режимах работы стана.

Исследования показали [30], что в реальных условиях разгона стана на отдельных волочильных блоках отношение максимальной величины натяжения проволоки между волочильными барабанами к минимальной может достигать величины 4,1, а в некоторых случаях, по имеющимся данным, и до 9. Величина 4,1 находится выше допустимой величины диапазона колебаний натяжения и дальнейшее увеличение темпа разгона обязательно приводит к обрывам проволоки, что и подтверждается высокой ее обрывностью в переходных режимах работы стана.

Таким образом, из всех рассмотренных возмущающих воздействий, увеличивающих обрывность проволоки, наиболее мощными являются возмущения, возникающие в переходных режимах работы стана из-за различия электромеханических постоянных времени отдельных волочильных блоков. При этом противонапряжения  $Q_i$  получают дополнительные изменения на величину

$$\pm \Delta Q_i = \frac{\alpha_i}{R} J_i \frac{d\omega_i}{dt}, \quad (2.19)$$

где  $\alpha_i$  - передаточное число редуктора;

$R$  – постоянные коэффициенты;

$J_i$  – момент инерции привода блока стана;

$\omega_i$  - скорость двигателя;

$i$  - номер волочильного блока.

При разгоне  $\Delta Q_i$  имеют положительные значения, а при торможении отрицательные, величины которых могут достигать недопустимых значений.

Анализ уравнений взаимосвязи технологических и электромеханических параметров стана в переходных режимах работы показывает [29], что отклонение натяжения между волочильными барабанами вызывается разницей в динамических моментах электропривода смежных волочильных блоков, которая обусловлена различием их электромеханических параметров. При этом чтобы эти отклонения были минимальны, необходимо исключить данную разницу. Так, например, для стана с последовательным соединением якорей приводных электродвигателей, должно выполняться условие

$$C_m (\Phi_1 + \Delta\Phi_1)\Delta I = C_m (\Phi_2 + \Delta\Phi_2)\Delta I = C_m (\Phi_n + \Delta\Phi_n)\Delta I, \quad (2.20)$$

где  $\Delta I$  – динамическая составляющая якорного тока одинакова для всех двигателей;

$\Phi_1, \Phi_2 \dots \Phi_n$  – потоки возбуждения приводных электродвигателей заданные при заправке стана;

$\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2 \dots \Delta\Phi_n$  – необходимые отклонения потоков возбуждения обеспечивающие выполнение данного условия;

$C_m$  – коэффициент определяемый конструкцией двигателя.

Из приведенного выше выражения видно, что данное равенство может быть реализовано регулятором, воздействующим на потоки возбуждения приводных электродвигателей в переходных режимах работы стана.

Следовательно, при разработке и проектировании систем автоматического регулирования электроприводами необходимо использовать устройство, позволяющее выделить динамический момент, возникающий в переходных режимах работы стана, и регулятор, исключаящий разницу в динамических составляющих моментов между смежными волочильными блоками. В качестве такого устройства можно использовать микропроцессор.

Функциональная схема разработанной системы автоматического регулирования электроприводом волочильного стана приведена на рисунке 2.6.

Электропривод содержит  $n$  электродвигателей 1 постоянного тока независимого возбуждения, создающих тяговое усилие волочения на тяговых барабанах 2, необходимое для волочения проволоки через волокна 3. Электродвигатели 1 связаны с тянущими барабанами 2 посредством редукторов 4, якорные обмотки двигателей могут быть соединены последовательно или параллельно. Числу двигателей соответствует число каналов управления. При этом каждый канал состоит из последовательно соединённых: датчика момента 5, пускового контакта 6, блока памяти 7 и основного блока сравнения 8. Кроме того, во все каналы, кроме первого и последнего входят сумматор 9 и дополнительный блок сравнения 10.

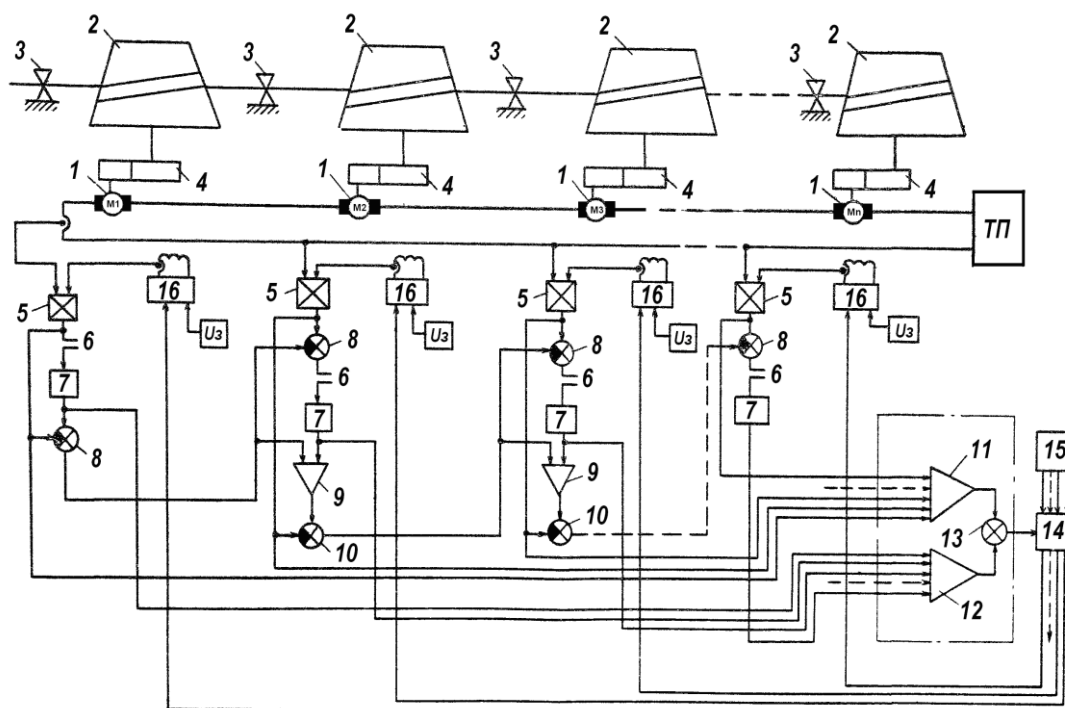


Рисунок 2.6 – Функциональная схема системы автоматического регулирования

Система работает следующим образом. Перед заправкой стана проволокой волочильщик на клавишах блока 17 постоянных коэффициентов устанавливает значение вытяжек согласно заданному маршруту волочения. При этом в блоках 18 формирования весовых коэффициентов определяются весовые коэффициенты, пропорциональные ожидаемым динамическим моментам на каждом волочильном блоке исходя из должной величины ускорения и момента инерции. Функциональная схема блока весовых коэффициентов и блока разделения динамических моментов представлена на рисунке 2.7.



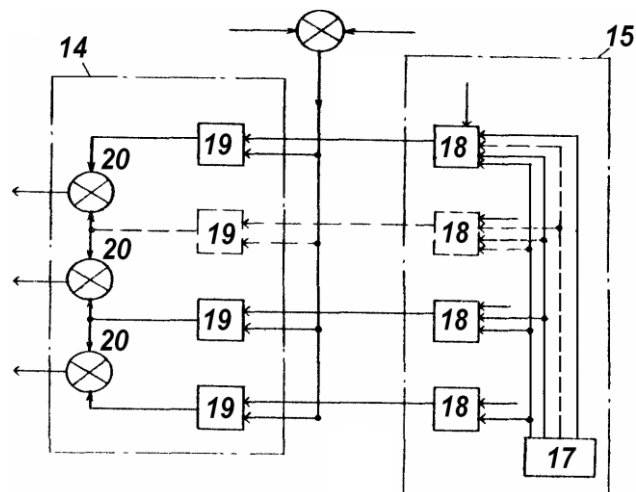


Рисунок 2.7 - Функциональная схема блока весовых коэффициентов и блока разделения динамических моментов

Сигналы пропорциональные данным весовым коэффициентом, подаются на соответствующие входы множительных блоков 19. После чего волочильщик приступает к заправке первого по ходу технологического процесса барабана 2. В процессе заправки конец исходной заготовки заостряется, пропускается через волоку 3 и захватывается клещами, закрепляемыми на барабане. Затем волочильщик на заправочной скорости производит накопление 5-6 витков проволоки, на барабане 2, нажав педаль заправки первого блока (не показана). После нажатия педали заправки с выдержкой времени достаточной для того чтобы скорость барабана достигла установившегося значения, срабатывает реле заправки первого блока (не показано), замыкая свой нормально разомкнутый пусковой контакт 6 на время необходимое, чтобы сигнал, пропорциональный величине статического момента волочения на первом блоке с выхода датчика 5 моментов, запоминался в блоке 7 памяти до следующего нажатия педали заправки на данном волочильном блоке.

Во время заправки последующих волочильных барабанов к окончанию процесса накопления проволоки на каждом из них срабатывают соответствующее им реле педалей заправки, которые также на некоторое время замыкают свои нормально разомкнутые контакты 6 и т.д. в цепи управления соответствующих блоков 7 памяти. При этом в каждом блоке 7 памяти запоминаются сигнал с выхода блока 8 сравнения, который представляет собой разность сигналов с выхода датчика 5 данного волочильного блока и блока 10 сравнения предыдущего волочильного блока. Величина сигнала с датчика 5 момента на каждом волочильном блоке, пропорциональна моменту, который развивает электродвигатель во время заправки данного барабана. Величина сигнала с выхода блока 10 пропорциональна моменту натяжения между данным волочильным барабаном и предыдущим. Таким образом, к окончанию процесса заправки

стана в блоке 7 памяти находятся значения сигналов, которые соответствуют статическим моментам волочения на каждом волочильном блоке. Сигналы, пропорциональные статическим моментам волочения отдельных волочильных блоков, с выходов блоков памяти подаются на вход сумматора 12 статических моментов, где определяется суммарный статический момент волочения для всего стана.

Закончив заправку, волочильщик переводит оперативный ключ управления (на рисунке не показан) в положение, соответствующее разгону стана. При этом дополнительные контакты ключа управления замыкают цепь обратной связи контура регулирования момента. Стан начинает разгоняться до заданной рабочей скорости. Одновременно с выхода датчиков моментов сигналы, пропорциональные действительным моментам, которые развивают двигатели во время разгона на каждом волочильном блоке, суммируются в сумматоре 11 текущих моментов. В процессе разгона действительный суммарный момент из-за наличия динамической составляющей момента не равен суммарному статическому моменту волочения, поэтому на выходе блока 13 выделения динамического момента сигнал разности представляет собой суммарный динамический момент. Далее данный суммарный динамический момент в блоке 14 разделения динамических моментов распределяется между волочильными блоками в соответствии с весовыми коэффициентами, пропорциональными ожидаемым динамическим моментам на каждом волочильном блоке согласно заданному маршруту волочения. В блоках 20 сравнения динамических коэффициентов определяются сигналы, пропорциональные разности динамических моментов смежных волочильных блоков. В результате чего с блоков 20 сравнения для локализации возмущений, вызванных разностью динамических моментов, в блоки 16 регулирования магнитным потоком в обмотках возбуждения приводных электродвигателей соответствующих волочильных блоков подаётся регулирующее воздействие, пропорциональное данной разности. В статическом режиме работы стана динамическая составляющая момента отсутствует, в результате чего сумма текущих моментов электродвигателей равна сумме статических моментов определённых ранее, и сигнал разности с блока 13 равен нулю, регулирующее воздействие с блоков 20 отсутствует.

В процессе торможения и остановки волочильного стана устройство работает аналогично процессу разгона, но с противоположным знаком регулирующего воздействия с блоков 20, поскольку знак производной с блока 13 изменяется на противоположный.

Данная система была исследована и внедрена в условиях Магнитогорского метизно – металлургического завода на прямоточном стане ВМЭП - 4 – 350/450 АЗТМ предназначенном для волочения порошковой проволоки и на стане ВС 3/4 – 550 АЗТМ предназначенном для волочения низкоуглеродистой проволоки. Принцип построения предлагаемой системы был заложен Алматинским заводом тяжёлого машиностроения во вновь проектируемые СУЭП волочильных станов.

## 2.5 Самонастраивающаяся система управления тяговым приводом

Под адаптацией будем понимать процесс изменения величин параметров, структуры, а в некоторых случаях и управляющих воздействий на основе информации, получаемой во время управления с целью достижения определенного, обычно оптимального, качества управления при изменяющихся условиях работы [10].

Выбор адаптивного принципа управления определяется имеющейся информацией об управляемом процессе и принятом критерием качества работы системы управления. В свою очередь выбор критерия качества управления предопределяет подход к выбору типа системы управления. Поскольку основной задачей системы управления волоочильных станков является стабилизация противонатяжения, выберем критерий качества в виде

$$Q_i = Q_{i0} = const, i = 1, n; \quad (2.21)$$

где  $Q_{i0}$  - заданное (оптимальное) значение противонатяжения  $i$  - го контура регулирования.

Системы управления с таким критерием качества получили название беспоисковые самонастраивающиеся системы (СНС) стабилизации, у которых управляющие воздействия являются постоянными величинами. Целью самонастройки подобных систем является обеспечением устойчивости и заданных показателей качества динамических процессов во всем диапазоне изменения характеристик объекта и возмущающих воздействий.

Для построения требуемой СНС необходимо иметь информацию об изменении силовых параметров волочения. Такая информация может быть получена косвенным методом. Если воспользоваться законом сохранения секундных объемов. Давление на волоку пропорционально коэффициенту вытяжки, а значит и скорости проволоки при входе и выходе ее из волоки:

$$P_i = \gamma_i \frac{V_i}{V_{i-1}}, i = 1, n; \quad (2.22)$$

Тогда алгоритмы управления СНС можно представить в следующем виде

$$Q_{i-1} V_{i-1} = \frac{M_{ci} V_{i-1}}{R_{\delta i}} - \gamma_i V_i = const, i = 1, n; \quad (2.23)$$

При жесткой стабилизации скорости на первом блоке волочения  $V_0 = const$ , достаточно фиксировать изменение скорости на  $i$ -ом блоке  $V_i \pm \Delta V_i$  в установившемся режиме волочения при постоянном износе волоочильного

инструмента. Это изменение и будет определяющим для величины давления на волоку.

$$\Delta P_i = \gamma_i(V_i \pm \Delta V_i)/V_0, \quad i = 1, n; \quad (2.24)$$

Предположим, что произошел износ  $i$ -ой волоки. Тогда, диаметр проволоки увеличится на  $\Delta d_i$ , а коэффициент вытяжки уменьшится на  $\Delta d_i^2$ . Скорость проволоки уменьшится на величину  $\Delta V_i$ , обеспечивается равенство секундных объемов.

$$m_i = \frac{d_{i-1}^2}{\Delta d_i^2} = \frac{\Delta V_i}{V_{i-1}}, \quad i = 1, n; \quad (2.25)$$

Следовательно, давление на волоку уменьшится на  $\Delta P_i$ . В установившемся режиме работы статический момент  $M_{ci}$  поддерживается постоянным, поэтому для выполнения условия (2.24), необходимо уменьшить противонапряжение на величину  $\Delta Q_{i-1}$ , равную  $\Delta P_i$ .

На рисунке 2.8 изображена функциональная схема СНС стабилизации, обеспечивающая требуемое значение качества (2.24). Она включает волоки **В** для протягивания проволоки, тяговые барабаны **Б**, двигатели **М** постоянного тока независимого возбуждения (якорные обмотки двигателей могут быть соединены последовательно или параллельно), передающие тяговые усилия **Т** на волоочильные барабаны, нерегулируемый источник тока **ИТ**, тиристорный преобразователь **ТП**, датчики скорости **ДС**, суммирующие усилители **УС**, ключи **К**, блоки задания скорости **ЗС** и момента **БЗМ**, а также размоточное устройство **РУ** и намоточный аппарат **НА** [31].

Управление электроприводом **ПВС** осуществляется **ИТ** по бесконтактной схеме, что значительно снижает массогабаритные показатели и повышает надежность.

Электропривод первого по ходу волочения барабана выполнен с отрицательной обратной связью по скорости и стабилизирует заданную частоту вращения волоочильного барабана **Б1**.

Электроприводы последующих барабанов выполнены по системе **ИТ-Д** без обратной связи по скорости, благодаря чему на валах данных двигателей автоматически сохраняется постоянство момента из-за ограниченного свойства источника тока и постоянство заданного потока возбуждения независимо от нагрузки. Частота вращения последующих двигателей задается и определяется линейной скоростью проволоки.

Согласующие блоки **СБ** обеспечивают равенство сигналов датчиков скоростей **ДС** при неизношенных волоках, т.е. если волоки не изнашивались, то сигналы на выходе узлов сравнения скоростей **УС** равны нулю.

Выходы блока задания момента **БЗМ** в установившемся режиме имеют постоянные положительные сигналы, соответствующие оптимальным

значениям силовых параметров волочения. В пусковых режимах предусмотрены задатчики интенсивности по току возбуждения, для каждого канала регулирования с соответствующими значениями ускорения.

Ключи **К** предусмотрены для подключения контуров самонастройки к соответствующим каналам регулирования в установившемся режиме волочения, а также настройки выходов **СБ**.

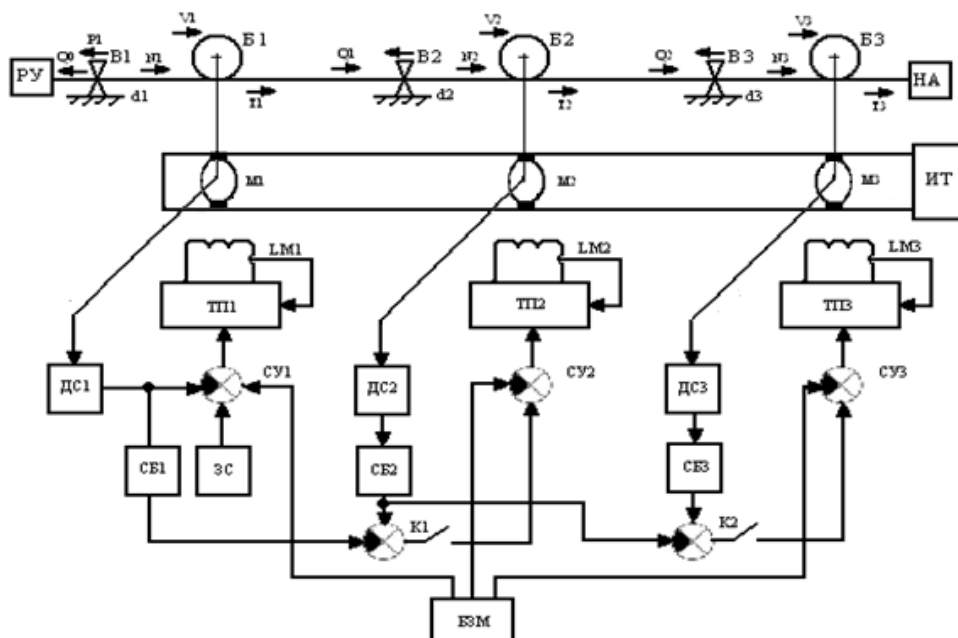


Рисунок 2.8 – Функциональная схема самонастраивающейся системы управления волочильным станом

Самонастройка параметров в **СМР** имеет свою особенность. Например, сигнал с выхода согласующего блока **СБ1** является эталонным значением ( $U_{1эТ}$ ) для второго канала регулирования эталонным значением является выход блока **СБ2** ( $U_{2эТ}$ ) и т.д.

В принципе работы СНС заложена зависимость скорости волочения от изменения давления на волоку в процессе износа волочильного инструмента.

При уменьшении давления на волоку  $i$ -го блока на  $\Delta P_i$  частота вращения  $\omega_i$  двигателя  $M_i$  уменьшится на  $D_{wi}$  и на выходе узла сравнения скоростей  $УС_i$  появится постоянный положительный сигнал  $\Delta U_i$ , пропорциональный противонатяжению:

$$\Delta U_i \gamma_i = \Delta Q_{i-1}, \quad i = 1, n; \quad (2.26)$$

Этот сигнал суммируется с сигналом задания момента в суммирующем усилителе  $СУ_i$ , тем самым обеспечивает равенство (2.26).

Самонастройка такого типа получила название сигнальной самонастройки ее принцип заключается в том, что параметры регулятора

остаются постоянными, а управляющие воздействия меняются в соответствии с алгоритмом управления (2.24) при изменении давления на волоке.

Структурная схема разработанной СНС стабилизации двукратного волоочильного стана изображена на рисунке 2.9.

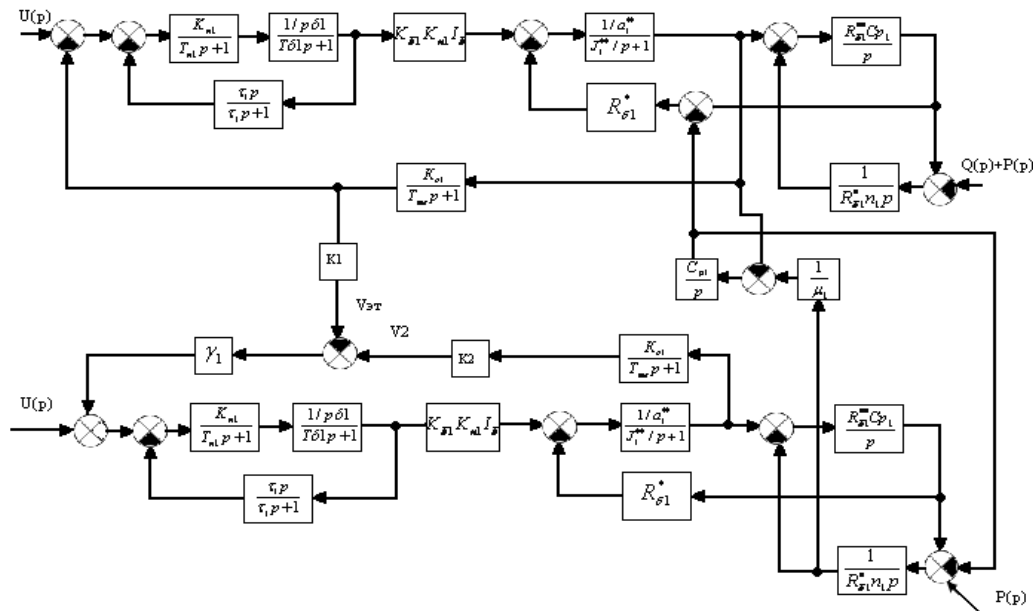


Рисунок 2.9 – Функциональная схема самонастраивающейся системы стабилизации двукратного ПВС

Если коэффициент усиления самонастройки  $\gamma_i$  достаточно большой, то передаточная функция замкнутой системы второго канала регулирования будет приближенно равна передаточной функции модели:

$$W_m(p) = \frac{K_1 K_2}{T_{mv} p + 1}; \quad (2.27)$$

Следовательно, при изменении параметров объекта в замкнутой системе динамические процессы по управлению будут стабилизированы.

На практике анализируемые сигналы, как правило, искажаются помехами. В зависимости от уровня частного спектра помех и полезного сигнала, а также от качества работы фильтров существует два подхода к анализу сигналов, характеризующих реальные процессы управления. В первом случае, когда частотные спектры полезного сигнала и помех существенно разнесены, имеется возможность качественно отфильтровать анализируемый сигнал. Во втором случае необходимо применять методы, учитывающие наличие помех в анализируемых сигналах.

Для разработанной СНС стабилизации анализируемыми сигналами являются напряжения с выходов тахогенераторов. Минимальная погрешность аналоговых систем обработки информации о скорости электроприводов

находиться на уровне 0,1 процентов. Поскольку частотный спектр помех превышает на порядок и более частотного спектра полезного сигнала, сигналы с выходов датчиков частоты вращения ДС отфильтрованы низкочастотными фильтрами.

На рисунке 2.10 приведена принципиальная схема СНС для волочильного стана ВН – 2/550, установленного на Лексинском метизном заводе.

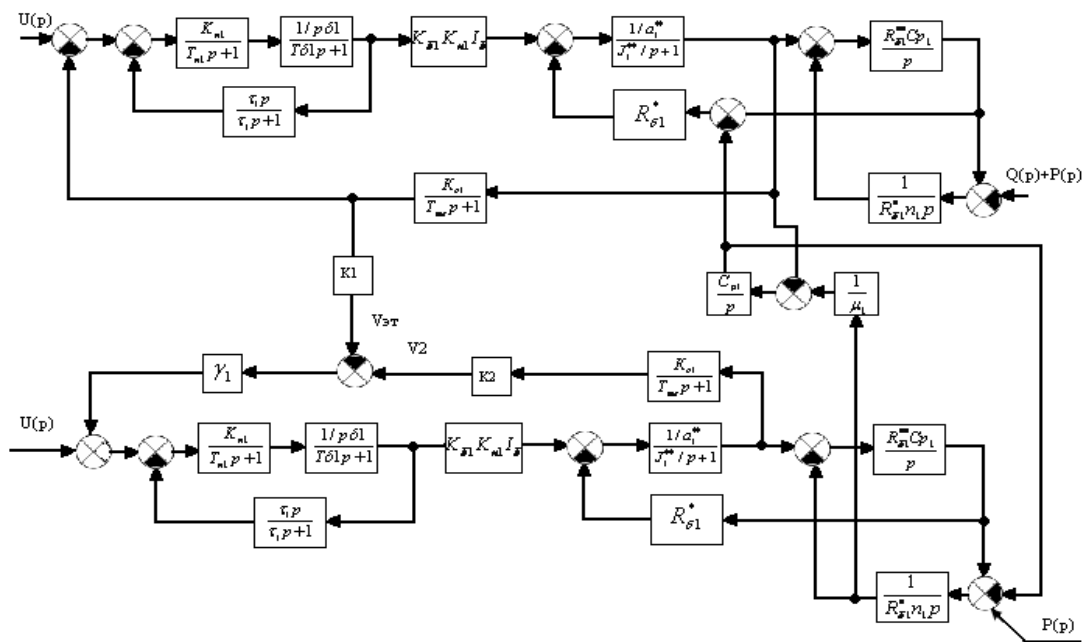


Рисунок 2.10 – Принципиальная схема самонастраивающейся системы управления ПВС

Помехи от тахогенератора устраняются активными фильтрами, выполненными на усилителях 1,2. Передаточная функция такой схемы имеет вид:

$$W_{\phi}(p) = \frac{R / R_{\phi}}{\alpha(1 - \alpha)R_{\phi} C_{\phi} P + 1}; \quad (2.28)$$

Изменяя положение движков потенциометров, можно сохраняя неизменный коэффициент передачи, изменить постоянную фильтра от 0 до  $T_{\max}$ , которая достигает при  $\alpha=0,5$  и оставляет  $T_{\phi \max}=0,25 R_{\phi} C_{\phi}$ . Нижнее значение величины постоянной фильтра определяется исходя из ограничения уровня помех. Верхнее значение также ограничено из-за влияния фильтра на динамические свойства систем регулирования.

Задатчики интенсивности, формирующие на выходе линейно-нарастающие сигналы при ступенчатых входных сигналах  $U_{31}, U_{32}$ , включают



в себя усилители 3,6 с высоким коэффициентом усиления, интеграторы 4,7 и инверторы 5,8. Предельное напряжение усилителя 3 ограничено некоторым значением  $U_{3 \text{ огр}}$  с помощью блока ограничения БО. Если же на выход задатчика поступает ступенчатый сигнал  $U_{31}$ , на выходе усилителя 3 сразу устанавливается напряжение  $U_{3 \text{ огр}}$  и напряжение усилителя 4 меняется в соответствии с выражением

$$U_{3m1} = U_{3огр} t / \tau (\tau = R_{m1} C); \quad (2.29)$$

В момент, когда напряжение на выходе задатчика достигает значения напряжения на его входе, усилитель 3 выйдет из ограничения, обратная связь через усилитель 5 замкнется и далее будет поддерживаться равенство

$$U_{31} = U_{3m1}; \quad (2.30)$$

Установка требуемого значения ускорения осуществляется потенциометром  $R_{\tau}$ .

Согласующие блоки реализованы на потенциометрах  $R_{\omega}$  и  $R_{\gamma}$ . Потенциометром  $R_{\gamma}$  устанавливается требуемое значение коэффициента самонастройки  $K_{\gamma}$ , рассчитываемого по формуле (2.25).

Суммирующие усилители находятся внутри тиристорных преобразователей ТП1 и ТП2 типа БУ-3509. Также формируются напряжения задания  $U_{31}$  и  $U_{32}$ .

Ключи  $K_2$  и  $K_3$ , установленные на пульте управления, служат для установления токов возбуждения, которые соответствует оптимальным силовым параметрам волочения. Ключ  $K_1$  служит для включения контура сигнальной самонастройки в установившемся режиме.

Съем готовой продукции осуществляется на чистовом барабане с помощью грейфера поворотным краном. Для этого на чистовом барабане предусмотрен реверс барабана, осуществляемый контактом КМЗ.

Таким образом, полученная СНС стабилизация позволяет автоматически регулировать и поддерживать заданный критерий качества, согласно (2.21) алгоритм управления при изменении силовых параметров волочения. Иными словами, данная система регулирования обеспечивает компенсацию воздействий со стороны волочильного инструмента.

Кроме рассмотренных возмущений, действующих на ПВС, имеются возмущения, которые могут поступать от намоточного аппарата. Эти возмущения, в виде провисания проволоки или колебания ее натяжения между волочильным станом и намоточным аппаратом, могут привести к проскальзыванию проволоки по барабану и обрыву проволоки на участке «волока-барабан-намоточный аппарат». Также существует проблема межвиткового заклинивания проволоки и деформации катушек намоточного аппарата.

## **2.6 Система оптимального управления прямоточным волочильным станом**

Существенным недостатком прямоточных волочильных станом является повышенная чувствительность к возмущениям: любое возмущение, возникающее на линии волочения, распространяется как по ходу, так и против хода волочения. В результате, увеличивается число обрывов проволоки и соответственно снижается производительность.

Источником возмущения могут быть: размоточные устройства, изменение диаметра заготовки, изменение диаметра фильер, намоточные устройства, изменение предела прочности материала, высокочастотные колебания, связанные с биением барабанов и упругими свойствами проволоки, среднечастотные колебания барабанов, связанные со свойствами электропривода, колебание питающей сети, изменение режимов смазки в фильерах, изменение режима работы, связанные с разгоном или замедлением стана.

Вероятность возникновения ряда возмущений, перечисленных выше, можно значительно снизить с помощью применения оригинальных конструкций размоточных, намоточных устройств и самого стана. Так, например, если выбрать вариант компоновки с использованием в качестве приемного блока стана накопительного блока, то возмущения от размоточного устройства и изменение диаметра в заготовке практически будут исключены. Уменьшить влияние возмущения на процесс волочения со стороны намоточного аппарата можно путем установки специальных барабанов – компенсирующих устройств между станом и намоточным аппаратом.

Первоначальные настроечные параметры маршрута волочения рассчитываются ЭВМ управляющего контролера, на основании введенных в него данных волочения по методике, чтобы противонатяжения на всех блоках были заведомо меньше оптимальных для данного маршрута.

При достижении станом некоторой скорости волочения включается алгоритм настройки стана на оптимальный режим.

Влияние многих видов возмущений на обрывность проволоки существенно зависит от типа примененного электропривода и системы его автоматического управления и регулирования.

Электроприводы прямоточных волочильных станом, как правило, оснащены электродвигателями постоянного тока, питание которых осуществляется от управляемых тиристорных преобразователей типа БТУ, ЭПУ, КТЭ и т.д. При этом используются известные схемы питания; последовательное или параллельное соединение якорей электродвигателей с подключением к одному общему источнику питания и индивидуальное подключение каждого двигателя к собственному источнику питания [13].

Главным достоинством электропривода с последовательным соединением якорей электродвигателей является простота реализации. В тоже

время, электропривод прямоточных волочильных станов с последовательным соединением якорей электродвигателей обладает существенными недостатками, основной из которых состоит в том, что при обрыве проволоки все напряжение прикладывается к разгрузившемуся двигателю, а это приводит к резкому увеличению частоты вращения и, как следствие, к снижению срока службы двигателя и повышенному износу механической части стана. Взаимодействуя с упругими свойствами проволоки и упругими связями в редукторах, они возбуждают незатухающие колебания, которые приводят к повышенной обрывности проволоки [13].

Индивидуальное питание двигателей ценно тем, что обеспечивает высокое быстродействие электропривода за счет управления двигателями по цепи якорей. Однако, массогабаритные и надежные показатели электропривода с индивидуальным питанием значительно хуже, чем у электропривода с параллельным соединением якорей.

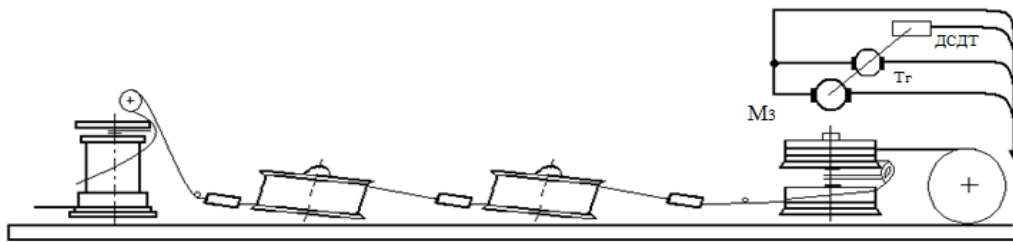
Электропривод прямоточных станов с параллельным соединением якорей обладает относительной простотой и малыми массогабаритами электрооборудования. Он обладает также способностью к самонастройке и, следовательно, малой критичностью к точности ручной поднастройки. Параллельное соединение якорей обеспечивает приводу свойство «электрического вала», что значительно улучшает поведение стана в переходных режимах. При этом практически полностью компенсируется разница динамических свойств волочильных блоков, вследствие чего быстро затухают возмущения, возникшие в процессе волочения, и даже отсутствуют обрывы проволоки при аварийном останове стана. Недостаточное высокое быстродействие электропривода, обусловленное управлением двигателями по каналу возбуждения, в данном случае не является недостатком, т.к. по этому каналу отрабатываются медленно действующие возмущения (изменения предельной прочности материала, режима смазки волок и т.п.). С другой стороны, при скачкообразных возмущениях, распространяющихся одновременно на весь стан (толчки питающей сети, аварийное торможение и др.), запаздывание системы управления позволяет удерживать режим «электрического вала» и сохранить в динамике установленные значения противонапряжения с достаточной точностью.

На рисунке 2.11, а изображена блок-схема прямоточного волочильного стана, состоящего из приемного блока, прямоточных блоков и чистового блока с барабаном-компенсатором.

Электропривод (рисунок 2.11, б) содержит электродвигатели постоянного тока, якоря которых параллельно соединены и подключены через симисторные ключи к общему источнику питания – тиристорному преобразователю. Каждый электродвигатель снабжен датчиком тока якоря (ДТЯ), с помощью которого обеспечивается индивидуальная токовая защита.

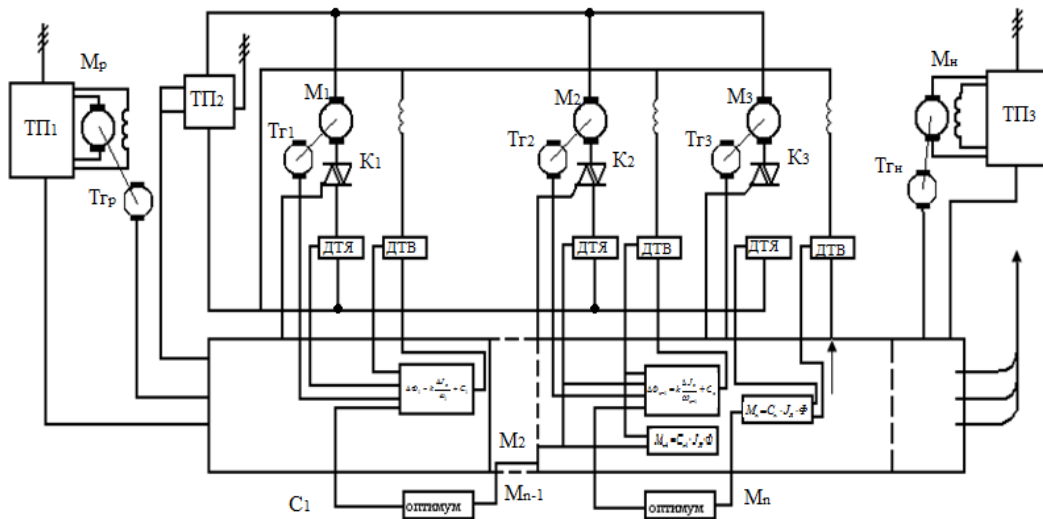
В момент трогания и до некоторой малой частоты вращения двигателей, система управления тиристорным преобразователем охвачена обратной связью по напряжению. В дальнейшем система управления переходит на

обратную связь по частоте вращения электродвигателя чистового блока для обеспечения стабилизации скорости волочения проволоки.



а)

$M_3$  – двигатель постоянного тока;  $T_g$  – датчик скорости (тахогенератор);  
ДСДТ – датчик сопротивления динамического торможения



б)

$ТП_{1-3}$  – тиристорный преобразователь;  $M_{1-3}$  – двигатель постоянного тока на валу, которого установлен барабан волочильного стана;  $M_p$  – двигатель постоянного тока размоточного устройства;  $M_n$  – двигатель постоянного тока намоточного устройства;  $T_{г1-3}$  – тахогенератор для двигателя барабана волочильного стана;  $T_{gr}$  – тахогенератор размоточного устройства;  $T_{gn}$  – тахогенератор намоточного устройства;  $K_{1-3}$  – ключ (симистор); ДТЯ – датчик тока якоря; ДТВ – датчик тока возбуждения

Рисунок 2.11 – Блок-схема и упрощенная электрическая схема электропривода прямомоточного волочильного стана

Синхронизация электродвигателей блоков стана осуществляется с помощью локальных адаптивных параметрических систем регулирования, воздействующих на ток возбуждения двигателей. Текущее значение этого тока определяется выражением:

$$i_{\sigma j} = k - \frac{i_{\text{я}j}}{\omega_j} + J_K \quad (2.31)$$

где  $i_{\text{я}j}$  - текущее значение тока якоря  $j$ -го двигателя;

$\omega_j$  - частота вращения  $j$ -го двигателя;

$J_K$  - составляющая тока возбуждения, задаваемого с помощью ручного корректора или резидентной управляющей ЭВМ.

Система автоматического управления строится на базе управляющего микропроцессорного контролера, который выполняет функции управления силовыми параметрами процесса волочения; контроля качества процесса волочения (текущих диаметров волок, температуры проволоки, скорости волочения и др.); диагностики систем электропривода; диагностики состояния технологического оборудования и, наконец, выдача необходимой информации по запросам цеховой АСУП.

Из теории волочения известно, что противонатяжение существенно влияет на процесс деформации металла в волоке.

Равновесие сил для второй волоки двукратного стана (рисунок 2.12, а) описывается выражением

$$N_2 = T_2 = (P_2 + Q_i) \quad (2.32)$$

где  $N_2$  - сила волочения;

$T_2$  - тяговая сила барабана;

$P_2$  - давление на волоку;

$Q$  - сила противонатяжения.

Функциональная зависимость тяговой силы  $T_2$  и давления на волоку  $P_2$  от противонатяжения  $Q_1$  представлена на рисунке 2.12, б. Из этого рисунка видно, что с увеличением  $Q_1$  давление на волоку  $P_2$  убывает. Экспериментально установлено, что при возрастании  $Q_1$  от 0,25 до 1,5 кН давление на волоку  $P_2$  падает с 8 до 5,8 кН, т.е. на 28%, однако при этом сила волочения  $N_2 = T_2$  изменяется несущественно. В то же время из уравнения равновесия для первого блока

$$N_2 = T_1 + Q_1 \quad (2.33)$$

видно, что тяговая сила  $T_1$  линейно снижается по мере возрастания  $Q_1$ . Одновременно можно констатировать, что за счет «редуктирующих» свойств волоки суммарное значение усилия  $T_c = (T_1 + T_2)$  существенно уменьшается в диапазоне изменения силы  $Q_1 \geq Q_1^*$ . Дальнейшее же увеличение противонатяжения приводит к уменьшению  $P_2$  и увеличению  $N_2 = T_2$ ,

вследствие чего при некотором противонатяжении  $Q_1=Q_1^*$  имеет место минимум суммы тяговых сил барабанов.

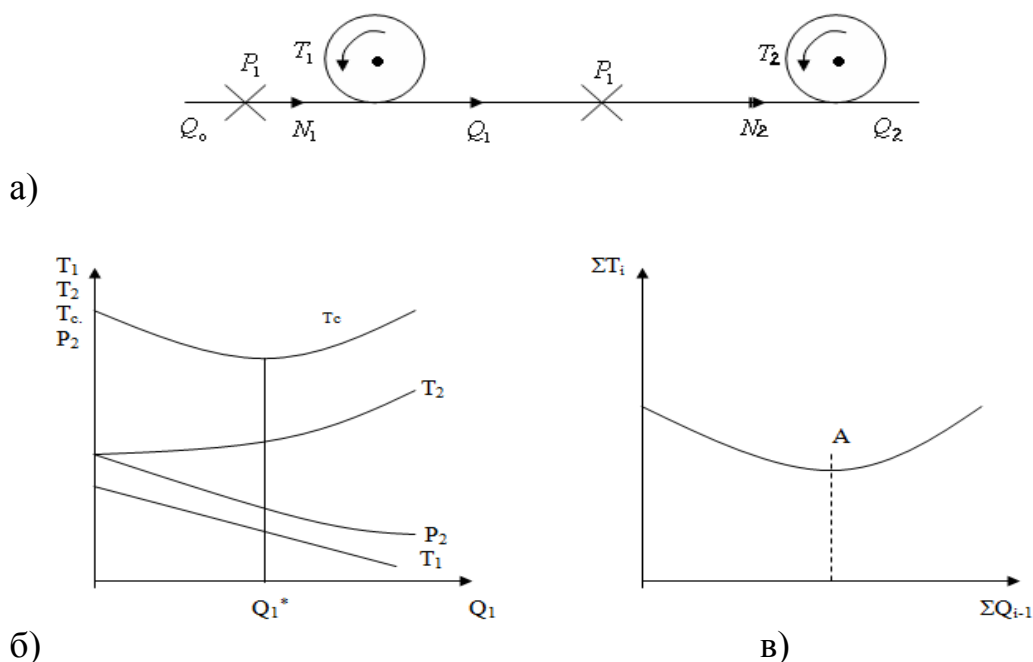


Рисунок 2.12 - Упрощенная функциональная схема процесса волочения и функциональные зависимости отдельных составляющих тяговых усилий и суммарного тягового усилия от силы противонатяжения

Зависимость суммы тяговых сил барабанов  $\Sigma T_j$  от суммы противонатяжений  $\Sigma Q_{j-1}$  для работающего стана можно интерпретировать кривой  $\Sigma T_j = f(\Sigma Q_{j-1})$ , изображенный на рисунке 2.12, в.

Наличие минимума  $\Sigma T_j$  в точке «А» позволяет утверждать, что для каждого маршрута существует оптимальное значение противонатяжений, при котором мощность, потребляемая станом от электрической сети, минимальна, а следовательно, минимальны давления на волоку, температура нагрева проволоки, износ инструмента и другие параметры.

Рассмотрим принципы оптимального выбора силовых параметров на примере двукратного стана. Предположим, что стан настроен так, что противонатяжение  $Q_1=0$ , а частота вращения 2 блока стабилизирована. Если уменьшить тяговую силу первого блока  $T_1$ , то противонатяжение  $Q_1$  начнет увеличиваться, но благодаря снижению давления на волоку  $P_1$  это почти не скажется на величине тяговой силы второго блока, поскольку сумма тяговых сил  $T_c=T_1+T_2$  начинает уменьшаться и достигнет минимума в точке А. Дальнейшее увеличение  $T_2$  приведет к увеличению  $T_c$ , т.к. при этом сила  $T_2$  растет быстрее, чем убывает  $T_1$ .

Рассмотрим вариант, когда управляющее воздействие прилагается ко 2-му блоку двукратного стана, а частота вращения 10-го блока стабилизирована. Как и в предыдущем случае, принимаем начальное значение  $Q_1=0$ . Если дать

приращение задания на скорость второму блоку, то возрастет его тяговая сила, что приведет к росту противонатяжения  $Q_1$  и снижению давления на волоку  $P_2$  пока не установится равновесие сил на новом уровне. При этом в пределах начального участка малому приращению силы  $T_2$  соответствует значительное приращение  $Q_1$  и снижение  $T_1$ , т.е. уменьшение тяговых сил  $T_c$ . При некоторой величине приращения задания рост  $T_2$  начинает превышать снижение  $T_1$ , а значение  $T_c$  начнет возрастать.

Следовательно, определив величину  $Q_1$ , соответствующую минимальному значению  $T_c$  можно оптимизировать силовые параметры режима волочения по потребляемой станом мощности.

Очевидно, что приведенную концентрацию можно распространить на стан любой кратности, рассматривая например группу боков, как один эквивалентный блок. Наличие минимума суммы тяговых сил в точке А позволяет составить задачу оптимального управления многократным волочильным станом. Критерием оптимального управления многократным волочильным станом должен быть критерий  $\Sigma T_j \rightarrow \min$  или же, после приведения его к валу электродвигателя, критерий  $\Sigma T_j \rightarrow \min$ .

Измерение электромагнитных моментов электродвигателей не требует установки датчиков, т.к. информация о моментах может быть получена обработкой легко измеряемых электрических величин.

Алгоритм настройки n-кратного прямоточного стана на оптимальный режим работы строится из предположения, что формируемое управляющее воздействие направлено на последующий двигатель. В качестве базового, не управляемого системой оптимизации выбран первый блок стана. Такой выбор базового блока определен тем, что затухание при прохождении возмущения против хода волочения значительно меньше, чем при прохождении возмущения по ходу волочения. Обход стана системой при настройке на оптимальный режим идет в направлении возрастания номера блока, по ходу волочения, что позволяет при настройке очередного блока минимально влиять на ранее настроенную группу блоков.

Первоначальные настроечные параметр маршрута волочения рассчитываются на ЭВМ управляющего контролера, на основании введенных в него данных о маршруте волочения по методике, разработанной в Казахском политехническом институте. Параметры выбираются такими, чтобы противонатяжения на всех блоках были заведомо меньше оптимальных для данного маршрута.

## **2.7 Расчет мощностей приводных электродвигателей и выбор основного оборудования**

При выборе электропривода волочильного стана необходимо выполнение требования плавного регулирования скорости при пуске и торможении стана. Для настройки и регулирования рабочей скорости должно быть осуществлено бесступенчатое регулирование скорости в большом

диапазоне, и для этого используют двигатель постоянного тока независимого возбуждения.

Несмотря на то, что стоимость машин постоянного выше, чем у машин переменного тока, они получили широкое применение в промышленности, это объяснимо тем, что они имеют лучше эксплуатационные характеристики в отношении регулирования скорости вращения и допускают высокие перегрузки по сравнению с машинами переменного тока.

Для плавного регулирования скорости в широких пределах используют двигатели постоянного тока в виде системы тиристорный преобразователь-двигатель или в виде двигателя постоянного тока с регулированием скорости вращения путем изменения возбуждения. Процесс волочения на стане ВПЦ 3-4/550 идет в одном направлении, и вследствие этого выбираем нереверсивный привод.

Таблица 2.1- Численные значения параметров волочильного стана ВПЦ 3-4/550

№ п/п ппи	Параметры Стана	Идентификаторы	Численные значения
1.	C-электромагнитная постоянная	C	77.3
2.	L[Гн] — индуктивность цепи якоря	DLL	0.0012
3.	r[Ом]—сопротивление цепи якоря	R	0.031
4.	R[м] — радиус барабана	RR	0.275
5.	l[м]—длина проволоки от барабана до следующего барабана	DL	0.56
6.	W— число витков обмотки	W	850
7.	r <sub>в</sub> [Ом]—сопротивление цепи возбуждения	RB	41
8.	E[Па] — модуль Юнга	E	0.2 + E12
9.	J <sub>к</sub> [кг*м <sup>2</sup> ] — момент инерции масс	DJJ(K)	0.683 0.705 0.745
10.	j <sub>к</sub> — передаточное число редуктора	DJ <sub>к</sub>	0.150 0.193 0.244
11	F <sub>к</sub> <sup>о</sup> [Н] — усилие волочения	FU1(K)	13590 9712 7308
12.	Q <sub>к-1</sub> [М <sup>2</sup> ] — площадь сечения проволоки	Q(k)	0.406-E04,0.258-0.1962-E04
13.	μ <sub>ε</sub> —коэффициент обжатия	DM (к)	1.67 1.32 1.23

Для питания двигателей используются тиристорные преобразователи. Тиристорный преобразователь используется для преобразования переменного напряжения сети в регулируемое постоянное напряжение. Такого рода



системы с использованием тиристоров получили в настоящее время широкое распространение.

Для управления электроприводом выбрана самонастраивающаяся система управления тяговым приводом, описание которой приводится в разделе 2.5 данного дипломного проекта, и соответственно данной системе управления производится расчет силовой части и оборудования электропривода.

2.7.1 Расчет мощностей и выбор электродвигателя для маршрута волочения [14]:

$$8 - 6,06 - 4,59 - 3,48 \text{ мм.}$$

Предельная прочность для материала:

$$\sigma_0 = 1250 \text{ Н/мм}^2;$$

Число (количество) протяжек:

$$n = 3;$$

Предельная прочность после n-ой протяжки:

$$\sigma_n = \sigma_0 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \sigma_{ед.ср.n}}} \cdot n \cdot \delta_{ед.ср.n} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{сум.n.}}, \quad (2.34)$$

где 3,16 – множитель, показывающий выражение предельной прочности в ньютонах;

$\delta_{ед.ср.}$  – единичное среднее обжатие по заданному маршруту волочения:

$$\delta_{ед.ср.n} = \frac{d_{n-1}^2 - d_n^2}{d_{n-1}^2}; \quad (2.35)$$

$\delta_{сум.}$  – суммарное обжатие после прохождения всех протяжек:

$$\delta_{сум.n} = \frac{d_0^2 - d_n^2}{d_0^2}. \quad (2.36)$$

После первой протяжки, при  $n = 1$ :

$$\delta_{ед.ср.1} = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2} = \frac{8 - 6,06}{8} = 0,426,$$

$$\delta_{сум.1} = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2} = \frac{8 - 6,06}{8} = 0,426,$$

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_0 + 3.16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \sigma_{\text{ед.ср.1}}}} \cdot 1 \cdot \delta_{\text{ед.ср.1}} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{\text{сум.1}}} = \\ &= 1250 + 3.16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{1250}{1 - 0,426}} \cdot 1 \cdot 0,426 + 0,1 \cdot 1250 \cdot \sqrt{0,426} = \\ &= 1250 + 251,43 + 81,6 = 1583,04 \text{ Н / мм}^2,\end{aligned}$$

$$\sigma_{\text{ср1}} = \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2} = \frac{1250 + 1583,04}{2} = 1416,52 \text{ Н / мм}^2.$$

После второй протяжки, при  $n = 2$ :

$$\delta_{\text{ед.ср.2}} = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1^2} = \frac{6,06 - 4,59}{6,06} = 0,426,$$

$$\delta_{\text{сум.2}} = \frac{d_0^2 - d_2^2}{d_0^2} = \frac{8 - 4,59}{8} = 0,67,$$

$$\begin{aligned}\sigma_2 &= \sigma_0 + 3.16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \sigma_{\text{ед.ср.2}}}} \cdot 2 \cdot \delta_{\text{ед.ср.2}} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{\text{сум.2}}} = \\ &= 1250 + 3.16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{1250}{1 - 0,426}} \cdot 2 \cdot 0,426 + 0,1 \cdot 1250 \cdot \sqrt{0,67} = \\ &= 1250 + 503,05 + 102,38 = 1855,43 \text{ Н / мм}^2,\end{aligned}$$

$$\sigma_{\text{ср2}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{1583,04 + 1855,43}{2} = 1719,23 \text{ Н / мм}^2.$$

После третьей протяжки, при  $n = 3$ :

$$\delta_{\text{ед.ср.3}} = \frac{d_2^2 - d_3^2}{d_2^2} = \frac{4,59 - 3,48}{4,59} = 0,425,$$

$$\delta_{\text{сум.3}} = \frac{d_0^2 - d_3^2}{d_0^2} = \frac{8 - 3,48}{8} = 0,81,$$

$$\begin{aligned}\sigma_3 &= \sigma_0 + 3.16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \sigma_{\text{ед.ср.3}}}} \cdot 3 \cdot \delta_{\text{ед.ср.3}} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{\text{сум.3}}} = \\ &= 1250 + 3.16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{1250}{1 - 0,425}} \cdot 3 \cdot 0,425 + 0,1 \cdot 1250 \cdot \sqrt{0,81} = \\ &= 1250 + 751,84 + 112,55 = 2114,39 \text{ Н / мм}^2,\end{aligned}$$

$$\sigma_{cp3} = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} = \frac{1855,43 + 2114,39}{2} = 1984,91 \text{ Н / мм}^2.$$

Определение силы волочения на n-ой протяжки:

$$F_n = 0,6 \cdot d_{n-1}^2 \cdot \sqrt{\delta_{ед.ср.н.}} \cdot \sigma_{ср.н.}; \quad (2.37)$$

Определение силы волочения после каждой протяжки:

$$F_1 = 0,6 \cdot d_0^2 \cdot \sqrt{\delta_{ед.ср.1.}} \cdot \sigma_{ср.1} = 0,6 \cdot 8^2 \cdot \sqrt{0,426} \cdot 1416,52 = 35510,55 \text{ Н},$$

$$F_2 = 0,6 \cdot d_1^2 \cdot \sqrt{\delta_{ед.ср.2.}} \cdot \sigma_{ср.2} = 0,6 \cdot 6,06^2 \cdot \sqrt{0,426} \cdot 1719,23 = 24733,9 \text{ Н},$$

$$F_3 = 0,6 \cdot d_2^2 \cdot \sqrt{\delta_{ед.ср.3.}} \cdot \sigma_{ср.3} = 0,6 \cdot 4,59^2 \cdot \sqrt{0,425} \cdot 1984,91 = 16360,78 \text{ Н}.$$

Для того чтобы определить требуемую мощность на каждую протяжку нужно знать скорость, так как заданная скорость имеет отношение к выходу проволоки из последней волюки на последний барабан.

Для того чтобы определить скорость каждого из предыдущих барабанов необходимо воспользоваться формулой:

$$V_{к-1} = \frac{S_к \cdot V_к}{S_{к-1}} = \frac{d_к^2 \cdot V_к}{d_{к-1}^2}; \quad (2.38)$$

где  $V_к$  и  $S_к$  – соответственно скорость на последнем барабане и площадь поперечного сечения проволоки.  $V_{к-1}$  и  $S_{к-1}$  – такие же параметры на предыдущем барабане.

$$V_3 = \frac{d_4^2 \cdot V_4}{d_3^2} = \frac{3,48^2 \cdot 4,68}{4,59^2} = 2,69 \text{ м / с},$$

$$V_2 = \frac{d_3^2 \cdot V_3}{d_2^2} = \frac{4,59^2 \cdot 2,69}{6,06^2} = 1,54 \text{ м / с},$$

$$V_1 = \frac{d_2^2 \cdot V_2}{d_1^2} = \frac{6,06^2 \cdot 1,54}{8^2} = 0,88 \text{ м / с}.$$

Для расчета мощности на каждую протяжку пользуются следующей формулой:

$$P_n = \frac{F_n \cdot V_n}{\eta}; \quad (2.39)$$

Мощность на каждой протяжке:

$$P_1 = \frac{F_1 \cdot V_1}{\eta} = \frac{35510,55 \cdot 0,88}{0,9} = 34249,28 \text{ Вт},$$

$$P_2 = \frac{F_2 \cdot V_2}{\eta} = \frac{24733,91 \cdot 1,54}{0,9} = 42322,468 \text{ Вт},$$

$$P_3 = \frac{F_3 \cdot V_3}{\eta} = \frac{16360,78 \cdot 2,69}{0,9} = 48900,55 \text{ Вт}.$$

Выбираем для используемого электропривода электродвигатель серии 4ПФМ мощностью 55 кВт.

Двигатели постоянного тока серии 4ПФМ пользуются большой популярностью при использовании их в электроприводах постоянного тока общепромышленного назначения, в том числе и волочильных станов.



Рисунок 2.13 – Внешний вид двигателя постоянного тока серии 4ПФМ

Таблица 2.3 – Технические характеристики электродвигателя постоянного тока серии 4ПФМ250М

Тип электродвигателя	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, об./мин.	КПД %
4ПФМ250М	55	440	142	1000/1500	86,6

### 2.7.2 Выбор тиристорного преобразователя

В электроприводе барабанов волочильного стана ВПЦ 3-4/550 используются двигатели постоянного тока из серии 4ПФМ250М.

Данный электродвигатель имеет основные параметры, которые показаны в таблице 2.3, исходя из способа соединения якорных обмоток двигателей найдем величины напряжения и тока в сети, питаемой от тиристорного преобразователя, и по найденным величинам выберем преобразователь.

Так как соединение обмоток якорей двигателей выполнено по параллельной схеме, то получаем величины тока и напряжение в сети:

$$I_{общдв} = I_{1дв} + I_{2дв} + I_{3дв} = 3 \cdot I_{дв} = 3 \cdot 142 = 426 A,$$

$$U_{общдв} = U_{1дв} = U_{2дв} = U_{3дв} = 440 B.$$

Выбираем тиристорный преобразователь ЭПУ1М – 1-48-4-7-М-УХЛ4. По структуре основного обозначения тиристорного преобразователя мы можем выяснить что: преобразователь имеет не реверсивное исполнение; номинальный (выходной) ток  $I_n = 630A$ ; номинальное выходное напряжение 460В; номинальное напряжение питающей сети 380В.



Рисунок 2.14 – Внешний вид тиристорных преобразователей серии ЭПУ1М

Тиристорные преобразователи унифицированные трехфазные серии ЭПУ1М используют в электроприводах, которые предназначены для создания реверсивных и нереверсивных систем управления электродвигателями постоянного тока с регулированием скорости [«Г»]. Область применения таких преобразователей в станкостроении – механизмах подачи и главного движения, в том числе и в машинах волочения, и других механизмах различной отрасли промышленности.

Преобразователи ЭПУ1М в последнее время получили широкое распространение и заменяют большинство других преобразователей в электроприводах, таких как БТУ3601, ЭТУ2, БУВ, КЕМРОН, КЕМЕК, ШУВ, КЕМРОС, КЕМТОК, и другие аналогичные им.

Электроприводы ЭПУ1М изготавливаются в двух исполнениях: электроприводы подачи (ЭПУ1М-2-...П), к ним относятся реверсивные, для высокомоментных двигателей, производят перегрузку по моменту до 6 для электроприводов на 25, 50, 200А и в случае не более 4 на 100А, имеют большой диапазон регулирования (до 10000) и предназначены для реверсивных быстродействующих регулируемых приводов с однозонным регулированием скорости; электроприводы главного движения (ЭПУ1М-2/1-...Д/М/Е) предназначены для реверсивных и нереверсивных регулируемых

приводов с двухзонным и однозонным регулированием скорости, электроприводы главного движения производят перегрузку по току до 2, и в зависимости от вида управления могут иметь исполнение: ЭПУ1М...Д – двухзонный, с обратной связью по скорости двигателя и с широким диапазоном регулирования; ЭПУ1М...Е – однозонный, с обратной связью по ЭДС (управления по якорю двигателя); ЭПУ1М...М – однозонный, с обратной связью по скорости двигателя.

Электроприводы с преобразователями серии ЭПУ1М обеспечивают работу с электродвигателями постоянного тока, в число которых входят двигатели из серии 4ПФМ, питаются от трехфазной сети напряжением 220, 380, 400В частоты 50 Гц, силовая часть преобразователя подключается к сети через силовой трансформатор или сетевой (коммутационный или токоограничивающий), основу силовой схемы данных преобразователей составляет 3-фазная мостовая схема. Тиристорные преобразователи ЭПУ1М с выпрямленным напряжением 110...115 и 230 В подключаются к сети 380В через согласующий трансформатор ТС или ТСТ [15].

2.7.3 Расчет параметров системы электропривода и выбор трансформатора

Для выбора трансформатора используются следующие расчетные данные:

$I_{1расч}$ ,  $I_{2расч}$ ,  $U_{2фрасч}$ ,  $S_{тр}$  – мощность трансформатора

$$U_{2расч} = \frac{1}{K_V} \cdot K_c \cdot K_\alpha \cdot K_\kappa \cdot U_\phi; \quad (2.40)$$

где  $K_V$  – коэффициент, показывающий соотношение напряжения вторичной обмотки и выпрямленного напряжения (коэффициент схемы).  $K_V = 2,34$ ;

$K_c$  – коэффициент запаса по напряжению, предназначенный для учитывания возможного снижения напряжения сети до  $0,9U_H$ . В зависимости от стабильности сети.  $K_c = 1,05 \div 1,1$ ;

$K_\alpha$  – коэффициент запаса (по тиристорам), учитывающий неполное открытие тиристоров при максимальном управляющем сигнале.  $K_\alpha = 1,05 \div 1,1$ ;

$K_\kappa$  – коэффициент запаса (по трансформатору), учитывающий падение напряжения в обмотках трансформатор.  $K_\kappa = 1,05$ ;

$U_\phi$  – выпрямленное напряжение, имеющее равное значение с номинальным напряжением двигателя.

$$U_{2расч} = \frac{1}{2,34} \cdot 1,05 \cdot 1,05 \cdot 1,05 \cdot 440 = 217В.$$

Расчет тока вторичной обмотки:

$$I_{2расч} = K_I \cdot K_i \cdot I_{Общ} ; \quad (2.41)$$

где  $K_I$  – коэффициент, показывающий соотношение токов  $I_{2ф}/I_d$  в идеальном выпрямителе.  $K_I = 0,578$ ;

$K_i$  – коэффициент, показывающий отклонение анодного тока вентилей от прямоугольной.  $K_i = 1,05 \div 1,1$ ;

$I_{Общ}$  – выпрямленное значение тока, имеющее равное значение общим током в сети соединения двигателей.

$$I_{2расч} = 0,578 \cdot 1,05 \cdot 426 = 258,54 A.$$

Действующее (расчетное) значение тока в первичной обмотки:

$$I_{1расч} = \frac{I_{2расч.}}{K_{Tp}} ; \quad (2.42)$$

где  $K_{Tp}$  – коэффициент трансформации

$$K_{Tp} = \frac{W1}{W2} = \frac{U_{1ф}}{U_{2ф}} = \frac{440}{217} = 2,02.$$

$$I_{1расч} = \frac{258,54}{2,02} = 128 A.$$

Мощность силового трансформатора  $S_{Tp}$ :

$$S_{Tp} = K_S \cdot K_V \cdot K_i \cdot K_\alpha \cdot U_{Общ} \cdot I_{Общ} \cdot 10^{-3} ; \quad (2.43)$$

где  $K_S$  – коэффициент схемы.  $K_S = 2,34$ ;

$$S_{Tp} = 2,34 \cdot 1,35 \cdot 1,05 \cdot 1,05 \cdot 440 \cdot 426 \cdot 10^{-3} = 652,8 кВА.$$

После проведенных расчетов, известны значения необходимых параметров ( $I_{1расч}$ ,  $I_{2расч}$ ,  $U_{2фрасч}$ ,  $S_{Tp}$ ) для выбора силового трансформатора, и в итоге выбираем трансформатор серии ТС-1000.

Трансформаторы серии ТС и ТСТ предназначены для преобразования электроэнергии у потребителя, и устанавливаются в шкафах и блоках управления, и выполнены без защитного корпуса с естественным воздушным охлаждением [15].

Технические данные трансформатора ТС-1000 10/0,4 (паспортные данные):

$$S_{\text{ном.тр}} = 1000 \text{кВА};$$

$$U_{\text{вн}} = 10 \text{кВ};$$

$$U_{\text{нн}} = 0,4 \text{кВ};$$

$$\Delta P_{\text{кз}} = 8,25 \text{кВт};$$

$$\Delta P_{\text{xx}} = 1,92 \text{кВт};$$

$$U_{\text{кз}} = 6\%;$$

Схема соединения обмоток трансформатора Y/Y<sub>0</sub>.

По данным полученным из технических характеристик трансформатора определяется:

$$U_{2\phi} = \frac{U_{2Л}}{\sqrt{3}} \Rightarrow U_{2Л} = \sqrt{3} \cdot U_{2\phi} = \sqrt{3} \cdot 0,4 = 0,69 \text{кВ},$$

$$I_{2H} = \frac{S_{\text{ном.тр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2Л}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,69 \cdot 10^3} = 836,8 \text{А}.$$

Сопротивления (активное и индуктивное) трансформатора, приведенные к его вторичной обмотки:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{T_{\text{тр}} \cdot I_{1H}^2 \cdot K_{\text{тр}}^2}; \quad (2.44)$$

$$X_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{кз}\%} \cdot U_{1\phi}}{100 \cdot I_{1H} \cdot K_{\text{тр}}^2}; \quad (2.45)$$

где  $T_{\text{тр}}=3$ ,

$$I_{1H} = \frac{S_{\text{ном.тр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\phi}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 1449,2 \text{А},$$

$$R_{\text{тр}} = \frac{8,25 \cdot 10^3}{3 \cdot 1449,2^2 \cdot 2,02^2} = 0,00032 \text{Ом},$$

$$X_{\text{тр}} = \frac{6 \cdot 10 \cdot 10^3}{100 \cdot 1087 \cdot 2,02^2} = 0,101 \text{Ом}.$$

Производим расчет для выбора сглаживающего дросселя, сглаживающий дроссель подключается последовательно с якорем. Индуктивность дросселя определяется из условия обеспечения непрерывности



тока двигателя во всем диапазоне нагрузки от  $I_{d\min}$  до  $I_{d\max}$ , изменения угла управления  $\alpha$ , от  $\alpha_{\min}$  до  $\alpha=90^\circ$ .

$$L_{\Delta.необх} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_n}{m \cdot \omega_C \cdot I_{d\min}}; \quad (2.46)$$

$$\omega_C = 2 \cdot \pi \cdot f = 6,28 \cdot 50 = 314 \text{ Гц},$$

$$I_{d\min} = 0,15 \cdot I_n = 0,15 \cdot 142 = 21,3 \text{ А},$$

$$L_{\Delta.необх} = \frac{\sqrt{2} \cdot 125}{3 \cdot 314 \cdot 21,3} = 0,0088 \text{ Гн}.$$

$$L_{\Delta.необх} = L_{c.\Delta} + L_{y.\Delta} + L_{\Deltaв.} + L_{Tp}; \quad (2.47)$$

$$L_{c.\Delta} = L_{\Delta.необх} - (L_{y.\Delta} + L_{\Deltaв.} + L_{Tp});$$

Необходимая величина уравнивающих дросселей рассчитывается из условия ограничения амплитуды переменной составляющей уравнительного тока до величины не превышающей  $3 \div 5\%$  от  $I_{н.дв.}$

$$L_{y.\Delta} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_n'}{m \cdot \omega_C \cdot (0,03 \div 0,05) \cdot I_{1H}}; \quad (2.48)$$

где  $U_n'$  – удвоенное эффективное значения выпрямленного напряжения 1-й гармоники,  $U_n'=250\text{В}$ .

$$L_{y.\Delta} = \frac{\sqrt{2} \cdot 250}{3 \cdot 3,14 \cdot 0,03 \cdot 142} = 0,088 \text{ Гн},$$

$$L_{c.\Delta} = 0,0088 - (0,088) = -0,08 \text{ Гн}.$$

Так как значение получилось отрицательное, то установка сглаживающего дросселя не производится.

Далее производит расчет параметров цепи ТП-Д, в первую очередь рассчитаем сопротивление цепи выпрямленного тока

$$R_{я.ц.} = 1,2 \cdot (R_{я} + R_{д.п.} + R_{щ.} + R_{п.}); \quad (2.49)$$

$R_{\text{Щ}}$  – сопротивление щеточного контакта:

$$R_{\text{Щ}} = \frac{2}{I_{\text{Общ.дв}}} = \frac{2}{426} = 0,0047 \text{ Ом},$$

$R_{\text{П}}$  – сопротивление преобразователя:

$$R_{\text{П}} = R_{\text{T}} + R_{\text{У.д.}} + \frac{X_{\text{T}} \cdot T}{2 \cdot \pi}; \quad (2.50)$$

где  $R_{\text{T}}$  и  $X_{\text{T}}$  – соответственно активное и индуктивное обмотки, приведенный к цепи выпрямленного тока, силового трансформатора.

$$R_{\text{У.д.}} = \frac{R_{\text{T}}}{T_{\text{Тр}}} = \frac{0,00032}{3} = 0,0001 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{П}} = 0,00032 + 0,0001 + \frac{0,101 \cdot 3}{2 \cdot 3,14} = 0,0486 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{Я.ц.}} = 1,2 \cdot (0,038 + 0,0047 + 0,0486) = 0,52 \text{ Ом}.$$

Индуктивность цепи якоря:

$$L_{\text{Я.ц.}} = L_{\text{Дв..}} + L_{\text{T}} + L_{\text{У.д.}}; \quad (2.51)$$

$$L_{\text{Дв..}} = \frac{U_{\text{Ян.}} \cdot K_{\text{К}}}{I_{\text{Ян.}} \cdot \omega_{\text{Н}} \cdot P_{\text{Н}}}; \quad (2.52)$$

$K_{\text{К}}$  – коэффициент компенсации,  $K_{\text{К}} = 0,25 \div 0,3$

$$\omega_{\text{Н}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{Н}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с},$$

$$L_{\text{Дв..}} = \frac{440 \cdot 0,25}{426 \cdot 157 \cdot 2} = 0,000822 \text{ Гн},$$

$$L_{\text{Я.ц.}} = 0,000822 + 0,00032 + 0,088 = 0,089 \text{ Гн},$$

$$L_{\text{Тр}} = \frac{X_{\text{Тр}}}{\omega_{\text{С}}} = \frac{0,101}{314} = 0,00032 \text{ Гн}.$$

Определим постоянные времени силовых элементов, постоянная двигателя:

$$C = \frac{U_H - 1,2 \cdot I_H (R_{Я} + R_{д.н})}{\omega_H}; \quad (2.53)$$

$$C = \frac{440 - 1,2 \cdot 426 \cdot 0,038}{157} = 2,67.$$

$$K_D = \frac{1}{C} = \frac{1}{2,67} = 0,374.$$

Электромагнитная постоянная времени цепи ТП-Д:

$$T_{Я} = \frac{L_{Я.Ц.}}{R_{Я.Ц.}} = \frac{0,08914}{0,52} = 0,171 \text{сек.} \quad (2.54)$$

Электромагнитная постоянная времени для привода:

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{Я.Ц.}}{C^2} = \frac{(J_{МЕХ} + J_{ДВ.}) \cdot R_{Я.Ц.}}{C^2} = \frac{(1,6 + 0,8) \cdot 0,062}{2,67^2} = 0,0557 \text{сек.} \quad (2.55)$$

Рассчитаем сопротивления динамического торможения:

$$R_{Д.Т.} = \frac{5 \cdot U_H}{I_{ДОП}} - R_{Я.Ц.}; \quad (2.56)$$

где  $I_{ДОП}$  – максимально допустимый ток двигателя.

$I_{ДОП} = 2 \cdot I_H = 2 \cdot 142 = 284$  – при двукратном ослаблении поля двигателя.

$$R_{Д.Т.} = \frac{5 \cdot 440}{284} - 0,52 = 7,22 \text{Ом.}$$

Время торможения двигателя:

$$t_T = 4 \cdot T_M = 4 \cdot 0,0557 = 0,2228 \text{с.} \quad (2.57)$$

Эквивалентный длительный ток нагрева:

$$I_{\text{Э.П.}} = I_P \cdot 0,08 = 284 \cdot 0,08 = 22,72 \text{А.} \quad (2.58)$$

$I_P$  – рабочий ток периода, при двукратном ослаблении поля двигателя.

### 3 Математическое моделирование системы ТП – ДПТ НВ

#### 3.1 Реализованный в виде виртуальной модели двигатель постоянного тока

Модернизированная виртуальная модель двигателя постоянного тока, показанная на рисунке 3.1, предусматривает возможность работы двигателя с любым моментом нагрузки [23].

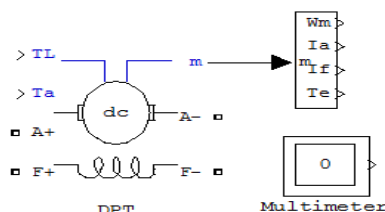


Рисунок 3.1 – Модернизированная виртуальная модель ДПТ двигателя постоянного тока

На рисунке 3.1, показано условное обозначение двигателя и демультиплексор для формирования таких выходных переменных как:  $I_a$  – тока обмотки якоря,  $\omega_m$  – частоты вращения;  $I_f$  – тока обмотки возбуждения;  $T_e$  – электромагнитного момента двигателя и *Multimeter*.

При раскрытии подсистемы *Mechanics* и внесении необходимых добавок и исправлений, получаем окончательный результат модернизации представленный на рисунке 3.2.

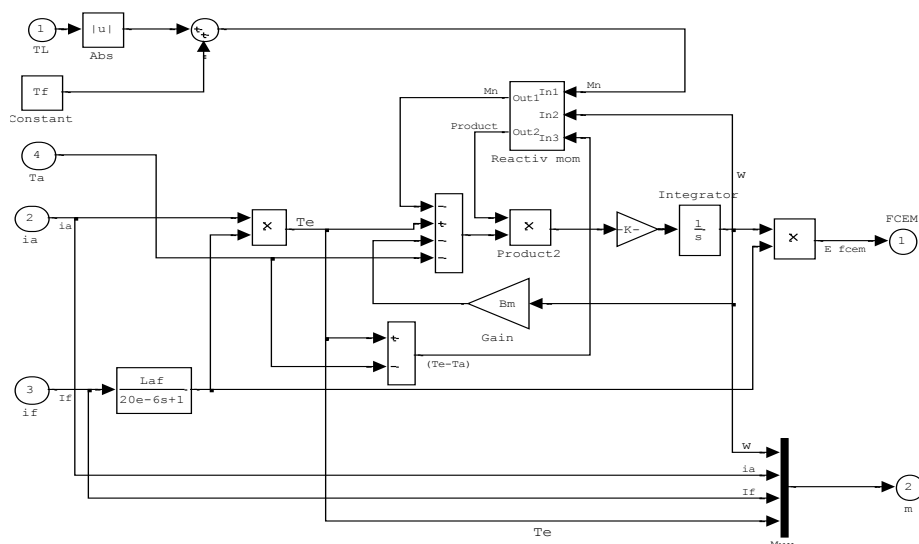


Рисунок 3.2 – Модернизированная виртуальная модель подсистемы *Mechanics* двигателя постоянного тока

Введены блок реактивного момента *Reactive mom* и блок умножения *Product 2*, для управления процессом моделирования уравнения движения электропривода.

Предусмотрен двойкий ввод реактивной нагрузки: как по отдельному входу *TL*, так и через графический интерфейс (диалоговое окно ввода параметров двигателя через параметр *Tf*). Вход задания активной нагрузки *Ta* предусмотрен отдельно. Коэффициента вязкого трения *Bm*, один из видов реактивной нагрузки, возможно, задавать через графический интерфейс.

### 3.2 Нереверсивный мостовой трёхфазный тиристорный преобразователь

Схема рассматриваемой модели показана на рисунке 3.3. В ней имеется трёхфазный источник питания, внутренние параметры источника питания представлены *R,L*-блоком. Для регулирования и выпрямления напряжения на выходе используется трёхфазный тиристорный мост *Universal Bridge*, активно-индуктивная цепь *Series RLC Branch* является нагрузкой, фазоимпульсное управление тиристорным мостом, производится блоком *Synchronized 6-Pulse Generator (СИФУ)* [23].

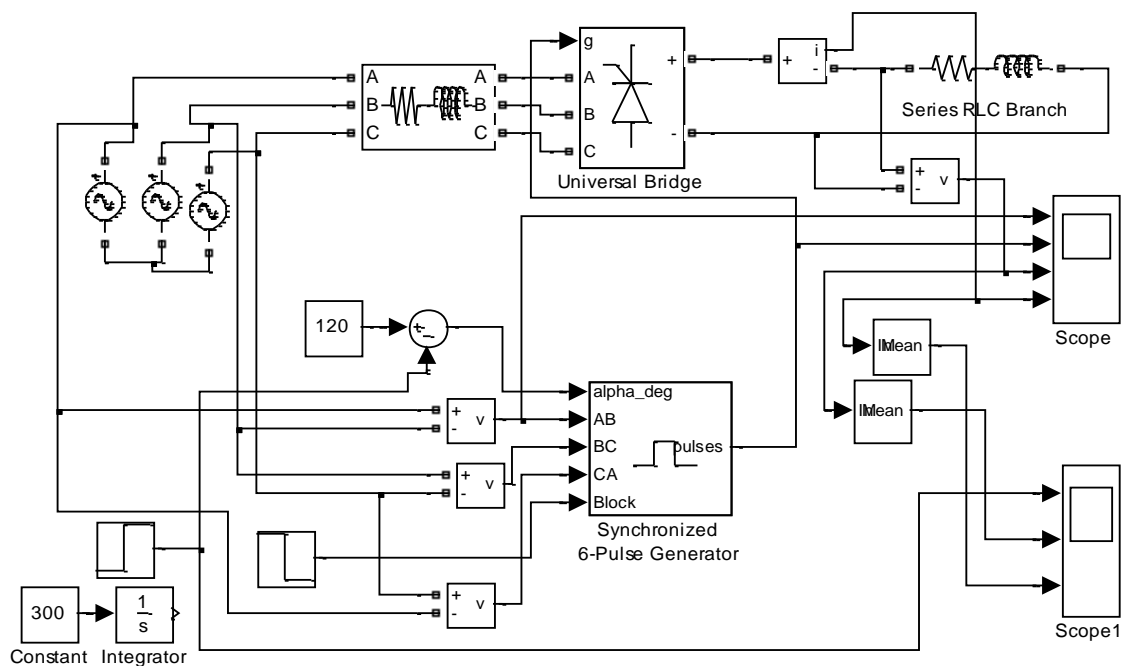


Рисунок 3.3– Схема модели трёхфазного тиристорного преобразователя с начальным углом управления  $\alpha_0=120$  град.

Выбран угол 120 град., для начального значения управления, этому углу соответствует нулевое значение тока в нагрузке, при заданной нагрузке. Будет уменьшаться ток нагрузки с уменьшением индуктивности при  $\alpha_0=120$  град. До нулевого уровня. СИФУ блокируется на время 0,01с., для исключения помех в

канале управления тиристорным мостом, путем подачи единичного уровня на вход *Block* в это время. Работа *СИФУ* синхронизирована с питающей сетью подачей линейных напряжений, обозначенных на входах *СИФУ*.

На экране осциллографа *Scope* показываются диаграммы изменения линейного напряжения  $U_{AB}$ , последовательности импульсов управления тиристорным мостом *Pulses*, выходного напряжения на нагрузке  $U_n$  и тока в нагрузке  $I_n$ . Для регистрации и прослеживания (*Scope1*) изменения выходного напряжения и тока в средних значениях использован блок *Mean*, который выделяет гладкую составляющую выходного параметра.

На рисунке 3.4 показаны итоги моделирования. Из диаграммы следует, что ток при  $\alpha=120$  град. фактически равен нулевому значению. При подаче на вход управляющего угла в  $\alpha=20$  град. преобразователь открывается и ток в нагрузке возрастает в соответствии с эквивалентной неизменной.

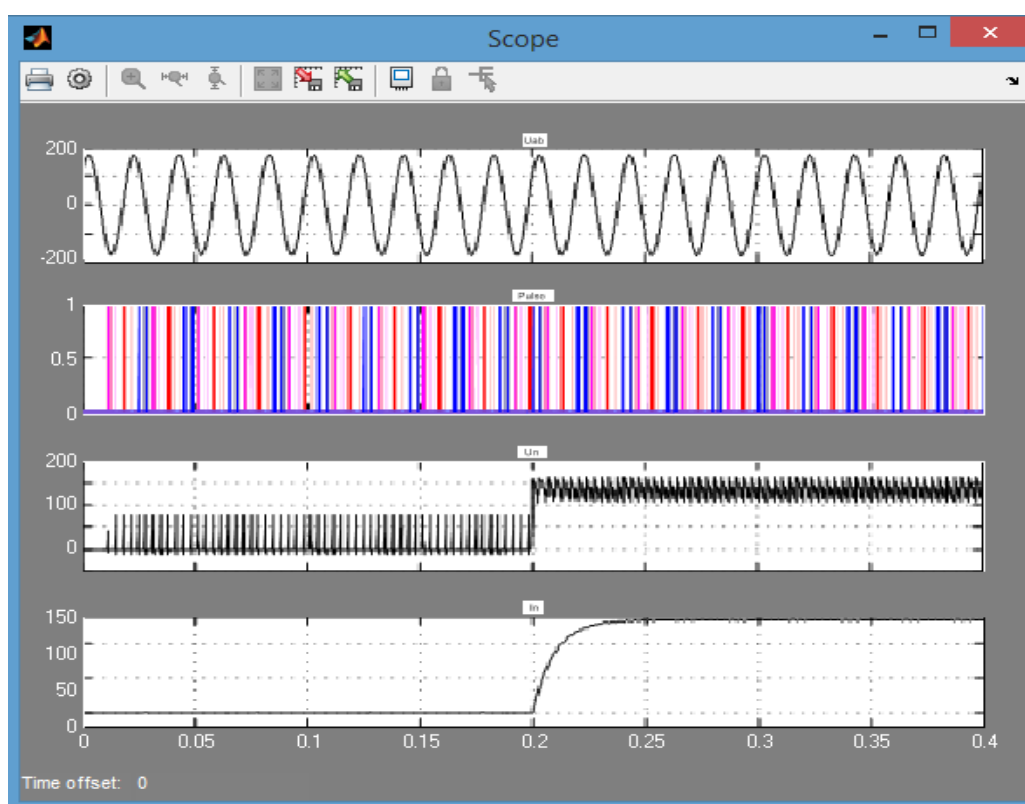


Рисунок 3.4 – Результаты моделирования работы преобразователя с блокировкой в течение 0.01с, работа с  $\alpha=120$  град. и с  $\alpha=20$  град.

Реакция тиристорного преобразователя на линейно возрастающий управляющий сигнал от  $\alpha=120$  град. до  $\alpha=0$  град., представляет особый интерес. Для этого используем интегратор с постоянным входным сигналом 300 и соединим выход его с входом преобразователя. Через 0,4с выходное напряжение интегратора будет равно 120В (град.), что равносильно изменению угла управления от  $\alpha=120$  град. до  $\alpha=0$  град.

Реакцию тиристорного преобразователя на линейно нарастающий сигнал управления проследим с помощью *Scope1*.

На рисунке 3.5 представлены результаты моделирования. Напомним, что выходное напряжение и ток нагрузки усреднены до гладкой составляющей с помощью блока Mean. Если тиристорный преобразователь является безинерционным звеном, вид кривой выходного напряжения  $U_n(t)$  соответствует статической регулировочной характеристике  $U_n=f(\alpha_{вх})$ , аналитическое выражение которой  $U_n=E_{a0}\cos(\alpha_y)$ , где угол управления преобразователем  $\alpha_y=120-\alpha_{вх}$ . Таким образом, при максимальном значении входного сигнала  $\alpha_{вх}=120$  град. угол управления преобразователем  $\alpha_y=0$  град. и выходное напряжение принимает максимальное значение.

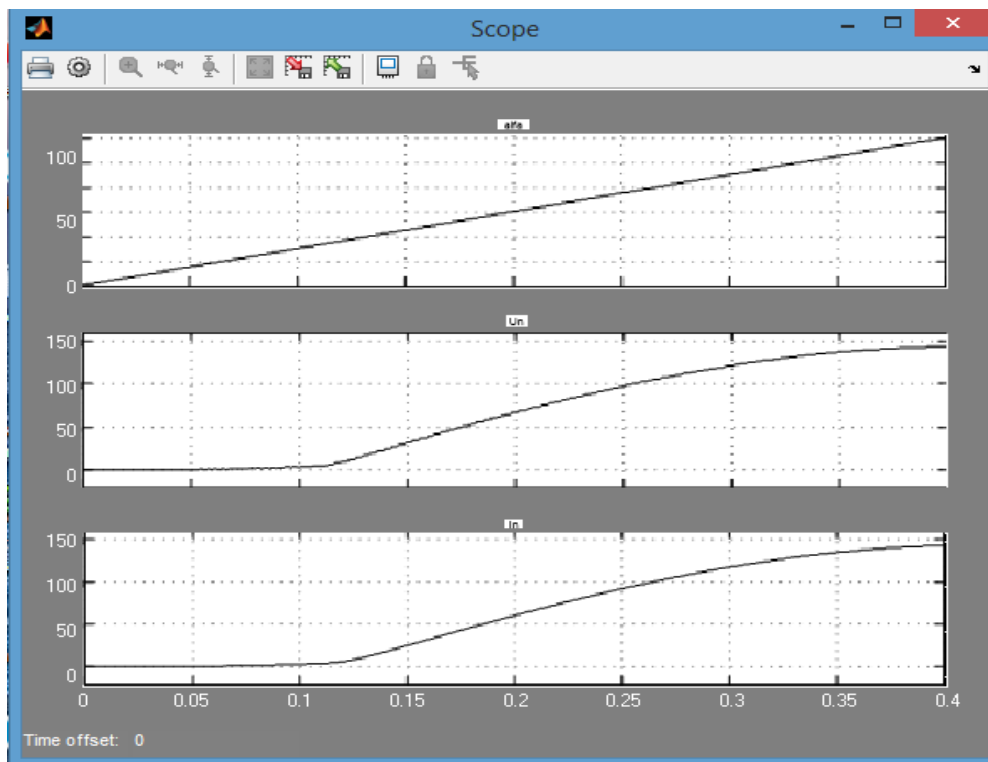


Рисунок 3.5 – Реакция выходного напряжения тиристорного преобразователя на линейно нарастающий входной сигнал управления

Трёхфазную мостовую схему включения тиристоров, представляет тиристорный мост *Universal Bridge*, показанный на рисунке 3.6. Последовательность включения тиристоров, представляет их нумерация, что находит смысл при разводке сигналов управления на каждый. Данная схема содержится в файле и может быть использована при моделировании, когда требуется исследовать ток и напряжения (прямые и обратные) каждого из тиристоров. Всё сказанное справедливо при прямом чередовании фаз питающих напряжений *A*, *B* и *C*.

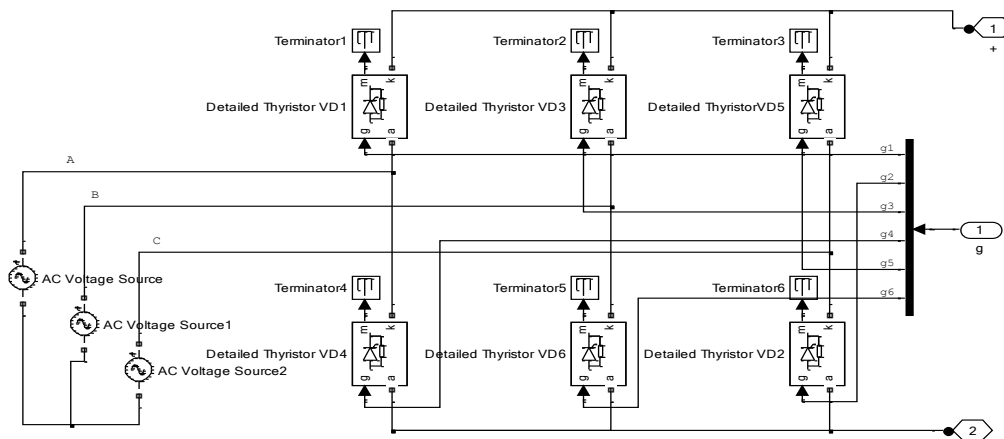


Рисунок 3.6 – Тиристорный мост с объединённой шиной управления g

### 3.3 Синтез регуляторов тока и скорости в электроприводе стана с САУ подчиненного регулирования

Системы управления скоростью двигателя постоянного тока, в которых скорость регулируется изменением напряжения на якоре двигателя, за счет управляемого электрического преобразователя (управляемого тиристорного преобразователя, генератора) при подчинённом контуре регулирования тока двигателя, получили наибольшее распространение.

Функциональная схема электропривода с подобной системой регулирования представлена рисунке 3.7. Питание двигателя Д с независимым возбуждением (обмотка возбуждения ОВД) осуществляется от управляемого нереверсивного тиристорного преобразователя УП с двумя выпрямительными группами со встречно-параллельной схемой включения и с отдельным их управлением [24, 25].

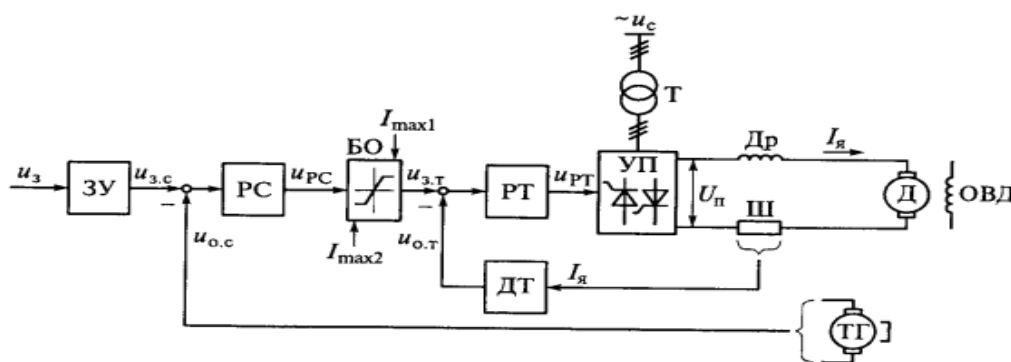


Рисунок 3.7 – Функциональная схема электропривода с подчинённым регулированием тока и скорости

Согласование номинальных значений напряжения питающей УП сети  $\sim u_c$ , его выходного напряжения и тока якоря двигателя обеспечивается трансформатором Т. Применение Т позволяет: обеспечить номинальное



напряжение на выходе преобразователя при минимальном угле управления его тиристорами и, в итоге, при максимальном коэффициенте мощности электропривода; ограничить скорость изменения тока через тиристоры при их коммутации и коротких замыканиях в случае возможных аварийных режимов в силовой цепи УП; потенциально разделить высоковольтные цепи питания УП и якорную цепь двигателя, что повышает эксплуатационную надежность и безопасность их обслуживания. При необходимости улучшения условий коммутации тока якоря двигателя за счет ограничения скорости его изменения в цепи якоря двигателя устанавливается дроссель Др. Сглаживание пульсаций тока якоря способствует также уменьшению вибраций и шума в двигателе.

В системе управления электропривода содержится два контура регулирования: внутренний контур тока якоря (КТ) и внешний контур скорости (КС).

Контур тока включает в себя силовую часть электропривода с выходом по току якоря  $I_{я}$ , цепь отрицательной обратной связи по току якоря и регулятор тока якоря РТ. На входе РТ сравниваются напряжение задания тока якоря  $u_{зт}$  и напряжение обратной связи  $u_{от}$ , поступающее с датчика тока ДТ. На вход ДТ подается напряжение с шунта Ш, пропорциональное току якорной цепи двигателя. Блок БО ограничивает выходное напряжение  $u_{РС}$  регулятора скорости РС.

Контур скорости двигателя включает в себя замкнутый КТ, цепь отрицательной обратной связи по скорости двигателя и регулятор скорости. На входе РС сравниваются напряжение задания скорости  $u_{зс}$ , подаваемое с выхода задающего устройства ЗУ, и напряжение обратной связи  $u_{ос}$  по скорости двигателя, поступающее от тахогенератора ТГ. Регулятор скорости может быть как пропорциональным (при невысоких требованиях к точности регулирования скорости), так и пропорционально-интегральным (при необходимости абсолютной статической точности регулирования).

Задающее устройство формирует желаемый закон изменения скорости электропривода, например, линейный с заданным постоянным ускорением (датчик интенсивности), экспоненциальный (инерционное входное звено) либо синусоидальный (как тестовый сигнал для снятия частотных характеристик электропривода).

Блок БО ограничивает выходное напряжение РС и тем самым максимальное напряжение задания  $u_{зт}$  тока якоря двигателя, обеспечивая в замкнутом КТ якоря двигателя ограничение этого тока на уровне максимально допустимого значения  $I_{max}$ . Уровень ограничения статической характеристики БО независимо регулируется сигналами  $I_{max1}$ ,  $I_{max2}$ .

Структурная схема электропривода представлена на рисунке 3.8. Она соответствует следующим допущениям: регулировочная характеристика управляемого преобразователя линейна; ток якорной цепи двигателя непрерывный; отсутствует реакция якоря двигателя; момент инерции, приведенный к валу двигателя, постоянен; инерционность датчиков тока и скорости не учитывается ввиду ее малости. Обозначения, принятые на схеме:

$T_{\Sigma}$  - электромагнитная постоянная времени якорной цепи, с;  
 $R_{\Sigma}$  - сопротивление якорной цепи, Ом;  
 $J$  - суммарный момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  
 $k_n$  - коэффициент усиления УП;  
 $T_n$  - постоянная времени цепи управления преобразователем, учитывающая коммутационные запаздывания и наличие фильтров, с (для полупроводниковых УП  $T_n < 10$  мс и может быть принята за некомпенсирующую постоянную времени  $T_{\Sigma}$ );  
 $k_d$  - передаточный коэффициент двигателя, рад/ДВс);  
 $k_{am}$  — коэффициент обратной связи по току, Ом;  
 $k_{oc}$  — коэффициент обратной связи по скорости двигателя, (Вс)/рад;  
 $W_{PT}(p)$  и  $W_{PC}(p)$  - передаточные функции регуляторов соответственно тока и скорости.

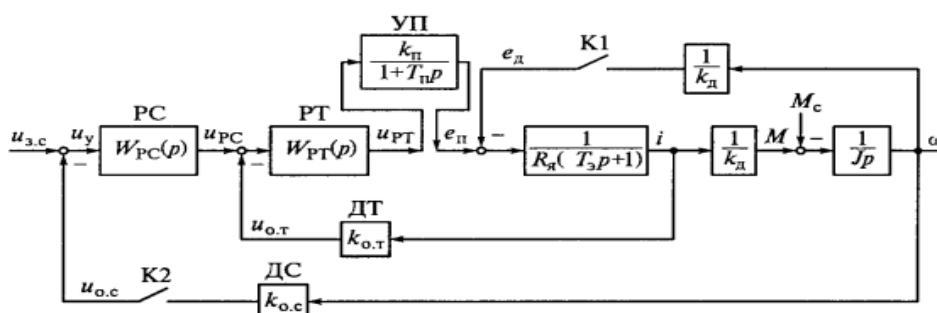


Рисунок 3.8 – Структурная схема электропривода с подчинённым регулированием тока и скорости

В приведенной схеме имеются два контура — внутренний контур тока и внешний контур скорости. Данная схема не соответствует каскадной структуре подчиненного регулирования из-за дополнительной связи по ЭДС двигателя, воздействующей на контур тока. С помощью известных правил преобразования структурных схем можно привести данную схему к виду каскадной структуры (рисунок 3.9).

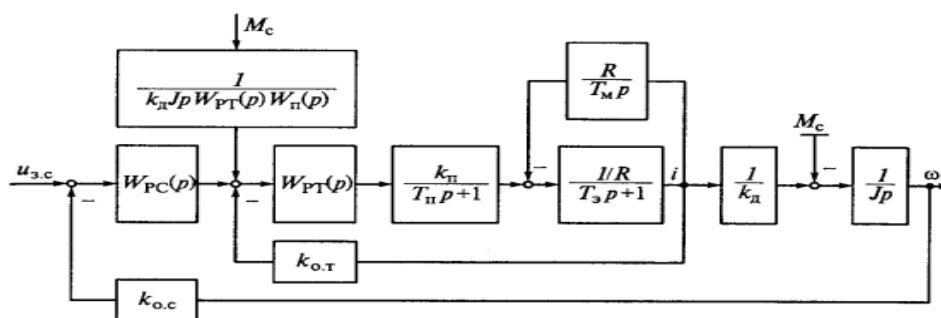


Рисунок 3.9 – Преобразованная структурная схема электропривода одного волоочильного блока стана

### 3.4 Исследование электропривода волоочильного стана в среде MatLab

В качестве электропривода волоочильного стана рассмотрена замкнутая нереверсивная система с использованием тиристорного преобразователя.

На рисунке 3.10 показана разработанная схема модели тиристорного электропривода [23, 26] (двухконтурная с подчинённым регулированием параметров).

Внешним контуром, является контур обратной связи по скорости. Задающий сигнал скорости через фильтр *Transfer Fcn* поступает на сумматор *Sum3*, сравнивается с сигналом обратной связи по частоте вращения, и разность поступает на вход *ПИ*-регулятора скорости *PI Controller1*. Выходной сигнал регулятора скорости через блок ограничения *Saturation Dynamic* задаёт ток двигателя. Максимальное значение  $\pm 10\text{В}$ , задаваемое в блоке *PI Controller1*, соответствует предельному значению тока двигателя. Дополнительное уменьшение максимального выходного напряжения регулятора скорости осуществляет контур независимого токоограничения *PreLookup, Interpolation (n-D)*.

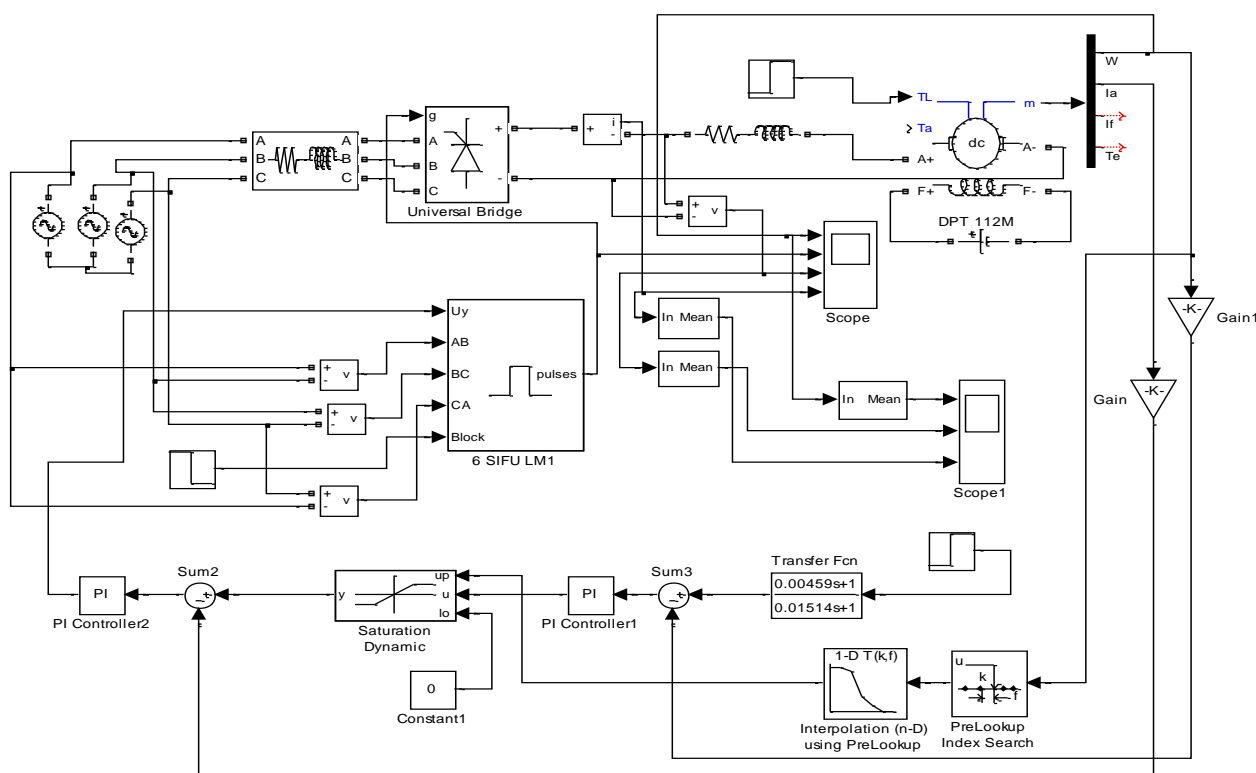


Рисунок 3.10 – Схема модели нереверсивного тиристорного электропривода стана

Для реализации контура необходимо иметь дополнительную информацию по используемому двигателю, что бы построить зависимость

предельного (пускового) значения тока от частоты вращения. Полученный график разбивается на линейно-ломанные отрезки и координаты точек перегиба вводятся в окна настроек блоков PreLookup, Interpolation (n-D), показанные на рисунке 3.11.

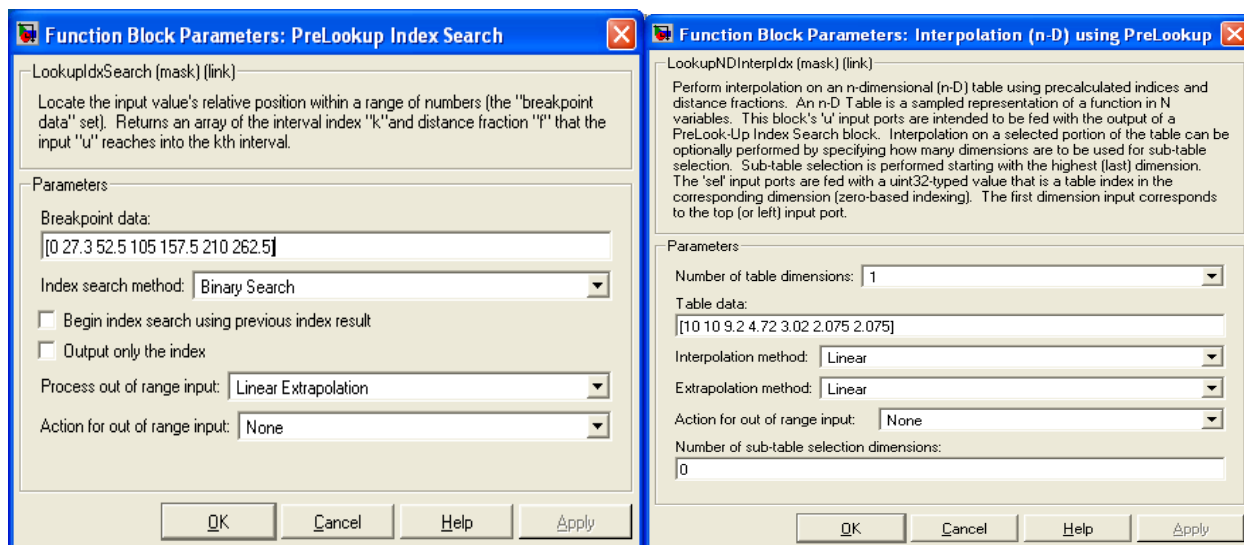


Рисунок 3.11 – Окна настроек блоков PreLookup, Interpolation (n-D)

В блок *PreLookup* вносятся частоты вращения точек перегиба, а в блок *Interpolation (n-D)* – максимальные выходные напряжения регулятора скорости, которые будут воспроизведены блоком ограничения *Saturation Dynamic*.

Сумматор *Sum2* вырабатывает сигнал разности между задающим и действительным значением тока двигателя, который подаётся на вход регулятора тока *PI Controller2*. Регулятор тока *PI Controller2*, тиристорный преобразователь *Universal Bridge* с управлением (*6 SIFU LMI*) и двигатель *DPT* образуют подчинённый (внутренний) контур.

Напомним, что блоки *6 SIFU LM*, *DPT*, *PI Controller* были модернизированы и не входят в состав библиотеки *Simulink*. Если двигатель с постоянными магнитами, то необходимо искусственно создать ток возбуждения, равный 1А, и не задавать индуктивность цепи возбуждения двигателя. При этих условиях коэффициент  $L_{af}=C=K_E \cdot \Phi=K_M \cdot \Phi$  и при включении двигателя в сеть магнитный поток будет номинального значения.

На рисунках 3.12 и 3.13 представлены результаты моделирования пуска привода на минимальную частоту вращения.

На рисунке 3.12 исследуемые параметры: частота вращения  $\omega$ , ток двигателя  $I_n$  и напряжение на двигателе  $U_n$  представлены так, как они выглядят в действительности при измерении на реальном приводе. Если необходимо убрать пульсации и вести исследование по «гладкой» (усреднённой) составляющей, то последовательно с исследуемым сигналом включить блок усреднения *Mean* (рисунок 3.13).

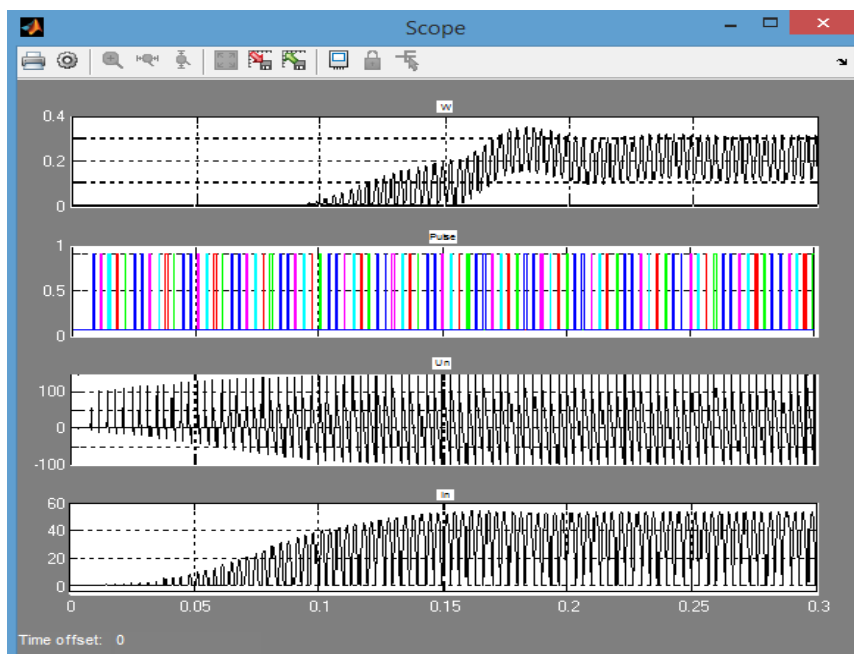


Рисунок 3.12 - Моделирования пуска на минимальную частоту вращения

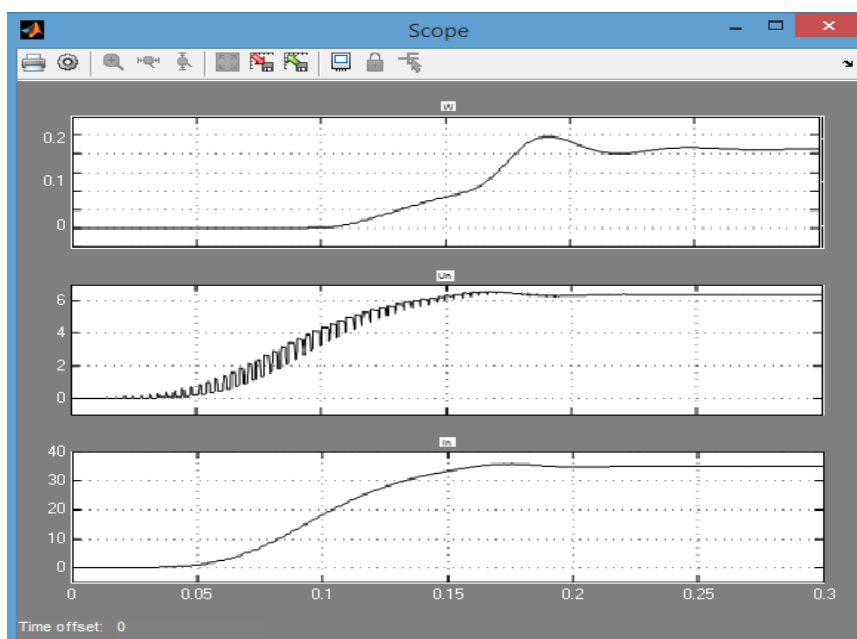


Рисунок 3.13 - Результаты моделирования пуска на минимальную частоту вращения (выделена гладкая составляющая с помощью блока усреднения Mean)

Особенностью этого исследования (рисунок 3.14) является снижение пускового тока по мере роста частоты вращения двигателя. Максимальное значение пускового тока около 200А имеет место до частоты вращения 50 1/с. Пуск протекает вяло и длится примерно 0,7с. Наиболее полно высокие динамические свойства таких двигателей проявляются на частотах вращения, не превышающих 50 1/с.

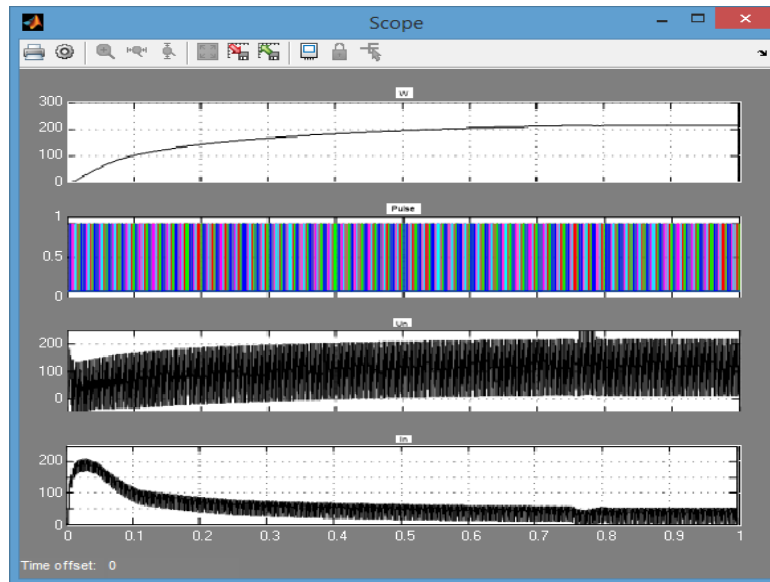


Рисунок 3.14 – Результаты моделирования пуска привода на максимальную скорость

### 3.5 Исследование стабилизации противоняжения прямоточного волоочильного стана ВПЦ 3-4/550 на компьютерной модели

С применением современных средств вычислительной техники, облегчаются исследования, связанные, непосредственно, с решением дифференциальных уравнений и построением переходных процессов.

Система дифференциальных уравнений, представленная в выражениях (3.1, 3.2, 3.3), может математически дать описание динамики переходных процессов 3-х кратного прямоточного волоочильного стана [12]:

выражение, описывающее уравнение движения

$$J_i \frac{d\omega_i}{dt} = k_{mi} I - \frac{R_B}{\eta_i \alpha_i} \left[ P_{0i} \left( 1 - \frac{Q_{i-1}}{\sigma_{B(i-1)} S_{i-1}} \right) + Q_{i-1} - Q_i \right], \quad (3.1)$$

выражение, описывающее уравнение э.д.с. цепи якоря

$$3L \frac{dI}{dt} = k_p u - \sum_{i=1}^3 c_{ei} \omega_i - 3rI, \quad (3.2)$$

выражение, показывающее уравнение, дающее описание поведения проволоки при растяжении на участке между волоочильным барабаном и волокой по ходу волочения

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{ES_i R_B}{l} \left( \frac{\omega_{i+1}}{\alpha_{i+1} \mu_{i+1}} - \frac{\omega_i}{\alpha_i} \right) - \frac{R_B}{\alpha_i l} \omega_i Q_i. \quad (3.3)$$

где  $J$  – момент инерции двигателя;  
 $i$  - порядковый номер блока волочения;  
 $\omega$  - скорость вращения якоря двигателя;  
 $I$  - ток цепи якоря;  
 $u$  - напряжение на якоре двигателя;  
 $r$  - сопротивления в цепи якоря;  
 $k_m, k_p, c_e$  - пропорциональные коэффициенты;  
 $\mu$  - коэффициент, показывающий вытяжку проволоки в волоке;  
 $R_B$  - радиус барабанов волочильного стана;  
 $\alpha$  - отношение передаточного числа редуктора;  
 $\eta$  - КПД двигателя и его передачи;  
 $P_{0i}$  - сил возникающая при воздействии металла на волоку при  
отсутствии противонапряжения ;  
 $Q$  - противонапряжение действующее перед  $i$ -ой волокой;  
 $S_i$  - площадь поперечного сечения проволоки перед ее проходом в  
 $i$ -ю волоку;  
 $\sigma$  - величин показывающая среднее по времени сопротивление  
материала;  
 $E$  – модуль упругости волочильной проволоки;  
 $l$  – длина проволоки на волочильном участке с противонапряжением.

На рисунке 3.15 показана структурная схема многодвигательного электропривода прядильного волочильного стана.

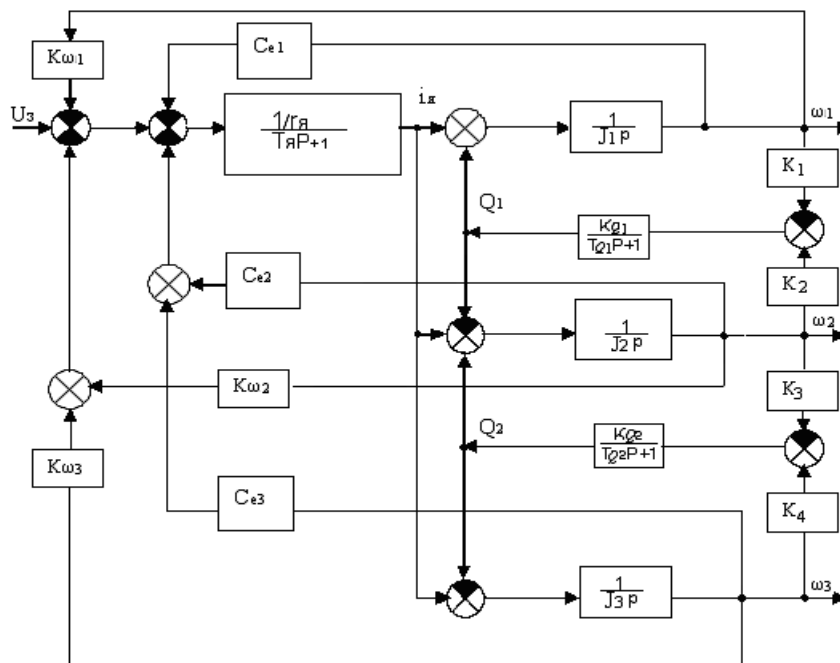


Рисунок 3.15 - Структурная схема многодвигательного электропривода прядильного волочильного стана

На рисунке 3.16 показана модель структурной схемы, представленной на рисунке 3.15, реализованной в виде программных модулей, которые предназначены для визуального программирования SIMULINK математического пакета программы MATLAB

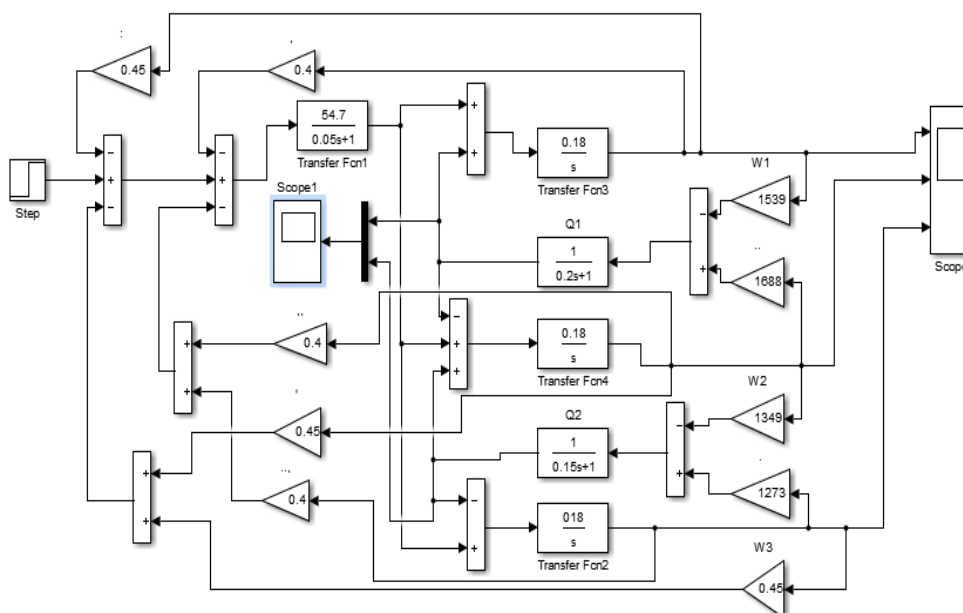


Рисунок 3.16 – Реализованная на компьютере в среде Simulink MatLab модель структурной схемы стана ВПЦ 3-4/550

В основу модели представленной на рисунке 3.16 заложены структурная схема электропривода стана и ее взаимосвязи, и параметры самого прямоугольного волочильного стана ВПЦ 3-4/550 представленные в таблице 2.1.

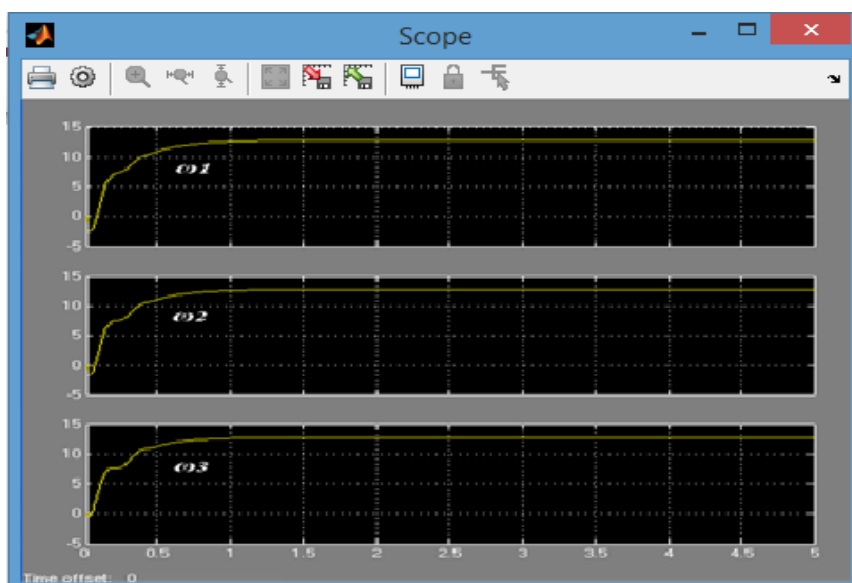


Рисунок 3.17 – Разгон двигателей на каждом блоке волочения до рабочей скорости при пуске стана



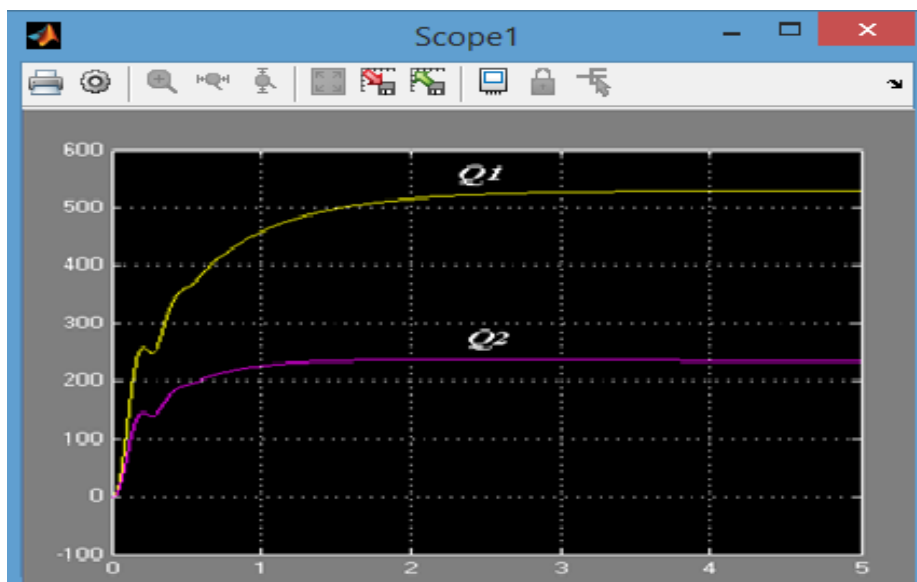


Рисунок 3.18 – Противонатяжения на каждом участке волочения, где оно возникает (между первым и вторым, и вторым и третьем межбарабанным промежутке) при пуске стана

На рисунках 3.17 и 3.18 соответственно приведены результаты моделирования процесса пуска стана: скорости вращения двигателей на каждом из блоков волочильного стана и противонатяжения на каждом из участков волочения, где они возникают. Стан разгоняется до рабочей скорости за время в течение 4 секунд.

В итоге при помощи проведенного моделирования, подтверждается работоспособность системы управления электроприводом стана предложенной с дипломном проекте. Можно заметить, что ошибка поддержания скорости волочения не превышает 0.3 м/с, что позволительно по технологическим требованиям. Также стоит обратить внимание, что ошибка поддержания противонатяжения на каждом участке волочения  $Q_1 = 5кН$  и  $Q_2 = 2,5кН$  в динамическом режиме работы стана меньше максимально допустимой. Переходные процессы получились удовлетворительными.

## 4 Безопасность жизнедеятельности

### 4.1 Анализ условий труда обслуживающего персонала в волочильном цехе

В дипломном проекте разработана система электропривода прямого тока волочильного стана на основании использования тиристорного преобразователя для питания электродвигателей постоянного тока. В состав схемы электропривода волочильного входят тиристорный преобразователь с приводным двигателем постоянного тока и источник питания

(трансформатор), на случай аварийной ситуации предусмотрено включение резервного питания (АВР) в виде дизельного генератора. Вращающиеся части машины постоянного тока для безопасности обслуживающего персонала закрыты защитными кожухами. Система имеет следующие технические характеристики:

В электроприводе имеются три одинаковых двигателя их характеристики:

Номинальная мощность – 55кВт;

Номинальный ток – 142А;

Номинальное напряжение: 440В;

Синхронная скорость – 1500Об/мин.;

КПД – 86,6%.

Так как двигатели соединены по параллельной схеме питания якорных обмоток статора то характеристики сети будут:

Общая мощность в сети соединения двигателей – 652,8кВА;

Общий ток в сети – 426А;

Общее напряжение сети – 440В;

Выходное напряжение тиристорного преобразователя – 460В;

Входное напряжение тиристорного преобразователя (входное напряжение питающей сети) – 380;

Номинальная частота питающей электрической сети – 50Гц.

Характеристики резервного источника питания (дизельного генератора):

Мощность установки может регулироваться – 0,1-5,0 МВт;

КПД – 0,4-0,47%;

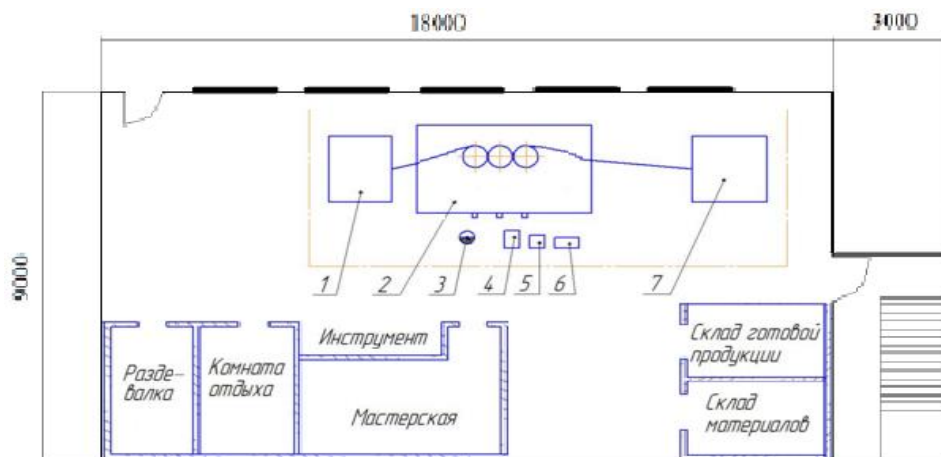
Расход топлива – 0,185-0,22кг/кВтч;

Срок службы – 150-300тыс.ч;

Уровень шума – 86 дБ.

Рабочее место для выполнения работы в положении стоя соответствует требованиям ГОСТа (ГОСТ 12.2.033-78. «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования»). В конструкции его элементов учитываем характер работы и психологические особенности человека. Стан расположен в волочильном цехе, в котором постоянно присутствует не менее 6-ти человек, в одну смену с 9-ти часов утра до 18-ти часов вечера.

Цех с волочильным оборудованием, представленный на рисунке 4.1, имеет следующий размеры: длина  $A=18$  м, ширина цеха  $B=9$  м, высота  $H=3,2$  м. Высота рабочей поверхности над уровнем пола 0,8 м, окна начинаются с высоты 0,8 м, высота окон 1,8 м. Окна расположены с северной стороны практически во всю стену. В северо-западном углу находится выход, запасной выход находится в противоположном углу. С правой стороны окон находится пожарный щит. Цех освещается лампами дневного света. Так как двери приёма и отправки металла почти всегда открыты, вентиляция цеха проходит естественным путём. Для дополнительной вентиляции в стенах имеются вентиляционные решетки.



- 1 – намоточный аппарат; 2 – волочильный стан; 3 – работник;  
 4 – управляющий пульт; 5 – стационарные ножницы; 6 – аппарат сварки;  
 7 - размоточный аппарат

Рисунок 4.1 – План размещения оборудования в волочильном цехе

Условия труда в волочильном цехе благоприятны и отвечают требованиям производственной санитарии. Категория работы данного помещения – средней тяжести Па, (не требующая определенного физического напряжения). Для сохранения здоровья работников в волочильном цехе предельно допустимый уровень (ПДУ) и предельно допустимая концентрация (ПДК) физических факторов:

Таблица 4.1 – ПДУ и ПДК физических факторов в волочильном цехе

Шум (уровень звука) дБ	Температура °С		Запыленность мг/м <sup>3</sup>
	Лето	Зима	
80-90	18-27	17-23	6,0

В современных машиностроительных заводах цеха оснащены различного вида технологическими оборудованиями, делающими труд человека более легким и делая его производительным, но в некоторых случаях работа этого оборудования связана с производственной опасностью, воздействием на рабочих вредными и опасными производственными факторами.

В процессе волочения проволоки на многократном волочильном стане имеется множество технологических операций и сложное электромеханическое оборудование.

В проволоке возникают большие напряжения из-за волочения проволоки на больших скоростях. Возможный разрыв проволоки, несет сильный разрушающий характер. Также большую опасность производственного травматизма несут множество вращающихся деталей расположенных на волочильном стане.

Следует также заметить, что безопасность и безвредность труда зависят от параметров производственной среды (микроклимата, вредных выделений от сгорания смазочного материала и других производственных вредностей). Металлическая пыль волочильных цехов имеет размеры менее 50 мкм, составляемая около 85% от пыли в цехе. Около 20% от этой пыли, составляет пыль размером 5-10 мкм, образуемая от испарения окалина, эта пыль разносится по всему цеху, при выбросе пыли от всех источников ее образования в среднем накапливается около 200 г на 1 т товарной продукции (проволоки). В зависимости от форм и размеров отдельных частиц пыли определяется ее поведение в воздухе. Пылинки размером 10 мкм и более оседают и в органы дыхания могут не попасть, особую опасность представляют мелкие частицы пыли размером до 5 мкм, которые находятся в воздухе долгое время во взвешенном состоянии, особенно при повышенной подвижности воздуха и могут попасть в организм человека [16].

Кроме перечисленных опасных факторов, волочильное оборудование является также источником вибраций и шумов в широком диапазоне частот. Это наносит большой ущерб организму человека, повышает утомляемость, снижая производительность труда. Утомление рабочих и операторов из-за шума и вибраций увеличивает число ошибок при работе и способствует возникновению травм. Исходя из параметров мощности двигателей и синхронной скорости вращения, по справочным материалам следует, что для двигателей, мощность которых находится в диапазоне 37-55 кВт, и частота вращения 1320-1900 об/мин., уровень шума составляет 86 дБ, что подходит по предельно допустимому уровню (ПДУ) физических факторов воздействующих на производстве данного типа [17].

В процессе волочения проволоки из-за работающего оборудования и самого процесса волочения возникает избыток тепла, который влияет на изменение микроклимата.

## **4.2 Расчет теплового баланса в волочильном цехе**

Рассчитаем поступление тепловыделения от источников тепла в помещение

Воздействие излучения тепла оценивается плотностью энергетического потока на рабочем месте определяемого по ГОСТ 12.1.005-88 «Общие требования санитарной гигиены в области рабочей зоны»

В разделе теплоступлений в холодный период года учитывают тепло от освещения, а в теплый период – от солнечной радиации [18].

Выделения тепла от работников цеха:

В волочильном цехе постоянно находится 6 работников в одну смену. При работе средней тяжести (категории Па) человек выделяет 233-290 Вт полного тепла, примем эту величину в размере 290 Вт, тогда теплоступления от людей в цехе:

$$Q_{Д} = 6 \cdot 290 = 1,74 \text{ кВт.} \quad (4.1)$$

Выделение тепла от работы электродвигателей:

Для работы стана используют три одинаковых электродвигателя, исходя из этого, рассчитаем тепловыделение от одного двигателя и умножим на их общее количество:

$$Q_{Э} = \frac{N_{ЭУ} \cdot k_{загр} \cdot k_{ОД} \cdot (1 - \eta)}{\eta} ; \quad (4.2)$$

где  $N_{ЭУ}$  – установленная мощность одного электродвигателя, 55 кВт;

$k_{загр}$  – коэффициент загрузки электродвигателя, равный отношению мощностей передаваемой к установленной,  $k_{загр} = 0,89$ ;

$k_{ОД}$  – коэффициент одновременности работы двигателей, 0,98.

$$Q_{Э} = \frac{55 \cdot 0,89 \cdot 0,98 \cdot (1 - 0,86)}{0,86} = 7,81 \text{ кВт},$$

$$Q_{Эобщ} = 3 \cdot Q_{Э} = 3 \cdot 7,81 = 23,43 \text{ кВт}.$$

Выделение тепла от нагрева при волочении проволоки:

Среднее количество выделяющегося тепла от слоев проволоки, возникающее в результате работы деформации, может быть определено из уравнения [19].

$$Q_{срнр} = (t_{ср} - t_0) c \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \gamma \cdot v \cdot 60 \cdot 10^{-6} = \frac{945 \cdot 10^{-4} D^2 \cdot \eta \cdot \sigma_{ср} \cdot v \cdot (1 - n)}{1 - \eta} ; \quad (4.3)$$

где  $t'_{ср}$  – температура средних слоев проволоки:

$$t'_{ср} = t_0 + \frac{2,2 \cdot \eta \cdot \sigma_{ср} \cdot v \cdot (1 - n)}{1 - \eta} ; \quad (4.4)$$

$t_0$  – температура проволоки до волочения,

$D$  – диаметр (поперечное сечение) проволоки перед первой протяжкой,  $D = 8 \text{ мм}$ ;

$\sigma_{ср}$  – средняя величина предельной прочности после протяжки, принимаем наибольшему значению,  $\sigma_{ср} = 1984,9 \text{ Н/мм}^2$ ;

$v$  – скорость волочения на последнем барабане,  $v = 2,69 \text{ м/с}$ ;

$n$  – число зависящее от величины скорости волочения для данного случая,  $n = 0$ ;

$\eta = 0,1$ , при  $n = 0$  и скорости, не превышающей 3,5 м/с.

$$Q_{срнр} = \frac{945 \cdot 10^{-4} \cdot 8^2 \cdot 0,1 \cdot 1984,9 \cdot 2,69}{1 - 0,1} = 3,588 \text{ кВт}.$$

Количество тепла, поступающего за счет солнечной радиации (для летнего периода):

$$Q_{с.р.} = (0,192 \cdot \frac{l \cdot h \cdot v_B}{\sqrt{S_{ок}}} + 0,24 \cdot L_{д\gamma}) \cdot (t_{нар} - t_{вн}), \quad (4.5)$$

где  $l$  – длина проема окон, т.к. окна расположены практически во все стену  $l=18\text{м}$ ;

$h$  – высота проема окон,  $h=1,8\text{м}$ ;

$v_B$  – скорость воздуха,  $v_B=3\text{м/с}$ ;

$S_{ок}$  – табличные данные, для окон с двойным остеклением в раздельных деревянных переплетах,  $S_{ок}=3,36 \cdot 10^{-2} \text{Вт/м}^2$

$t_{нар}$ ,  $t_{вн}$  – наружная и внутренняя температура воздуха,  $t_{нар}=29^\circ\text{C}$ ,  $t_{вн}=19^\circ\text{C}$ ;

$$L_{д\gamma} = A \cdot B \cdot H = 18 \cdot 9 \cdot 3,2 = 518,4 \text{ м}^3$$

$$Q_{с.р.} = (0,192 \cdot \frac{18 \cdot 1,8 \cdot 3}{\sqrt{3,36 \cdot 10^{-2}}} + 0,24 \cdot 518,4) \cdot (29 - 19) = 2,264 \text{ кВт}.$$

Тепловыделения от источников искусственного освещения (для зимнего периода):

$$Q_{освц} = E \cdot F \cdot q_{осв} \cdot h_{осв}; \quad (4.6)$$

где  $E$  – уровень освещённости,  $E=96,3\text{лк}$ ;

$F$  – площадь пола помещения,  $F=162 \text{ м}^2$ ;

$q_{осв}$  – удельные тепловыделения, для помещений площадью 50-200 $\text{м}^2$ ,  $q_{осв}=0,102 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{лк})$ ;

$h_{осв}$  – доля теплоты, поступающей в помещение, для ламп находящихся в помещении,  $h_{осв}=1$ .

Искусственное освещение осуществляется светильниками. Количество светильников 6, мощность каждого 125Вт, и световым потоком 2600 лм, следует

$$E = \frac{6 \cdot 2600}{162} = 96,3 \text{ лк},$$

$$Q_{освц} = 96,3 \cdot 162 \cdot 0,102 \cdot 1 = 1,6 \text{ кВт}.$$

Суммарные тепловыделения:

Для летнего периода

$$Q_{\text{ВЫДЛ}} = Q_{\text{Л}} + Q_{\text{Эобщ}} + Q_{\text{српр}} + Q_{\text{СР}} = 1,74 + 23,43 + 3.588 + 2,264 = 31,014 \text{ кВт} ,$$

Для зимнего периода

$$Q_{\text{ВЫДЗ}} = Q_{\text{Л}} + Q_{\text{Эобщ}} + Q_{\text{српр}} + Q_{\text{освц}} = 1,74 + 23,43 + 3.588 + 1,6 = 30,35 \text{ кВт} .$$

Рассчитаем тепловые потери в промышленном помещении.

Основные потери тепла – это потери через ограждающие конструкции  $Q_{\text{ог}}$ , Вт [18]:

$$Q_{\text{ог}} = \frac{F}{R_0} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot n ; \quad (4.7)$$

где  $F$  – площадь ограждающих конструкций по наружному обмеру,  $F=230,4 \text{ м}^2$ ;

$t_{\text{в}}, t_{\text{н}}$  – температура внутреннего и наружного воздуха (для зимнего периода),  $t_{\text{в}}=17^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{н}}=-10^{\circ}\text{C}$ ;

$n$  – табличная величина, зависящая от термического сопротивления конструкции,  $n=0,9$ .

$R_0$  – сопротивление теплопередаче наружных стен и полов:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_{\text{к}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = 0,114 + 0,017 + 0,057 = 0,188 (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}) / \text{Вт} ;$$

где  $\alpha_{\text{в}}, \alpha_{\text{н}}$  – внутренний наружный коэффициенты теплоотдачи,  $\alpha_{\text{в}}=8,72 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,  $\alpha_{\text{н}}=17,45 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$R_{\text{к}}$  – термическое сопротивление конструкции,  $R_{\text{к}}=0,017 (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$ ;

$$Q_{\text{ог}} = \frac{230,4}{0,188} \cdot (17 - (-10)) \cdot 0,9 = 29,78 \text{ кВт} .$$

Если сравнить количество выделяющегося тепла  $Q_{\text{ВЫДЗ}}=30,35 \text{ кВт}$  и количество потерь тепла (для зимнего периода)  $Q_{\text{ог}}=29,78 \text{ кВт}$ , то можно заметить что они практически одинаковы, и избыток тепла равный  $0,578 \text{ кВт}$  для зимнего периода в производственном помещении не будет оказывать серьезного влияния на обслуживающий персонал в холодный период принимают механическую или естественную вытяжную вентиляцию из верхней зоны, рассчитанную на удаление вредных выделений, не уловимых местными отсосами. Предусматривают общеобъемную и местную (воздушное

душирование) механическую приточную вентиляцию с подогревом приточного воздуха, рассчитанную на компенсацию вытяжной вентиляции. При избытке тепла в летний период принимают общеобъемную механическую или естественную вытяжную вентиляцию, естественный поток наружного воздуха с подачей его непосредственно в рабочую зону, общеобъемную механическую приточную вентиляцию, где нельзя осуществить естественную приточную вентиляцию [18]. Для летнего периода ( $Q_{\text{выдл}}=31,014\text{кВт}$ ) наблюдается большой избыток тепла, т.к. потери тепла отсутствуют, а тепловыделения имеют значительные показатели, поэтому необходимо установление системы вентиляции в цехе, избыток тепла оказывает сильное влияние на организмы рабочих, наступает быстрая утомляемость.

### 4.3 Расчет системы вентиляции в волоочильном цехе

Для перемещения воздуха имеется разветвлённая сеть каналов в системах вентиляции, при установке вентилятора в стене или перекрытии каналы отсутствуют. В общем случае, для систем вентиляции имеется четыре признака, по которым их можно охарактеризовать: по конструктивным особенностям, сфере действия, по назначению, способу побуждения [22]. На рисунке 4.2 представлены основные типы систем вентиляции.

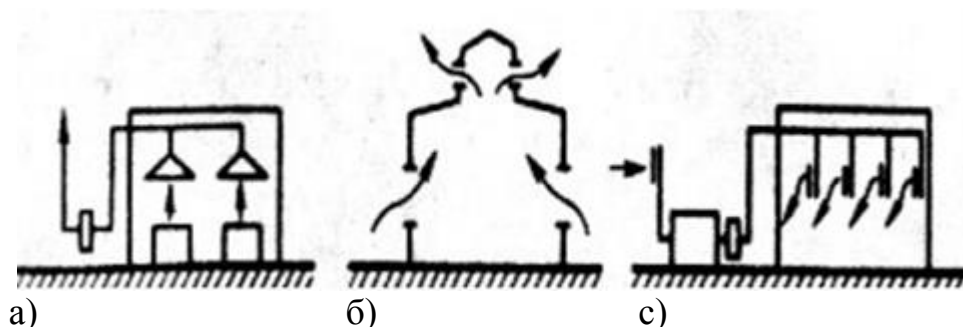


Рисунок 4.2 – Разновидности основных вентиляционных систем

На рисунке отражены основные типы систем вентиляции:

рисунок 4.2,а - система местная, механическая, вытяжная, канальная (выделяющиеся вредности и тепловыделения удаляются от технологического оборудования) – локальная вентиляция;

рисунок 4.2,б – система общеобменная, приточная (или вытяжная), бесканальная, естественная (приток воздуха через открывающиеся элементы окон) (удаление – через фонарь);

рисунок 4.2,в - система механическая, приточная, канальная, общеобменная,.

Основной задачей расчета системы вентиляции является определение количества воздуха, которое необходимо подать или удалить из помещения,



для нормального воздухообмена и предотвращения возможного образования вакуума в помещениях цеха при работе вентиляционных установок [22].

Разработка и проектирование системы вентиляции производственных помещений начинается с определения источников, выделяющих вредные вещества и тепло, после этого производится расчет, целью которого стоит выяснить расход вытяжного и приточного воздуха для удаления излишней тепловой массы и вредных веществ и соблюдения нормальных условий для работы людей. Для рассматриваемого мной случая в производственном помещении нет выделения вредных веществ, поэтому рассчитаем только количество свежей воздушной массы, необходимой для людей в соответствии с санитарными нормами.

Вначале рассчитывают, какой будет воздухообмен в цехе, для того чтобы запроектировать один тип вентиляционных сетей с выделением очищенного воздуха в атмосферу:

$$Q_i = \frac{Q_{\text{ОБЩ}}}{V_n} ; \quad (4.8)$$

где  $Q_{\text{ОБЩ}}$  – общий расход воздуха;

$V_n$  – внутренний объем всех рабочего помещения цеха,  $518,4\text{м}^3$ ;

$$Q_{\text{ОБЩ}} = N \cdot m ; \quad (4.9)$$

где  $N$  – количество людей постоянно присутствующих в цехе, 6 человек;

$m$  – удельный расход чистого воздуха на 1 человека в час, для помещений с возможностью проветривания составляет  $30\text{м}^3/\text{ч}$  на человека,

$$Q_{\text{ОБЩ}} = 6 \cdot 30 = 180\text{м}^3 / \text{ч} .$$

Если воздухообмен, рассчитанный по формуле (4.8) не больше допустимого (1–1,5 обмена в час), то проектируют первый тип вентиляционных сетей с выбросом очищенного воздуха в атмосферу:

$$Q_i = \frac{180}{518,4} = 0,347 \text{ в час} .$$

По полученному выражению можно выбрать первый тип системы вентиляции.

Так как я рассматриваю систему вентиляции для помещения с явным избытком тепла. То необходимо провести расчет воздухообмена для частного случая.

Из условия удаления из помещения явного тепла вычисляют воздухообмен  $Q$  (кг/ч) по формуле:

$$Q = \frac{3,6 \cdot Q_{\text{ВЫДЛ}}}{C \cdot (t_{\text{уд}} - t_{\text{вв}})}; \quad (4.10)$$

где  $Q_{\text{ВЫДЛ}}$  – количество чрезмерного тепловыделения, 31,014кВт;  
 $C$  – удельная теплоемкость воздуха, 1 кВТ/(кг·°С);  
 $t_{\text{уд}}$  – температура удаляемого из помещения воздуха, для производственных цехов в летний период температура может достигать 40°С;  
 $t_{\text{вв}}$  – температура приточного воздуха, 19°С;

$$Q = \frac{3,6 \cdot 31,014}{1 \cdot (40 - 19)} = 5,31 \text{ кг/ч};$$

По проведенным расчетам видно, что воздухообмен рассчитанный для частного случая с избытком тепла превышает допустимое значение, то проектируют второй или третий тип вентиляционной системы, т.к. основной задачей вентиляции является устранение избытка тепла, а очищение воздушной среды от пыли не является критически необходимой то может использовать второй тип вентиляции – приточная (вытяжная), общеобъемная, бесканальная.

В зависимости от теплового избытка, плотности, теплоемкости и температуры удаляемого и вводимого воздуха можно определить объем поступаемого воздуха (м<sup>3</sup>/ч):

$$Q_{\text{ВВ}} = \frac{Q_{\text{ВЫДЛ}}}{C \cdot \rho_n \cdot (t_{\text{уд}} - t_{\text{вв}})}; \quad (4.11)$$

где  $Q_{\text{ВЫДЛ}}$  – количество чрезмерного тепловыделения, 31,014кВт;  
 $C$  – удельная теплоемкость воздуха, 1 кВТ/(кг·°С);  
 $\rho_n$  – удельная плотность воздуха в помещении, 1,127кг/м<sup>3</sup>;  
 $t_{\text{уд}}$  – температура удаляемого из помещения воздуха, 40°С;  
 $t_{\text{вв}}$  – температура вводимого воздуха в помещение, 19°С;

$$Q_{\text{ВВ}} = \frac{31,014}{1 \cdot 1,127 \cdot (40 - 19)} = 1,31 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

В итоге по проведенным расчетам установлено, что для нормальной работы персонала в волочильном цехе (в летний период) необходима приточная (вытяжная) система вентиляции с вводимым объемом 1,31 м<sup>3</sup> воздуха в течение одного рабочего часа.

## 5 Технико-экономическая часть

### 5.1 Целесообразность проведения модернизации системы управления электропривода прямоточного волочильного стана

Технико-экономический расчет производится с целью определения эффективности от модернизации системы управления электропривода прямоточного волочильного стана.

Внедрение более надежной системы управления электропривода оказывает серьезное изменение в условиях производительной работы, повышая производительность, улучшая качество продукции, снижая потери электроэнергии и облегчая труд рабочего. В настоящее время технический потенциал ряда производственных отраслей во многом определяет развитие электротехнической промышленности.

Продукция электротехнической промышленности расширяет сферу применения, и приводит к наиболее эффективному конструкторскому решению. В условиях быстрого развития и улучшения изделий электротехнической промышленности, очень большое значение уделяется четкому экономическому обоснованию новых разработок различных видов технологических процессов, электроприводов и применяемых материалов. Соблюдение правильного конструирования, эксплуатации и изготовления электропривода приводит к получению наибольшей производительности системы электропривода любой установки или механизма при наименьших затратах на ее осуществление.

Повышение качества изделий и выявление оптимальных пределов надежности оказывает сильный экономический эффект от бездефектного изготовления конструкции.

На основе сравнения волочильного стана ВПЦЗ-4/550 до модернизации (I вариант) и после модернизации (II вариант) при волочении проволоки, произведем технико-экономический расчет.

### 5.2 Расчёт производительности волочильных станков

Производительность стана [20]:

$$Q = 60 \cdot V_{cp} \cdot g \cdot k_1 \cdot k_2; \quad (5.1)$$

где  $V_{cp}$  – средняя скорость волочения проволоки с учётом разгона и торможения стана, в м/мин

$$V_{cp} = \frac{Q}{g \cdot t_m}; \quad (5.2)$$

где  $g$  – вес погонного метра готовой продукции (проволоки), в кг;

$k_1$  – коэффициент, с помощью которого учитывают не перекрывающиеся подготовительно-заключительные операции, смену волок, обрывности и т.д.

$$k_1 = \frac{t_{\text{смен}} - t_{\text{ВСП}}}{t_{\text{смен}}}; \quad (5.3)$$

$t_{\text{ВСП}}$  – вспомогательное время;

$$t_{\text{ВСП}} = t_0 + t_e + t_B + t_{\text{ППС}}; \quad (5.4)$$

$t_{\text{смен}}$  – продолжительность рабочей смены;

$t_0$  – время, затрачиваемое на устранение обрывов;

$t_e$  – время необходимое на естественные надобности;

$t_B$  – время, затрачиваемое на смену волок;

$t_{\text{п.п.с.}}$  – время которое затрачивается на приём передачу рабочей смены;

$k_2$  – коэффициент, который учитывает не перекрываемое время на съём наполненной и установку пустой шпули

$$k_1 = \frac{t_M}{t_M + t_{II}}; \quad (5.5)$$

$$t_M = \frac{Q_n}{g \cdot V_{\text{max}}} + 0,5 \cdot t_{\text{ПП}}; \quad (5.6)$$

$Q_n$  – вес проволоки в шпуле;

$V_{\text{max}}$  – максимальная скорость при волочении на заданном маршруте;

$t_{\text{п.р}}$  – время затрачиваемое на разгон и остановку стана;

$t_{\text{II}}$  – время затрачиваемое на съём наполненной и установку пустой шпули.

### 5.3 Расчёт производительности волочильного стана до модернизации

Продолжительность работы стана 5840 часов в течение года.

Среднее количества обрывов за смену (4 обрыва) и средняя продолжительность на ликвидацию обрыва 0.25 часа, исходя из этого, время на ликвидацию обрывов:

$$t_0 = 4 \cdot 0,25 = 1ч,$$

Время необходимое на естественные надобности:

$$t_e = 0.5 \text{ ч.}$$

Время, затрачиваемое на смену волок:

$$t_B = 0.5 \text{ ч.}$$

Время, затрачиваемое на приём и передачу рабочей смены:

$$t_{п.п.с.} = 1 \text{ ч.}$$

Вспомогательное время:

$$t_{ВСП} = t_0 + t_e + t_B + t_{ППС}; \quad (5.7)$$

$$t_{ВСП} = 1 + 0,5 + 0,5 + 1 = 3 \text{ ч.},$$

Продолжительность рабочей смены:

$$t_{смен} = 8 \text{ ч.}$$

$$k_1 = \frac{t_{смен} - t_{ВСП}}{t_{смен}} = \frac{8 - 3}{8} = 0,625, \quad (5.8)$$

Вес проволоки в шпуле:

$$Q_n = 1000 \text{ кг.}$$

Время, затрачиваемое на разгон и остановку стана:

$$t_{п.р.} = 3 \text{ мин.}$$

Вес погонного метра готовой продукции (проволоки):

$$g = 0,025 \text{ кг/м.}$$

Максимальная скорость при волочении на заданном маршруте:

$$V_{\max} = 1500 \text{ м/мин.}$$

$$t_M = \frac{Q_n}{g \cdot V_{\max}} + 0,5 \cdot t_{ПР} = \frac{1000}{0,025 \cdot 1500} + 0,5 \cdot 3 = 28,16 \text{ мин}, \quad (5.9)$$

$$k_1 = \frac{28,16}{28,16 + 6} = 0,824. \quad (5.10)$$

Средняя скорость волочения с учётом разгона и торможения стана:

$$V_{CP} = \frac{Q_n}{g \cdot t_M} = \frac{1000}{0,025 \cdot 28,1} = 1420 \text{ мин}, \quad (5.11)$$

Производительность волочильного стана до модернизации:

$$Q = 60 \cdot V_{cp} \cdot g \cdot k_1 \cdot k_2 = 60 \cdot 1420 \cdot 0,025 \cdot 0,625 \cdot 0,824 = 1096,95 \text{ кг/ч.}$$

Производительность стана при работе 5840 часов в течение года минус 7% общего рабочего времени на ремонт, профилактику, обслуживание и т.д.:

$$(5840 - 409) \cdot 1,09695 = 5957,5 \text{ т} \quad (5.12)$$

#### 5.4 Расчёт производительности волочильного стана после модернизации

Среднее количества обрывов за смену (2 обрыва) и средняя продолжительность на ликвидацию обрыва 0.25 часа, исходя из этого, время на ликвидацию обрывов:

$$t_0 = 2 \cdot 0,25 = 0,5 \text{ ч.}$$

Время, затрачиваемое на естественные надобности:

$$t_e = 0,5 \text{ ч.}$$

Время, затрачиваемое на смену волок:

$$t_B = 0,5 \text{ ч.}$$

Время необходимое на приём передачу рабочей смены:

$$t_{\text{п.п.с.}} = 1 \text{ ч.}$$

Вспомогательное время:

$$t_{\text{ВСП}} = t_0 + t_e + t_B + t_{\text{ППС}}; \quad (5.13)$$

$$t_{\text{ВСП}} = 0,5 + 0,5 + 0,5 + 1 = 2,5 \text{ ч,}$$

Продолжительность рабочей смены:

$$t_{\text{смен}} = 8 \text{ ч.}$$

$$k_1 = \frac{t_{\text{смен}} - t_{\text{ВСП}}}{t_{\text{смен}}} = \frac{8 - 2,5}{8} = 0,7, \quad (5.14)$$

Вес проволоки в шпуле:

$$Q_n = 1000 \text{ кг.}$$

Время, затрачиваемое на разгон и остановку стана:

$$t_{\text{п.р.}} = 1 \text{ мин.}$$

Вес погонного метра готовой продукции (проволоки):

$$g = 0,025 \text{ кг/м.}$$

Максимальная скорость при волочении проволоки на заданном маршруте:

$$V_{\text{max}} = 1500 \text{ м/мин.}$$

$$t_M = \frac{Q_n}{g \cdot V_{\max}} + 0,5 \cdot t_{\text{ПП}} = \frac{1000}{0,025 \cdot 1500} + 0,5 \cdot 1 = 27,16 \text{ мин}, \quad (5.15)$$

$$k_1 = \frac{27,16}{27,16 + 6} = 0,82. \quad (5.16)$$

Средняя скорость волочения проволоки с учётом разгона и торможения:

$$V_{\text{CP}} = \frac{Q_n}{g \cdot t_M} = \frac{1000}{0,025 \cdot 27,1} = 1476 \text{ м/мин}. \quad (5.17)$$

Производительность волочильного стана после модернизации:

$$Q = 60 \cdot V_{\text{cp}} \cdot g \cdot k_1 \cdot k_2 = 60 \cdot 1476 \cdot 0,025 \cdot 0,7 \cdot 0,82 = 1270,8 \text{ кг/ч}.$$

Производительность стана при работе 5840 часов в течение года минус 7% общего рабочего времени на ремонт, профилактику, обслуживание и т.д.:

$$(5840 - 409) \cdot 1,2708 = 6901,7 \text{ т} \quad (5.18)$$

## 5.5 Затраты на оборудование и модернизацию волочильного стана

I вариант. По данным маркетингового отдела «Алматинского завода тяжёлого машиностроения» принимаю, что первоначальная стоимость волочильного стана базового варианта со вспомогательным оборудованием 12 миллионов тенге.

II вариант. Первоначальная стоимость волочильного стана базового варианта со вспомогательным оборудованием: 12 миллионов тенге;

Стоимость модернизации: 8000000 тенге;

Итого стоимость модернизированного стана: 12000000 + 8000000 = 20000000 тенге.

Формула для определения экономического эффекта:

$$\mathcal{E}_r = U_{\text{б.ж.}} \cdot a - (U_M + \Delta K) + \frac{U'_\delta \cdot a_1 - U'_M + (K'_\delta \cdot a_1 - K'_M)}{P_{\text{ам}}} \quad (5.19)$$

Коэффициент, показывающий рост производительности модернизированного электрооборудования по сравнению с первоначальным вариантом:

$$a = a_1 \cdot a_2 \quad (5.20)$$

$$a_1 = \frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{6901,7}{5957,5} = 1,15$$

где  $\beta_1, \beta_2$  – производительность старого и нового стана соответственно

$$a = 1,15 \cdot 0,92 = 1,05.$$

Сопутствующее капиталовложение:

$$K' = K_{TP} \cdot K_{KP}; \quad (5.21)$$

## 5.6 Определение затрат на текущий и капитальный ремонт

Одним из вариантов технического решения технико-экономических показателей, являются капитальные затраты. Затраты на обслуживание и ремонт включают в себя затраты на комплектующие изделия, запчасти и материалы, используемые при ремонтах и обслуживании и затраты на заработную плату ремонтного и обслуживающего [21].

$$C_{PO} = C_{zn} \cdot C_m \quad (5.22)$$

По статическим данным рассчитываются нормативно-параметрические уравнения трудоемкости ремонтов электрических двигателей и преобразователей, представляющий собой электропривод, характеризуемый в функции номинальной мощности  $P_H$ , т.к. величина мощности она определяет до 98% трудоемкости ремонтов, средний тарифный разряд электрослесарных ремонтных работ для электродвигателей постоянного тока и комплектных преобразователей равен 6.

До модернизации оборудования текущий ремонт проводили два раза в год, после модернизации текущий ремонт сократили до одного раза в год.

Расчет нормативно-параметрических уравнений текущего ремонта:

$$t_{mp} = 1,42 \cdot P_H^{0,48} = 1,42 \cdot 252^{0,48} = 20 \text{ чел} \cdot \text{ч}, \quad (5.23)$$

$$t_{mp} = 0,785 \cdot P_H^{0,48} = 0,785 \cdot 252^{0,48} = 11 \text{ чел} \cdot \text{ч}. \quad (5.24)$$

Для определения основного фонда зарплат ремонтного и обслуживающего персонала нужно умножить среднюю часовую тарифную ставку на трудоемкость ремонтов:

$$C_{озн1} = t_{mp1} \cdot 2 \cdot 500 = 20000 \text{ тенге}, \quad (5.25)$$

$$C_{озн2} = t_{mp2} \cdot 1 \cdot 500 = 5500 \text{ тенге}. \quad (5.26)$$

10% от основных затрат составляют дополнительные затраты:



1 вариант  $C_{д.б} = 2000$  тенге;  
 2 вариант  $C_{д.м} = 550$  тенге;  
 21% от основной и дополнительной заработной платы составляют начисления на соцстрахование:

$C_{сб} = 2310$  тенге;

$C_{см} = 635$  тенге;

Тогда 
$$K_{кр} = C_{озп} + C_{д} + C_{с} \quad (5.27)$$

1 вариант: 
$$K_{кр} = 20000 + 2000 + 2310 = 24310 \text{ тенге/год}, \quad (5.28)$$

2 вариант: 
$$K_{кр} = 5500 + 550 + 635 = 6685 \text{ тенге/год}. \quad (5.29)$$

Для транспортировки электрооборудования затрачивают:

$$K_{кр,б} = 0,03 \cdot Ц1 = 0,03 \cdot 12000000 = 360000 \text{ тенге}, \quad (5.30)$$

$$K_{кр,м} = 0,03 \cdot Ц2 = 0,03 \cdot 15500000 = 465000 \text{ тенге}. \quad (5.31)$$

Сопутствующие капитальные вложения:

$$K_{б} = 360000 + 24310 = 384310 \text{ тенге (1 в)}, \quad (5.32)$$

$$K'_{м} = 465000 + 6685 = 471685 \text{ тенге (2 в)}. \quad (5.33)$$

## 5.7 Проведем расчет текущих годовых издержек у потребителя

$$U' = U_{з.э} + U_{з.л} + U_{рм} + U_{т.р}. \quad (5.34)$$

где  $U_{з.э}$  – производимые затраты на возмещение потерь электроэнергии;  
 $U_{з.л}$  – производимые затраты на зарплату обслуживающего персонала;

$U_{рм}$  – производимые затраты на расходные материалы;

$U_{т.р}$  – производимые затраты на текущий ремонт и обслуживание.

Определим производимые затраты на зарплату обслуживающего персонала [20]:

1 вариант:

$$U_{о.з.л.} = N \cdot S \cdot h = 1920 \cdot 3 \cdot 400 = 2304000 \text{ тенге}, \quad (5.35)$$

где N - годовое число рабочих часов;

S – количество рабочих смен;

h – почасовая тарифная ставка рабочего;

Принимаем, что 50% от основных затрат составляют затраты на планово-предупредительный ремонт:

$$U_{п.п.р} = 2304000 \cdot 0,5 = 1152000 \text{ тенге,} \quad (5.36)$$

10% от основной зарплаты – дополнительная зарплата:

$$U_{доп} = 2304000 \cdot 0,1 = 230400 \text{ тенге,} \quad (5.37)$$

21% от основной и дополнительной зарплаты составляют начисление на соцстрахование:

$$U_{соц} = (1152000 + 230400) \cdot 0,21 = 290304 \text{ тенге.}$$

Общий фонд зарплаты персонала в год составляет:

$$U_{з.п} = U_{о.з.п.} + U_{п.п.р} + U_{доп} + U_{соц};$$

$$U_{з.п} = 2304000 + 1152000 + 230400 + 290304 = 3976704 \text{ тенге,}$$

2 Вариант: То же самое  $U_{з.п} = 3976704$  тенге.

## 5.8 Рассчитаем производимые затраты на возмещение потерь электроэнергии

1 вариант.

$$U_{з.э.} = \varepsilon \cdot \Delta A; \quad (5.38)$$

где  $\varepsilon = 15,44$  тенге кВт/час – тариф на 1 кВт/час электроэнергии;

$\Delta A$  – годовые потери электроэнергии:

$$\Delta A = \frac{1-\eta}{\eta} \cdot P_H \cdot K_3 \cdot T; \quad (5.39)$$

где  $\eta$  – КПД системы электроприводов;

$K_3$  – коэффициент загрузки по мощности;

$P_H$  – номинальная мощность электродвигателя двигателя;

T – задействованный фонд времени;

$$\Delta A = \frac{1-0,86}{0,86} \cdot 55 \cdot 0,9 \cdot 5840 = 47059 \text{ кВт/ч.}$$

2 вариант.

Годовые потери электроэнергии, по новому стану отнесённые к производительности старого волочильного стана

$$\Delta A_M = 47059 \cdot 0,92 = 43294 \text{ кВт/ч}$$

1 вариант:  $U_{3.Эб} = \varepsilon \cdot \Delta A = 15,44 \cdot 47059 = 726590,9$  тенге/год,

2 вариант:  $U_{3.ЭМ} = \varepsilon \cdot \Delta A_M = 15,44 \cdot 43294 = 668459,3$  тенге/год.

Определим производимые затраты на расходные материалы

$$U_{PM} = 0,5 \cdot C_{O3}; \quad (5.40)$$

1 вариант:  $U_{PM} = 0,5 \cdot C_{O3} = 0,5 \cdot 20000 = 10000$  тенге,

2 вариант:  $U_{PM} = 0,5 \cdot C_{O3} = 0,5 \cdot 5500 = 2750$  тенге.

Определим производимые затраты на текущий ремонт и содержание электрооборудования:

На 1 кВт/час затрачивают около 567 тенге в год тогда:

1 вариант:  $U_{ТР.б} = 165 \cdot 567 = 93555$  тенге/год, (5.41)

2 вариант:  $U_{ТР.б} = 165 \cdot 567 = 93555$  тенге/год.

Текущие издержки у потребителя в течение года:

1 вариант:

$$U'_б = 726590,9 + 3976704 + 10000 + 93555 = 4806845 \text{ тенге}, \quad (5.42)$$

2 вариант:

$$U'_M = 668459,3 + 3976704 + 2750 + 93555 = 4741468,3 \text{ тенге.} \quad (5.43)$$

Определим затраты на дополнительные капитальные вложения:

$$\Delta K = \frac{K_{III}}{A_2}; \quad (5.44)$$

$K_{III} = 100$  тыс. тенге.

где  $K_{\text{пп}}$  – производственные расходы перед началом эксплуатации оборудования;

$A_2$  – количество модернизированных станков выпускаемых в год;

$A_2 = 10$  единиц.

$$\Delta K = \frac{100000}{10} = 10000 \text{ тенге.}$$

Рассчитав все необходимые данные, определим годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E}_Г = U_{\text{б.ж.}} \cdot a - (U_M + \Delta K) + \frac{U'_\delta \cdot a_1 - U'_M + (K'_\delta \cdot a_1 - K'_M)}{P_{\text{ам}}} \quad (5.45)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_Г &= 12000000 \cdot 1,05 - (20000000 + 10000) + \\ &+ \frac{4806845 \cdot 1,15 - 4741468,3 + (384310 \cdot 1,15 - 471685)}{0,0874}, \end{aligned}$$

$$\mathcal{E}_Г = 12600000 - 20010000 + 18671095 = 11261095 \text{ тенге.}$$

$$T_{\text{окупаемость}} = \frac{U_M}{\mathcal{E}_Г} = \frac{20010000}{11261095} = 1,7 \text{ года.} \quad (5.46)$$

Таким образом, выяснили, что годовой экономический эффект составит 11261095 тенге.

Сравним полученные затраты по обоим вариантам:

Таблица 4.1 – Затраты до модернизации, и после модернизации стана.

Показатель	Первый вариант	Второй вариант
1 Капиталовложения и строительно-монтажные работы	120000000 тенге	20000000 тенге
2 Годовые текущие издержки у потребителя	4806845 тенге	4741468,3 тенге
3 Затраты на текущий ремонт и обслуживание ЭП	384310 тенге	471685 тенге
4 Затраты на смазочные и обтирочные материалы	10000 тенге	2750 тенге
5 Затраты на электроэнергию	726590,9 тенге	668459,3
Итого затраты	5927745,9	5884362,6
Экономический эффект	11261095	

## Заключение

В дипломном проекте приводится ознакомление с технологическим процессом волочения на различных типах волочильных станов, особое внимание уделяется станам прямоточного типа. Также предлагается внедрение системы управления электропривода со стабилизацией противонатяжения на прямоточном волочильном стане, представлены несколько, отличающийся между собой по конструкции и способу управления, систем, дается описание по каждой из них, и выбрана одна из систем, удовлетворяющая всем необходимым показателям.

Путем расчета затрачиваемой силы при волочении проволоки на прямоточном стане ВПЦ 3-4/550, обосновывается выбор приводных электродвигателей. В результате выбраны электродвигатели типа 4ПФМ250 мощностью 55кВт и соответствующие им преобразователи типа ...

Разработана структурная и виртуальная модели электропривода, которая исследована в среде MatLab. Исследования на модели показали, что предложенная система устойчива и удовлетворяет требованиям технологического процесса в рабочих режимах стана

При помощи технико-экономического обоснования, доказывається эффективность проведения модернизации волочильного стана, за счет окупаемости, сроком 1,7 года, и увеличения производительности.

Для нормальных условий работы обслуживающего персонала, рассчитывается воздухообмен и поступление необходимого объема свежего воздуха в помещение волочильного цеха, и выбирается тип вентиляции, используемой в рабочем помещении, т.к. имеется явный избыток тепла при работе волочильного стана.

## Список литературы

1. Цыба Ю.А., Смагулова Г.К., Бестерекова А.Н. Основные принципы построения систем регулирования электроприводом прямоточных волоочильных станов //Вестник КазАТК. – Алматы, 2014. – № 3.– С.
2. Туганбаев И.Т. Автоматизированный электропривод волоочильного оборудования. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: Алматы, 1997 -350 с.
3. Королев, В.Д., Боков И.И., Кандауров Л.Е., Утюгов Л.Г., Красавин Б.Н. Волоочильные станы для производства стальной проволоки. – Магнитогорск: МГТУ, 1999. – 236 с.
4. Цыба Ю.А. и др. Особенности взаимосвязи электромеханических параметров в многодвигательном электроприводе прямоточного волоочильного стана без учета упругих связей. МВ и ССО Каз. ССР. Межвузовский сборник научных трудов «Электропривод и преобразовательная техника». - Алма-Ата, 1985. – С. 40-45.
5. Пальмов Е.В., Гурьянов М.К. Современные скоростные волоочильные станы. В сб. “Расчет и конструирование заводского оборудования” – М.: Машгиз, 1950 -195 с.
6. Тарнавский А.Л. Элементы теории и практики высокоскоростного волоочения – М.: Сталь, №6, 1974.
7. Тарнавский А.Л. Эффективность волоочения с противонатяжением. – М.: Металлургия, 1959.
8. Зудкин С.М., Пружак А.Г., Алалыкин Г.С. Электропривод и автоматика волоочильных станов. – М.: Металлургия, 1977. -208 с.
9. А.С. 182787 (СССР). Способ настройки многодвигательного электропривода петлевого стана многократного волоочения. Колесов В.М., Волков В.Е., Егай А.Г. и др. – Опул. В Б.И. 1966, N12.
10. Б.В. Беспалов, А.И. Рябинин. Совершенствование систем регулирования волоочильными станами. // Сталь, 1982, №10, С.54-56.
11. Цыба Ю.А., Туганбаев И.Т. Анализ многодвигательных электроприводов волоочильных станов при различных схемах питания якорных цепей. Межвузовский сборник научных трудов «Электропривод и автоматизация промышленных установок» - Горький, 1987. – С.140-146.
12. Цыба Ю.А., Шадхин Ю.И. Аналитическое конструирование регулятора многодвигательного электропривода прямоточного волоочильного стана. «Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. Тынышпаева» №6(61). – Алматы: Каз.АТК, 2009. – С.142 -148.
13. Бородавкин И.Т., Михайлов А.С. Влияние скорости волоочения на качество проволоки. - М.: Металлургия, N9, 1976.
14. Когос А.М. Механическое оборудование волоочильных и лентопрокатных цехов. - М.: Металлургия, 1964. -311с.
15. ООО «Электроаппаратура» – регулируемые электроприводы постоянного и переменного тока: каталоги. <http://www.elmotor.ru>.

16. Указания по строительному проектированию предприятий, зданий и сооружений черной металлургии. СШ1125-60.М.: Стройиздат, 1960.
17. Юдин Е.Я. Борьба с шумом на производстве: Справочник. - М.: Машиностроение, 1985.
18. Торговников Б.М., Табанчик В.Е., Ефанов Е.М. Проектирование промышленной вентиляции: Справочник. Киев: Будівельник, 1983. -256 с.
19. Красильщиков Р.Б. Нагрев при холодном волочении проволоки. - М.:Металлургиздат,1962. -86 с.
20. Орлов Г.А. Холодная прокатка и волочение труб: Учебное пособие. УрФУ. 2011.
21. Методические указания к выполнению экономической части выпускных работ (для бакалавров электроэнергетики). - Алматы: АУЭС, 2011.
22. Антипов С.В., Соловых С.Ю., Василевская С.П. Виды систем вентиляции и методика расчета воздухообмена в помещениях: Методические указания по курсу вентиляционные установки – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003.
23. Терёхин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink MATLAB 7.0.1: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
24. Терехов В.М., Осипов О.И. Система управления электроприводов: Учебник. – М.: Академия, 2005, - 296 с.
25. Шыпило В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. – М.: Энергия, 1968, - 400 с.
26. Удит Л.С., Мальцева О.П., Коянин Н.В. Проектирование автоматизированных электроприводов постоянного тока: Учебное пособие по курсовому проектированию. – Томск, изд. ТПИ им Кирова С.И., 1991, - 104 с.
27. Цыба Ю.А., Сагитов П.И. Результаты исследований системы автоматической настройки и стабилизации натяжения проволоки на волочильных станах. Инженерно – технический Журнал, №1 (07) КИП и Автоматика в Казахстане. – Алматы, март 2005. – С.49-50.
28. Цыба Ю.А. К вопросу оптимального управления и регулирования прямоточными волочильными станами. Труды 3-й международной научно-технической конференции «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях». – Алматы: АИЭС, 17-18 октября, 2002.
29. Сагитов П.И., Цыба Ю.А. Исследование динамики многодвигательных электроприводов прямоточных волочильных станов // Сб. научных трудов по материалам II Международной научно-технической конференции. Ч. 3. «Электромеханика, АИЭС. – Алматы, 2000. – С. 126-127.
30. Морозов Д.П., Кузиков В.С. Переходные процессы электропривода прямоточных волочильных станов многократного волочения. Изв. вузов. сер. // Электромеханика. - 1969 . - № 10. – 123 с.
31. Беспалов Б.В., Пусгильников В.М. О влиянии связи между противонапряжением и давлением наволоку на процесс стабилизации усилий волочения в прямоточном волочильном стане. /Мзвешья АНКазССР, №6 - Алма-Ата, 1969 - с.35.