

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

ФАКУЛЬТЕТ АСУ ТП

КАФЕДРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

К ЗАЩИТЕ ДОПУСТИТЬ:

ЗАВ. КАФЕДРОЙ _____ Кулик В.Д.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ДИПЛОМНОМУ ПРОЕКТУ

НА ТЕМУ: РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА РЫЧАЖНЫХ ЛЕТУЧИХ НОЖНИЦ

ДИПЛОМАНТ: _____ Жуков И. Б.

РУКОВОДИТЕЛЬ _____ Ковалев Е. Н.

КОНСУЛЬТАНТЫ:

1. <u>Безопасность объекта</u>	_____ Гордеев Л.Л.
2. <u>Экономика</u>	_____ Пугачев Ю.Г.
3	_____
4	_____
5	_____

С сайта автора
ibzh.eko3.ru/procat/in.htm

Санкт-Петербург
2002 год

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Кафедра автоматизированного электропривода и электротехники

“Утверждаю”

Зав. кафедрой _____

“ _____ “ _____ 2002 г.

З А Д А Н И Е
П О Д И П Л О М Н О М У П Р О Е К Т И Р О В А Н И Ю

Студента _____ Жукова И. Б. _____ группа (или шифр) _____ 553 _____

1. Тема проекта

Разработка системы электропривода рычажных летучих ножниц.

Утверждена приказом по ВУЗу № _____ от _____

2. Исходные данные по проекту

3. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

4. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

5. Консультанты по проекту (с указанием относящихся к ним разделов проекта)

6. Дата выдачи задания

7. Срок сдачи студентом законченного проекта

РУКОВОДИТЕЛЬ: _____ Ковалев Е.Н.
(подпись)

Задание принял к исполнению

(дата)

_____ / подпись студента/

- Примечание;
1. Это задание прилагается к законченному проекту и вместе с проектом представляется в ГЭК.
 2. Студент должен составить календарный график работы над проектом на весь период проектирования (с указанием сроков выполнения и трудоемкости этапов).

Содержание

Введение.	7
1. Общее описание летучих ножниц.	9
1.1 Описание установки датчиков путевой автоматизации.	9
1.2 Описание летучих ножниц.	12
1.3 Технологические данные летучих ножниц.	17
1.4 Требования к системе управления.	19
1.5 Описание тянуще-следящих роликов.	22
2. Техничко-экономическое обоснование.	24
2.1 Экономическая оценка.	24
2.2 Расчёт капитальных затрат.	25
2.3 Расчёт экономии ресурсов.	27
2.4 Расчёт экономии текущих затрат.	29
2.5 Расчёт и распределение прибыли.	31
2.6 Расчёт экономического эффекта.	32
2.7 Выводы.	33
3. Выбор законов регулирования.	34
3.1 Дифференциальное уравнение и функциональная схема механической части летучих ножниц.	34
3.2 Зоны регулирования.	36
3.3 Выбор закона управления в зоне регулирования мерной длины проката.	38

3.4	Выбор законов управления во время реза и синхронного движения с прокатом	52
4.	Выбор основного оборудования	54
4.1	Расчёт двигателя	54
4.2	Выбор оборудования	56
4.3	Разработка релейно-контакторной схемы	57
5.	Разработка системы управления.	65
5.1	Реализация системы управления на основе преобразователей TPD32	65
6.	Моделирование САУ	68
6.1	Идентификация объекта регулирования	68
6.2	Компенсация возмущений	75
6.2.1	Оценка возмущения	75
6.2.2	Первый вариант коррекции	77
6.2.3	Коррекция системы по второму варианту	78
6.2.4	Коррекция системы по приведённому ко входу возмущению. Первый вариант	79
6.2.5	Коррекция системы приведённому ко входу возмущению. Второй вариант	81
6.2.6	Сравнение вариантов компенсации возмущений	81
6.2.7	Компенсация возмущений в электроприводе постоянного тока	82
7.	Безопасность объекта.	84
7.1	Анализ вредных и опасных факторов на производстве	84
7.1.1	Шум и вибрация	85
7.1.2	Электрический ток	87
7.1.3	Высокая температура	90
7.1.4	Наличие подвижных вращающихся частей	91

7.2 Охрана труда	92
7.2.1 Безопасность ремонтных работ	92
7.2.2 Расчёт заземлений	93
7.3 Защита при чрезвычайных ситуациях.	96
7.3.1 Классификация чрезвычайных ситуаций	96
7.3.2 Защита при чрезвычайных ситуациях в военное время	97
8. Расчёт экономического эффекта.	104
8.1 Расчёт капитальных затрат	104
8.2 Расчёт экономии ресурсов	106
8.3 Расчёт экономии текущих затрат	108
8.4 Расчёт и распределение прибыли	109
8.5 Расчёт экономического эффекта	111
8.6 Выводы	112
Заключение	113
Список использованной литературы.	114

Приложения

Введение

Целью данной работы является разработка системы электропривода летучих рычажных ножниц обводной линии непрерывно-заготовочного стана НЗС 850/700/500 АО «Северсталь». Ножницы предназначены для порезки раската на мерные длины, а также для зачистки переднего и, при необходимости, заднего концов раската.

В схему управления процессом резания кроме ножниц включены тянуще-следящие ролики с датчиками импульсов, секции рольганга перед и за ножницами, датчики путевой автоматизации и система оптимального раскроя.

Тянуще-следящие ролики установлены перед летучими ножницами обводной линии и предназначены для подачи раската в ножницы с постоянной скоростью и измерения его длины. Раскат к тянуще-следящим роликам подаётся по рольгангам обводной линии.

Регулирование мерной длины порезки предусматривается за счёт снижения частоты вращения двигателей в период между резами с выравниванием скоростей ножей и проката.

Механизм обладает переменными моментом инерции и моментом сопротивления холостого хода, заданными в табличной форме в функции угла поворота кривошипа.

При проектировании электропривода летучих ножниц предусмотрена реализация энергосберегающих режимов управления при регулировании мерной длины реза, кроме того, требуется обеспечить минимальный износ механизма.

Для выполнения дипломного проекта необходимо выполнить следующие задачи: анализ объекта, разработку закона управления электроприводом в режиме, регулирования мерной длины проката, разработку закона управления электроприводом в режиме реза, выбор электрооборудования, разработку системы управления летучими ножницами технико-экономическое обоснование, безопасность объекта.

Дипломный проект выполнялся на основе технического задания на про-

ектирование электропривода летучих ножниц обводной линии стана №479.042-ТЗ и технического задания на проектирование тянуще-следящих роликов перед летучими ножницами обводной линии №479.054-ТЗ.

1. Общее описание летучих ножниц

1.1 Описание установки датчиков путевой автоматизации

В схему управления процессом резания включены:

- тянуще-следящие ролики с датчиками импульсов, выполняющие подачу раската в летучие ножницы, а также измерение скорости и длины раската;
- двухроликовая секция рольганга, транспортирующая раскат в ножницы;
- летучие ножницы, выполняющие порезку проката;
- трёхроликовая секция рольганга за ножницами, транспортирующая отрезанные заготовки;
- датчики путевой автоматизации, определяющие температуру раската, размер отрезанных заготовок, положение проката и пр.
- система оптимального раскроя.

Расположение датчиков путевой автоматизации относительно осей тянуще-следящих роликов приведено на рис. 1.1. На рисунке обозначены:

ФГ1, ФГ2 и ФГ3 — фотоголовки для определения длины раската после I-ой непрерывной группы клетей при работе автоматической системы раскроя проката при порезке его на летучих ножницах основной или обводной линии. Работают в комплексе с генератором импульсов и измерителем скорости проката.

ФП1 и ФП2 — фотопирометры для контроля температуры раската (головной и хвостовой части) перед порезкой на летучих ножницах обводной линии. При температуре раската менее 850°С подаётся сигнал о подаче захлаженного проката, и его порубка не производится.

ФГ4 — фотоголовка, дающая сигнал на опускание верхнего тянуще-следящего ролика обводной линии по переднему концу раската.

ФГ5 — фотоголовка, используемая для:

а) определения момента прохождения заднего конца раската для:

- подъёма верхнего тянуще-следящего ролика;
- пропуска реза на мерную длину, если остаток раската меньше 4,7 м, когда нет зачистки заднего конца, или 4,9 м при зачистке заднего конца;
- подачи команды от заднего конца (при отсутствии его зачистки) приводу ножниц на приведение в исходное положение ножей, т. к. потом пауза в работе ножниц ~ 20 с;
- для подготовки системы управления приводом ножниц при зачистке заднего конца (при необходимости);

б) включение датчика импульсов тянуще-следящих роликов, контролирующего общую длину раската.

ФГ6 — фотоголовка, дающая сигнал на зачистку:

а) переднего конца (по воздействию на неё переднего конца);

б) заднего конца (по воздействию на неё заднего конца) при необходимости.

ФГ7, ФГ8 и ФГ9 — фотоголовки для контроля длины отрезанных заготовок и для подсчёта количества заготовок, полученных с одного раската. Работают в комплексе с генератором импульсов и измерителем скорости заготовки.

Расстояние между фотоголовкой ФГ6 и осью рычажных летучих ножниц составляет $L_{\Phi} = 2\,300$ мм.

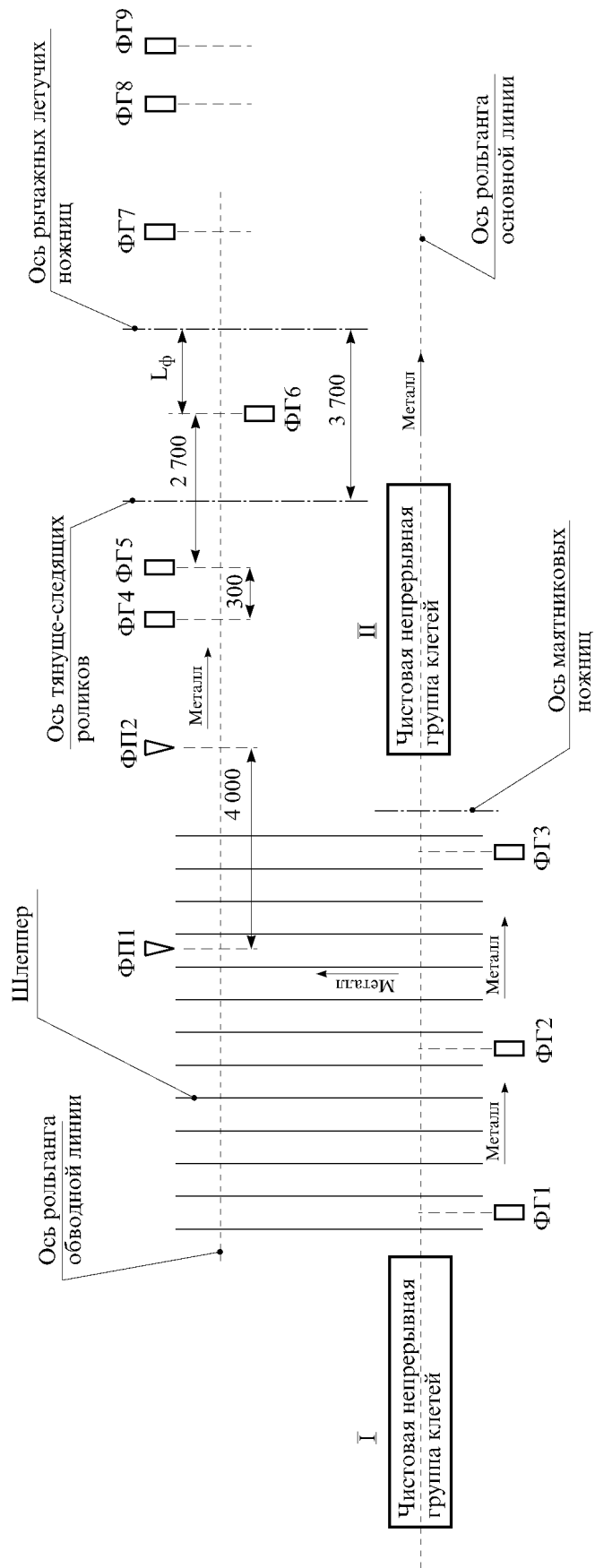


Рис. 1.1.1. Расположение датчиков путевой автоматизации относительно осей рычажных ножиц и тянуще-следящих роликов

1.2 Описание летучих ножниц

Летучие рычажные ножницы с усилием реза до 4 000 кН устанавливаются на обводной линии НЗС и служат для порезки раската на мерные длины, а также для зачистки переднего и, при необходимости, заднего концов раската. Может быть режим, когда зачистка заднего конца не производится (этот режим выбирается оператором). Упрощённый эскиз механизма изображён на рис. 1.2.

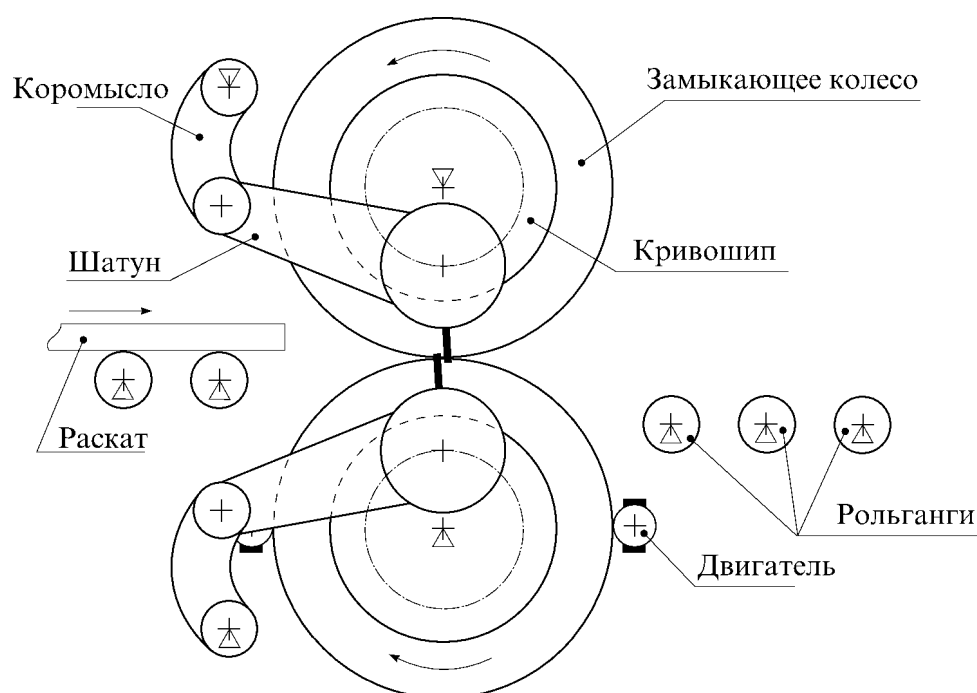


Рис. 1.2. Схема станка

Рабочая клетка ножниц выполнена с рычажным (кривошипно-коромысловым) механизмом резания, состоящим из кривошипов, шатунов и коромысел. Верхний и нижний ножи, имеющие в зоне резания почти поступательную траекторию движения, установлены на шатунах, связанных с коромыслами и кривошипами. Кривошипные валы связаны друг с другом замыкающими зубчатыми передачами (колёсами) с передаточным отношением $i_{зк} = 1$. На верхнем кривошипном валу установлено подпружиненное колесо для выборки люфтов в замыкающей передаче.

Нижний кривошипный вал через редуктор рабочей клетки ножниц с передаточным отношением $i_{кр} = 5,21$ и зубчатые муфты связаны с двумя электродвигателями постоянного тока. Использование двух двигателей, а не одного позволяет уменьшить суммарный момент инерции механизма.

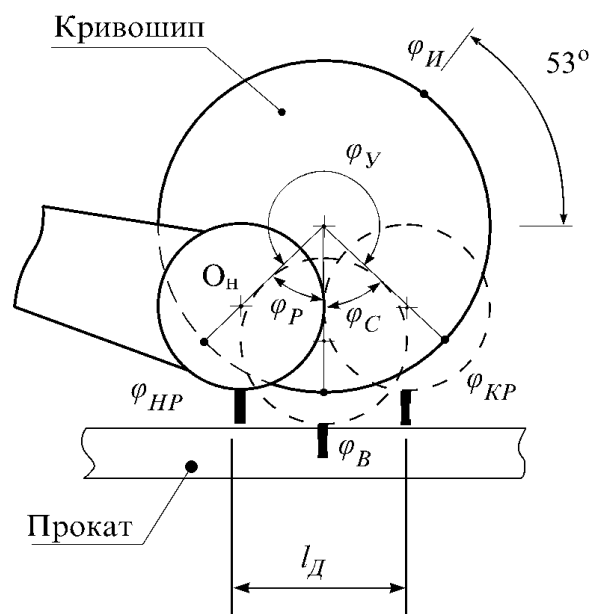


Рис. 1.3. Основные положения ножа. На рисунке обозначены φ_U — зона регулирования; $\varphi_R = 30^\circ$ — зона рубя; $\varphi_C = 30^\circ$ — зона, на которой нож движется синхронно прокату; $\varphi_{И} = 53^\circ$ — исходное положение, в котором нож находится между циклами поступления раската; $\varphi_{НР}$ — положение, из которого начинается руб; $\varphi_{В}$ — положение ножей в выключенном состоянии электропривода, соответствует окончанию зоны рубя и началу зоны синхронного движения с прокатом; $\varphi_{КР}$ — положение, в котором начинается зона регулирования φ_U .

На свободных концах валов двигателей должны быть установлены датчики скорости (например, цифровые энкодеры) и центробежные реле.

Тип редуктора — одноступенчатый, циклический, с передаточным числом $i_{кр} = 5,21$ с двумя ведущими шестернями на нижнем кривошипном валу.

Режим работы электропривода ножниц повторно-кратковременный, нормально нереверсивный, с электрическим торможением.

Для зачистки переднего конца предусматривается запуск ножниц из исходного положения на каждый раскат (см. рис. 1.3). Регулирование мерной длины порезки предусматривается за счёт снижения частоты вращения двигателей в период между резами с выравниванием скоростей ножей и проката таким образом, чтобы окружная скорость ножей превышала скорость проката на 7,5 % в момент начала реза, т. к. в дальнейшем идёт просадка скорости ножей, и нельзя допускать, чтобы прокат давил на ножи.

При необходимости зачистки заднего конца производится регулирование частоты вращения перед последним резом так, чтобы последняя мерная длина была не менее 4,7 м из условия прохождения через летучие ножницы, в противном случае зачистка заднего конца не производится.

Задание частоты вращения ножниц в режиме выравнивания скоростей ножей (с учётом обгона 7,5 %) и проката, а также измерение положения проката производится с помощью датчиков тянуще-следящих роликов.

Управление ножницами производится с поста управления ПУ9.

Для контроля подачи смазочного материала к редуктору привода ножниц на линии привода (на корпусе редуктора) установлен манометр показывающий сигнализирующий ДМ201.0С4-6 кгс/см² – 1,5.

Регулирование длины пореза осуществляется за счёт снижения частоты вращения привода в период между резами, т. е. летучие ножницы работают в режиме электрического выравнивания скоростей ножей и проката.

По технологии по обводной линии и без порезки может проходить прокат круглого сечения диаметром 170...200 мм.

Зависимость суммарного статического момента на валах верхнего и нижнего кривошипов $M_{СМEX}$ приведена в табл. 1.1.

В табл. 1.2 приведён суммарный момент инерции механизма и двух двигателей J_{2-2} , приведённый к валу одного двигателя в функции угла поворота кривошипа.

Таблица 1.1. Суммарный статический момент $M_{СМЭХ}$ на валах верхнего и нижнего кривошипов в функции угла поворота кривошипа из исходного положения φ .

φ , град	$M_{СМЭХ}$, кН · м
0	0,027
7	0,026
37	0,012
67	-0,039
97	-0,093
127	0,036
157	0,059
187	30,316
192	2 392,1
197	1 935,7
202	1 464,4
207	982,2
212	492,4
217	-0,0007
222	-0,0066
227	-0,0128
232	-0,0189
237	-0,0249
242	-0,0307
247	-0,0358
277	-0,0378
307	0,0102
337	0,0295

Таблица 1.2. Суммарный момент инерции механизма и двух двигателей J_{2-2} , приведённый к валу одного двигателя, в функции угла поворота кривошипа φ из исходного положения.

φ , град	J_{2-2} , кг · м ²
0	2 471
7	2 472
37	2 488
67	2 592
97	2 488
127	2 461
157	2 500
187	2 509
192	2 504
197	2 499
202	2 496
207	2 493
212	2 490
217	2 490
222	2 489
227	2 488
232	2 487
237	2 485
242	2 484
247	2 482
277	2 467
307	2 466
337	2 464

1.3 Технологические данные летучих ножниц

Усилие резания максимальное, кН	4 000
Сечение раската, мм	$200 \pm 3,2 \times 200 \pm 3,2$
Масса раската максимальная, кг	8 820
Длина раската, м	43,8
Скорость движения раската, м/с	2,3
Диапазон мерных длин, м	4...6
Допуск на длину, мм	+50
Кратность порезки на мерные длины, мм	10
Минимальная длина последней обрезанной заготовки, м	4,7
Длина отрезаемого конца, мм:	
• переднего	100...400
• заднего	200...300
Температура раската при резе, °С	850...950
Цикл поступления раскатов, с	41
Коэффициент обгона ножей	1,075
Максимальный статический момент на нижнем кривошипном валу, кН · м	
• от электропривода	1 480
• от максимального усилия резания	2 550
Максимальное сопротивление деформации при температуре резания 850...950°С и сечении проката 200×200 мм ²	176 Н/мм ²
Передаточное число от привода к замыкающей передаче	5,21
Минимальная длина проката, транспортируемая через ножницы	4,7 м
Номинальный боковой зазор между режущими кромками ножей в исходном положении	4 мм

Режим работы привода— повторно-кратковременный 176 включений в час в режиме электрического выравнивания скоростей.

Продолжительность включения ПВ:

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{МАШ}}}{t_{\text{ЦИКЛА}}} = \frac{20}{41} = 49 \%,$$

где $t_{\text{МАШ}} = 20$ с — «машинное время», время работы машины; $t_{\text{ЦИКЛА}} = 41$ с — продолжительность цикла поступления раската.

1.4 Требования к системе управления

Электропривод летучих ножниц предусматривается по системе «реверсивный тиристорный преобразователь – двигатель» с однозонным регулированием скорости и микропроцессорным управлением в режиме позиционирования.

Режим работы электропривода — повторно–кратковременный, нормально нереверсивный, с электрическим торможением; должен предусматриваться аварийный реверс.

Система управления предусматривает:

- Задание частоты вращения от тахогенератора тянуще–следящих роликов в режиме выравнивания скоростей ножей и проката (с учётом обгона 7,5 % к началу реза).
- Измерение положения переднего конца проката, мерной длины реза, а также положения заднего конца проката с помощью фотодатчиков и импульсного датчика Е6С–СWZ3С тянуще-следящих роликов.
- Установку ножей в исходное положение после разрезания раскатов, а также по команде оператора перед началом работы, а также регулирование длины отрезаемого переднего конца проката в пределах 100...400 мм при запуске ножниц из исходного положения на каждый раскат;
- Регулирование мерной длины реза за счёт снижения частоты вращения двигателей в период между резами при управлении в режиме позиционирования с допуском +50 мм.
- Зачистку заднего конца (при необходимости) проката в заданном диапазоне 200...300 мм, если последняя мерная длина не менее 4,7 м (режим зачистки выбирается оператором) ¹.
- Задание мерной длины реза в пределах 4...6 м с дискретностью 10 мм.
- Задание ручного режима работы с заданной мерной длиной реза проката и автоматической зачисткой переднего и, при необходимости, заднего концов проката, а также задание режима работы в системе безостаточного (безотходного) раскроя проката.

¹Обрезная заготовка не должна быть меньше 4,7 м из условия прохождения через летучие ножницы.

- Совмещение системы управления летучих ножниц с системой оптимального раскроя раската, обеспечивающей ввод задания на длину реза каждой следующей заготовки из системы раскроя в момент отрезания предыдущей.
- Синхронизация линейной скорости ножа в направлении движения раската, в момент начала реза (с учётом обгона), со скоростью тянуще-следящих роликов в режиме реза переднего конца и порезки на заданные длины.
- Синхронизация 3-х роликовой секции рольганга за летучими ножницами со скоростью тянуще-следящих роликов и двух роликовой секции рольганга перед летучими ножницами в момент обрезки заднего конца, т. к. последняя заготовка выходит при этом из тянуще-следящих роликов.
- Ручное управление приводом летучих ножниц, обеспечивающее реверс ножей на ползучей скорости.

При проектировании электропривода летучих ножниц предусмотреть реализацию энергосберегающих режимов управления при регулировании мерной длины реза.

Схема управления должна обеспечивать следующие блокировки и сигнализацию:

- блокировку, запрещающую включение привода ножниц при давлении масла в линии ниже 1 кгс/см^2 ;
- подачу аварийного сигнала (звукового и светового) на пост управления ПУ9 при снижении давления масла в линии подвода жидкости ниже 1 кгс/см^2 во время работы ножниц и выключения привода ножниц через 30 сек после подачи аварийного сигнала, если давление в линии не восстановилось до нормального значения.
- Сигнализация исходного положения ножей.
- Сигнализация заданного интервала пореза и фактических длин.
- Запрет транспортировки проката по рольгангам летучих ножниц, когда ножи сведены (при неработающем приводе летучих ножниц).
- Запрет работы привода ножниц, если фотопирометры сигнализируют о поступлении захоложденного проката.

Управление ножницами ручное и полуавтоматическое производится с поста управления ПУ9.

1.5 Описание тянуще-следающих роликов

Тянуще-следающие ролики установлены перед летучими ножницами обводной линии и предназначены для транспортирования раската к летучим ножницам и измерения скорости движущегося раската и его длины.

В состав тянуще-следающих роликов входят следующие механизмы:

- механизм вращения роликов;
- механизм прижима роликов.

Управление тянуще-следающими роликами предусматривается с поста управления летучими ножницами ПУ9.

Раскат по рольгангам обводной линии подаётся к тянуще-следающим роликам.

После захода раската в ролики, поршни гидроцилиндров поднимаются и ролик опускается на прокат. Сигнал на опускание и подъём ролика подаётся от фотодатчика ФГ4, установленного перед роликами, при воздействии на него переднего и заднего концов раската.

Благодаря прижиму раската с помощью гидроцилиндров, обеспечивается постоянный контакт раската с роликами, чем исключается его пробуксовка в роликах и создаётся возможность точного замера длины и скорости прохождения раската в роликах.

Поступивший в тянущие ролики раскат подаётся к летучим ножницам, где на ходу производится обрезка переднего конца и затем порезка его на мерные длины.

Привод обоих тянуще-следающих роликов (верхнего и нижнего) производится от электродвигателей постоянного тока типа Д814 в продуваемом исполнении с независимой вентиляцией через раздаточный и одноступенчатый цилиндрический редуктор с передаточным числом $i_{\text{тср}} = 3,375$.

На приводе установлен тахогенератор ТП212 для согласования скорости летучих ножниц со скоростью тянуще-следающих роликов.

Для измерения длины и скорости движущегося раската в автоматизированной системе управления порезкой раската установлен импульсный датчик типа Е6С-СWZ5С фирмы «Omron» с полумуфтой типа Е69-СО6В.

Режим работы электродвигателя — длительный. Скорость ролика 2,3 м/с соответствует номинальной частоте вращения двигателя 500 об/мин.

Схема управления тянуще-следающими роликами предусматривает:

- аварийный реверс и электрическое торможение электродвигателя;

- регулирование скорости от 1,7 до 2,3 м/с с изменением напряжения на якоре двигателя.

Механизм прижима роликов предназначен для зажатия раската тянущими роликами для обеспечения надёжной без пробуксовки подачи раската в летучие ножницы с заданной скоростью.

Механизм представляет собой два гидроцилиндра, поршни каждого из которых связаны тягой с одним концом рычага, установленным на валу верхнего тянущего ролика.

Привод гидроцилиндра осуществляется от двух гидрораспределителей - 2Р203–БЕ–574АРГ24Н1ОУХЛ4 с одним электромагнитом постоянного тока напряжением 24 В каждый.

Предусматривается два режима управления гидроцилиндрами:

- с усилием прижатия проката 12 т (с противодавлением);
- с усилием прижатия проката 24 т (без противодавления).

Переключение с одного усилия прижатия на другое и обратно должно производиться в неоперативном режиме управления при поднятом верхнем ролике, т. е. при отключённых электромагнитах YA1 и YA2.

В этом случае жидкость под давлением подаётся в штоковые полости гидроцилиндров и ролик поднимается в верхнее крайнее положение.

При включении электромагнита YA1 жидкость под давлением подаётся в поршневые полости гидроцилиндров и ролик прижимается к прокату с усилием 12 т.

При включении электромагнитов YA1 и YA2 жидкость давление жидкости в штоковых полостях снижается и ролик прижимается к прокату с усилием 24 т.

На линиях трубопроводов от гидрораспределителей до гидроцилиндров установлены обратные клапаны с дросселями с целью уменьшения гидроударов в момент переключения гидрораспределителя, регулирования оптимальной скорости поворота рычага ролика и относительно плавного ускорения его при включении гидрораспределителя.

2. Технико-экономическое обоснование

2.1 Экономическая оценка

При проектировании электропривода рассмотрим с экономической точки зрения два преобразователя «TPD» и «FlexPack» и системы управления, поставляемые к данным преобразователям фирмами Консис и СПБЭК.

1. преобразователи TPD, системы управления фирмы СПБЭК;
2. преобразователи FlexPack, системы управления фирмы Консис.

2.2 Расчёт капитальных затрат

Величина капитальных затрат (K_O) определяется по формуле

$$K_O = K_{OF} + K_{ПР}, \quad (2.1)$$

где

K_{OF} — капитальные вложения в основные производственные фонды, руб;

$$K_{OF} = K_{OB}, \quad (2.2)$$

где K_{OB} — капитальные вложения в оборудование, руб;

$$K_{OB} = \sum_{i=1}^n N_i \times C_{gi} \times (1 + \alpha_1), \quad (2.3)$$

где n — количество типов оборудования; N_i — количество единиц оборудования, средств автоматизации i -го наименования; C_{gi} — договорная цена оборудования i -го наименования, руб; α_1 — доля от стоимости оборудования, учитывающая расходы на его транспортировку, монтаж, наладку, доли ед.; для ТЭО $\alpha_1 = 0,3$;

$K_{ПР}$ — предпроизводственные расходы (на проведение НИОКР, маркетинговых исследований, разработку проектов, программ и пр.). На стадии ТЭО

$$K_{ПР} \approx (0,1 \dots 0,6)K_{OB}.$$

Стоимость комплекса технических средств по варианту №1 определяется по приведённой ниже таблице №2.1.

Таблица 2.1. Средства автоматизации фирмы СПБЭК

Наименование	стоимость	Ед. Изм.
Контроллер GE-Fanuc 90—70 с программным обеспечением	210 000	руб.
Преобразователь постоянного тока TPD	998 550	руб.
Двигатель постоянного тока	3 120 000	руб.
Автоматические выключатели	65 000	руб.
Датчики Leine&Linde	35 000	руб.
Панель оператора	969 000	руб.
Шкаф электромонтажный	51 000	руб.

На основании формулы (2.3) и таблицы №2.1 рассчитаем капитальные затраты на оборудование

$$K_{OB} = (1 \cdot 210\,000 + 2 \cdot 998\,550 + 2 \cdot 3\,120\,000 + 1 \cdot 65\,000 +$$

$$+3 \cdot 35\,000 + 1 \cdot 969\,000 + 1 \cdot 51\,000) \cdot (1 + 0,3) = 11\,460\,800 \text{ руб.}$$

Тогда предпроизводственные расходы составят

$$K_{\text{ПР}} = 0,4 \cdot 11\,460\,800 = 4\,584\,320 \text{ руб.}$$

Капитальные вложения в основные производственные фонды составят

$$K_{\text{ОФ}} = K_{\text{ОБ}} = 11\,460\,800 \text{ руб.}$$

Согласно формуле (2.1) величина капитальных затрат составит

$$K_{\text{О}} = K_{\text{ОФ}} + K_{\text{ПР}} = 11\,460\,800 + 4\,584\,320 = 16\,045\,120 \text{ руб.}$$

Стоимость комплекса технических средств по варианту №2 определяется по приведённой ниже таблице №2.2.

Таблица 2.2. Средства автоматизации фирмы Консис

Наименование	стоимость	Ед. Изм.
Контроллер Festa с программным обеспечением	225 500	руб.
Преобразователь постоянного тока FlexPack	1 358 550	руб.
Двигатель постоянного тока	3 120 000	руб.
Автоматические выключатели	59 000	руб.
Датчики Omron	109 500	руб.
Панель оператора	54 000	руб.

На основании формулы (2.3) и таблицы №2.1 рассчитаем капитальные затраты на оборудование

$$K_{\text{ОБ}} = (1 \cdot 225\,500 + 2 \cdot 1\,358\,550 + 2 \cdot 3\,120\,000 + 1 \cdot 59\,000 + 3 \cdot 42\,000 + 1 \cdot 109\,500 + 1 \cdot 54\,000) \cdot (1 + 0,3) = 12\,772\,630 \text{ руб.}$$

Тогда предпроизводственные расходы составят

$$K_{\text{ПР}} = 0,4 \cdot 12\,772\,630 = 5\,109\,052 \text{ руб.}$$

Капитальные вложения в основные производственные фонды составят

$$K_{\text{ОФ}} = K_{\text{ОБ}} = 12\,772\,630 \text{ руб.}$$

Согласно формуле (2.1) величина капитальных затрат составит

$$K_{\text{О}} = K_{\text{ОФ}} + K_{\text{ПР}} = 12\,772\,630 + 5\,109\,052 = 17\,881\,682 \text{ руб.}$$

2.3 Расчёт экономии ресурсов

В дипломном проекте были рассмотрены два закона управления электроприводом в зоне регулирования: закон по полиному девятой степени с оптимизацией потерь в меди и закон по полиному седьмой степени без оптимизации. Было показано, что рассеиваемая энергия при применении закона с оптимизацией меньше на $23 \dots 32 \%$ в зависимости от мерной длины, чем при применении закона без оптимизации.

Мощность каждого из двух двигателей

$$P_N = 1\,250 \text{ кВт.}$$

Загрузка двигателей по мощности за один цикл в среднем

$$Q_{O\%} = 50,2 \%$$

Продолжительность работы двигателей в цикле

$$t_{\text{раб}} = l_{\text{п}}/v_{\text{п}} = \frac{43,8}{2,3} = 19 \text{ с,}$$

где $l_{\text{п}} = 43,8 \text{ м}$ — длина проката; $v_{\text{п}} = 2,3 \text{ м/с}$ — скорость движения проката. При этом потребляемая за один цикл электроэнергия составляет

$$Q_{1\text{ц}} = 2P_N \cdot Q_{O\%} \cdot \frac{t_{\text{раб}}}{3\,600} = 2 \cdot 1\,250 \cdot 50,2 \cdot \frac{19}{3\,600} = 6,64 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

При использовании закона регулирования без оптимизации загрузка двигателей в зоне регулирования составляет

$$Q_{60\%} = 29,5 \%$$

При использовании закона регулирования с оптимизацией загрузка двигателей в зоне регулирования составляет

$$Q_{\text{опт}\%} = 24,5 \%$$

Средняя длительность одного регулирования мерной длины

$$t_{1\text{рег}} = 2 \text{ с.}$$

В среднем раскат рубится на 8 заготовок. При этом, производится 9 регулирования мерной длины. Общая продолжительность регулирования за период реза раската

$$t_{\text{рег}} = 9t_{1\text{рег}} = 9 \cdot 2 = 18 \text{ с.}$$

Экономия электроэнергии за один цикл составляет

$$Q_{\text{ЭК}} = 2P_N \cdot (Q_{\text{б0\%}} - Q_{\text{опт\%}}) \cdot \frac{t_{\text{раб}}}{3600} = \\ = 2 \cdot 1250 \cdot (0,295 - 0,245) \cdot \frac{19}{3600} = 0,62 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Экономия электроэнергии за один цикл в процентах

$$Q_{\text{ЭК\%}} = \frac{Q_{1\text{ЭК}}}{Q_{1\text{ц}}} = \frac{0,62}{6,64} = 9,41 \text{ \%}.$$

Средний цикл поступления раскатов

$$t_{\text{ц}} = 50 \text{ с}.$$

Предприятие работает круглосуточно, поэтому в сутки количество циклов в среднем составляет

$$n = \frac{24 \cdot 3600}{t_{\text{ц}}} = \frac{24 \cdot 3600}{50} = 1728.$$

Экономия электроэнергии в год составляет

$$Q_{\text{ЭКГ}} = n \cdot Q_{\text{ЭК}} \cdot 365 = 1728 \cdot 0,62 \cdot 365 = 394200 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

или в денежном выражении при тарифной ставке $\text{Ц}_{\text{э}} = 1,25 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}$

$$S_{\text{э}} = Q_{\text{ЭКГ}} \cdot \text{Ц}_{\text{э}} = 394200 \cdot 1,25 = 492750 \text{ руб/год}.$$

Кроме того, выбранный закон управления обеспечивает плавность пуска и торможения, что в свою очередь, ведёт к уменьшению износа механизма.

В частности затраты времени на устранение отклонения зазора между ножами от номинального составляют 130 ч/год у аналогичного оборудования.

Применение алгоритмов управления, обеспечивающих плавность пуска и остановки по сравнению с обычными позволяет затраты времени до 33 ч. По статистическим данным АО «Северсталь» простои аналогичного оборудования наносит предприятию убытки в размере 100000 руб/ч. Таким образом, от внедрения данного алгоритма управления расходы, связанные с простоями оборудования уменьшаются на

$$S_{\text{ПР}} = (130 - 33) \cdot 100000 = 9700000 \text{ руб/год}.$$

Итого, экономия ресурсов составляет

$$S = S_{\text{э}} + S_{\text{ПР}} = 100000 + 9700000 = 10192750 \text{ руб/год}.$$

2.4 Расчёт экономии текущих затрат

Расчёт экономии текущих затрат (ΔC), руб/год:

$$\Delta C = S - (\Delta C_A + \Delta C_{ТО}), \quad (2.4)$$

где S — экономия ресурсов живого и овеществлённого труда, которая может быть получена по результатам внедрения технического или организационного решения, руб/год. Она рассчитывается путём умножения фактической экономии ресурсов (топливно-энергетических, заработной платы и др.) на договорную цену ресурсов или тарифные ставки. На стадии ТЭО экономия ресурсов может быть рассчитана ориентировочно по исходным данным, полученным на преддипломной практике. При расчёте экономического эффекта расчёт производится по фактическим данным, полученным при разработке дипломного проекта.

Дополнительные амортизационные отчисления, ΔC_A руб/год:

$$\Delta C_A = K_{ОБ} \cdot \frac{H_{АО}}{100 \%}, \quad (2.5)$$

где $H_{АО} = 10 \%$ — норма амортизационных отчислений на реновацию.

Вариант первый

$$\Delta C_A = K_{ОБ} \cdot \frac{H_{АО}}{100 \%} = 11460800 \cdot \frac{10 \%}{100 \%} = 1146080 \text{ руб/год.}$$

Вариант второй

$$\Delta C_A = K_{ОБ} \cdot \frac{H_{АО}}{100 \%} = 12772630 \cdot \frac{10 \%}{100 \%} = 1277263 \text{ руб/год.}$$

Дополнительные расходы на текущий ремонт, техническое обслуживание определяются по формуле $\Delta C_{ТО}$

$$\Delta C_{ТО} \approx (0,03 \dots 0,05) \cdot K_{ОБ}. \quad (2.6)$$

Вариант первый

$$\Delta C_{ТО} = 0,03 \cdot K_{ОБ} = 0,03 \cdot 11460800 = 343824 \text{ руб/год.}$$

Вариант второй

$$\Delta C_{ТО} = 0,03 \cdot K_{ОБ} = 0,03 \cdot 12772630 = 383178,9 \text{ руб/год.}$$

Вычислим теперь экономию текущих затрат Вариант первый

$$\Delta C = 10\,192\,750 - (1146080 + 343824) = 8702846 \text{ руб/год.}$$

Вариант второй

$$\Delta C = 10\,192\,750 - (1\,277\,263 + 383\,178,9) = 8\,702\,846 \text{ руб/год.}$$

Балансовая прибыль

$$\Pi_6 = \Delta C.$$

Прибыль, которая может быть получена по результатам внедрения проектируемого мероприятия определяется формулой

$$\Pi_P = 0,8 \cdot \Pi_6.$$

Вариант первый

$$\Pi_P = 0,8 \cdot \Pi_6 = 0,8 \cdot 8\,702\,846 = 6\,962\,277 \text{ руб/год.}$$

Вариант второй

$$\Pi_P = 0,8 \cdot \Pi_6 = 0,8 \cdot 8\,702\,846 = 8\,532\,308 \text{ руб/год.}$$

2.5 Расчёт и распределение прибыли

Распределение прибыли производится по следующим формулам: Норма налога на прибыль $\alpha_8 = 0,24$. Налог на прибыль

$$H_{\text{ПР}} = \alpha_8 \cdot \text{ПР};$$

$$H_{\text{ПР1}} = 6962277 \text{ руб/год};$$

$$H_{\text{ПР2}} = 6825846 \text{ руб/год};$$

Норма налога на имущество $\alpha_9 = 0,02$. Величина налога на имущество

$$H_{\text{И}} = \alpha_9 \cdot K_{\text{ОФ}};$$

$$H_{\text{И1}} = 229216 \text{ руб/год};$$

$$H_{\text{И2}} = 255453 \text{ руб/год};$$

Норма налога местных сборов $\alpha_{10} = 0,05$. Величина местных налогов и сборов

$$H_{\text{М}} = \alpha_{10} \cdot \text{ПР};$$

$$H_{\text{М1}} = 248114 \text{ руб/год};$$

$$H_{\text{М2}} = 341292 \text{ руб/год}.$$

Прибыль, остающаяся в распоряжении предприятия

$$\text{ПРП} = \text{ПР} - (H_{\text{ПР}} + H_{\text{М}} + H_{\text{И}});$$

$$\text{ПРП1} = 4714001 \text{ руб/год};$$

$$\text{ПРП2} = 4590898 \text{ руб/год}.$$

2.6 Расчёт экономического эффекта

Общая сумма прибыли, остающаяся в распоряжении предприятия за расчётный период выпуска продукции (или нормативного срока службы оборудования) по проектируемому варианту (T лет), равная Π_S и общих амортизационных отчислений за этот период A_S , определяется по формуле

$$\Pi_S + A_S = \sum_{t=1}^T (\Pi_{PA} + A) \cdot \alpha_t = \frac{\Pi_{PP_1} + A_1}{1 + E} + \frac{\Pi_{PP_2} + A_2}{(1 + E)^2} + \dots + \frac{\Pi_{PP_T} + A_T}{(1 + E)^T}, \quad (2.7)$$

где α_t — коэффициент дисконтирования, определяемый для случая, когда норма дисконта (E — равна величине ссудного процента, устанавливаемого центральным банком РФ — 0,25) не меняется.

Условие эффективности при этом проектируемого варианта имеет вид

$$\Pi_S + A_S \geq K_0 \quad (2.8)$$

$\Pi_{pp} + A_p$ — чистый дисконтный поток;

$\Pi_{pp1} = 4714001$ руб/год — годовой прирост прибыли по варианту №1;

$\Pi_{pp2} = 4590898$ руб/год — годовой прирост прибыли по варианту №2;

$T = 10$ лет — срок для расчёта экономического эффекта;

$A_{p1} = 6515150$ руб/год — амортизационные отчисления за год для варианта №1;

$A_{p2} = 1\,788\,168$ руб/год — амортизационные отчисления за год для варианта №2;

Экономический эффект ($\mathcal{E}_{руб}$) определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{руб} = (\Pi_S + A_S) - K_0. \quad (2.9)$$

Экономический эффект за десять лет составит по варианту №1

$$\mathcal{E}_{руб1} = 6515150 \text{ руб.}$$

Экономический эффект за десять лет составит №2

$$\mathcal{E}_{руб2} = 4894796 \text{ руб.}$$

2.7 Выводы

Исходя из оценки экономической эффективности проектирование электропривода по первому варианту выгоднее, чем по второму. Экономический эффект составляет

$$\mathcal{E}_{\text{руб}} = 6515150 \text{ руб.}$$

Таким образом, выбираем оборудование, поставляемое фирмой СПБЭК, как наиболее экономически выгодное.

Окончательно результаты приведены в таблицах №№2.3 и 2.4

Таблица 2.3. Экономические показатели первого проектируемого варианта (оборудование фирмы СПБЭК)

Наименование показателя	Единицы измерения	Численное значение
Экономия ресурсов	руб/год	10192750
Амортизационные отчисления	руб/год	1 604 512
Прибыль, остающаяся в распоряжении предприятия	руб/год	4714001
Капитальные затраты	руб.	16 045 120
Экономический эффект	руб.	6515150

Таблица 2.4. Экономические показатели второго проектируемого варианта (оборудование фирмы Консис)

Наименование показателя	Единицы измерения	Численное значение
Экономия ресурсов	руб/год	10192750
Амортизационные отчисления	руб/год	1 788 168
Прибыль, остающаяся в распоряжении предприятия	руб/год	4590898
Капитальные затраты	руб.	17 881 682
Экономический эффект	руб.	4894796

3. Выбор законов регулирования

3.1 Дифференциальное уравнение и функциональная схема механической части летучих ножниц

Построим функциональную схему механической части летучих ножниц. Для этого запишем дифференциальное уравнение движения кривошипного вала

$$\frac{dE}{dt} = M\omega,$$

где E — кинетическая энергия кривошипного вала; M — суммарный момент сил, приведённый к кривошипному валу; ω — скорость вращения кривошипного вала.

Учитывая, что

$$E = \frac{J \cdot \omega^2}{2},$$

находим

$$M(t) \cdot \omega(t) = \frac{d}{dt} \frac{J \cdot \omega^2(t)}{2} = \dot{J}(t) \cdot \frac{\omega^2(t)}{2} + \frac{2\omega(t) \cdot \dot{\omega}(t) \cdot J(t)}{2};$$

$$M(t) = \dot{J}(t) \cdot \frac{\omega(t)}{2} + \dot{\omega}(t) \cdot J(t).$$

Здесь J — момент инерции механизма, приведённый к кривошипному валу.

Дифференциальное уравнение движения будет иметь вид

$$\ddot{\varphi}(t) \cdot J(t) + \dot{J}(t) \cdot \frac{\dot{\varphi}(t)}{2} = M(t),$$

где φ — угол поворота кривошипа.

В нашем случае момент инерции J зависит не явно от времени t , а от угла поворота кривошипа $\varphi(t)$. Таким образом, уравнение движения примет

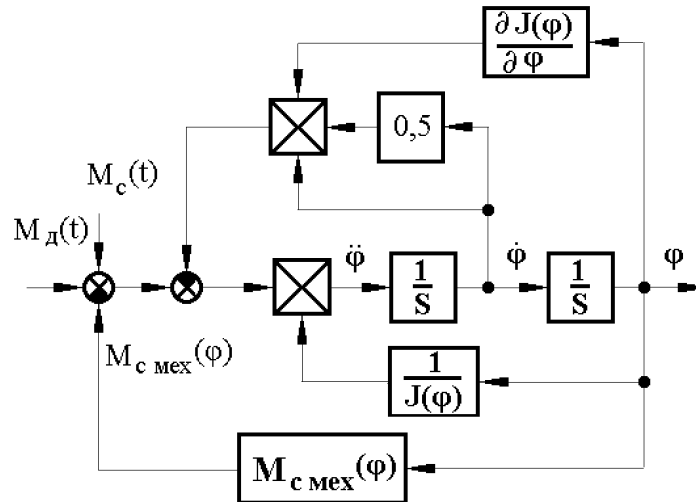


Рис. 3.1. Структурная схема механической части летучих ножниц.

ВИД

$$\ddot{\varphi}(t) \cdot J(\varphi(t)) + \dot{\varphi}(t) \cdot \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} = M(t),$$

ИЛИ

$$\ddot{\varphi}(t) \cdot J(\varphi(t)) + \frac{\dot{\varphi}^2(t)}{2} \cdot \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} = M(t).$$

Суммарный момент сил $M(t)$ имеет несколько составляющих:

- приведённый к кривошипному валу суммарный электромагнитный момент двигателей $M_d(t)$;
- момент сопротивления механизма $M_{СМЕХ}(\varphi(t))$, приведённый к нижнему кривошипному валу;
- случайный возмущающий момент сопротивления $M_c(t)$, который может, например, обуславливаться изменением параметров механизма с течением времени.

Таким образом, уравнение движения принимает вид:

$$\ddot{\varphi}(t) \cdot J(\varphi(t)) + \frac{\dot{\varphi}^2(t)}{2} \cdot \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} = M_d(t) - M_{СМЕХ}(\varphi(t)) - M_c(t), \quad (3.1)$$

ИЛИ

$$\frac{1}{J(\varphi(t))} \cdot \left(M_d(t) - M_{СМЕХ}(\varphi(t)) - M_c(t) - \frac{\dot{\varphi}^2(t)}{2} \cdot \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \right) = \ddot{\varphi}(t).$$

По данному уравнению можно построить структурную схему модели механической части летучих ножниц рис. 3.1.

3.2 Зоны регулирования

В зависимости от положения кривошипного вала можно выделить несколько зон регулирования (см. рис. 1.3), в которых должны использоваться различные алгоритмы управления:

- зона регулирования мерной длины φ_y , на которой за счёт уменьшения или увеличения скорости вращения ротора двигателя производится регулирование мерной длины заготовок;
- зона реза φ_p , на которой осуществляется рез проката;
- зона синхронного движения φ_c , в которой нож движется синхронно вместе с прокатом.

Рассмотрим зону регулирования.

Для обеспечения точного реза необходимо выполнить два кинематических условия: во первых совпадение режущей кромки ножа с заданной границей отрезаемого участка проката, и во вторых окружная скорость ножа должна находиться в заданном соотношении со скоростью проката в момент начала рубя:

$$v_H = k \cdot v_{\Pi},$$

где $v_{\Pi} = 2,3$ м/с — скорость движения проката; v_H — окружная скорость ножа; $k = 1,075$ — коэффициент обгона.

При входе ножей в зону рубя линейная скорость режущей кромки ножа превосходит линейную скорость точки O_H кривошипа, через которую проходит ось вращения ножа, в $k_{v1} = 0,94$ раза, а в момент входа в зону регулирования — в $k_{v0} = 1,05$. Коэффициенты k_{v0} и k_{v1} были найдены графически из плана скоростей. Поэтому, принимаем значения угловой скорости кривошипа при входе в зону регулирования ω_0 и при входе в зону реза ω_1 соответственно

$$\omega_0 = \frac{v_{\Pi}}{k_{v1} \cdot R_{\text{КР}}},$$
$$\omega_1 = \frac{k}{k_{v0}} \cdot \frac{v_{\Pi}}{R_{\text{КР}}},$$

где $R_{\text{КР}} = 0,7$ м — радиус кривошипа.

Промежуток времени T_K , через который должна начать отрезаться следующая заготовка, определяется выражением

$$T_K = \frac{l_M - l_D}{v_{\Pi}},$$

где l_M — отмеряемая длина проката, l_D — участок проката, уже находящийся под летучими ножницами (см. рис. 1.3). Участок l_D следующей заготовки должен начинать замеряться тянуще-следящими роликами в момент начала рубя данной.

3.3 Выбор закона управления в зоне регулирования мерной длины проката

В качестве начальных условий примем

$$\varphi(0) = 0,$$

$$\omega(0) = \omega_0,$$

а в качестве конечных

$$\varphi(T_K) = \varphi_1,$$

$$\omega(T_K) = \omega_1.$$

Здесь φ_0, φ_1 — положение ножа в начале и в конце зоны регулирования (которую при периодическом рубе можно принять равной φ_Y); ω_0, ω_1 — скорости ножа в начале и в конце зоны регулирования;

С целью более плавного входа в зону резания φ_P и входа в зону регулирования φ_Y (для снижения механических нагрузок и, как следствие, износа механизма), а также уменьшения тока приводного двигателя положим равными нулю ускорение и рывок в начале и в конце зоны регулирования:

$$\varepsilon(0) = 0,$$

$$\varepsilon(T_k) = 0,$$

$$\dot{\varepsilon}(0) = 0,$$

$$\dot{\varepsilon}(T_k) = 0,$$

Кроме того, надо учитывать, что ток и напряжение ни в какой момент времени не могут превышать некоторых максимальных значений, т. е. в любой момент времени

$$|i(t)| \leq I_{MAX},$$

$$|u(t)| \leq U_{MAX},$$

где I_{MAX} — максимально допустимый ток обмотки якоря; U_{MAX} — максимальное напряжение на выходе преобразователя. Кроме того, ножи не должны выходить до момента T_K из зоны регулирования:

$$0 < \varphi \Big|_{t \in (t_H; t_K)} < \varphi_P.$$

Кроме удовлетворения начальным и конечным условиям, учёта ограничений тока напряжения и угла поворота кривошипа, требуется обеспечить минимум потребляемой энергии. Для этого необходимо решить вариационную задачу о минимуме некоторого функционала. Возможны по крайней мере два варианта оптимизации:

- минимум потерь в меди (на активном сопротивлении якорной обмотки), такому случаю соответствует минимум функционала

$$v[i(t)] = \int_0^{T_K} i^2(t) \cdot R_{ac} dt;$$

- минимум потребляемой мощности из сети, ему соответствует функционал вида

$$v[p(t)] = \int_0^{T_K} i(t) \cdot u(t) dt.$$

Здесь $i(t)$ — ток якоря двигателя; $u(t)$ — напряжение на якоре двигателя; R_{ac} — сопротивление якоря.

Поскольку основные потери двигателя связаны с потерями на активном сопротивлении обмотки якоря, то будем считать, что минимум потерь соответствует минимуму потерь в меди, и, поэтому, будем исследовать на экстремум первый функционал.

Запишем дифференциальное уравнение, связывающее угол поворота кривошипа и ток двигателя.

Момент двигателя при постоянном потоке определяется формулой

$$M_{дв}(t) = i(t) \cdot k_m,$$

где k_m — коэффициент момента машины постоянного тока.

Угол поворота вала двигателя связан с углом поворота кривошипа соотношением:

$$\varphi_{дв} = i_{кр} \cdot \varphi,$$

Скорость, двигательный момент и момент инерции на валу двигателя связаны с угловой скоростью кривошипа, моментом сил и моментом инерции

приведёнными к кривошипному валу выражениями

$$\omega_{\text{ДВ}} = i_{\text{кр}} \cdot \omega,$$

$$M_{\text{ДВ}} = \frac{M_{\text{Д}}}{i_{\text{кр}}},$$

$$J_{\text{ДВ}} = \frac{J}{i_{\text{кр}}^2}.$$

где

$\varphi_{\text{ДВ}}$ — угол поворота вала двигателя;

$\omega_{\text{ДВ}} = \dot{\varphi}_{\text{ДВ}}$ — скорость вращения вала двигателя;

$J_{\text{ДВ}}$ — момент инерции приведённый к валу двигателя;

φ — угол поворота вала кривошипа;

$\omega = \dot{\varphi}$ — скорость вращения вала кривошипа;

J — момент инерции приведённый к валу кривошипа.

Дифференциальное уравнение, связывающее двигательный момент на валу кривошипа с углом поворота кривошипа

$$M_{\text{Д}} = J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) + M(t)$$

Принимаем $M(t) \equiv 0$.

$$i = \frac{M_{\text{ДВ}}}{k_m} = \frac{M_{\text{Д}}}{k_m \cdot i_{\text{кр}}}$$

Таким образом, ток якоря связан с углом поворота кривошипа следующим дифференциальным уравнением

$$i = \frac{1}{k_m \cdot i_{\text{кр}}} \cdot \left(J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) \right)$$

Функционал принимает следующий вид:

$$v[i(t)] = \int_0^{T_{\text{К}}} i^2(t) \cdot R_{\text{ац}} dt = \int_0^{T_{\text{К}}} R_{\text{ац}} \cdot \left[\frac{1}{k_m \cdot i_{\text{кр}}} \cdot \left(J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) \right) \right]^2 dt,$$

учитывая, что k_m , $i_{\text{кр}}$ и $R_{\text{ац}}$ — постоянные величины (изменение температуры якорной обмотки в процессе работы не учитываем), можно записать

$$v[i(t)] = \frac{R_{\text{ац}}}{(k_m \cdot i_{\text{кр}})^2} \cdot \int_0^{T_{\text{К}}} \left(J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) \right)^2 dt.$$

Этот функционал достигает минимум на тех же кривых, что и функционал

$$v[i(t)] = \int_0^{T_K} \left(J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) \right)^2 dt.$$

Чтобы найти кривую, на которой функционал достигает минимума, необходимо решить дифференциальное уравнение Эйлера с учётом граничных условий и ограничений, накладываемых на вид кривой, и проверить достигается ли на полученной кривой, называемой экстремалью, минимум или максимум. Если достигается минимум, то это и есть искомая кривая. Уравнение Эйлера для функционалов вида

$$v[i(t)] = \int_{t_0}^{t_1} F(t, \varphi(t), \dot{\varphi}(t), \ddot{\varphi}(t)) dt$$

имеет вид

$$F_{\varphi} - \frac{d}{dt} F_{\dot{\varphi}} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{\varphi}} = 0,$$

где

$$F = \left(J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) \right)^2,$$

$$F_{\varphi} = \frac{\partial}{\partial \varphi} F,$$

$$F_{\dot{\varphi}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\varphi}} F,$$

$$F_{\ddot{\varphi}} = \frac{\partial}{\partial \ddot{\varphi}} F.$$

Найдём частные производные

$$\begin{aligned} F_{\varphi} &= \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) \right)^2 = \\ &= 2 \cdot \left(J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) \right) \times \\ &\quad \times \left(\frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \ddot{\varphi} + \frac{\partial^2 J(\varphi)}{\partial \varphi^2} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + \frac{\partial M_{\text{СМЕХ}}(\varphi)}{\partial \varphi} \right); \end{aligned}$$

$$F_{\dot{\varphi}} = \frac{\partial}{\partial \dot{\varphi}} \left(J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) \right)^2 =$$

$$= 2\dot{\varphi} \cdot \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \left(J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) \right);$$

$$F_{\ddot{\varphi}} = \frac{\partial}{\partial \ddot{\varphi}} \left(J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) \right)^2 =$$

$$= 2 \cdot J(\varphi) \cdot \left(J(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\partial J(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + M_{\text{СМЕХ}}(\varphi) \right).$$

Ввиду сложности задачи первоначально решения уравнений будем искать без учёта ограничений $i(t)$ и $u(t)$. Поскольку вариационные задачи в общем виде решаются лишь в исключительных случаях, решение будем искать прямыми методами вариационного исчисления.

Основная идея прямых методов в вариационных задачах состоит в том, что вариационная задача рассматривается как предельная для некоторой задачи на экстремум функции конечного числа переменных. Эта задача на экстремум функции решается обычными методами, а затем предельным переходом получается решение соответствующей вариационной задачи.

Функционал вида $v[\varphi(t)]$ можно рассматривать как функцию бесконечного множества переменных. Это утверждение становится очевидным, если предположить, что допустимые кривые могут быть разложены в какие-либо ряды:

$$\varphi(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n y_n(t), \quad (3.2)$$

где $y_n(t)$ — заданные функции. Для задания функций $\varphi(t)$, представляемой в виде (3.2), достаточно знать значения всех коэффициентов a_n , и следовательно, значение функционала $v[\varphi(t)]$ в этом случае определяется заданием бесконечной последовательности чисел: $a_0, a_1, \dots, a_n, \dots$, т. е. функционал является функцией бесконечного множества переменных:

$$v[\varphi(t)] = y(a_0, a_1, \dots, a_n, \dots).$$

Следовательно, различие между вариационными задачами и задачами на экстремум функции конечного числа переменных состоит в том, что в вариационных задачах приходится исследовать на экстремум функции бесконечного числа переменных.

Одним из методов решения подобных уравнений является конечно-разностный метод Эйлера. Идея этого метода состоит в том, что значения функционала $v[\varphi(t)]$ рассматривается не на всех допустимых кривых, а лишь на

ломанных, составленных из заданного числа n прямолинейных звеньев с заданными абсциссами вершин $t = t_0 + k \cdot \Delta t$, $k = 0 \dots n$, $\Delta t = t_1 - t_0/n$.

На таких ломаных функционал превращается в функцию $y(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n-1})$ ординат $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ вершин ломаной, т. к. ломаная вполне определяется этими ординатами.

Выбираем y_1, y_2, \dots, y_{n-1} так, чтобы функция $y(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n-1})$ достигла экстремума, т. е. определяем такие $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n-1}$ из системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial \varphi_1} &= 0 \\ \frac{\partial y}{\partial \varphi_2} &= 0 \\ &\dots \\ \frac{\partial y}{\partial \varphi_{n-1}} &= 0. \end{aligned}$$

Чтобы получить точное решение, нужно совершить предельный переход при $n \rightarrow \infty$. Если предельный переход не совершать, что обычно является достаточным для большинства практических задач, то ломаная будет являться приближенным решением вариационной задачи.

Для решаемой задачи приближенное решение будет являться решением системы уравнений:

$$F_{\varphi_i} - \frac{\Delta F_{\dot{\varphi}_i}}{\Delta t} + \frac{\Delta^2 F_{\ddot{\varphi}_i}}{\Delta t^2} = 0, \quad i \in [0; n];$$

или в более развёрнутой форме

$$\begin{aligned} &F_{\varphi} \left(t_i, \varphi_i, \frac{\Delta \varphi_i}{\Delta t}, \frac{\Delta^2 \varphi_i}{\Delta t^2} \right) - \\ & - \frac{1}{\Delta t} \left[F_{\dot{\varphi}} \left(t_i, \varphi_i, \frac{\Delta \varphi_i}{\Delta t}, \frac{\Delta^2 \varphi_i}{\Delta t^2} \right) - F_{\dot{\varphi}} \left(t_{i-1}, \varphi_{i-1}, \frac{\Delta \varphi_{i-1}}{\Delta t}, \frac{\Delta^2 \varphi_{i-1}}{\Delta t^2} \right) \right] + \\ & + \frac{1}{\Delta t^2} \left[F_{\ddot{\varphi}} \left(t_i, \varphi_i, \frac{\Delta \varphi_i}{\Delta t}, \frac{\Delta^2 \varphi_i}{\Delta t^2} \right) - 2F_{\ddot{\varphi}} \left(t_{i-1}, \varphi_{i-1}, \frac{\Delta \varphi_{i-1}}{\Delta t}, \frac{\Delta^2 \varphi_{i-1}}{\Delta t^2} \right) + \right. \\ & \left. + F_{\ddot{\varphi}} \left(t_{i-2}, \varphi_{i-2}, \frac{\Delta \varphi_{i-2}}{\Delta t}, \frac{\Delta^2 \varphi_{i-2}}{\Delta t^2} \right) \right] = 0, \quad (i = 0, 1 \dots n). \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{t_K - t_H}{n}, \\ \Delta \varphi_i &= \varphi_{i+1} - \varphi_i \end{aligned}$$

$$\Delta^2 \varphi_i = \varphi_{i+2} - 2\varphi_{i+1} + \varphi_i$$

Другим методом решения вариационных задач является метод Рунца. Суть метода заключается в том, что значения функционала $v[\varphi(t)]$ рассматриваются лишь на всевозможных линейных комбинациях

$$\varphi_n(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i(t)$$

с постоянными коэффициентами, составленных из n первых функций некоторой выбранной последовательности функций $w_1(t), w_2(t), \dots, w_n(t), \dots$. Функции

$$\varphi_n(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i(t)$$

должны быть допустимы в рассматриваемой задаче, что налагает некоторые ограничения на выбор последовательности функций $w_i(t)$. На таких линейных комбинациях функционал $v[\varphi(t)]$ превращается в функцию $y(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$. Эти коэффициенты выбираются таким образом, чтобы функция $\varphi(t)$ достигала экстремума, следовательно, α_i можно найти из системы уравнений

$$\frac{\partial y}{\partial \alpha_i} = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Совершая предельный переход при $n \rightarrow \infty$, получим в случае существования предела функцию

$$\varphi(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i w_i(t),$$

являющуюся (при некоторых ограничениях, налагаемых на функционал $v[\varphi(t)]$ и на последовательность функций $w_1(t), w_2(t), \dots, w_n(t), \dots$) точным решением, рассматриваемой вариационной задачи. Если ограничиться n первыми членами, то решение будет приближенное.

Если этим методом определяется абсолютный минимум функционала, то приближенное значение находится с избытком, т. к. минимум этого функционала на любых допустимых кривых не больше, минимума того же функционала на части допустимых кривых вида

$$\varphi_n(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i(t).$$

Если находится максимальное значение, то оно по тем же причинам будет с недостатком.

Для того, чтобы функции

$$\varphi_n(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i(t)$$

были допустимыми, необходимо удовлетворить граничным условиям (не следует забывать и о других ограничениях, которые могут быть наложены, например, гладкости или непрерывности).

Для решения рассматриваемой задачи координатные функции выберем в виде

$$w_i(t) = t^i.$$

Тогда закон управления будет представлять из себя полином вида

$$\varphi(t) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot t^i.$$

Решать рассматриваемую вариационную задачу будем методом Ритца, так как он требует меньшего объёма вычислений, по сравнению с методом Эйлера и может обеспечивать более точное решение.

Для простоты первоначально при поиске минимума функционала не будем учитывать момент сил сопротивления холостого хода и переменный характер моментов инерции. Тогда функционал примет вид

$$v[i(t)] = \int_0^{T_k} (J \cdot \ddot{\varphi})^2 dt,$$

который будет достигать минимум на тех же кривых, что и

$$v[\varepsilon(t)] = \int_0^{T_k} \varepsilon^2(t) dt.$$

Искомый закон управления будет иметь вид полинома

$$\varphi(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4 + \dots + a_n \cdot t^n,$$

где $n = 9$ — степень полинома. Для обеспечения закона управления, удовлетворяющего заданным начальным и конечным условиям, достаточно полинома $n = 7$, но, чтобы произвести оптимизацию закона управления, были добавлены ещё две степени.

Дифференцируя $\varphi(t)$, найдём, что заданные скорость, ускорение и рывок будут определяться выражениями

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot i \cdot t^{i-1}$$

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=2}^n a_i \cdot i(i-1) \cdot t^{i-2}$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \sum_{i=3}^n a_i \cdot i(i-1)(i-2) \cdot t^{i-3}$$

Первые четыре коэффициента ($a_0 \cdots a_3$) можно найти, подставив в выражения для положения, скорости, ускорения и рывка начальные условия при $t = 0$.

Остальные коэффициенты ($a_4 \cdots a_9$) при старших степенях определяются из системы уравнений

$$\varphi_1 = \sum_{i=0}^n a_i \cdot T_k^i$$

$$\omega_1 = \sum_{i=1}^n a_i \cdot i \cdot T_k^{i-1}$$

$$\varepsilon_1 = \sum_{i=2}^n a_i \cdot i(i-1) \cdot T_k^{i-2}$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \sum_{i=3}^n a_i \cdot i(i-1)(i-2) \cdot T_k^{i-3}$$

и условия минимума потерь

$$v[\varepsilon(t)] = \int_0^{T_k} \varepsilon^2(t) dt.$$

Используя конечные условия можно свести систему уравнений к двум неизвестным независимым переменным, например, a_8, a_9 , а все оставшиеся коэффициенты ($a_4 \cdots a_7$) выразить через них и граничные условия. Тогда, задача отыскания минимума интеграла v сведётся к задаче отыскания минимума функции

$$v(a_8, a_9) = \int_0^{T_k} \varepsilon^2(t, a_8, a_9) dt$$

Чтобы найти минимум, нужно взять частные производные по a_8, a_9 , и решить систему уравнений

$$\frac{\partial v}{\partial a_8} = 0,$$

$$\frac{\partial v}{\partial a_9} = 0,$$

и проверить выполнение неравенства

$$AC - B^2 > 0,$$

где

$$A = \frac{\partial^2 v(a_8, a_9)}{\partial a_8^2},$$

$$B = \frac{\partial^2 v(a_8, a_9)}{\partial a_8 \partial a_9},$$

$$C = \frac{\partial^2 v(a_9, a_9)}{\partial a_9^2}.$$

Если данное неравенство выполняется, то в данной точке существует экстремум. Если при этом A (или C) положительно, то в данной точке будет минимум.

Затем, подставляя a_8 и a_9 , можно найти выраженные через них коэффициенты $a_4 \cdots a_7$.

Выражения для коэффициентов $a_0 \cdots a_9$ были найдены в общем виде в пакете аналитических вычислений Maple V и приведены ниже. Сам файл приведён в [приложении №1](#).

$$a_0 = 0$$

$$a_1 = \omega_0$$

$$a_2 = 0$$

$$a_3 = 0$$

$$a_4 = \frac{-20 T_k \omega_0 + T_k^8 a_8 + 4 T_k^9 a_9 - 15 \omega_1 T_k + 35 \varphi_1}{T_k^4}$$

$$a_5 = -\frac{-45 T_k \omega_0 + 4 T_k^8 a_8 + 15 T_k^9 a_9 - 39 \omega_1 T_k + 84 \varphi_1}{T_k^5}$$

$$a_6 = 2 \frac{-18 T_k \omega_0 + 3 T_k^8 a_8 + 10 T_k^9 a_9 + 35 \varphi_1 - 17 \omega_1 T_k}{T_k^6}$$

$$a_7 = -2 \frac{-5 T_k \omega_0 + 2 T_k^8 a_8 + 5 T_k^9 a_9 + 10 \varphi_1 - 5 \omega_1 T_k}{T_k^7}$$

$$a_8 = -\frac{10}{9} \cdot \frac{-567 \cdot \varphi_1 + 277 \cdot \omega_1 T_k + 290 T_k \omega_0}{T_k^8}$$

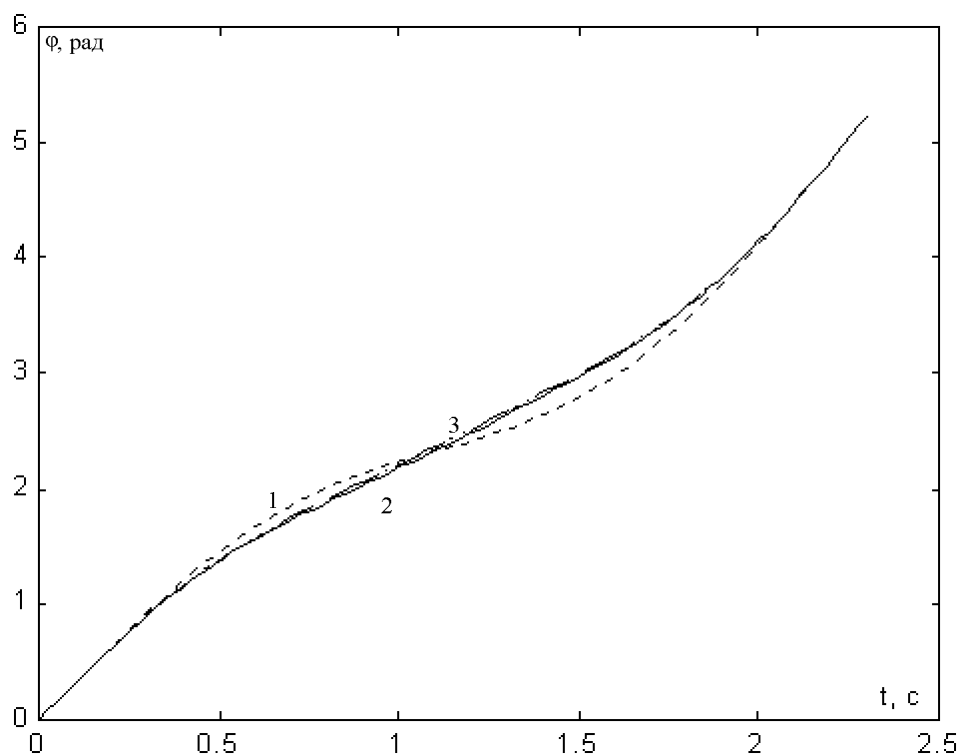


Рис. 3.2. График положения кривошипа. 1 — без оптимизации; 2 — с оптимизацией; 3 — с оптимизацией уточнённый.

$$a_9 = 70 \frac{\omega_1 T_k - 2 \varphi_1 + T_k \omega_0}{T_k^9}$$

Графики полученных законов приведены на рис. 3.2—3.5 . Был произведен расчёт эффективности применения закона управления с $n = 9$ по сравнению с $n = 7$ с учётом переменных моментов инерции и сопротивления в MatLab'e. Кроме того, был выполнен поиск более оптимальных a_8 , a_9 на тот случай, если оптимальные значения сместились. Поиск существенных результатов не дал, удалось добиться увеличения выигрыша лишь на 2,5 % и менее (в зависимости от мерной длины и скорости движения проката). Результаты приведены в таблице №3.1, график, построенный по табличным данным, изображён на рис. 3.6.

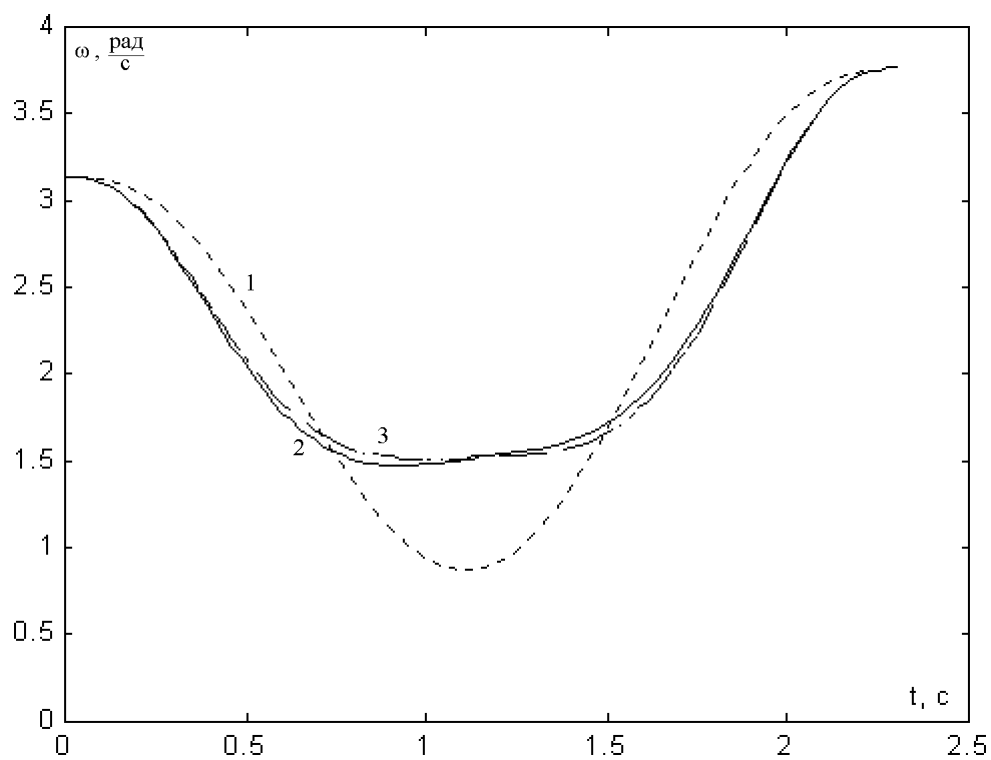


Рис. 3.3. График скорости кривошипа. 1 — без оптимизации; 2 — с оптимизацией; 3 — с оптимизацией уточнённый.

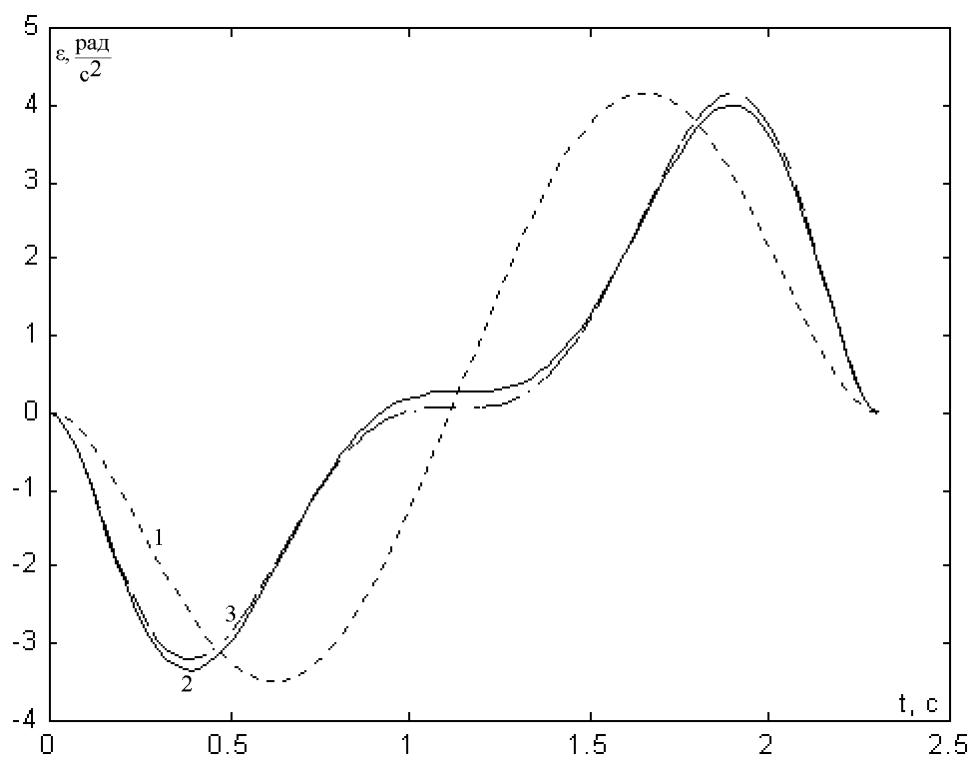


Рис. 3.4. График ускорения кривошипа. 1 — без оптимизации; 2 — с оптимизацией; 3 — с оптимизацией уточнённый.

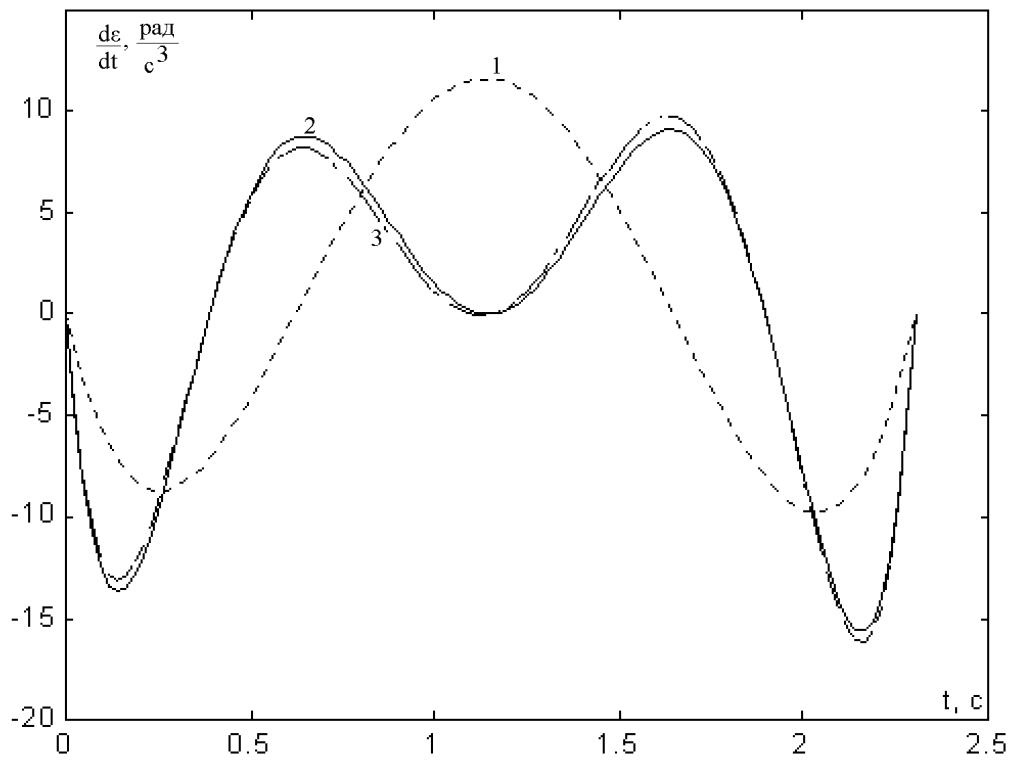


Рис. 3.5. График рывка кривошипа. 1 — без оптимизации; 2 — с оптимизацией; 3 — с оптимизацией уточнённый.

Таблица 3.1. Эффективность применяемого закона при разных мерных длинах и разных скоростях проката

v	Закон	Длина					
		6	5,5	5	4,5	4	3
2,3	Опт	32,66	32,02	30,3	23,37	30,1	33,94
	ОчОпт	32,71	32,13	30,65	25,77	32,64	34,14
2	Опт	32,63	31,98	30,23	23,22	30,07	33,97
	ОчОпт	32,68	32,08	30,53	25,61	32,61	34,18
1,8	Опт	32,6	31,94	30,16	23,05	30,02	33,99
	ОчОпт	32,65	32,04	30,46	25,43	32,53	34,19

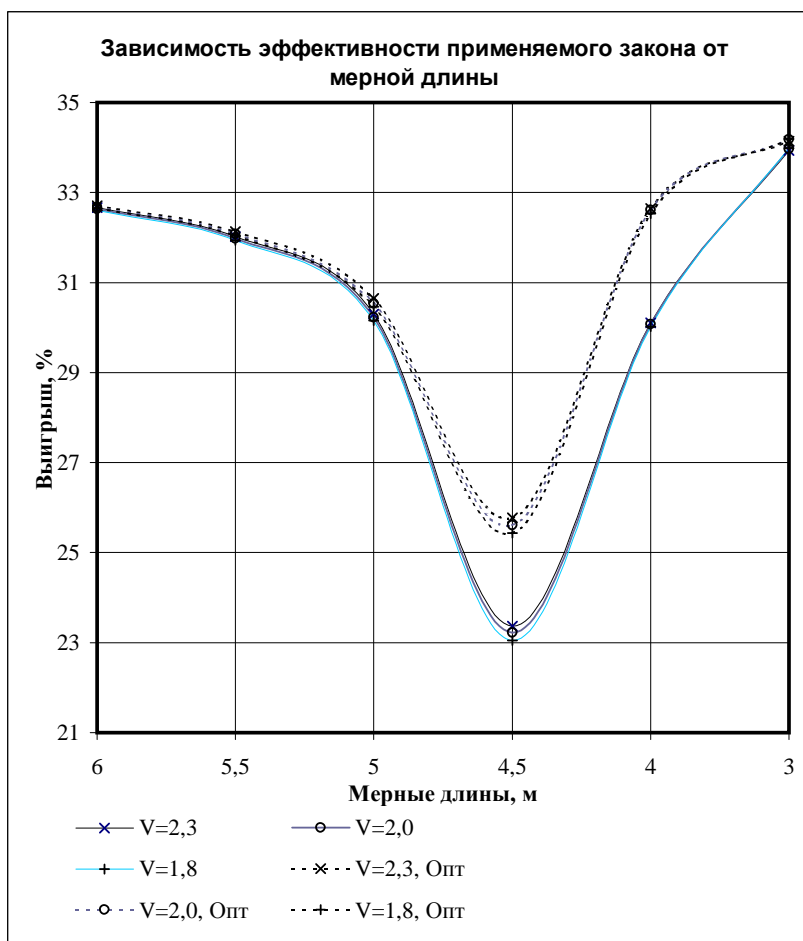


Рис. 3.6. График зависимости эффективности применяемого закона от мерной длины

3.4 Выбор законов управления во время реза и синхронного движения с прокатом

Зона реза проката состоит из двух частей (см. рис. 1.3): участок (φ_p), на котором происходит руб, и участок (φ_c), на котором нож движется параллельно прокату. График изменения статического момента на нижнем кривошипном валу в функции от угла поворота кривошипа приведён на рис. 3.7.

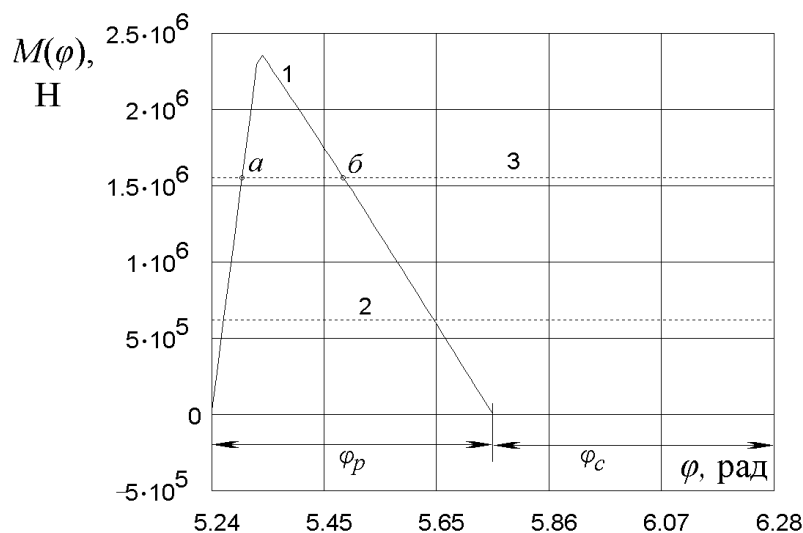


Рис. 3.7. График момента сопротивления механизма, приведённый к нижнему кривошипу. На графике изображено: момент сопротивления механизма (1), номинальный момент двигателей, приведённый к кривошипу (2), максимально допустимый рабочий момент двигателя, приведённый к кривошипу (3), кружками *a* и *б* обозначены точки пересечения линии момента сопротивления механизма и максимально допустимого рабочего момента двигателя.

Рассмотрим вначале участок φ_p , на котором происходит руб. На этом участке между точками *a* и *б* момент сопротивления механизма превышает максимально допустимый рабочий момент двигателя. Часть энергии, необходимая для рубя на участке *a–б* может обеспечиваться только за счёт уменьшения кинетической энергии самого механизма, при этом следует учитывать, что скорость кривошипа не должна опускаться ниже ω_0 , т. к. в противном случае разрезаемый прокат станет давить на ножи, что недопустимо. Если в точке *a* кривошип движется со скоростью ω_1 , то часть кинетической энергии механизма, которую допустимо израсходовать на рез, будет превышать требуемую на 70 %. Предлагается на участке реза φ_p выдавать на двигатель задание на поддержание скорости на уровне ω_1 , и кроме того, давать добавку к заданию тока компенсирующую расчётное значение момента сопротивления. Поскольку момент двигателя ограничен, то на

участке $a-b$ естественно ожидать просадку скорости. После этого участка скорость начнёт возрастать до ω_1 .

Во второй части зоны рубя φ_C кривошип движется синхронно с отрубленным участком, с малым моментом сопротивления, по сравнению с рубом. На этом участке предлагается скорость плавно снижать с ω_1 до ω_0 . Ниже ω_0 скорость в этой зоне снижать нельзя, т. к. в противном случае прокат станет нагонять ножи.

4. Выбор основного оборудования

4.1 Расчёт двигателя

Приводные двигатели выбираем марки МП1250–200У3.

Параметры двигателя

Мощность двигателя, кВт	1 250;
Напряжение питания, В	850;
Номинальный ток, А	1 580;
Максимально допустимая рабочая перегрузка по току.....	2,5;
Длительность максимально допустимой перегрузки по току, с	15;
Максимальная отключающая перегрузка по току	2,75;
Номинальная скорость вращения, об/мин	200;
Номинальный момент, кН	60;

В режиме реза момент двигателей превышает номинальный в 2,5 раза, время перегрузки составляет $t_{пер} = 0,13$ с.

Проверка двигателя на нагрев производится методом эквивалентного момента для наиболее тяжёлого режима реза на мерные длины 5,25 м (8 мерных длин из раската 43,8 м, последняя длина увеличена). В этом режиме на каждый раскат производится 9 пусков и 9 торможений двигателя при 9-и резах. Расчёт был выполнен в пакете MathCad исходный файл приведён в [приложении №2](#).

$$M_{\text{Э}} = 33,1 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

Загрузка двигателя по нагреву

$$\frac{M_{\text{Э}}}{M_{\text{H}}} \cdot 100 = \frac{3,31 \cdot 10^4}{6 \cdot 10^4} \cdot 100 = 55,4 \%$$

Таким образом, выбранные двигатели удовлетворяют заданным условиям работы.

4.2 Выбор оборудования

Преобразователь был выбран марки реверсивный тиристорный преобразователь TPD32–690/890–2000–4В фирмы General electric.

- Входное напряжение 690 В.
- Выходное напряжение 890 В.
- Номинальный ток 2 000 А.
- Максимальный ток 4 000 А.

Импульсный датчик скорости, устанавливаемый на валу двигателя, — энкодер ХН 861 фирмы Leine&Linde. Параметры энкодера следующие:

- Напряжение питания 9...30 В.
- Разрешение 2 500 имп./об.

Импульсный датчик положения, устанавливаемый на кривошипном валу, — абсолютный энкодер фирмы Leine&Linde 567–028050–1024. Параметры датчика положения следующие:

- Напряжение питания 9...30 В.
- Используемый код передачи параллельный код Грея.
- Разрешение 1 024 имп./об.

Контроллер выбран марки GE Fanuc 90–70 фирмы General electric. Панель управления марки IU 200.

4.3 Разработка релейно-контакторной схемы

Релейная схема работает следующим образом.

Рассмотрим работу релейной схемы. Расцепителями QS1 и QS2 подаётся напряжение на входную цепь силовой части преобразователя. Автоматически выключатели QF1 и QF2 включают соответственно питание релейно-контакторной схемы и цепь реле главного контактора соответственно.

Если после включения питания релейно-контакторной схемы система управления преобразователя не обнаружила аварийной ситуации, то на выходе преобразователя «Реле ОК» (клеммы 35 и 36) появляется напряжение, питающее реле К1. Это реле переключает контакт К1.3 в нижнее положение, запитывая реле К2. Реле К2 включает контакты К2.1 и К2.2. Теперь, если сигнал «ОК» будет снят преобразователем с К1, контакт К1.3 перейдёт в верхнее положение и включит красную мигающую лампу HL4 (сигнал аварии). Само реле К2 останется на самопитании через контакт К2.2.

При замыкании выключателей SA1 или S1, при замкнутом контакте К2.2, ток протекает через реле К6. При этом замыкается контакт К6.1, подключающий реле главного контактора КМ1. Это реле замыкает контакты КМ1.3 (подключает цепь охлаждающего вентилятора М2, установленный в шкафу преобразователя), контакт КМ1.4 (подаёт дискретный сигнал «Enable», разрешающий системе управления преобразователя подавать напряжение на двигатель), КМ1.5 (включает синюю лампу HL3, сигнализирующую о том, что главный контактор включён), а так же главные контакторы обмотки возбуждения и коря привода КМ1.1 и КМ1.2.

Теперь, если в шкафу температура превысит уставку термореле SK1 замкнётся и включится охлаждающий вентилятор М2.

Для пуска двигателя нужно замкнуть выключатель S2. При этом включается реле К4. Оно замыкает контакты К4.1 (подаёт сигнал пуска на вход «Start» преобразователя). После этого преобразователь подаёт сигнал «Работа» с клемм 75 и 76 на реле К3, которое замыкает контакт К3.1 (зажигается зелёная лампа HL5, сигнализирующая о работе преобразователя). При отключении выключателей S2 сигнал пуска снимается с преобразователя и он начинает тормозить двигатель. После того, как двигатель остановлен, сигнал «работа» снимается с реле К5, при этом отмыкаются контакты К3.1 и лампа HL5 гаснет.

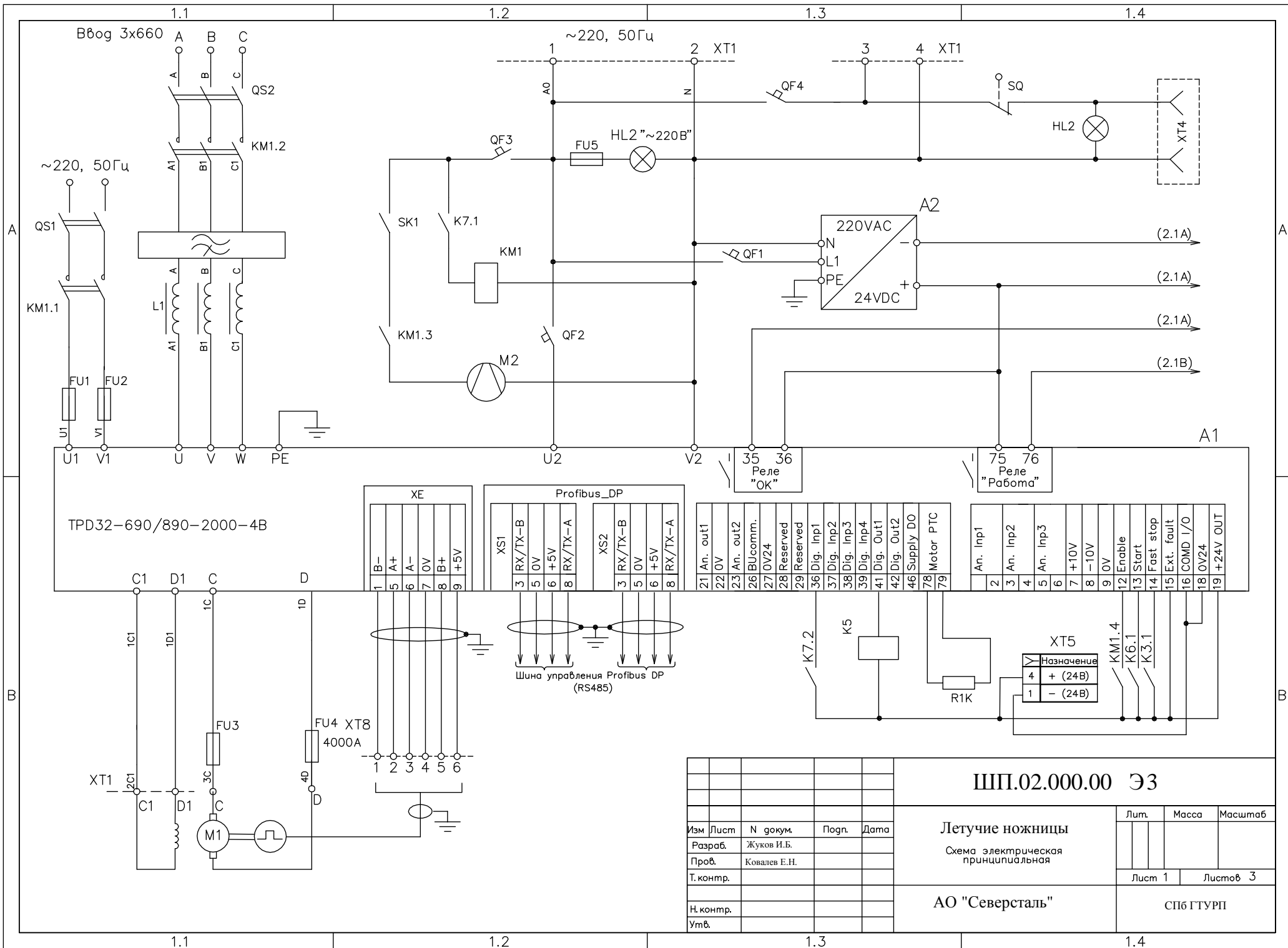
Если происходит авария, то реле К1 отпускает контакты К1.3 (зажигается

красная мигающая лампа HL4, сигнализирующая об аварии), отключается реле К6 (при этом отключаются главные контакторы).

При отключении выключателей SA2 (отключение главного контактора) отключаются реле К6 (при этом через контакт К6.1 отключаются главные контакторы). После того, как с реле главного контактора КМ1 напряжение снято, отмыкаются контакты КМ1.3 (питающий вентилятор охлаждения шкафа) КМ1.4 (снимается сигнал разрешения работы системы управления преобразователя) КМ1.5 (отключается синяя лампа HL3), а также сами главные контакторы КМ1 и КМ2.

Сброс аварии преобразователя производится замыканием выключателей S3, при этом реле К5 замыкает контакт К5.1, подающий на дискретный вход преобразователя Dig Inp 1 сигнал сброса аварии.

Принципиальная схема и спецификация шкафа преобразователя одного из двигателей летучих ножниц приведены ниже.



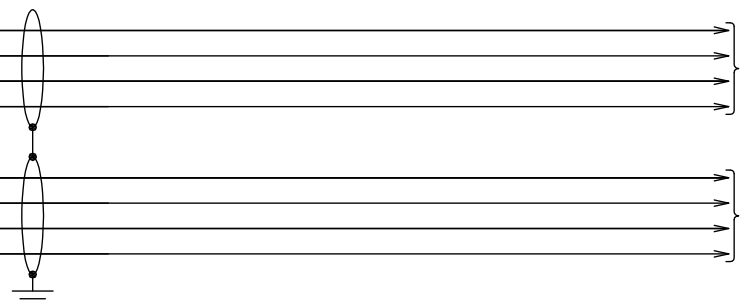
ШП.02.000.00 Э3				
Изм.	Лист	№ докум.	Попл.	Дата
Разраб.	Жуков И.Б.			
Пров.	Ковалев Е.Н.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Умб.				
Летучие ножницы			Лит.	Масса
Схема электрическая				
принципиальная			Лист 1	Листов 3
АО "Северсталь"			СПб ГТУРП	

Profibus_DP	
XS1	
RX/TX-B	3
0V	5
+5V	6
RX/TX-A	8
XS2	
RX/TX-B	3
0V	5
+5V	6
RX/TX-A	8

TBO-B	
XSB	
An. out1 (Out. volt.)	1 25
An. out2 (Motor curr)	2 26
	3 27
	4 28

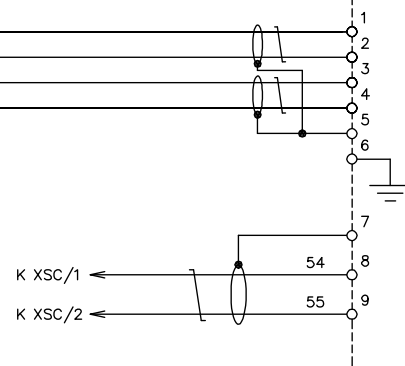
TBO-A	
XSA	
An. out1 (Motor curr)	1
An. out2 (Flux curr)	2 3
com/d.out	4 5
D. out1 cp match	6
24V/d.out	10 33
reset	11 34
com/d.inp	15 31

Regulation card	
XSC	
PE	10
An. input1 (Pad 0)	1 2 30
0V / 10	9
Enable	12 35
Start	13 37
Fast stop	14 33
Ext. fault	15
com ID	16 31
0V / 24	18
+24V	19 33



Шина управления
Profibus DP
(RS485)

XT3



K XSC/1

K XSC/2

XT5

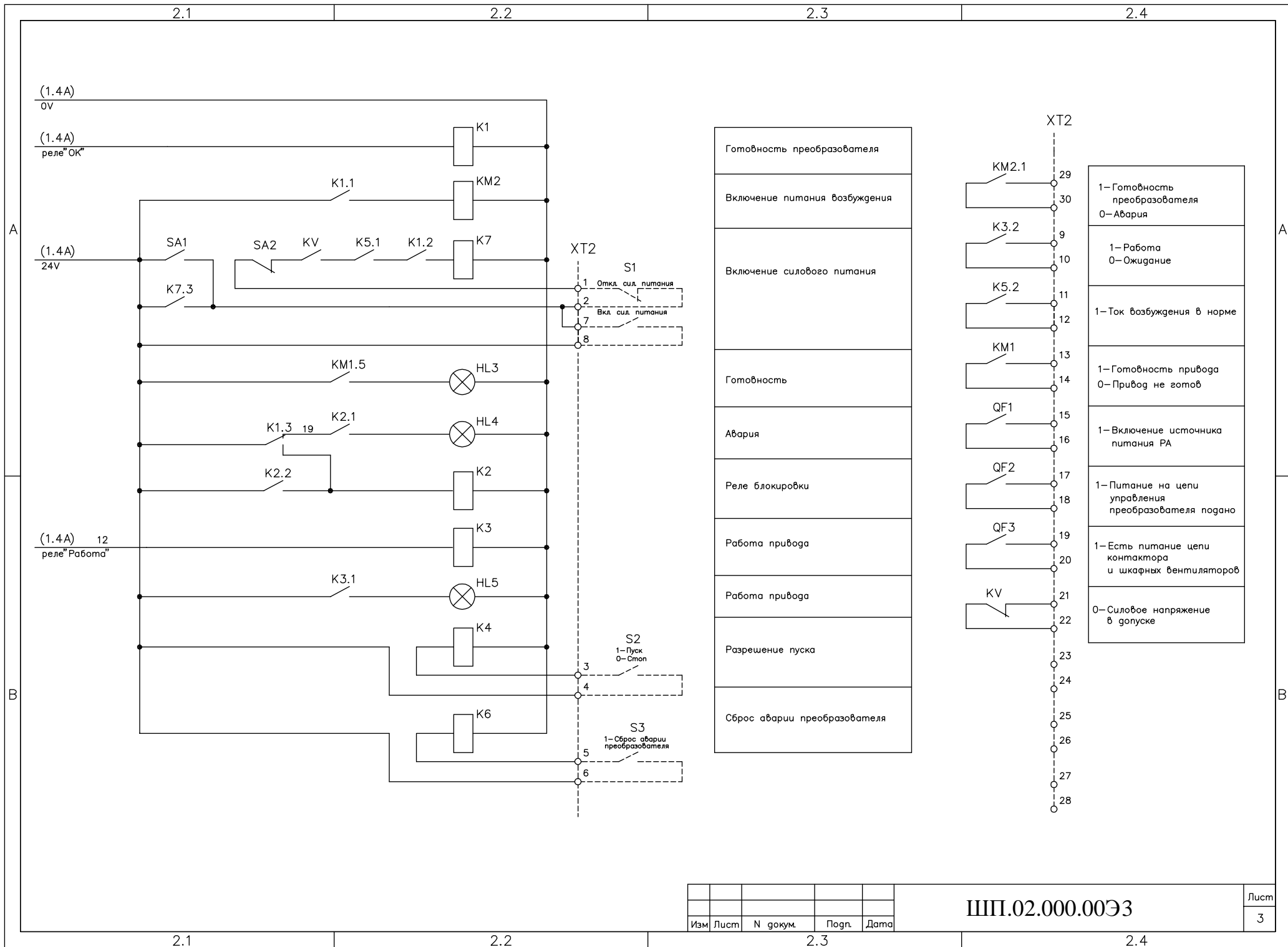
>	Назначение
4	+ (24В)
1	- (24В)

Изм	Лист	N докум.	Погн.	Дата

ШП.02.000.00 Э3

Лист

2



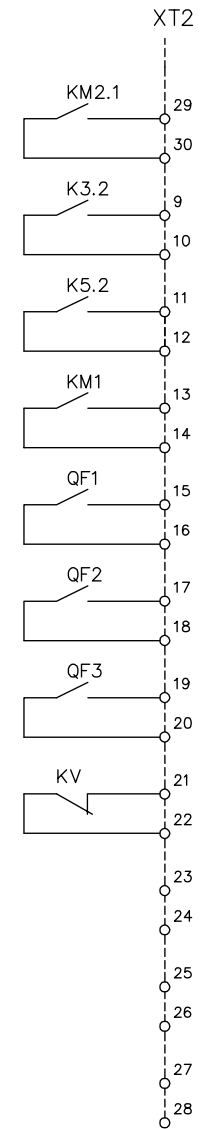
(1.4 A)
0V

(1.4 A)
реле "OK"

(1.4 A)
24V

(1.4 A) 12
реле "Работа"

Готовность преобразователя
Включение питания возбуждения
Включение силового питания
Готовность
Авария
Реле блокировки
Работа привода
Работа привода
Разрешение пуска
Сброс аварии преобразователя



1-Готовность преобразователя 0-Авария
1-Работа 0-Ожидание
1-Ток возбуждения в норме
1-Готовность привода 0-Привод не готов
1-Включение источника питания РА
1-Питание на цепи управления преобразователя подано
1-Есть питание цепи контактора и шкафовых вентиляторов
0-Силовое напряжение в допуске

Изм	Лист	N докум.	Погп.	Дата

ШП.02.000.00Э3

Зона	Поз. Обознач	Наименование	Кол.	Примечание
1.1A	A1	Тиристорный преобразователь TPD32-690/890-2000-4B	1	
1.3A	A2	Источник QUINT-PS-230AC/24DC/2,5 (~230V/=24V; 2,5A)	1	
1.2B	A3	Плата Profibus DP SBI-PDP-33, код S5H44	1	
1.4A	EL	Плафон шкафного освещения (под лампу накаливания ~220...240 В/ 60 Вт)	1	
1.1A	FU1,FU2	Предохранитель: на собственном изоляционном основании, с бойком и свободным контактом. Номинальный ток основания 44А. Корпус: ПП32-37-21-УХЛ3. Плавкая вставка: ПНБ7 44А/220В	3	
1.1B	FU3,FU4	Предохранитель: на собственном изоляционном основании, с бойком, без свободного контакта. Номинальный ток основания 4000А. Корпус: ПП32-37-21-УХЛ3. Плавкая вставка: ПНБ7 4000А/850В	2	
1.1A	HL1	Светосигнальная арматура: бесцветная NEF 30-LYRb 220V (с доб. резистором)+ лампа накаливания 60 В/ 35 мА;	1	
1.3A	HL2	Светосигнальная арматура: синяя NEF 30-LYRn 220V (с доб. резистором)+ лампа накаливания 60 В/ 35 мА;	1	
2.2A	HL3	Светосигнальная арматура: Желтая NEF 30-LDSg 24VDC (светодиодная);	1	
2.2A	HL4	Светосигнальная арматура: Красная NEF 30-LDSBc 24VDC (светодиодная мигающая)	1	
2.2B	HL5	Светосигнальная арматура: Зеленая NEF 30-LDSg 24VDC (светодиодная)	1	
	K1,...K7	Реле промежуточные RELPOL :R4-2014-23-1024-LD (обм. 24 VDC; комм. 5 A/ 220 VAC); Колодка GZ4 Прижим G4 1051	6 8 8	

ШП.02.000.00ПЭЗ

Изм	Лист	№ Документа	Подпись	Дата
Разраб.		Жуков И. Б.		
Проверил		Ковалёв Е. Н.		
Н.контр				
Утв.				

Летучие ножницы
Перечень элементов.

Литера	Лист	Листов
	1	3

СПб ГТУРП

Зона	Поз. Обознач	Наименование	Кол.	Примечание
1.1A	КМ1.1	Контактор СК08СА311N (44 А для АС)	1	
1.1A	КМ1.2	Контактор СК08СА311N (4000 А для АС)	1	
2.2A	КТ	Реле времени MRD 5CD: Однокомандное, с задержкой на размыкание 0,5...5с; Один контакт временной; Обмотка =24В	1	
1.1A	L1	Реактор входной LR3-090, код S7D19;In=173A, Is=4000A, L=0,148 мГн	1	
1.2A	M1	Вентилятор шкафной PF6000, Фильтр PFA6000	1 2	
		Прокладка к вентилятору	2	
1.3A	QF1,QF4	Выключатель автоматический однополюсный ~220В, 50Гц, Gti10/1p-2A/(5...10)In, код V/395-046102	2	
1.2A	QF2,QF3	Выключатель автоматический однополюсный ~220В, 50Гц, Gti10/1p-4A/(5...10)In, код V/395-046104	2	
1.1A	QS1	Расцепитель Dilos4/3P-44А, код 730474	1	
1.1A	QS2	Расцепитель Dilos4/3P-4000А, код 730474	1	
1.1B	R1K	Резистор МЛТ 1 кОм, 0,5Вт	1	
1.2A	SK	Реле тепловое KTS-60C	1	
1.3A	SQ	Выключатель концевой дверной WI 100	1	
	SA1	Переключатель P9SSMZ3G	1	
		Блок-контакты к переключателю: P9B01VN, P9B10VN	1	
ШП.02.000.00ПЭЗ				Лист
				2
Изм.	Лист	№ Документа	Подпись	Дата

5. Разработка системы управления

5.1 Реализация системы управления на основе преобразователей TPD32

Структура электропривода строится по принципу комбинированного управления на основе структуры управления преобразователя DV300. Она содержит три контура подчинённого регулирования (контур положения, контур скорости и контур тока). На регуляторы двух внутренних контуров дополнительно (для повышения быстродействия) вводятся добавки задания скорости и тока. Добавки к заданию подаются с опережением, компенсируя, тем самым, инерционность привода.

При работе в зоне регулирования на привод подаётся задание на РП, РС, и РТ. В зоне реза регулирование положения отключается и задание подаётся только на РС и РТ. При выбранных законах управления диаграмма момента на валу двигателя будет иметь вид представленный на рис. 5.1. Расчёт диаграммы приведён в [приложении №2](#).

Реализация структуры управления на основе функциональных блоков преобразователя изображена на рис. 5.2. Настройка преобразователя приведена в [приложении №6](#).

Регуляторы положения и блок задания реализованы на контроллере. Регуляторы скорости и тока строятся на основе функциональных блоков преобразователя. Используются модуль адаптации контура скорости к изменяющемуся моменту инерции и модуль распределения нагрузки между преобразователями. Сигнал распределении нагрузки передаётся по аналоговой линии.

Связь между преобразователями и управляющим контроллером предусматривается по шине ProfyBus DP.

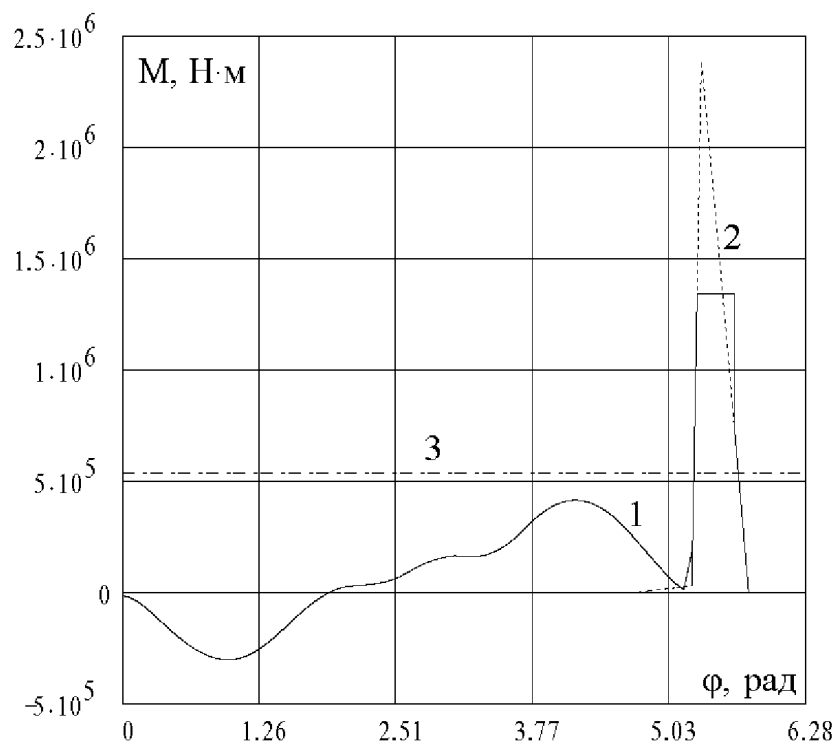


Рис. 5.1. График момента двигателя в функции угла поворота кривошипа. На графике изображено: момент двигателей приведённый к кривошипному валу (1), момент сопротивления механизма (2), номинальный момент двигателей, приведённый к кривошину (3).

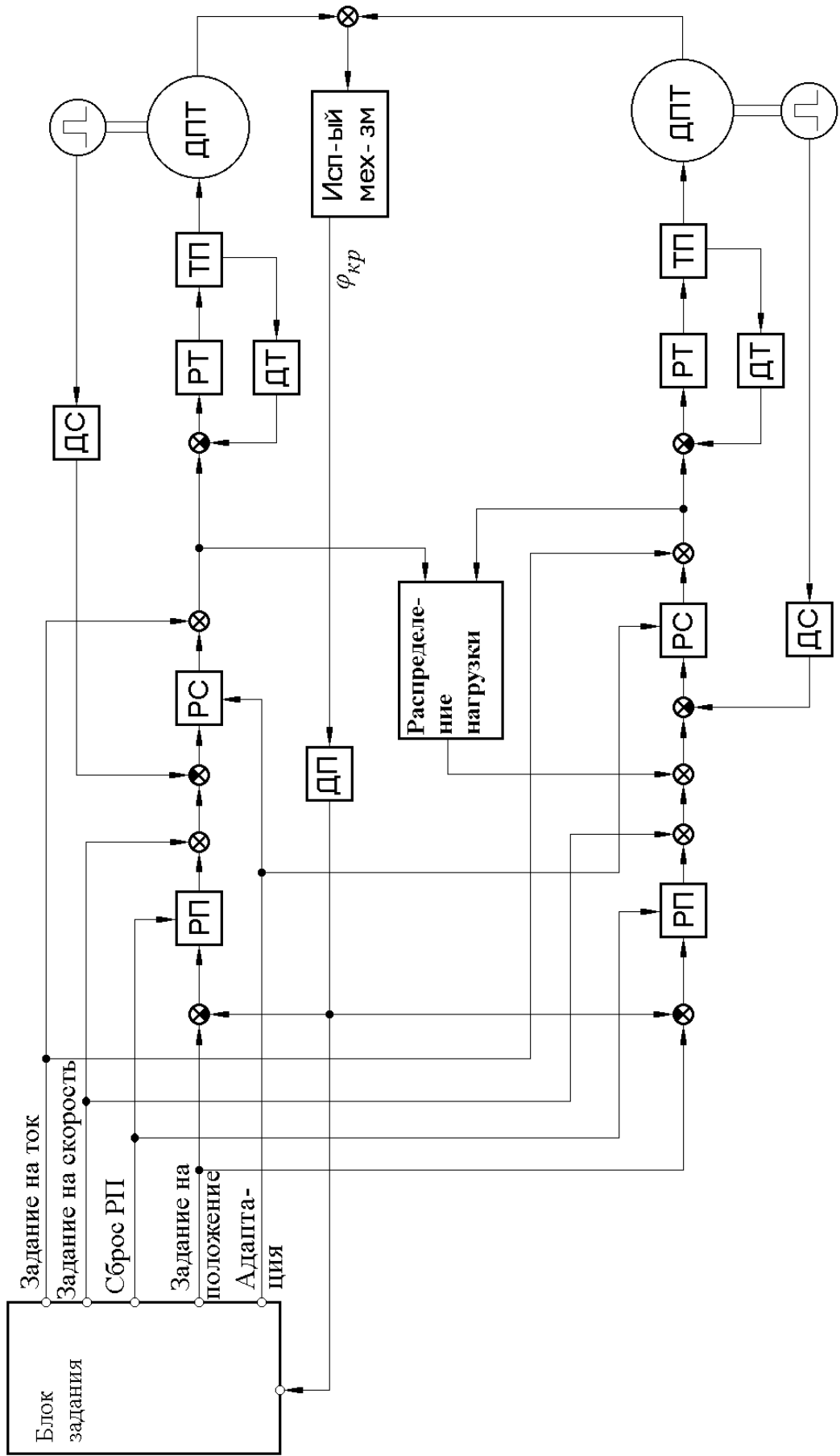


Рис. 5.2. Функциональная схема системы управления.

6. Моделирование САУ

6.1 Идентификация объекта регулирования

В настоящее время при построении систем автоматического управления широко используются цифровые системы управления, построенные на основе контроллеров. Преимуществами таких систем по сравнению с аналоговыми являются.

- Большая гибкость, обусловленная возможностью менять алгоритм управления без изменения аппаратной части.
- Возможность управления одним контроллером сразу несколькими приводами. На аналоговых элементах это организовать сложнее, чем на контроллере.
- Стабильность характеристик преобразования информации. Они не изменяются с течением времени и не зависят от температуры окружающей среды.
- В цифровых системах аппаратно проще организовать сложные алгоритмы управления, зависящие от многих параметров, например, векторное управление асинхронным двигателем.
- Высокая точность преобразования информации внутри контроллера.

К недостаткам таких систем относится следующее.

- Потери информации при снятии аналогового сигнала с датчика, возникающие при квантовании по времени и амплитуде. Однако эти потери могут компенсироваться более высокой точностью преобразования информации внутри контроллера, а также более высокой точностью цифровых датчиков по сравнению с аналоговыми (например, синусоидаль-

ный энкодер является более точным датчиком скорости, чем аналоговый тахогенератор).

- Цифровые системы стоят часто дороже, чем обладающие таким же быстродействием аналоговые.

Поскольку на цифровых системах можно реализовать значительно более сложные и эффективные САУ, чем на аналоговых, то возникает множество новых задач. Одной из них является идентификация объекта регулирования для определения его параметров и построение его цифровой модели, которая может использоваться для задач диагностики и компенсации возмущений. Обе эти задачи очень важны для проектируемого электропривода.

Цифровую модель можно реализовать в виде дискретного фильтра, который просто запрограммировать. Значение на выходе фильтра в n -ый момент времени $y[n]$ в общем случае зависит от текущего значения на входе $x[n]$, нескольких предыдущих значений на входе, а так же от нескольких предыдущих значений его выхода. Фильтр описывается следующим выражением:

$$y[n] = \sum_{i=0}^k \alpha_i x[n-i] - \sum_{j=1}^l \beta_j y[n-j].$$

При этом в начальный момент времени $n = 0$ значения $x[-k] \dots x[0]$ равны нулю и $y[-l] \dots y[-1]$ также равны нулю. Если значение на выходе фильтра в данный момент времени зависит от значений на его выходе в предыдущие, то фильтр называется рекурсивным, в противном случае — нерекурсивным.

Задача идентификации — получить значения коэффициентов при $x[i]$ и $y[i]$ по переходному процессу $h(t)$.

При синтезе цифровых систем используется Z-преобразование. При этом объект регулирования описывается передаточной функцией

$$W(z) = \frac{a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_k z^{-k}}{b_0 z^0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_l z^{-l}}, \quad (k \leq l)$$

По передаточной функции легко можно написать уравнение для дискретного фильтра.

$$\begin{aligned} W(z) &= \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_k z^{-k}}{b_0 z^0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_l z^{-l}} \\ Y(z) \cdot (b_0 z^0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_l z^{-l}) &= \\ &= X(z) \cdot (a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_l z^{-l}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y(z) \cdot (b_0 z^0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_k z^{-k}) &= \\
= X(z) \cdot (a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_l z^{-l})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y(z)b_0 z^0 &= X(z) \cdot (a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_k z^{-k}) - \\
&- Y(z) \cdot (b_1 z^{-1} + \dots + b_l z^{-l})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y(z)z^0 &= X(z) \cdot \frac{a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_k z^{-k}}{b_0} - \\
&- Y(z) \frac{b_1 z^{-1} + \dots + b_l z^{-l}}{b_0}
\end{aligned}$$

или, переходя к временной области

$$\begin{aligned}
y[n] &= \frac{a_0 x[n] + a_1 x[n-1] + \dots + a_k x[n-k]}{b_0} - \\
&- \frac{b_1 y[n-1] + \dots + b_l y[n-l]}{b_0}.
\end{aligned}$$

С другой стороны, известно, что Z-преобразование переходного процесса имеет следующий вид:

$$H(z) = \sum_{i=0}^{\infty} y[i] \cdot z^{-i},$$

где $y[i]$ — соответствующие значения переходного процесса $h(t)$. При представлении Z-преобразования переходного процесса, часто бывает достаточно ограничиться первыми N членами переходного процесса

$$H(z) \approx \sum_{i=0}^N y[i] \cdot z^{-i}.$$

Если $H(z)$ — изображение реакции звена на дельта-функцию, то можно записать

$$H(z) = W(z) \tag{6.1}$$

$$\sum_{i=0}^N y[i] \cdot z^{-i} = \frac{a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_k z^{-k}}{b_0 z^0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_l z^{-l}}$$

Найдём соотношения, связывающие коэффициенты a_0, a_1, \dots, a_k и b_0, b_1, \dots, b_l со значениями $y[0], y[1], \dots, y[N]$. Для этого разделим числитель на знаменатель $W(z)$ и приравняем частное к $H(z)$.

$$\begin{array}{cccccccc|c}
 a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & & 1+b_2+b_3+b_4 \\
 k_1 & b_2k_1 & b_3k_1 & b_4k_1 & & & & & k_1+k_2+k_3+k_4+k_5+k_6+k_7 \\
 \hline
 0 & a_2-b_2k_1 & a_3-b_3k_1 & a_4-b_4k_1 & a_5 & & & & \\
 k_2 & & b_2k_2 & b_3k_2 & b_4k_2 & & & & \\
 \hline
 0 & a_3-b_3k_1-b_2k_2 & a_4-b_4k_1-b_3k_2 & a_5-b_4k_2 & a_6 & & & & \\
 k_3 & & b_2k_3 & b_3k_3 & b_4k_3 & & & & \\
 \hline
 0 & a_4-b_4k_1-b_3k_2-b_2k_3 & a_5-b_4k_2-b_3k_3 & a_6-b_4k_3 & a_7 & & & & \\
 k_4 & & k_4b_2 & k_4b_3 & k_4b_4 & & & & \\
 \hline
 0 & a_5-b_4k_2-b_3k_3-k_4b_2 & a_6-b_4k_3-k_4b_3 & a_7-k_4b_4 & a_8 & & & & \\
 k_5 & & b_2k_5 & b_3k_5 & b_4k_5 & & & & \\
 \hline
 0 & a_6-b_4k_3-k_4b_3-b_2k_5 & a_7-k_4b_4-b_3k_5 & a_8-b_4k_5 & a_9 & & & & \\
 k_6 & & k_6b_2 & k_6b_3 & k_6b_4 & & & & \\
 \hline
 0 & a_7-k_4b_4-b_3k_5-k_6b_2 & a_8-b_4k_5-k_6b_3 & a_9-k_6b_4 & & & & & \\
 k_7 & & . & . & . & & & & \\
 \hline
 0 & . & . & . & & & & &
 \end{array}$$

где

$$k_1 = a_1$$

$$k_2 = a_2 - b_2k_1$$

$$k_3 = a_3 - b_2k_2 - b_3k_1$$

$$k_4 = a_4 - b_2k_3 - b_3k_2 - b_4k_1$$

$$k_4 = a_4 - b_2k_3 - b_3k_2 - b_4k_1$$

$$k_5 = a_5 - b_2k_4 - b_3k_3 - b_4k_2$$

$$k_6 = a_6 - b_2k_5 - b_3k_4 - b_4k_3$$

$$k_7 = a_7 - b_2k_6 - b_3k_5 - b_4k_4$$

По индексам выведем рекуррентные соотношения

$$k_i = a_i - \sum_{j=2}^i b_j \cdot k_{i+1-j} \quad (i \leq n)$$

$$k_i = a_i - \sum_{j=2}^n b_j \cdot k_{i+1-j} \quad (i \geq n)$$

Учитывая (6.1), получим, что $k_i = y[i], i = 1, 2, \dots, N$

$$y[i] = a_i - \sum_{j=2}^i b_j \cdot y_{i+1-j} \quad (i \leq n), \quad (6.2)$$

$$y[i] = a_i - \sum_{j=2}^n b_j \cdot y_{i+1-j} \quad (i \geq n) \quad (6.3)$$

Обычно, легче снять реакцию звена на ступенчатое воздействие, а не на дельта-функцию. Поэтому, предлагается сначала снять переходную характеристику $h(t)$ и продифференцировать её численными методами, получив приближенную решётчатую импульсную переходную характеристику $y[n]$. После этого, решить систему уравнений, образованную уравнениями (6.2) и (6.3). Получив, тем самым, коэффициенты a_i и b_i для передаточной функции $W(z)$.

Скрипт, выполняющий идентификацию по переходной характеристике, написанный для пакета MatLab, приводится ниже. Пример использования скрипта идентификации приведён в [приложении №5](#).

Скрипт, выполняющий идентификацию объекта по переходному процессу

```

-----
function ab=id(h, T, n, Tbf);
% функция выполняет идентификацию объекта по переходному процессу
% Синтаксис: id(h, T, n, Tbf)
% Вход:
% h -- Массив с переходным процессом, полученный в Simulink
% T -- Период квантования
% n -- Степень полинома знаменателя F(z) (Степень
% полинома числителя n+1).
% Tbf -- Момент времени, начиная с которого вычисляются коэффи-
% циенты полинома знаменателя. Необязательный аргумент.
% Выход:
% ab -- массивы коэффициентов

%*****
%***** Список констант *****
%*****

t=1; % Индекс времени
H=2; % Индекс переходного процесса
mn=1; % m-n
tf=0; % Момент времени, начиная с которого
% отсчитывается переходный процесс

%*****
%***** Определение используемых переменных *****

```



```

%*****

nn=n+1;          %Степень полинома знаменателя +1 (для свободного члена)
mm=nn+mn;       %Степень полинома числителя
% w            % решётчатая функция импульсной переходной характеристики
a=zeros(1, mm); % Предварительное выделение памяти под массивы;
b=zeros(1, mm); % позволяет сократить время выполнения функции.
ab=zeros(2, mm);

%*****
%***** Основные проверки *****
%*****

if nargin==3
    Tbf=0;      % Такт, начиная с которого будут вычисляться b(i)
end

if nargin<3
    error('Число входных аргументов, должно быть равно 3 или 4');
end
if nargin>4
    error('Число входных аргументов, должно быть равно 3 или 4');
end

h=h';

if h(t,1)>tf
    error('Переходный процесс начинается слишком поздно');
end

if h(t,end)<tf+T*(mm+nn+Tbf)
    error('Переходный процесс слишком короткий');
end

% В массиве полинома числителя будет n+1 элемент

%*****
%***** Расчёт решётчатой функции w(n) *****
%*****

j=1;          % Индекс входного массива
if h(t,j)==tf;
    h1=h(H,j);
else
    while h(t,j)<tf
        j=j+1;
    end;
    % следующая строка производит интерполяцию.
    h1=(tf-h(t,j-1))*(h(H,j)-h(H,j-1))/(h(t,j)-h(t,j-1))+h(H,j-1);

```

```

end;
h0=h1;
for i=1:nn+mm+Tbf
    w(i)=h1-h0;
    h0=h1;
    while h(t,j)<T*i+tf
        j=j+1;
    end;
    h1=(T*i+tf-h(t,j-1))*(h(H,j)-h(H,j-1))/(h(t,j)-h(t,j-1))+h(H,j-1);
end;

%*****
%***** Расчёт коэффициентов полинома знаменателя b *****
%*****

c=w(mm+1+Tbf:mm+n+Tbf);
for i=mm+1:mm+n
    for j=2:n+1
        A(i-mm,j-1)=-w(i+1-j+Tbf);
    end;
end;
d=inv(A)*c';
b(1:n+1)=[1; d];

%*****
%***** Расчёт коэффициентов полинома числителя a *****
%*****

for i=1:mm
    k=0;
    for j=2:i
        k=k+b(j)*w(i-j+1);
    end;
    a(i)=w(i)+k;
end;

ab=[a; b];

```

6.2 Компенсация возмущений

Основной задачей систем управления таких электроприводов, как приводы летучих ножниц, является точная обработка задания по положению при воздействии возмущений электрического и механического характера.

Здесь рассмотрены способы управления с компенсацией возмущений электропривода на основе математической модели, встраиваемой в программное обеспечение контроллера системы управления. Суть метода заключается в следующем. На объект и его модель подаётся одинаковое задание. Далее по разности скоростей модели и объекта вычисляется величина добавки ΔG , на которую необходимо изменить задание G , чтобы скомпенсировать возмущения F_i (см. рис. 6.1).

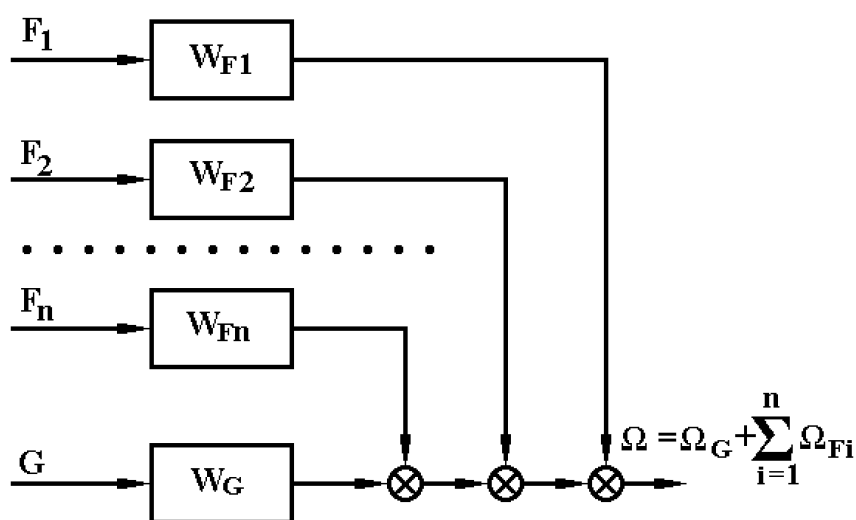


Рис. 6.1. Упрощённая структура объекта.

6.2.1 Оценка возмущения.

В рассмотренном в данной работе методе компенсации возмущений строится упрощённая модель объекта, содержащая передаточные функции по заданию $\widehat{W}_G(s) \approx W_G(s)$ и по какому-либо возмущению F_i $\widehat{W}_F(s) \approx W_{Fi}$. Все прочие возмущения считаются приведёнными к F_i , и в модель не входят. На объект и модель подаётся одинаковое задание. Затем сравниваются скорости на их выходах. Разность скоростей подаётся через звено оценки $W_{оц}$ на вход модели по возмущению F рис. 6.2. На $W_{оц}$ получается оценка при-

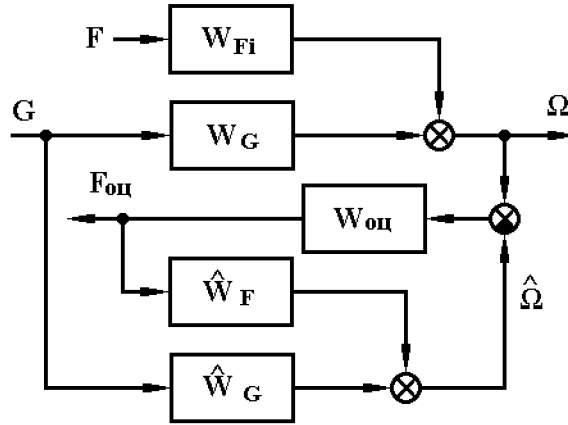


Рис. 6.2. Оценка возмущения на основе модели.

ведённого возмущения $F_{\text{оц}}$, которая подаётся через звено коррекции $W_{\text{к}}(s)$ на объект.

Вначале рассмотрим способ получения оценки возмущения. Система оценки рис. 6.2 будет устойчива, если устойчиво звено $\widehat{W}_F(s) \cdot W_{\text{оц}}(s)$, охваченное единичной отрицательной обратной связью (ООС). При $\widehat{W}_F(s) \rightarrow W_{Fi}(s)$ звено $W_{\text{оц}}(s) \cdot \widehat{W}_F(s)$ должно быть астатическим или в области значимых частот иметь большой коэффициент усиления. В общем случае передаточная функция $W_{\text{оц}}(s)$ должна стремиться к

$$W_{\text{оц}}(s) \rightarrow \frac{1}{W_{Fi}(s) - \widehat{W}_F(s)} \quad (6.4)$$

Влияние произвольного возмущения F_k , на оценку определяется передаточной функцией

$$\frac{F_{\text{оц}}}{F_k} = \frac{W_{Fk}(s) \cdot W_{\text{оц}}(s)}{1 + \widehat{W}_F(s) \cdot W_{\text{оц}}(s)} \quad (6.5)$$

Поскольку модель не может полностью соответствовать объекту по различным причинам (параметры объекта не всегда могут быть измерены с требуемой точностью или могут меняться в процессе эксплуатации оборудования), оценка приведённого возмущения $F_{\text{оц}}$ будет также зависеть от задания G . Передаточная функция оценки по заданию имеет вид:

$$\frac{F_{\text{оц}}}{G} = (W_G(s) - \widehat{W}_G(s)) \cdot \frac{W_{\text{оц}}(s)}{1 + \widehat{W}_F(s) \cdot W_{\text{оц}}(s)} \quad (6.6)$$

Из (6.6) видно, что оценка возмущения будет независима от задания, если модель точная $W_G(s) = \widehat{W}_G(s)$. Для удобства дальнейшего синтеза системы,

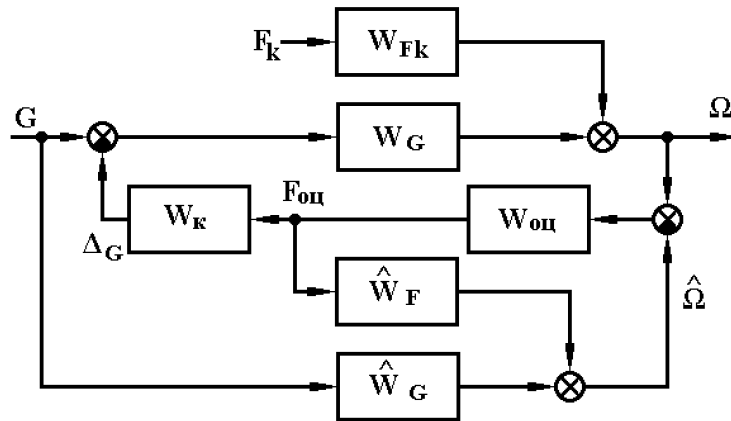


Рис. 6.3. Первый вариант коррекции.

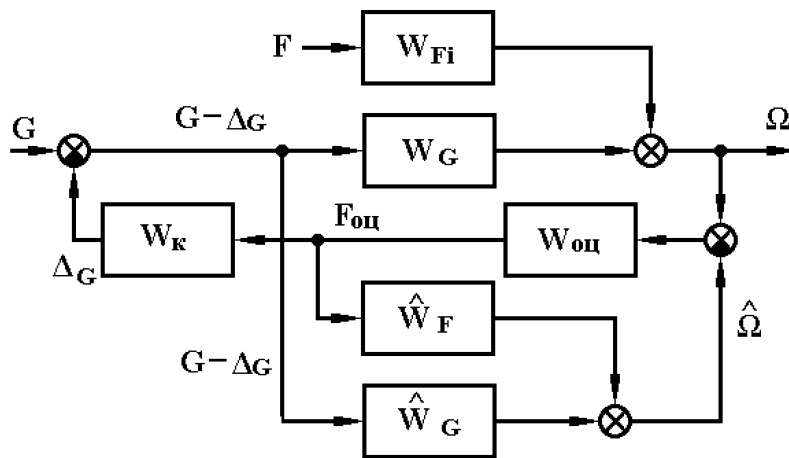


Рис. 6.4. Второй вариант коррекции.

желательно, чтобы оценка возмущения была не слишком колебательной. Поэтому следует стремиться к тому, чтобы звено $\widehat{W}_F(s) \cdot W_{оц}(s)$ имело частотные характеристики, соответствующие, например, системе, настроенной на модульный оптимум.

6.2.2 Первый вариант коррекции.

Корректирующий сигнал ΔG , получаемый на выходе звена $W_K(s)$, можно вводить двумя способами. В первом случае (рис. 6.3) сигнал добавляется только к заданию объекта, во втором случае (рис. 6.4) сигнал добавляется к заданию и модели, и объекта.

Рассмотрим в начале первый вариант. Скорректированная система будет устойчива, если устойчиво охваченное единичной ООС звено $W_G \cdot W'(s)$, где

$$W'(s) = \frac{W_{\text{оц}}(s) \cdot W_{\text{к}}(s)}{1 + \widehat{W}_F(s) \cdot W_{\text{оц}}(s)}$$

Передаточные функции по заданию и возмущению будут иметь вид

$$\frac{\Omega}{G} = \frac{\Omega_G - \Omega_{\Delta G}}{G} == W_G - \frac{W_G \cdot W'}{1 + W_G \cdot W'} \cdot (W_G - \widehat{W}_G) \quad (6.7)$$

$$\frac{\Omega}{F_k} = \frac{W_{Fk}(s)}{1 + W_G \cdot W'}. \quad (6.8)$$

Ошибка по возмущению будет стремиться к нулю, если

$$W_G(s) \cdot W'(s) \rightarrow \infty. \quad (6.9)$$

Желательно $W_{\text{к}}(s)$ выбирать таким образом, чтобы передаточная функция $W_G(s) \cdot W'(s)$ соответствовала настройке на модульный оптимум. Из (6.7) и (6.9) видно, что передаточная функция по заданию скорректированной системы будет стремиться к $\widehat{W}_G(s)$ в области значимых частот, что позволяет в некоторых пределах изменять отработку задания.

6.2.3 Коррекция системы по второму варианту.

В изображённом на рис. 6.1 варианте получаемый на выходе $W_{\text{к}}(s)$ корректирующий сигнал ΔG подаётся как на вход самого объекта, так и на вход его модели. Система будет устойчива, если будет устойчиво звено

$$W'(s) \cdot (W_G(s) - \widehat{W}_G(s)). \quad (6.10)$$

охваченное единичной ООС. Передаточные функции по заданию и возмущению будут иметь вид:

$$\frac{\Omega}{G} = \frac{W_G(s)}{1 + W'(s) \cdot (W_G(s) - \widehat{W}_G(s))} \quad (6.11)$$

$$\frac{\Omega}{F_k} = \frac{W_G(s)}{1 + W'(s) \cdot (W_G(s) - \widehat{W}_G(s))} \quad (6.12)$$

Из (6.12) видно, что система инвариантна по возмущению, если $W'(s) = 1/\widehat{W}_G(s)$ или звено коррекции $W_{\text{к}}(s)$ имеет вид

$$W_{\text{к}} = \frac{1 + \widehat{W}_F \cdot W_{\text{оц}}}{\widehat{W}_G \cdot W_{\text{оц}}}. \quad (6.13)$$

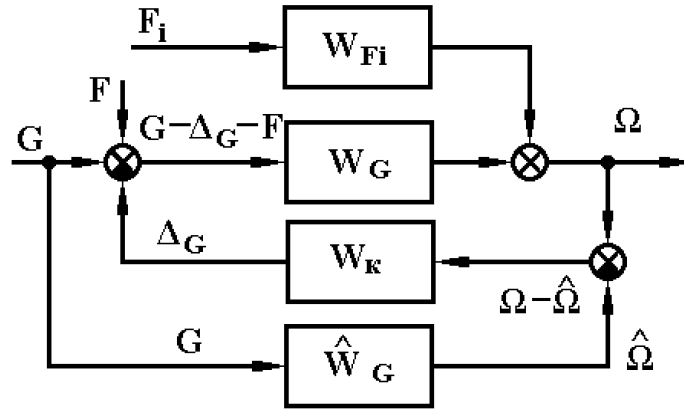


Рис. 6.5. Третий вариант коррекции.

При выборе $W_K(s)$ по формуле (6.13) передаточная функция по заданию скорректированного объекта будет такая же, как и у выбранной модели.

На практике, при использовании данного метода, рассчитанную по формуле (6.13) передаточную функцию $W_K(s)$ следует дополнить фильтром. С учётом малых постоянных времени, формула для звена коррекции примет вид

$$W_K(s) = \frac{1 + \widehat{W}_F(s) \cdot W_{\text{оц}}(s)}{\widehat{W}_G(s) \cdot W_{\text{оц}}(s)} \cdot \prod_{i=1}^N \frac{1}{\tau_i \cdot s + 1}, \quad (6.14)$$

где τ_i учитывают малые постоянные времени используемого оборудования.

6.2.4 Коррекция системы по приведённому ко входу возмущению. Первый вариант.

Удобно рассматривать случай, когда возмущение приведено ко входу объекта. Тогда можно не выполнять оценку и воспользоваться более простыми структурными схемами рис. 6.5 и 6.6. Корректирующий сигнал ΔG при использовании точной модели ($W_G(s) = \widehat{W}_G(s)$) может выступать в роли оценки приведённого ко входу возмущения.

В первом варианте рис. 6.5 на модель и объект подаётся задание G , далее, скорости на выходе модели и объекта сравниваются, и их разность подаётся на вход звена коррекции $W_K(s)$, затем, корректирующий сигнал ΔG , снимаемый с выхода звена $W_K(s)$, суммируется с заданием G и подаётся на вход объекта.

Передаточные функции по заданию и возмущению будут иметь вид:

$$\frac{\Omega}{G} = W_G(s) - \frac{W_G(s) \cdot W_K(s)}{1 + W_G(s) \cdot W_K(s)} \cdot (W_G(s) - \widehat{W}_G(s)). \quad (6.15)$$

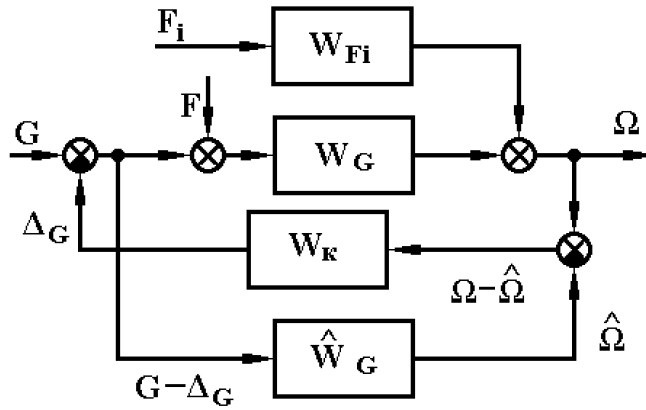


Рис. 6.6. Четвёртый вариант коррекции.

$$\frac{\Omega}{F_i} = \frac{W_{Fi}(s)}{1 + W_G(s) \cdot W_K(s)}. \quad (6.16)$$

Система будет устойчива, если будет устойчиво звено $W_G(s) \cdot W_K(s)$, охваченное единичной ООС, причём желательно его настроить на модульный оптимум, чтобы система не была колебательной. Условие инвариантности по возмущению имеет вид:

$$W_G(s) \cdot W_K(s) \rightarrow \infty. \quad (6.17)$$

Выполнение (6.17) можно обеспечить только в установившемся режиме, если передаточная функция $W_G(s) \cdot W_K(s)$ будет содержать астатическое звено. В тех же случаях, когда с небольшим отклонением скорости в установившемся режиме можно примириться, достаточно обеспечить большой коэффициент усиления данного звена в области значимых частот. Из (6.15) видно, что отработка задания системой в области значимых частот будет стремиться к отработке задания моделью.

6.2.5 Коррекция системы приведённого ко входу возмущению. Второй вариант.

Во втором варианте, изображённом на рис. 6.6, на модель и объект подаётся одинаковое задание G , затем скорости на выходе модели и объекта сравниваются, и их разность подаётся на вход звена коррекции $W_k(s)$, далее корректирующий сигнал ΔG , снимаемый с $W_k(s)$, суммируется с заданием G и подаётся на входы объекта и модели. Передаточные функции по заданию и возмущению в такой системе имеют вид:

$$\frac{\Omega}{G} = \frac{W_G(s)}{1 + W_k(s) \cdot (W_G(s) - \widehat{W}_G(s))}. \quad (6.18)$$

$$\frac{\Omega}{F_i} = \frac{W_{Fi}(s) \cdot (1 - \widehat{W}_G(s) \cdot W_k(s))}{1 + W_k(s) \cdot (W_G(s) - \widehat{W}_G(s))}. \quad (6.19)$$

Из (6.19) следует, что система будет инвариантна по возмущению в том случае, когда $1 - \widehat{W}_G(s) \cdot W_k(s) = 0$. Отсюда находим выражение для звена $W_k(s)$:

$$W_k(s) = \frac{1}{\widehat{W}_G(s)}. \quad (6.20)$$

Передаточная функция по заданию в таком случае будет совпадать с передаточной функцией модели. Звено с передаточной функцией (6.20) может оказаться физически не реализуемым. В этом случае звено коррекции будет иметь вид:

$$W_k(s) = \frac{1}{\widehat{W}_G(s)} \cdot \prod_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i \cdot s + 1} \quad (6.21)$$

где τ_i — учитывают малые постоянные времени реального оборудования. Система будет устойчива, если будет устойчиво охваченное единичной ООС звено

6.2.6 Сравнение вариантов компенсации возмущений.

В предыдущих параграфах было предложено четыре структурных схемы, использующих модель объекта для компенсации возмущений. Сравним их преимущества и недостатки. Первые два варианта построения систем (рис. 6.3 и 6.4) используют для формирования корректирующего сигнала ΔG

оценку возмущения $F_{\text{оц}}$, полученную на основе разности скоростей модели и объекта. Другие два варианта (рис. 6.5 и 6.6) формируют корректирующий сигнал ΔG непосредственно из разности скоростей. Варианты рис. 6.3 и 6.4 с помощью несложных структурных преобразований могут быть легко приведены к вариантам рис. 6.5 и 6.6 соответственно, при этом в рис. 6.5 и 6.6 вместо $W_{\text{к}}(s)$ следует поставить $W'(s)$.

Условия инвариантности для схем рис. 6.3 и 6.4 аналогичны условиям инвариантности для схем рис. 6.5 и 6.6. Таким образом, к звеньям $W'(s)$ для схем рис. 6.3, 6.4 предъявляются те же требования, что и к звеньям $W_{\text{к}}(s)$ рис. 6.5, 6.6. Но, поскольку в состав звеньев $W'(s)$ входят другие звенья ($W_{\text{к}}(s)$, $\widehat{W}_F(s)$ и $W_{\text{оц}}(s)$), на функции $W'(s)$ накладываются дополнительные ограничения, обусловленные необходимостью выбирать входящие в них $W_{\text{к}}(s)$ физически реализуемыми. Из этого следует, что системы, построенные по вариантам рис. 6.3 и 6.4, будут, по крайней мере, не более быстродействующими, чем системы, построенные по вариантам рис. 6.5 и 6.6. Кроме того, системы рис. 6.3 и 6.4 более сложны в построении, поскольку требуют предварительно получить оценку возмущения. Единственным преимуществом систем построенных по варианту рис. 6.4 является то, что можно получить наряду с компенсацией возмущений оценку одного из них (при использовании точной модели).

6.2.7 Компенсация возмущений в электроприводе постоянного тока.

Ниже приведён пример применения коррекции по модели к двигателю постоянного тока с настроенными контурами тока и скорости и учётом ограничений на входе регулятора тока и тиристорного преобразователя. Модель подключается к выходу регулятора скорости и к валу двигателя. При введении коррекции по первому варианту, в качестве модели двигателя с контуром тока используется интегрирующее звено. Во втором варианте использована более точная модель. На рис. 6.7. Приведены переходные процессы отработки возмущения по моменту исходной системы и скорректированной по рис. 6.5 и 6.6.

Из рис. 6.7 видно, что величина отклонения скорости от заданной в скорректированных системах значительно меньше.

В данной работе исследованы четыре варианта построения систем компенсации возмущений с использованием модели. Показано, что, используя модель, можно не только компенсировать возмущения, но и в некоторых пределах изменять отработку задания скорректированной системы. Наибо-

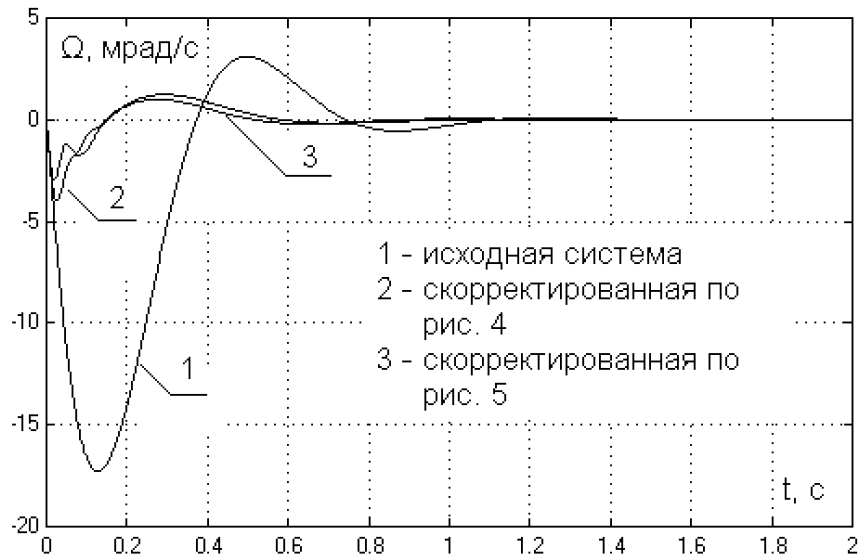


Рис. 6.7. Обработка возмущения по моменту сопротивления.

лее целесообразно использовать варианты, предложенные на рис. 6.5 и 6.6, в виду простоты их настройки и выбора звеньев $W_k(s)$. В тех случаях, когда наряду с компенсацией возмущений требуется получить оценку одного из них, предпочтительнее использовать структуру, предложенную на рис. 6.4, но при этом придётся отказаться от коррекции отработки задания, потому что оценка возмущения будет равна значению самого возмущения только при использовании точной модели.

7. Безопасность объекта

7.1 Анализ вредных и опасных факторов на производстве

Все действующие на человека отрицательные факторы делятся на вредные и опасные. Вредными называют такие факторы, которые могут постепенно вызывать заболевания или недомогания. Опасными факторами называются те, которые могут вызывать внезапно травму или резкое ухудшение состояния здоровья вплоть до летального исхода.

Все отрицательные факторы делятся на следующие группы:

- *физические* — это физическое воздействие факторов на организм (электрический ток, электромагнитное излучение, подвижные части станков и пр.);
- *химические* — это воздействие сильнодействующих ядовитых веществ на организм;
- *биологические* — влияние вирусов, микробов, которые или сами, или своими токсинами поражают организм).
- *психофизиологические*, к которым относятся перегрузки физическая, нервная или умственная.

Основными вредными и опасными факторами проектируемого станка являются:

- электрический ток (наличие источников высокого напряжения 850 В) и более;
- высокая температура воздуха в помещении;
- присутствие деталей, нагретых до очень высокой температуры. (Например, температура поверхности проката — 850 ··· 950°С);

- повышенный шум и вибрация, возникающие при транспортировке проката по рольгангам и особенно при его порубке на мерные длины;
- наличие подвижных вращающихся частей станка;
- химические факторы.

Рассмотрим их подробнее.

Окружающая среда: условия цеха горячей прокатки. Производственные помещения подразделяются на несколько типов:

- Повышенной опасности. Влажность до 75 % или токопроводящей пыли, наличие токопроводящих полов (железобетонных, железных, земляных), наличие высокой температуры (более 35°), возможность одновременного прикосновения к металлическим корпусам оборудования с одной стороны, и к металлическим конструкциям заземлений с другой.
- Особо опасные. Наличие особой сырости (влажность до 100 %. Наличие химически активной среды, где постоянно или длительно имеются пары или отложения, которые могут разрушительно воздействовать на изоляцию оборудования. Наличие двух и более признаков помещений повышенной опасности.
- Неопасные. К ним относятся помещения, в которых отсутствуют признаки особо опасных помещений или помещений повышенной опасности.

7.1.1 Шум и вибрация

Шум — это комплекс звуков различной частоты $f = 20 \dots 20 \cdot 10^3$ Гц. Энергетической характеристикой шума является интенсивность звука I , измеряемая Вт/м², или звуковое давление p , измеряемое в Па. Диапазон восприятия звука человеком лежит в пределах $I = 10^{-12} \dots 10$ Вт/м² или $p = 10^{-5} \dots 10^2$ Па. Нижней границе соответствует *порог слышимости* (звук, воспринимаемый людьми с очень хорошим слухом), верхней — *болевой порог*.

Уровень шума принято выражать в дБ:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{p}{p_0},$$

где $I_0 = 10^{-12}$ и $p_0 = 10^{-5}$ — порог слышимости. Воздействие шума зависит как от его интенсивности, так и от его частоты.

Шумы делятся на *постоянные* и *непостоянные*. Шум считается постоянным, если разница между наибольшей и наименьшей интенсивностью за время работы станка не превышает 5 дБ.

Непостоянные шумы делятся на три типа:

- *колеблющиеся*;
- *прерывистые*, уровень которых изменяется ступенчато более, чем на 5 дБ, при этом продолжительность интервала, на котором шум не меняется, не менее 1 с;
- *импульсные шумы*.

Сильный шум может неблагоприятно воздействовать на органы слуха (приводить к ухудшению чувствительности слуха, и может даже стать причиной глухоты) и на мозг (повышает утомляемость, раздражительность и внутричерепное давление, ухудшает память, зрение и внимание, нарушает работу вестибулярного аппарата и желудка).

В проектируемом станке шумы возникают вследствие транспортировки проката по рольгангам (постоянные), и в процессе рубки летучими ножницами (импульсные).

Для борьбы с шумом следует устранять источники шума, что не всегда осуществимо. Поэтому, нужно по возможности изолировать рабочее место обслуживающего персонала от шума. В шумных производственных помещениях иногда облицовывают потолок и части стен (не менее 50 % их поверхности) звукопоглощающими материалами, например пористыми плитами и перфорированными конструкциями. Могут применяться также средства индивидуальной защиты, например шлемы.

Вибрация — это механические колебания различной частоты. Основными характеристиками вибрации являются амплитуда, скорость, ускорение, частота и уровень колебаний. По характеру воздействия вибрация делится на

- *транспортную*, связанную с перемещением в транспортных средствах;
- *производственную*, возникающую из-за технологических колебаний;
- *смешанную*.

По месту приложения вибрация делится на *местную* и *общую*. Местная вибрация вызывает спазмы периферических сосудов, нервномышечные расстройства, постмышечные расстройства (плохо действуют шарнирные

суставы). Местная вибрация может возникать, например, при работе с ручным пневматическим инструментом.

Общая вибрация воздействует на центральную нервную и сердечно-сосудистую системы, вестибулярный аппарат, внутриобменные процессы. Она может передаваться через пол, фундамент.

Воздействие вибрации так же, как и шума, зависит от уровня и частоты. Для большинства органов человеческого организма резонансная частота составляет $6 \dots 9$ Гц. Следует избегать появления механических колебания на этой частоте. Порог восприимчивости вибрации $v_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ м/с. Болевой предел — $v = 1$ м/с. Уровень вибрации обычно выражают в дБ:

$$L_v = 20 \lg \frac{v}{v_0}.$$

Возникновение вибрации может быть связано с работой машин с неправильно сбалансированными валами, с нарушениями соединений отдельных частей механизма, с явлениями механического резонанса.

Для уменьшения уровня вибрации до допустимых санитарных норм, устраняют резонансные явления, проводят балансировку, уменьшают слишком большие зазоры в передачах и т.п. Также вводятся нормы на работу с оборудованием с повышенным уровнем вибрации, согласно которым, в частности, общая продолжительность местной вибрации не должна превышать $2/3$ рабочего времени, продолжительность действия непрерывной вибрации не должна превышать $15 \dots 20$ мин.

На проектируемом объекте может присутствовать только производственная общая вибрация, поскольку непосредственно с колеблющимися частями механизма человек не соприкасается.

Для уменьшения уровней шума и вибрации на организм человека в дипломном проекте предусмотрено автоматическое и дистанционное управление, технологическим процессом на летучих ножницах.

7.1.2 Электрический ток

Особую опасность для жизни людей представляет поражение электрическим током. Оно может возникнуть при соприкосновении с токоведущими элементами оборудования (проводами, шинами), а также с металлическими частями оборудования (корпусами, стойками), на которых может появиться напряжение в случае пробоя или иного повреждения изоляции.

Виды поражения электрическим током делятся на

- *местное воздействие*, характеризующееся местными травмами: электрическими ожогами и знаками, металлизацией и механическими повреждениями кожи, электроофтальмией;
- *общее воздействие* или *электроудар*.

Различают четыре степени электрических ударов:

- Первая степень — судорожные движения без потери сознания;
- Вторая степень — судорожные сокращения мышц с потерей сознания, но с сохранением работы сердца и дыхания;
- Третья степень — судорожные сокращения мышц с потерей сознания и с нарушением работы сердца и (или) дыхания;
- Четвёртая степень — клиническая смерть.

Характер воздействия тока зависит от рода тока и частоты (постоянный или переменный, наиболее опасным является ток с частотой $20 \dots 100$ Гц, например, пороговый неотпускающий ток при частоте 50 Гц — $6 \dots 10$ мА, а постоянный — $50 \dots 80$ мА), величины тока, физических данных человека, состояния окружающей среды (влажность, химический состав, наличие токопроводящей пыли и др.), времени воздействия (например, при времени воздействия $\tau = 0,1$ с максимально допустимый ток — 500 мА, а при $\tau = 1$ с — 50 мА), его пути (например, ток, протекающий только через руку менее опасен для жизни, чем протекающий через весь организм).

Электрический ток, проходя через живой организм, оказывает термическое, электролитическое и биологическое воздействие. Термическое действие тока выражается в ожогах тела, нагреве кровеносных сосудов и крови, нервов и других органов, вызывая в них серьезные функциональные расстройства. Электролитическое действия тока проявляется в разложении крови и других органических жидкостей, приводящим к нарушению их физико-химического состава. Биологическое действие тока проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей организма, сопровождающихся произвольными судорожными сокращениями мышц сердца, легких и других тканей.

Различают несколько пороговых значений тока по степени влияния на организм: *электрический ток восприимчивости* — это наименее ощутимая величина тока; *пороговый не отпускающий ток* — наименьшая величина тока, при которой человек уже не может самостоятельно освободиться от захваченных электродов действием тех мышц, через которые проходит ток;

фибрилляционный ток — ток вызывающий фибрилляцию. Значения величин тока приведены в нижеследующей таблице №7.1.

Таблица 7.1. Пороговые значения тока.

Род тока	Пороговый осязательный, мА	Пороговый неотпускающий, мА	Пороговый фибрилляционный, мА
50 Гц	0,5... 1,5	6... 10	80... 100
Постоянный ток	5... 7	50... 80	300

Протекающий через человеческий организм ток зависит как от приложенного напряжения, так и от сопротивления организма. Сопротивление тела человека изменяется от нескольких сотен Ом до нескольких кОм; Это величина нелинейная и зависит от следующих факторов:

- состояния кожи (сухая, влажная, чистая, повреждённая и т. п.);
- плотности контакта;
- площади контакта;
- величины тока проходящего через человека, и приложенного напряжения;
- времени воздействия тока на человека.

Считается, что ток не достигнет опасных значений при напряжении 36 В, которое считают безопасным.

Меры по защите от воздействия электрического тока:

1. по возможности переходить от переменного тока к постоянному;
2. снижение напряжения питающей сети (желательно до напряжения не более 36 В);
3. Защитные способы: использование предохранителей;
4. Использование *защитных заземлений* металлических корпусов соответствующим электрооборудованием на случай пробоя изоляции. Сопротивление между корпусом и землёй не должно превышать 4 Ом;
5. Устройства специальных ограждений, табличек, применение изолирующих устройств (вплоть до перчаток);
6. организационные мероприятия, обеспечивающие безопасность производства работ;

7. Заземление шкафов для преобразователей и контроллеров, двигателей и других металлических конструкций, которые могут оказаться под напряжением;
8. Применение экранированных силовых кабелей;
9. Заземление электродвигателей;
10. Выбор и установка электрооборудования в соответствии с условиями окружающей среды;
11. Ограждения токоведущих частей электрооборудования;
12. Применение защитных средств при обслуживании электроустановок;
13. Контроль и профилактика повреждения изоляции;

7.1.3 Высокая температура

Поскольку в цехе производится горячая прокатка металла, то воздух имеет повышенную температуру, что неблагоприятно для находящегося там персонала, поскольку при определённых условиях может происходить перегрев организма (человек чувствует себя устало, вяло, начинает делать ошибки и может получить тепловой удар). С целью понижения интенсивности теплообмена устанавливаются отражательные экраны, применяют теплоизоляцию, ограничивают температуру на поверхности предметов (менее 45°). Ставятся водяные затворы; применяют вентиляцию, которая удаляет избыток тепла и вредных веществ. Для защиты может использоваться также спец. одежда.

Для снижения температуры в помещении может использоваться общеобменная вентиляция вытяжная или приточная.

Очень опасным фактором является наличие в цехе деталей с очень высокой температурой. Например, температура проката составляет 850...950°С. При соприкосновении с таким предметом человек может получить травму вследствие очень сильного ожога или погибнуть.

Поскольку по технологическим причинам снизить температуру проката нельзя, то основными мерами по защите персонала являются установка ограждений и вывешивание предупреждающих табличек, а также организационные мероприятия.

7.1.4 Наличие подвижных вращающихся частей

Очень опасным фактором в проектируемом станке является наличие подвижных деталей с мощными приводными двигателями (около 1 МВт), которые могут стать причиной тяжёлых травм или гибели обслуживающего персонала. Для защиты персонала необходимо выполнить следующие мероприятия:

1. Установка ограждений, табличек;
2. установка защитных кожухов над вращающимися деталями;
3. проведение организационных мероприятий.

7.2 Охрана труда

7.2.1 Безопасность ремонтных работ

Для обеспечения условий безопасной эксплуатации, ремонта и технического обслуживания оборудования предусматриваются монтажные проёмы, стационарные или передвижные подъёмно-транспортные и такелажные приспособления и устройства.

Организационные мероприятия по обеспечению безопасности производства работ в электроустановках — следующие:

1. оформление работы нарядом или распоряжением;
2. оформление в наряде допуска к работе;
3. надзор во время работы;
4. оформление в наряде окончания работы;
5. закрытие наряда.

Техническими мероприятиями по обеспечению безопасности работ являются:

1. отключение ремонтируемого электрооборудования и принятие мер против ошибочного его включения;
2. Установка временных ограждений токоведущих частей и вывешивание запрещающих плакатов «Не включать — работают люди» или «Не включать — работы на линии»;
3. Для предотвращения аварий работы в электроустановках по срочному устранению неисправностей выполняются оперативно — ремонтным персоналом без наряда.

При работе с электрическими цепями напряжением до 1 000 В необходимо применять следующие основные защитные средства:

- диэлектрические перчатки;
- электроизмерительные клещи;
- указатели напряжения;

- слесарно-монтажный инструмент.

Все электротехнические защитные средства должны периодически проверяться и на них должен указываться срок безопасного применения.

7.2.2 Расчёт заземлений

Для защиты людей от поражений электрическим током применяется защитное заземление. Под защитным заземлением понимается преднамеренное электрическое соединение с землёй или её эквивалентом металлических нетоковедущих конструкций. Заземляться должны: корпуса шкафов управления, электрических машин, трансформаторов, светильников, переносной электроинструмент трубы с электропроводкой и другие металлические части, которые могут оказаться под напряжением.

Расчёт защитного заземления имеет целью определить основные параметры заземления — число, размеры и размещение одиночных заземлителей и заземляющих проводов, при которых напряжение прикосновения и шага в период замыкания фазы на заземлённый корпус не превышает безопасных значений.

Заземляющим устройством называется совокупность одиночных заземлителей и проводников, соединяющих эти заземлители.

Заземлителем называется металлический электрод любой формы (труба, стержень, полоса и т. д.), находящийся в соприкосновении с грунтом и создающий с ним электрическое соединение определённого сопротивления.

Различают заземлители искусственные и естественные. Естественные заземлители — это проложенные в грунте металлические конструкции зданий и сооружений. В качестве искусственных заземлителей обычно применяются металлические трубы длиной 2...3 м, диаметром 40...80 мм. Диаметр трубы выбирается по условиям механической прочности, которая необходима при забивке трубы в землю. Расстояние между заземлителями берётся равным 1...3 длинам трубы.

В заземляющем устройстве заземлители располагаются в один ряд или по контуру.

Сопротивлением растеканию тока служит суммарное электрическое сопротивление подводящего провода, переходного контакта от заземлителей к грунту, и сопротивление прохождению (растеканию) токов в прилегающих слоях грунта. Величина сопротивления заземления зависит в основном от сопротивления прохождению токов в прилегающих слоях грунта.

Сопротивление защитного заземления R_3 нормируется. В электроустановках до 1 000 В R_3 должно быть не более 4 Ом. В электроустановках напряжением свыше 1 000 В R_3 должно быть не более 10 Ом, а при очень больших токах (свыше 500 А) $R_3 \leq 0,5$ Ом.

В соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» сопротивление заземления должно измеряться не реже одного раза в год в периоды наименьшей проводимости: один раз — летом, при наибольшем просыхании почвы и один раз зимой, при наибольшем промерзании почвы.

Выполним расчёт заземления.

Расчёт заземления был произведён в математическом пакете Mathcad 7.0 и приведён в [приложении №4](#).

Исходные данные

Грунт торф;
 Удельное сопротивление грунта, Ом · см $\rho = 0,2 \cdot 10^4$;
 Длина заземлителя (трубы), см $l = 300$ см;
 Диаметр заземлителя, см $d = 5$ см;
 Глубина заложения заземлителя, см $h = 100$;
 Расстояние между заземлителями a , см $a = 3l = 900$

Заземлители будем располагать по контуру.

Максимально допустимое сопротивление заземляющего устройства $R_{\text{доп}} = 0,5$ Ом, т. к. ток замыкания может превышать 1 000 А. (рабочий ток каждого из двух двигателей более 1 000 А).

1. Рассчитаем сопротивление растеканию тока одиночного трубчатого заземлителя $R_{\text{тр}}$ рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l}{4t - l} \right) = 5,4 \text{ Ом},$$

где ρ — удельное сопротивление грунта, Ом · см;

$l = 300$ см — длина трубы, см;

$d = 5$ см — диаметр трубы, см;

t — расстояние от поверхности до середины заземлителя, $t = h + l/2 = 250$, см;

$h = 100$ см — глубина заложения.

2. Рассчитаем приближенное число заземлителей n' :

$$n' \approx \frac{R_{\text{тр}}}{R_{\text{доп}}} = 10,8.$$

3. По приближенному числу заземлителей n' из графика рис. 5. методического указания находим коэффициент использования заземлителей $\eta_{\text{тр}}$.

$$\eta_{\text{тр}} = 0,75$$

$$a/l = 3$$

4. Определяем число заземлителей n с учётом $\eta_{\text{тр}}$:

$$n \approx \frac{R_{\text{тр}}}{R_{\text{доп}} \eta_{\text{тр}}} = 14,4.$$

Окончательно примем

$$n = 15.$$

5. Найдём длину полосы L , соединяющей заземлители по формуле (для расположенных по контуру):

$$L = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,4 \cdot 10^4 \text{ см},$$

где a — расстояние между заземлителями.

6. Определяем сопротивление полосового заземлителя $R_{\text{п}}$, уложенного на заданную глубину h от поверхности земли

$$R_{\text{п}} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2 \cdot L^2}{bh} = 0,29 \text{ Ом},$$

где L — длина полосы, см; $b = 10$ см — ширина полосы, см; $h = 100$ см — глубина заложения от поверхности земли, см.

7. Вычисляем общее сопротивление заземляющего устройства по формуле

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_{\text{тр}} R_{\text{п}}}{n \cdot R_{\text{п}} \eta_{\text{тр}} + R_{\text{тр}} \eta_{\text{п}}} = 0,26 \text{ Ом}$$

где $\eta_{\text{п}} = 0,52$ — коэффициент использования полосы (по графику рис. 7. из методического указания).

7.3 Защита при чрезвычайных ситуациях

7.3.1 Классификация чрезвычайных ситуаций

Под чрезвычайной ситуацией понимают внезапно возникшую обстановку в следствие стихийных бедствий, крупных аварий, и катастроф, социально-политических и военных конфликтов, требующую экстренных мер по защите населения и народного хозяйства, а также по ликвидации последствий указанных событий.

По масштабам чрезвычайные ситуации подразделяются:

- *локальные* занимают один цех или одно помещение;
- *объектовые* охватывают объект/производство;
- *местные* находятся в пределах города, посёлка;
- *региональные*, занимают территорию нескольких районов или областей;
- *глобальные*, их масштабы охватывают несколько республик или стран.

По причинам чрезвычайные ситуации подразделяются:

- стихийные бедствия (землетрясения, наводнения, ураганы, бури, сели, цунами, пожары);
- техногенные чрезвычайные ситуации;
- социально-политические конфликты;
- военно-политические конфликты;
- комбинированные.

К последствиям военно-политическим конфликтам в частности относятся

- ядерные взрывы;
- радиоактивное заражение местности;
- заражение местности химическими веществами;
- заражение в результате применения бактериологического оружия.

Последний пункт мы рассмотрим более подробно.

7.3.2 Защита при чрезвычайных ситуациях в военное время

Одним из наиболее опасных видов оружия массового уничтожения является бактериологическое оружие.

Идея использования бактериальных (биологических) средств, в качестве боевого оружия обусловлена историей эпидемических заболеваний человеческого общества. В те или иные времена в некоторых регионах мира возникали эпидемии инфекционных болезней, уносившие многие человеческие жизни. Это особенно ярко проявилось в ходе ведения боевых действий. Так при захватнических войнах в Мексике и Перу в 1741 г. английская армия из 27 тысяч общих потерь 20 тысяч потеряла вследствие эпидемических болезней. Приведенный пример свидетельствует о высокой опасности определенных болезней, которые уносят большое количество человеческих жизней и оказывают сильное психологическое воздействие на население соответствующей страны. Защита от бактериологического оружия усложняется тем, что оно может быть применено скрытно, бесшумно, а начало его поражающего действия проявляется лишь после того, как пройдет скрытый (инкубационный) период. Кроме того, бактериологическое оружие просто в изготовлении и применении. Поэтому, в ряде стран (США, Германии, Японии и др.) возникла мысль о создании специального биологического оружия.

В 1972 г. была принята международная Конвенция о запрещении разработки, производства и накопления бактериологического и токсинного оружия и об их уничтожении. Однако в некоторых странах, при строжайшем соблюдении секретности, по-прежнему проводятся исследования по разработке и созданию бактериологического оружия. Поэтому, необходимо изучать как само бактериологическое оружие, так и способы защиты от него.

Бактериологическое оружие представляет собой совокупность биологических компонентов, способных вызывать эпидемические болезни, и средств доставки их к цели. В настоящее время оно является одним из видов оружия массового поражения.

Заражение может произойти в результате вдыхания зараженного воздуха, употребления зараженных продуктов и воды, попадания микробов и токсинов на слизистые оболочки и кожу открытых участков тела.

Одним из наиболее вероятных и эффективных способов применения бактериологического оружия может быть создание аэрозолей, т. е. распыление в воздухе жидких или сухих бактериальных смесей, которые образуют бак-

териальное облако. Перемещаясь под действием ветра, облако может заражать людей и животных на значительных территориях.

В качестве средств доставки могут применяться:

- ракетная техника,
- артиллерия,
- авиация,
- диверсионный способ.

К признакам применения бактериологического оружия относятся:

- глухие разрывы авиационных бомб или других боеприпасов с образованием дыма или тумана;
- обнаружение в местах разрыва крупных осколков или остатков авиационных бомб необычного устройства;
- обнаружение на местности, зданиях и других предметах порошкообразных веществ и маслянистых жидкостей.

Раннее обнаружение признаков применения бактериальных средств позволит в короткие сроки направить в район заражения бактериологическую разведку, установить площадь заражения и вид возбудителя.

Рассмотрим некоторые возбудители опасных инфекционных болезней.

Инфекционные болезни, при применении бактериологического оружия, вызываются либо патогенными микроорганизмами, либо продуктами их жизнедеятельности — токсинами. Патогенные микроорганизмы подразделяются на следующие виды.

- *Бактерии* — одноклеточные микроорганизмы размером 0,5 ··· 10 мкм. Они весьма чувствительны к воздействию высокой температуры, солнечного света, резким колебанием температуры и дезинфицирующим средством, устойчивы к воздействию низких температур (до минус 15-20°С). Некоторые бактерии способны покрываться защитной капсулой или образуют споры. Спора очень устойчива к высыханию, отсутствию питательных веществ, действию высоких и низких температур, дезинфицирующих средств. Бактерии являются возбудителями чумы, холеры, сибирской язвы и др.
- *Вирусы* — микроорганизмы размером 0,08 - 0,35 мкм. являются паразитами, которые живут и размножаются только в живых клетках. Обладают высокой устойчивостью к низким температурам и высыханию.

Губительное действие на вирусы оказывают такие факторы как солнечный свет, ультрафиолетовые лучи, температура выше 60°C и дезинфицирующие растворы (формалин, хлорамин) и др. Вирусы вызывают натуральную оспу, желтую лихорадку и др.

- *Риккетсии* — микроорганизмы, занимающие по размерам, промежуточное положение между бактериями и вирусами. 0,3 ··· 0,5 мкм. Они устойчивы к высушиванию, замораживанию и колебаниям влажности, чувствительны к воздействию высокой температуры и дезинфицирующих средств. Являются возбудителями таких болезней как сыпной тиф, пятнистая лихорадка скалистых гор и др. Заражение, как правило, осуществляется членистоногими кровососущими паразитами.
- *Грибки* — одно- или многоклеточные микроорганизмы растительного происхождения, размером 3... 50 мкм и более, могут образовывать споры, устойчивые к замораживанию, высушиванию, действию солнечных лучей и дезинфицирующих средств. Грибки вызывают тяжелые инфекционные заболевания, в частности кокцидиоидомикоз, бластомикоз и др.
- *спирохеты* и *простейшие* — не используются в разработке биологического оружия и поэтому не рассматриваются.

Микробные токсины — являются продуктом жизнедеятельности некоторых микроорганизмов. Если они попадают внутрь организма, то вызывают очень тяжелые болезни людей и животных. При хранении в жидком состоянии эти вещества быстро разрушаются, в высушенном состоянии могут сохранять токсические свойства длительное время. В воздухе поражающее действие этих токсинов сохраняется до 12 часов. Микробные токсины устойчивы к замораживанию, разрушаются при длительном кипячении и под воздействием дезинфицирующих средств. Наиболее опасными являются ботулинический токсин и стафилококковый энтеротоксин.

Рассмотрим наиболее опасные инфекционные болезни.

Известно множество опасных инфекционных болезней, часть из них (холера, чума, оспа натуральная и др.) может использоваться в военных целях.

Сибирская язва — острое инфекционное заболевание, может протекать в лёгочной, кишечной и кожной формах. Её возбудителем является относительно крупная палочка, которая образует споры и капсулы. Она погибает без доступа воздуха, при прогревании, воздействии дезинфицирующих средств. Споры весьма устойчивы во внешней среде. Болезнь имеет инкубационный период от нескольких часов до восьми суток. Наиболее часто

сибирская язва протекает в кожной форме (95 - 98 %), довольно эффективно излечивающейся при своевременном принятии необходимых мер. При протекании в лёгочной и кишечной формах наиболее вероятен летальный исход.

При всех формах развития может развиваться сепсис с бактериемией и вторичными очагами (поражение печени, селезёнки, почек и мозговых оболочек).

При обнаружении сибирской язвы больной госпитализируется в инфекционную больницу, при её отсутствии в отдельную палату с выделением индивидуальных предметов ухода, белья и посуды. Определяется круг контактов больного с целью выявления потенциальных больных. Контактёры обследуются и при необходимости госпитализируются. Для лечения используются антибиотики и другие медицинские препараты. Больной выписывается под наблюдение участкового врача только после полного клинического выздоровления.

Холера — острая особо опасная инфекционная болезнь с фекально-оральным механизмом передачи. Инкубационный период от нескольких часов до пяти суток. Лечение больного осуществляется в больнице, но в неотложных случаях может начаться и на дому. В организм вводится соляной раствор. В дальнейшем используется тетрациклин и другие препараты. При подозрении на холеру больного немедленно госпитализируют в инфекционную больницу. Составляется список лиц, имевших контакт с больным. Контактировавших подвергают обследованию на холеру и в случае необходимости госпитализируют. В помещении, где находился больной до госпитализации, проводится дезинфекция. В случае отсутствия лечения возможен летальный исход до 80 %. Изоляция больного прекращается после полного клинического выздоровления. Пациент отправляется под наблюдение участкового врача.

Чума — острая особо опасная инфекционная болезнь, вызываемая чумным микробом. Возбудитель чумы не выдерживает нагреваний и при температуре 100°С погибает в течении 1-5 минут. К низким температурам устойчив. В мокроте, выделенной человеком, сохраняет болезнетворные свойства до 10 суток. Инкубационный период до 3 суток. При отсутствии лечения быстро происходит потеря сознания и наступает смерть. Болезнь весьма скоротечна (1-2 суток). Лица, подозреваемые в болезни, немедленно госпитализируются. Госпитализации подвергаются все лица, имевшие контакт с больным. Обслуживающий персонал больницы при контакте с больным должен работать в специальных противочумных костюмах. Для лечения

применяются антибиотики и другие препараты. Выписка из больницы допустима не ранее чем через месяц после полного выздоровления. После выписки за пациентом ведётся контроль участкового врача в течение 3-х месяцев.

Оспа натуральная — весьма опасная инфекционная болезнь, вызываемая вирусом. Инкубационный период 6-16 суток. Возбудитель оспы — вирус весьма устойчивый к низкой температуре и высушиванию. Проникает в организм через слизистую оболочку верхних дыхательных путей, а затем, размножившись, поступает в кожу, вызывая сыпь. Больной, при подозрении на оспу, немедленно госпитализируется и подлежит лечению антибиотиками и другими препаратами. Лица, соприкасавшиеся с больным, подлежат вакцинации и должны быть изолированы на 17 суток. Выписка больных после отпадения всех корок, но не ранее чем через 40 суток от начала заболевания.

Из сказанного можно сделать несколько обобщающих выводов.

- Рассмотренные инфекционные болезни имеют инкубационный период от нескольких часов до нескольких суток. Данное положение существенно затрудняет своевременное выявление больных и проведение лечебно-профилактических мероприятий.
- При выявлении инфекционной болезни следует немедленно осуществить изоляцию и госпитализацию больного в специальной инфекционной больнице, а при ее отсутствии — в отдельную палату с соблюдением необходимых мер предосторожности.
- Выявить круг лиц, имевших контакт с больным, провести их медицинское обследование, а при необходимости — госпитализировать;
- Осуществить комплексное медицинское лечение и профилактику. Только после полного выздоровления разрешить выписку больного под наблюдение участкового врача.

Рассмотрим методы защиты от бактериологического оружия.

В случае возможного крупномасштабного эпидемического заболевания населения, что наиболее вероятно при использовании противником бактериологического оружия, для лечения эпидемий и их профилактики могут проводиться такие мероприятия как *карантин* и *обсервация*.

Карантин — система медицинских и организационных мероприятий, предусматривающих полную изоляцию очага эпидемической болезни до ликвидации эпидемии. Карантин вводится при бесспорном выявлении наличия особо опасных инфекционных болезней (чума, оспа и др.), принимающих

эпидемический характер. Территория, на которой вводится карантин, называется карантинной зоной.

На внешних границах зоны карантина устанавливается вооруженная охрана выставляются специальные знаки, вводится комендантская служба, осуществляющая медицинское обследование и лечение больных. Запрещается выход и выезд людей, вывод животных и вывоз имущества.

Вход (въезд) на территорию карантина может быть разрешен только специальным формированием для оказания помощи заболевшим и проведение профилактических мероприятий.

Объекты, оказавшиеся в зоне очага поражения и продолжающие производственную деятельность, переводятся на особый режим работы со строгим соблюдением противоэпидемических требований. В зоне карантина прекращается работа всех учебных заведений, зрелищных учреждений и рынков.

Обсервация осуществляется когда инфекционный возбудитель не относится к числу наиболее опасных. При успешном лечении в карантине, по прошествии определенного срока карантин может быть переведен на положение обсервации.

Обсервация отличается от карантина более мягким характером лечебно-профилактических мероприятий. Разрешается ограниченный въезд и выезд людей, вывоз имущества, но при жестком контроле со стороны эпидемиологов. Ограничивается перемещение людей по территории очага, общение между группами людей. Усиливается контроль за питанием и водоснабжением. Проводится ряд лечебно-профилактических и организационных мероприятий, направленных на профилактику эпидемии.

В зонах обсервации проводятся мероприятия по обеззараживанию (дезинфекция), дезинсекции и дератизации (уничтожение грызунов и насекомых).

Дезинфекция может производиться различными способами и средствами: механическим путем (выколачиванием, встряхиванием, очисткой), воздействием высокой температуры (кипячением и паром) или химическими веществами. В некоторых случаях зараженную одежду и другие предметы следует сжечь. Дезинфекция территории, зданий и зеленых насаждений проводится службой обеззараживания гражданской обороны, которая имеет соответствующие дезинфекционные средства и технику. Территория и сооружения промышленных предприятий дезинфицируются силами и средствами предприятий. Население самостоятельно дезинфицирует только жилые помещения и домашние вещи. Дезинфекцию жилых помещений прово-

дят в противогазах или ватно-марлевых повязках и защитных очках, халатах, перчатках и резиновой обуви. После окончания работы одежда, обувь, противогазы подвергаются дезинфекции, а люди проходят полную санитарную обработку. Тряпки, ветошь, мочалки и другие материалы, которыми пользовались при дезинфекции, сжигаются.

Большинство мероприятий, проводимых для защиты от ядерного и химического оружия, являются одновременно и мерами противобактериологической защиты. Так, например, убежища, укрытия, индивидуальные средства защиты органов дыхания и кожи, обеспечивают защиту человека и от бактериальных средств. Но, помимо этого, есть средства предназначенные только для защиты от бактериологического оружия. Их называют специфическими средствами противобактериологической защиты.

Для предохранительных прививок используются специальные препараты — вакцины, состоящие из убитых или ослабленных микробов. Организм справляется с ослабленными микробами и приобретает иммунитет к данному заболеванию.

Если до бактериологического нападения предохранительные прививки не проводились, применяются другие специфические средства защиты: сыворотки, антибиотики и др. Сыворотки — это препараты, содержащие готовое противоядие от того или иного заболевания. Вводятся сыворотки только в тех случаях, когда известен вид возбудителя болезни. Если возбудитель неизвестен, используют другие лекарственные препараты, например, антибиотики. Специфические средства защиты весьма эффективны в борьбе против бактериологического оружия.

В случае применения бактериологического оружия или при возникновении опасности бактериологического нападения население должно содействовать медицинской службе гражданской обороны в проведении мероприятий по их использованию. Никто не должен уклоняться от предохранительных прививок. Своевременное выявление инфекционно опасных болезней, оперативное принятие лечебно-профилактических и организационных мер, позволяет существенно снизить риск возможного возникновения опасных эпидемий и значительно повысить эффективность проводимого лечения.

8. Расчёт экономического эффекта

8.1 Расчёт капитальных затрат

Величина капитальных затрат (K_O) определяется по формуле

$$K_O = K_{OФ} + K_{ПР}, \quad (8.1)$$

где

$K_{OФ}$ — капитальные вложения в основные производственные фонды, руб;

$$K_{OФ} = K_{OБ}, \quad (8.2)$$

где $K_{OБ}$ — капитальные вложения в оборудование, руб;

$$K_{OБ} = \sum_{i=1}^n N_i \times \Pi_{gi} \times (1 + \alpha_1), \quad (8.3)$$

где n — количество типов оборудования; N_i — количество единиц оборудования, средств автоматизации i -го наименования; Π_{gi} — договорная цена оборудования i -го наименования, руб; α_1 — доля от стоимости оборудования, учитывающая расходы на его транспортировку, монтаж, наладку, доли ед.; для ТЭО $\alpha_1 = 0,3$;

$K_{ПР}$ — предпроизводственные расходы (на проведение НИОКР, маркетинговых исследований, разработку проектов, программ и пр.). На стадии ТЭО

$$K_{ПР} \approx (0,1 \cdots 0,6)K_{OБ}.$$

Стоимость комплекса технических средств определяется по приведённой ниже таблице №8.1.

На основании формулы (8.3) и таблицы №8.1 рассчитаем капитальные затраты на оборудование

$$K_{OБ} = (1 \cdot 184050 + 1 \cdot 998550 + 1 \cdot 998550 + 1 \cdot 3120000 + 1 \cdot 3120000 + 1 \cdot 9000 +$$

Таблица 8.1. Средства автоматизации фирмы СПБЭК

Наименование	стоимость
Контроллер	184050 руб.
преобразователь	998550 руб.
преобразователь	998550 руб.
Двигатель	3120000 руб.
Двигатель	3120000 руб.
Автомат	9000 руб.
Автомат	9000 руб.
Автомат	9000 руб.
Автомат	9000 руб.
Датчик скорости	38590 руб.
Датчик скорости	38590 руб.
Датчик положения	77180 руб.
Панель оператора	96900 руб.
Электромонтажный шкаф	51000 руб.
Электромонтажный шкаф	51000 руб.
Программное обеспечение	25710 руб.

$$\begin{aligned}
 &+1 \cdot 9000 + 1 \cdot 9000 + 1 \cdot 9000 + 1 \cdot 38590 + \\
 &+1 \cdot 38590 + 1 \cdot 77180 + 1 \cdot 96900 + 1 \cdot 51000 + 1 \cdot 51000 + \\
 &+1 \cdot 25710) \cdot (1 + 0,3) = 11486956 \text{ руб.}
 \end{aligned}$$

Тогда предпроизводственные расходы составят

$$K_{\text{ПР}} = 0,4 \cdot 11486956 = 4594782,4 \text{ руб.}$$

Капитальные вложения в основные производственные фонды составят

$$K_{\text{ОФ}} = K_{\text{ОБ}} = 11486956 \text{ руб.}$$

Согласно формуле (8.1) величина капитальных затрат составит

$$K_{\text{О}} = K_{\text{ОФ}} + K_{\text{ПР}} = 11486956 + 4594782,4 = 16\,081\,738,4 \text{ руб.}$$

8.2 Расчёт экономии ресурсов

В дипломном проекте были рассмотрены два закона управления электроприводом в зоне регулирования: закон по полиному девятой степени с оптимизацией потерь в меди и закон по полиному седьмой степени без оптимизации. Было показано, что рассеиваемая энергия при применении закона с оптимизацией меньше на $23 \dots 32 \%$ в зависимости от мерной длины, чем при применении закона без оптимизации.

Мощность каждого из двух двигателей

$$P_N = 1\,250 \text{ кВт.}$$

Загрузка двигателей по мощности за один цикл в среднем

$$Q_{O\%} = 50,2 \%.$$

Продолжительность работы двигателей в цикле

$$t_{\text{раб}} = l_{\text{п}}/v_{\text{п}} = \frac{43,8}{2,3} = 19 \text{ с,}$$

где $l_{\text{п}} = 43,8 \text{ м}$ — длина проката; $v_{\text{п}} = 2,3 \text{ м/с}$ — скорость движения проката. При этом потребляемая за один цикл электроэнергия составляет

$$Q_{1\text{ц}} = 2P_N \cdot Q_{O\%} \cdot \frac{t_{\text{раб}}}{3\,600} = 2 \cdot 1\,250 \cdot 50,2 \cdot \frac{19}{3\,600} = 6,64 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

При использовании закона регулирования без оптимизации загрузка двигателей в зоне регулирования составляет

$$Q_{60\%} = 29,5 \%.$$

При использовании закона регулирования с оптимизацией загрузка двигателей в зоне регулирования составляет

$$Q_{\text{опт}\%} = 24,5 \%.$$

Средняя длительность одного регулирования мерной длины

$$t_{1\text{рег}} = 2 \text{ с.}$$

В среднем раскат рубится на 8 заготовок. При этом, производится 9 регулирования мерной длины. Общая продолжительность регулирования за период реза раската

$$t_{\text{рег}} = 9t_{1\text{рег}} = 9 \cdot 2 = 18 \text{ с.}$$

Экономия электроэнергии за один цикл составляет

$$Q_{\text{ЭК}} = 2P_N \cdot (Q_{\text{б0\%}} - Q_{\text{опт\%}}) \cdot \frac{t_{\text{раб}}}{3600} = \\ = 2 \cdot 1250 \cdot (0,295 - 0,245) \cdot \frac{19}{3600} = 0,62 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Экономия электроэнергии за один цикл в процентах

$$Q_{\text{ЭК\%}} = \frac{Q_{1\text{ЭК}}}{Q_{1\text{ц}}} = \frac{0,62}{6,64} = 9,41 \text{ \%}.$$

Средний цикл поступления раскатов

$$t_{\text{ц}} = 50 \text{ с}.$$

Предприятие работает круглосуточно, поэтому в сутки количество циклов в среднем составляет

$$n = \frac{24 \cdot 3600}{t_{\text{ц}}} = \frac{24 \cdot 3600}{50} = 1728.$$

Экономия электроэнергии в год составляет

$$Q_{\text{ЭКГ}} = n \cdot Q_{\text{ЭК}} \cdot 365 = 1728 \cdot 0,62 \cdot 365 = 394200 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

или в денежном выражении при тарифной ставке $\text{Ц}_{\text{э}} = 1,25 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}$

$$S_{\text{э}} = Q_{\text{ЭКГ}} \cdot \text{Ц}_{\text{э}} = 394200 \cdot 1,25 = 492750 \text{ руб/год}.$$

Кроме того, выбранный закон управления обеспечивает плавность пуска и торможения, что в свою очередь, ведёт к уменьшению износа механизма.

В частности затраты времени на устранение отклонения зазора между ножами от номинального составляют 130 ч/год у аналогичного оборудования.

Применение алгоритмов управления, обеспечивающих плавность пуска и остановки по сравнению с обычными позволяет затраты времени до 33 ч. По статистическим данным АО «Северсталь» простои аналогичного оборудования наносит предприятию убытки в размере 100000 руб/ч. Таким образом, от внедрения данного алгоритма управления расходы, связанные с простоями оборудования уменьшаются на

$$S_{\text{ПР}} = (130 - 33) \cdot 100000 = 9700000 \text{ руб/год}.$$

Итого, экономия ресурсов составляет

$$S = S_{\text{э}} + S_{\text{ПР}} = 100000 + 9700000 = 10192750 \text{ руб/год}.$$

8.3 Расчёт экономии текущих затрат

Расчёт экономии текущих затрат (ΔC), руб/год:

$$\Delta C = S - (\Delta C_A + \Delta C_{ТО}), \quad (8.4)$$

где S — экономия ресурсов живого и овеществлённого труда, которая может быть получена по результатам внедрения технического или организационного решения, руб/год. Она рассчитывается путём умножения фактической экономии ресурсов (топливно-энергетических, заработной платы и др.) на договорную цену ресурсов или тарифные ставки. На стадии ТЭО экономия ресурсов может быть рассчитана ориентировочно по исходным данным, полученным на преддипломной практике. При расчёте экономического эффекта расчёт производится по фактическим данным, полученным при разработке дипломного проекта.

Дополнительные амортизационные отчисления, ΔC_A руб/год:

$$\Delta C_A = K_{ОБ} \cdot \frac{H_{АО}}{100 \%}, \quad (8.5)$$

где $H_{АО} = 10 \%$ — норма амортизационных отчислений на реновацию.

$$\Delta C_A = K_{ОБ} \cdot \frac{H_{АО}}{100 \%} = 11486956 \cdot \frac{10 \%}{100 \%} = 1148695,6 \text{ руб/год.}$$

Дополнительные расходы на текущий ремонт, техническое обслуживание определяются по формуле $\Delta C_{ТО}$

$$\Delta C_{ТО} \approx (0,03 \dots 0,05) \cdot K_{ОБ}. \quad (8.6)$$

$$\Delta C_{ТО} = 0,03 \cdot K_{ОБ} = 344609 \text{ руб/год.}$$

Вычислим теперь экономию текущих затрат

$$\Delta C = 10\,192\,750 - (344\,609 + 1\,148\,696) = 8\,699\,446 \text{ руб/год.}$$

8.4 Расчёт и распределение прибыли

Балансовая прибыль

$$\Pi_6 = \Delta C.$$

Прибыль, которая может быть получена по результатам внедрения проектируемого мероприятия определяется формулой

$$\Pi_P = 0,8 \cdot \Pi_6.$$

Распределение прибыли производится по следующим формулам: Отчисление в фонд резерва, (норма отчисления $\alpha_7 = 0,15$)

$$\Phi_{\text{рез}} = \alpha_7 \cdot K_{\text{об}}.$$

Отчисление в фонд развития предприятия, (норма отчисления $\alpha_6 = 0,1$)

$$\Phi_{\text{раз}} = \alpha_6 \cdot K_{\text{об}}.$$

При этом

$$(\Phi_{\text{рез}} + \Phi_{\text{раз}}) \leq 0,25 K_{\text{об}}.$$

Норма налога на прибыль $\alpha_8 = 0,24$. Налог на прибыль

$$H_{\text{ПР}} = \alpha_8 \cdot \Pi_P.$$

Норма налога на имущество $\alpha_9 = 0,02$. Величина налога на имущество

$$H_{\text{И}} = \alpha_9 \cdot K_{\text{ОФ}}.$$

Норма налога местных сборов $\alpha_{10} = 0,05$. Величина местных налогов и сборов

$$H_{\text{М}} = \alpha_{10} \cdot \Pi_P.$$

Прибыль, остающаяся в распоряжении предприятия

$$\Pi_{\text{РП}} = \Pi_P - (H_{\text{ПР}} + H_{\text{М}} + H_{\text{И}});$$

$$\Pi_P = 0,8 \cdot \Pi_6 = 0,8 \cdot 8699446 = 6959557 \text{ руб/год};$$

$$\Phi_{\text{раз}} = 0,1 \cdot 11486956 = 1148695 \text{ руб/год};$$

$$\Phi_{\text{рез}} = 0,15 \cdot 11486956 = 1723043 \text{ руб/год};$$

$$(\Phi_{\text{рез}} + \Phi_{\text{раз}}) = \mathbf{2871739} = 0,25 \cdot 11486956 = \mathbf{2871739};$$

$$H_{\text{IP}} = 0,24 \cdot 6959557 = 1670294 \text{ руб/год};$$

$$H_{\text{И}} = 0,02 \cdot 11486956 = 229739 \text{ руб/год};$$

$$H_{\text{М}} = 0,05 \cdot 6959557 = 347978 \text{ руб};$$

$$\Pi_{\text{PI}} = 6959557 - (1670294 + 347978 + 229739) = 4711546 \text{ руб/год}.$$

8.5 Расчёт экономического эффекта

Общая сумма прибыли, остающаяся в распоряжении предприятия за расчётный период выпуска продукции (или нормативного срока службы оборудования) по проектируемому варианту (T лет), равная Π_S и общих амортизационных отчислений за этот период A_S , определяется по формуле

$$\Pi_S + A_S = \sum_{t=1}^T (\Pi_{PA} + A) \cdot \alpha_t = \frac{\Pi_{P\Pi_1} + A_1}{1 + E} + \frac{\Pi_{P\Pi_2} + A_2}{(1 + E)^2} + \dots + \frac{\Pi_{P\Pi_T} + A_T}{(1 + E)^T}, \quad (8.7)$$

где α_t — коэффициент дисконтирования, определяемый для случая, когда норма дисконта (E — равна величине ссудного процента, устанавливаемого центральным банком РФ — 0,25) не меняется.

Условие эффективности при этом проектируемого варианта имеет вид

$$\Pi_S + A_S \geq K_0, \quad (8.8)$$

где $\Pi_{рп} + A_p$ — чистый дисконтный поток;

$\Pi_{рп} = 4711546$ руб. — годовой прирост прибыли;

$T = 10$ лет — срок для расчёта экономического эффекта;

$A_p = 1\,608\,173$ руб. — амортизационные отчисления за год.

Экономический эффект за 10 лет приведён в таблице №8.2.

Таблица 8.2. Экономический эффект за 10 лет.

Время, T(лет)	$\Pi_{рп} + A_p / (1 + E)^T$, руб.,
1	5055775,2
2	4044620,16
3	3235696,128
4	2588556,902
5	2070845,522
6	1656676,418
7	1325341,134
8	1060272,907
9	848218,3258
10	678574,6606
итого	22564577,36

Экономический эффект ($\mathcal{E}_{руб}$) определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{руб} = (\Pi_S + A_S) - K_0. \quad (8.9)$$

Экономический эффект за десять лет составит

$$\mathcal{E}_{руб} = 6\,482\,839 \text{ руб.}$$

8.6 Выводы

Экономический эффект за 10 лет использования внедрённой системы управления составляет

$$\Theta_{\text{руб}} = 6\,482\,839 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости системы — 5 лет. Таким образом, данный проект является экономически выгодным для заказчика. В окончательном виде результаты приведены в таблице №8.3.

Таблица 8.3. Экономические показатели первого проектируемого варианта (оборудование фирмы СПБЭК)

Наименование показателя	Единицы измерения	Численное значение
Экономия ресурсов	руб/год	1019275
Амортизационные отчисления	руб/год	1 608 173
Прибыль, остающаяся в распоряжении предприятия	руб/год	6319719
Капитальные затраты	руб.	16 073 838
Экономический эффект	руб.	6 482 839

Заключение

В данном дипломном проекте была разработана система электропривода летучих рычажных ножниц обводной линии непрерывно-заготовочного станка АО «Северсталь». Для этого, были выполнены следующие задачи. Анализ объекта, показавший, что объект имеет меняющиеся момент инерции и момент сопротивления, что оказывает значительное влияние на динамику переходных процессов объекта.

Были исследованы несколько различных вариантов управления в зоне регулирования мерной длины, в результате чего было установлено, что выбранный полиномиальный закон 9-ой степени позволяет уменьшить потери в меди по сравнению с полиномиальным законом 7-ой на 20 – 30 % в зависимости от мерной длины. Было также показано, что дальнейшее уточнение коэффициентов существенно повысить эффективность не позволяет и потому глубокого смысла не имеет.

Разработан закон управления электроприводом в режиме реза, обеспечивающий скорость ножа не ниже минимально допустимой в зоне реза. Было выбрано основное электрооборудование для реализации объекта управления. Разработана система управления летучими ножницами на основе преобразователя постоянного тока ТРД32, обеспечивающая отработку выбранных законов управления.

Была предложена комбинированная система компенсации случайных возмущений на основе модели, а также разработан алгоритм идентификации объекта управления для построения систем компенсации возмущений, который может использоваться для целей диагностики.

В работе было выполнено технико-экономическое обоснование, показавшее высокую экономическую эффективность разработанной системы управления, и были разработаны меры техники безопасности на объекте.

Список использованной литературы

1. Б. И. Яворский и А. А. Детлаф. Справочник по физике, изд. 7-ое. М., «Наука», 1979.
2. Г. Ф. Зайцев. Теория автоматического управления и регулирования., Киев, «Вища школа», 1975.
3. Л. Э. Эльсгольц. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М., «Наука», 1964.
4. Н. В. Копченова, И. А. Марон. Вычислительная математика в примерах и задачах. М., «Наука», 1972.
5. М. Я. Выгодский. Справочник по высшей математике, изд. 6-е. М., Государственное издательство физико-математической литературы, 1962.
6. В. Д. Барышников, С. Н. Куликов. Автоматизированные электроприводы машин бумагоделательного производства. Л., «Энергоиздат», 1982.
7. С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. Теория электропривода. СПб., Энерготомиздат, 1994.
8. Е. Н. Ковалев, С. В. Гринь, Г. И. Ольховик, С. П. Смирнов. Система управления станком поперечной резки. «Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС.», 2001.
9. И. Б. Жуков, Е. Н. Ковалев. [Компенсация возмущений в электроприводе.](#) / И.Б. Жуков, Е.Н. Ковалёв // XXIX Неделя науки СПбГПУ: тез. докл. Межвуз. научн-техн. конф. студентов и аспирантов, г. Санкт-Петербург, 27 нояб.– 02 декаб. 2000 г. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. — Ч. V. С. 136–138.