

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Институт открытого и дистанционного образования
Кафедра «Техники, технологий и строительства»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой,
к.т.н., доцент
_____ К.М. Виноградов
_____ 2021г.

Модернизация тягового привода электровоза ЕЛ-3

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–13.03.02.2021.025 ПЗ ВКР

Руководитель работы,
к.т.н., доцент
_____ К.М. Виноградов
_____ 2021г.

Автор работы
студент группы ДО – 514
_____ В.К. Кузнецов
_____ 2021г.

Нормоконтролер,
преподаватель
_____ О.С. Микерина
_____ 2021г.

Челябинск 2021

АННОТАЦИЯ

Модернизация тягового привода
электровоза ЕЛ-3. - Челябинск:
ЮУрГУ, ТТМ; 2021, 58 с., 25 ил., 15
табл., 11 прил., библиографический
список - 20 наим.

Актуальность: актуальность модернизации электроприводов
электровоза обусловлена широкой распространенностью тяговых
электроприводов.

Объект исследования: электровоз ЕЛ-3.

Предмет исследования: электропривод постоянного тока.

Цель исследования: проведение модернизации с целью повышения
энергетической эффективности электропривода.

Задачи исследования: провести анализ вариантов технических решений
для модернизации электроприводов.

Выводы:

1.Оптимальным вариантом при проведении модернизации тяговых
электроприводов постоянного тока является система на базе двигателя
постоянного тока независимого возбуждения с импульсным
преобразователем.

2.Применение преобразователей позволяет оптимизировать работу
электропривода, снизить потери энергии при регулировании скорости
электропривода.

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Кузнецов В.К.			Модернизация тягового электропривода электровоза ЕЛ-3	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Виноградов К.М.					4	55
Реценз.						ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» ИОДО Кафедра «ТТС» зп. ЛО-514		
Н. Контр.								
Утверд.								

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	8
1.1 Описание механизмов, рабочих органов, кинематическая схема	8
1.2 Исходные данные для проектирования.....	10
1.3 Электрическая схема электровоза ЕЛ-3.....	10
2 РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	13
2.1 Расчет нагрузочных диаграмм скорости и моментов рабочего органа	13
2.2 Предварительный расчет мощности электродвигателя	14
2.3 Предварительный выбор электродвигателя и редуктора	15
2.4 Предварительная проверка двигателя по нагреву и	15
производительности	
2.5 Разработка схемы электрической принципиальной системы	16
управления	
2.5.1 Выбор рода тока, величины напряжений системы управления .	17
2.5.2 Описание работы схемы электрической принципиальной	17
3 ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОЙ ЦЕПИ	18
3.1 Выбор преобразователя	18
3.2 Выбор коммутационных аппаратов	19
3.2.1 Выбор датчика тока	19
3.2.2 Выбор датчика скорости	20
3.2.3 Выбор датчика напряжения	20
3.2.4 Выбор сопротивлений.....	21
3.3 Шкаф управления электроприводом.....	21
4 РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА... ..	23
5 РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	27
6 ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ	40
6.1 Проверка двигателя и преобразователя по нагреву.....	40
6.2 Проверка на перегрузочную способность	40
7 АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	41
7.1 Выбор ПЛК.....	41
7.2 Логические уравнения	44
7.3 Программирование ПЛК	45

									Лист
									5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2021.00935 ПЗ				

8 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	46
9 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	50
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	51

					<i>13.03.02.2021.00935 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного производства все большее распространение получает регулируемый автоматизированный электропривод. Основными причинами являются: повышенные возможности энергосбережения, повышение качества производственного процесса, а также широкий круг возможностей, обусловленных применением программируемых контроллеров. Поскольку высокими темпами развиваются микроэлектроника, силовая преобразовательная техника, системы управления электроприводами и другие области науки и техники, то такие темпы развития приводят к тому, что электрооборудование быстро морально устаревает и требует модернизации.

Задачей данного ВКР является модернизация электропривода электровоза ЕЛ-13. Основное внимание будет обращено на замену реостатного регулирования скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения и применение современного энергетического оборудования для управления на базе регулируемого электропривода.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие основные задачи:

- 1 Анализ вариантов технических решений для выбора двигателя и преобразователя.
- 2 Анализ переходных процессов по разработанной структурной схеме в программной среде Simulink Matlab.
- 3 Построение схемы автоматизации электропривода электровоза.

					13.03.02.2021.00935 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

1.1 Описание механизмов, рабочих органов, кинематическая схема

Общий вид электровоза ЕЛ-3 представлен на рисунке 1.1.

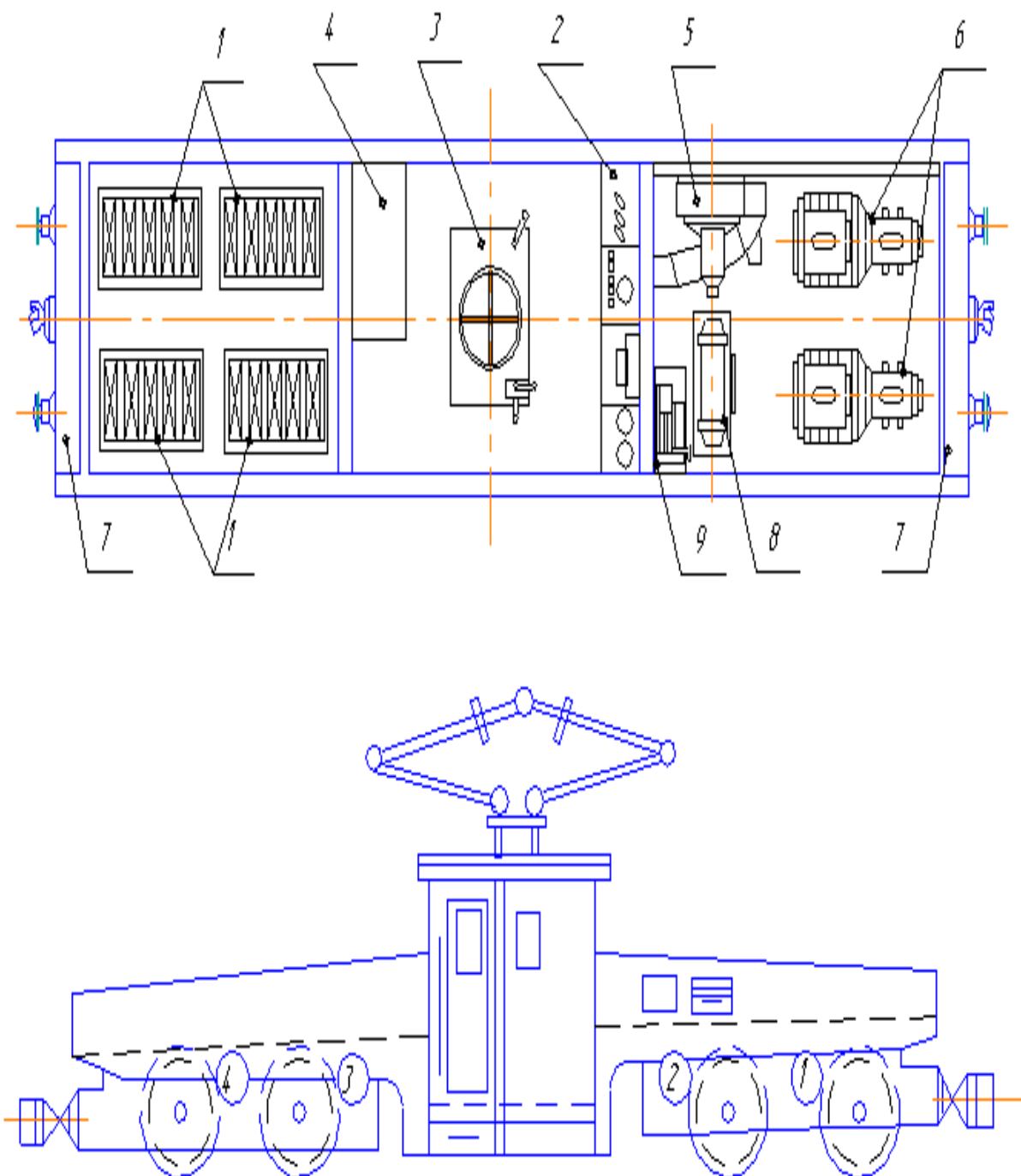


Рисунок 1.1 – Общий вид электровоза ЕЛ-3: 1 – пусковые реостаты; 2 – пульт управления; 3 – контролер; 4 – шкаф управления; 5 – мотор-вентилятор; 6 – компрессор; 7 – воздушный резервуар; 8 – генератор; 9 – выключатель.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

8

Несущая рама электровоза ЕЛ-3 в качестве опоры имеет две двухосные тележки, на которые устанавливается рама с использованием двух центральных опор.

Двухосные тележки состоят из колесной пары, зубчатой передачи и приводных электродвигателей. Общее количество тяговых электродвигателей, установленных на электровозе ЕЛ-3 равно четырем. За охлаждение электродвигателей, обеспечивающих движение электровоза, отвечает мотор-вентилятор.

К электрооборудованию, установленному на электровозе ЕЛ-3, также относятся мотор компрессоры, мотор-генератор для получения постоянного напряжения 600/24 В, а также аккумуляторная батарея, емкость которой составляет 120 А·ч и состоящей из 12 элементов.

Регулирование скорости электровоза осуществляется за счет реостатного регулирования. Этот способ регулирования скорости двигателей постоянного тока основан на введении дополнительного сопротивления в цепь якоря двигателя, за счет чего изменяется жесткость механической характеристики.

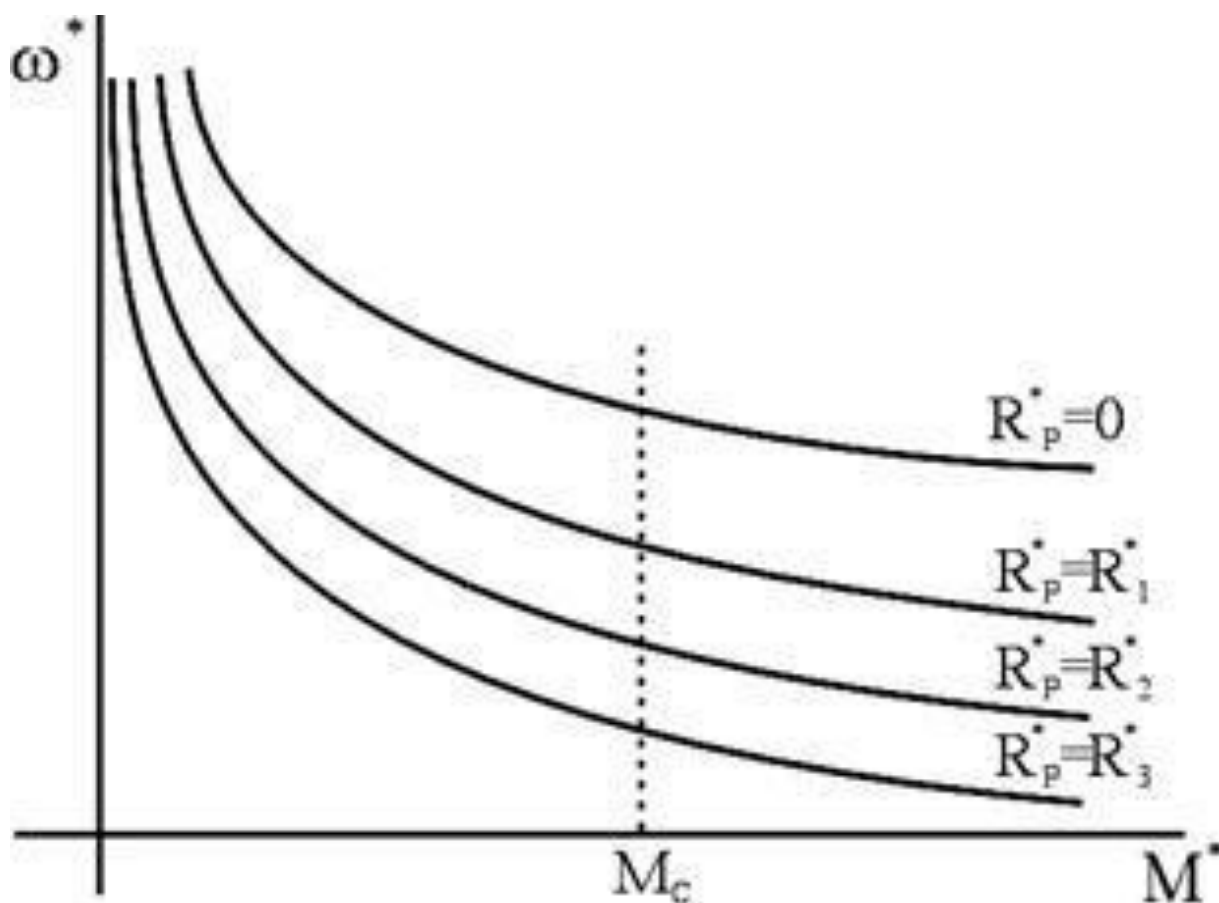


Рисунок 1.2 – Механические характеристики при реостатном регулировании скорости.

Основными недостатками реостатного регулирования являются дополнительные потери, которые образуются при введении дополнительного

сопротивления, а также невозможность регулирования скорости выше естественной механической характеристики двигателя.

1.2 Исходные данные для проектирования

Для расчета электропривода электровоза ЕЛ-3 рассмотрим его основные технические характеристики:

- суммарный вес электровоза $m=70$ т;
- номинальное напряжение контактного провода $U=600$ В;
- часовая мощность одного тягового электродвигателя $P=142$ кВт;
- количество приводных электродвигателей $n=4$;
- скорость при часовой мощности $V_ч=18,65$ км/ч;
- максимальная скорость электровоза $V_m=40$ км/ч.

1.3 Электрическая схема электровоза ЕЛ-3

Функциональная схема тягового привода электровоза ЕЛ-3 представлена на рисунке 1.2.

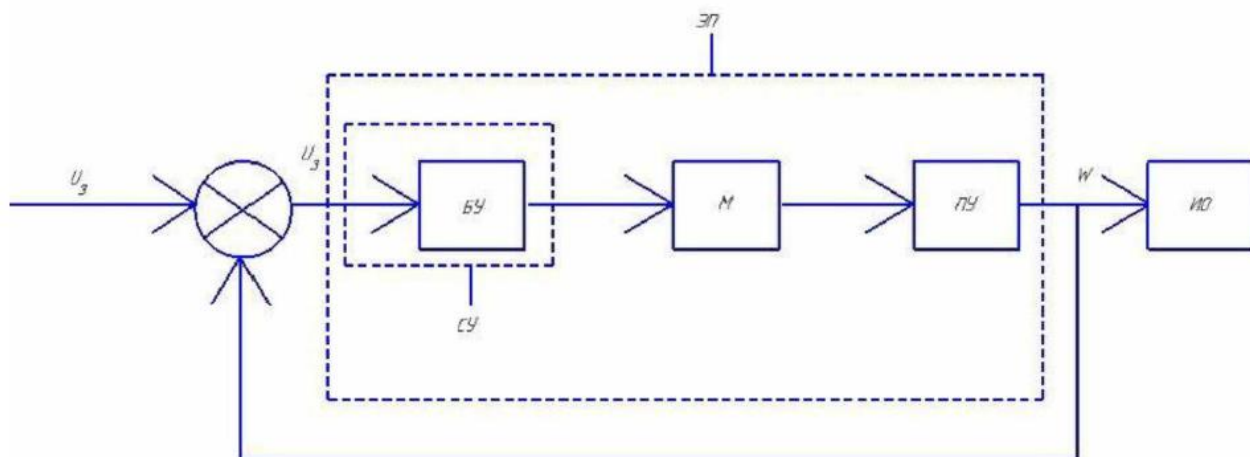


Рисунок 1.2 - Функциональная схема тягового привода электровоза ЕЛ-3.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

10

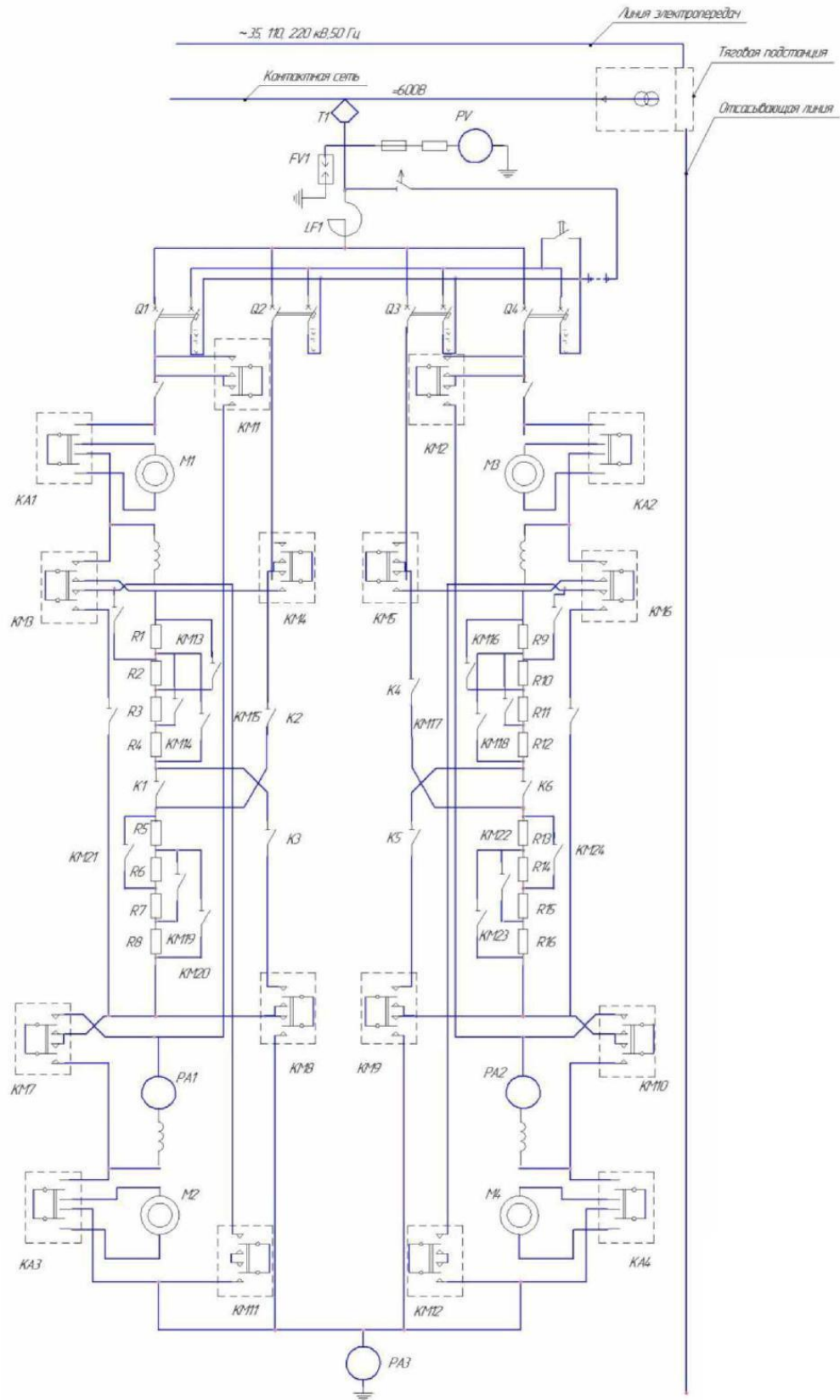


Рисунок 1.3 – Схема электровоза до модернизации.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

11

Функциональная схема тягового электропривода электровоза ЕЛ-3 состоит из приводного электродвигателя постоянного тока М, на вход которого поступает напряжение с блока управления электроприводом электровоза БУ. Требуемая скорость вращения исполнительного органа ИО обеспечивается установкой промежуточного передаточного устройства ПУ.

Управление электроприводом электровоза осуществляется машинистом электровоза посредством контроллера управления. Блок управления электровоза помимо задания скорости вращения исполнительного органа обеспечивает требуемые режимы работы для тягового электродвигателя в зависимости от сигнала задания скорости.

Регулирование скорости электровоза осуществляется за счет изменения сопротивления якорной цепи двигателя постоянного тока. Включение дополнительных пусковых и тормозных резисторов позволяет изменять жесткость механической характеристики двигателя. Таким образом, чем больше величина вводимого сопротивления, тем меньше скорость вращения тягового электродвигателя постоянного тока и исполнительного органа (приводного колеса) электровоза.

Вывод пусковых резисторов при разгоне электровоза осуществляется ступенчато при помощи соответствующих контактов, шунтирующих ступени сопротивлений. Управление разгоном и торможением осуществляется при помощи контроллера управления. На ходовой ступени контроллера все пусковые сопротивления в якорной цепи двигателя зашунтированы и двигатель работает на естественной механической характеристике.

									Лист
									12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2021.00935 ПЗ				

2 РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

2.1 Расчет нагрузочных диаграмм скорости и моментов рабочего органа

Сила тяги электровоза при установившейся скорости ($dV/dt = 0$) равна сопротивлению движению поезда:

$$F_{ЭР} = 10 \cdot Q_{п} (\omega_0 + i_p) = 10 \cdot 70 \cdot (4 + 12) = 11,2 \text{ кН}$$

где i_p - расчетный подъем, %,

$Q_{п}$ - масса поезда, т;

ω_0 - основное удельное сопротивление движению поезда, кгс/т

Между расчётной и конструкционной скоростями существует прямая зависимость:

$$V_p = K_{vp} \cdot V_k = 0,44 \cdot 40 = 17,6 \text{ км/ч}$$

По рассчитанным параметрам силы тяги и расчетной скорости построим нагрузочную диаграмму электропривода и тахограмму движения.

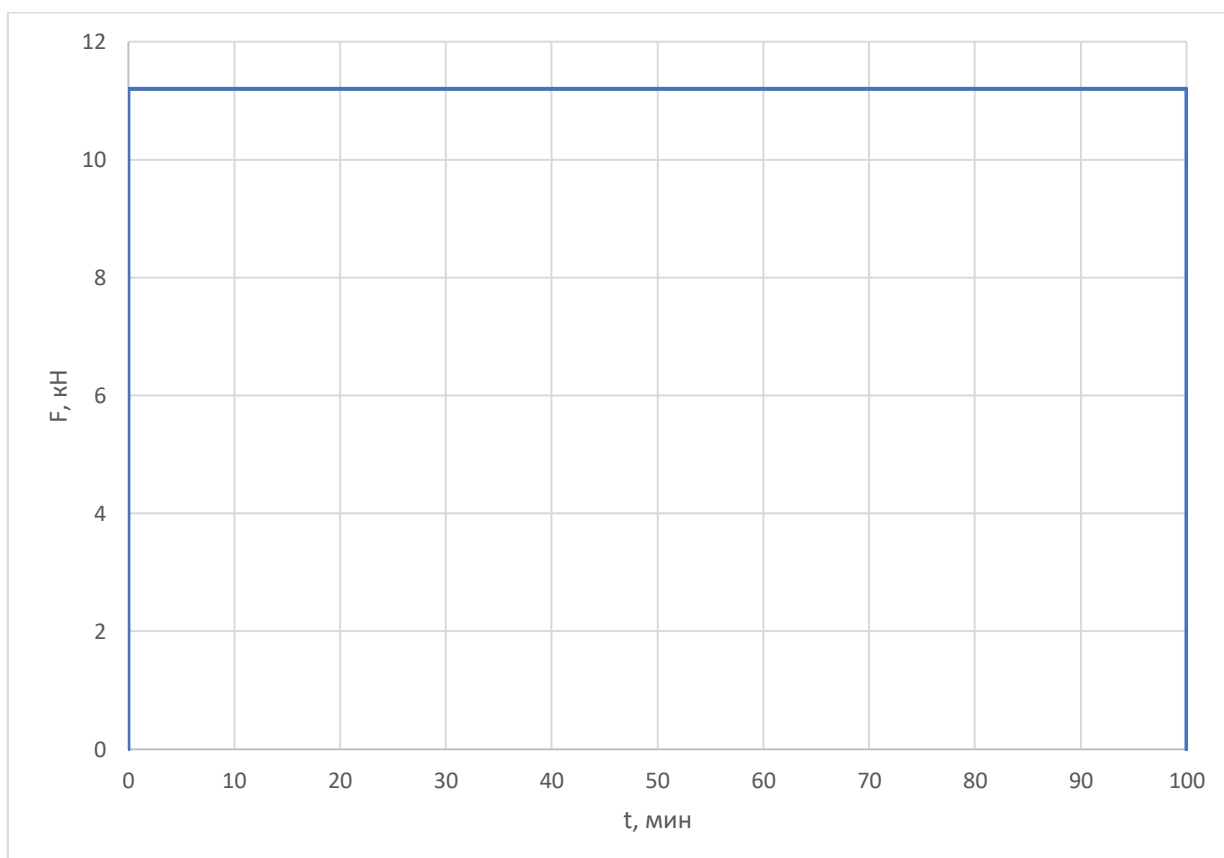


Рисунок 2.1 – Тахограмма электропривода.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

13

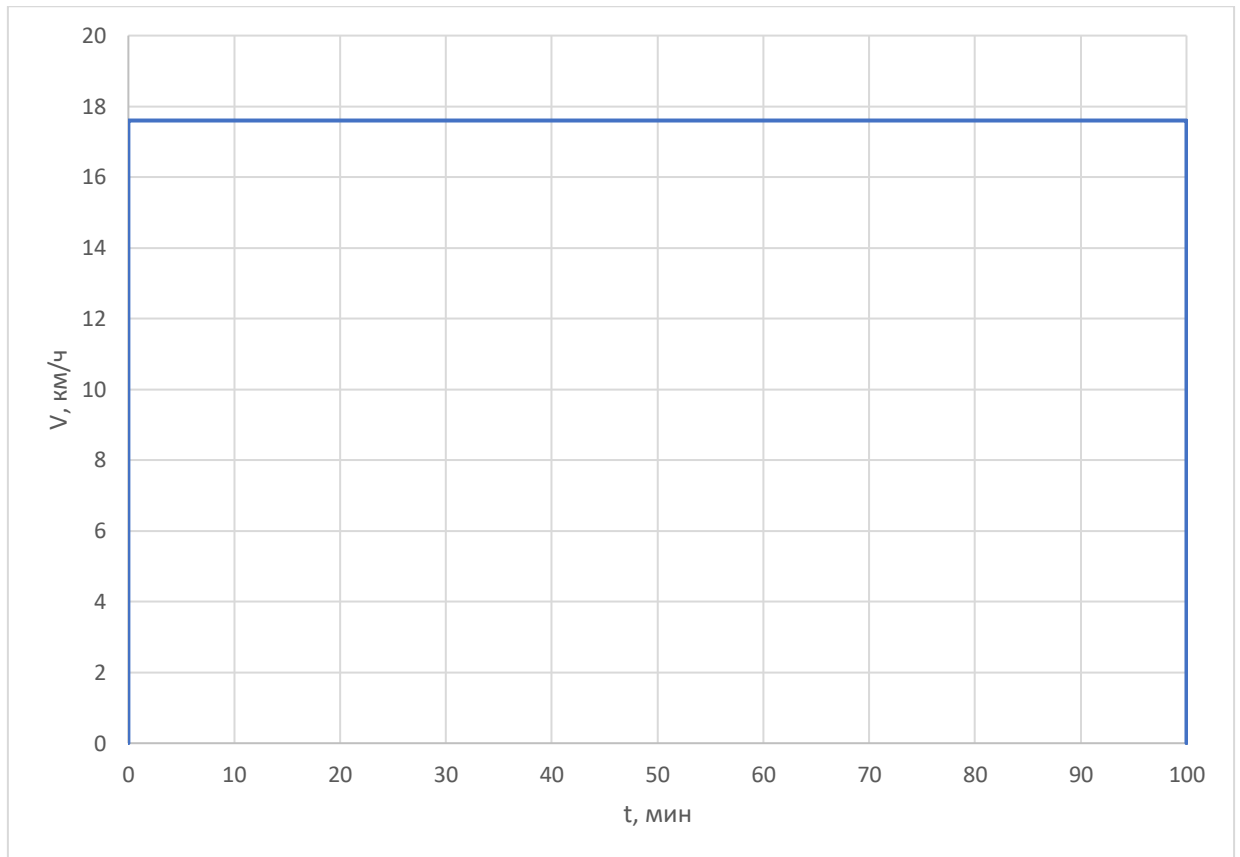


Рисунок 2.2 – Нагрузочная диаграмма электропривода.

2.2 Предварительный расчет мощности электродвигателя

Мощность электровоза:

$$P_{\text{ЭР}} = \frac{F_{\text{ЭР}} \cdot V_p}{367}$$

$$P_{\text{ЭР}} = \frac{11200 \cdot 17,6}{367} = 537,1 \text{ кВт}$$

Между номинальной мощностью электровоза и мощностью, реализуемой на расчётном подъёме существует соотношение:

$$P_{\text{ЭН}} = P_{\text{ЭР}} / K_p$$

$$P_{\text{ЭН}} = 537,1 / 1,1 = 488,3 \text{ кВт}$$

где $K_p = 1,1$ - коэффициент эксплуатационной перегрузки на расчётном подъёме.

Номинальная (часовая) мощность тягового двигателя определится как:

$$P_{\text{ДН}} = \frac{P_{\text{ЭР}}}{K_p \cdot m}$$

$$P_{\text{ДН}} = \frac{488,3}{1,1 \cdot 4} = 111$$

где m – количество тяговых двигателей. Принимаем $m = 4$.

2.3 Предварительный выбор электродвигателя и редуктора

С учетом требуемого значения мощности приводных электродвигателей принимаем мощность двигателя постоянного тока 142 кВт. Выбираем двигатель постоянного тока последовательного возбуждения со следующими техническими характеристиками:

- 1) напряжение - 600 В;
- 2) ток якоря - 250 А;
- 3) мощность - 142 кВт;
- 4) коэффициент полезного действия - 89 %;
- 5) номинальный коэффициент потока - 10,51.

2.4 Предварительная проверка двигателя по нагреву и производительности

Для выбранного электродвигателя произведем расчет естественной механической характеристики.

В двигателе с последовательным возбуждением поток и момент зависят от тока якоря. Поэтому механические характеристики машины определяются выражением

$$\omega(M) = \frac{U}{k\Phi(I_{я})} - \frac{R_a}{(k\Phi(I_{я}))^2} \cdot M$$

Форма этих характеристик при малых нагрузках имеет гиперболический характер, что говорит о необходимости исключения такого режима работы машины.

При изменении момента нагрузки в широких пределах диапазон изменения мощности у двигателей с последовательным возбуждением значительно меньше, что и обусловило их широкое использование в тяговом электроприводе.

Так как рассчитать механические характеристики последовательного возбуждения, в связи с нелинейностью кривой намагничивания машины, весьма затруднительно, в каталогах приводятся естественные характеристики.

Таблица 2.1 – Данные для построения естественной механической характеристики.

M, Нм	w, рад/с	I, А
15	8053	210
25	4982	219
35	3590	220
45	2800	221

продолжение таблицы 2.1

55	2305	223
65	1958	230
75	1732	240
85	1535	250
95	1380	260
100	1321	270

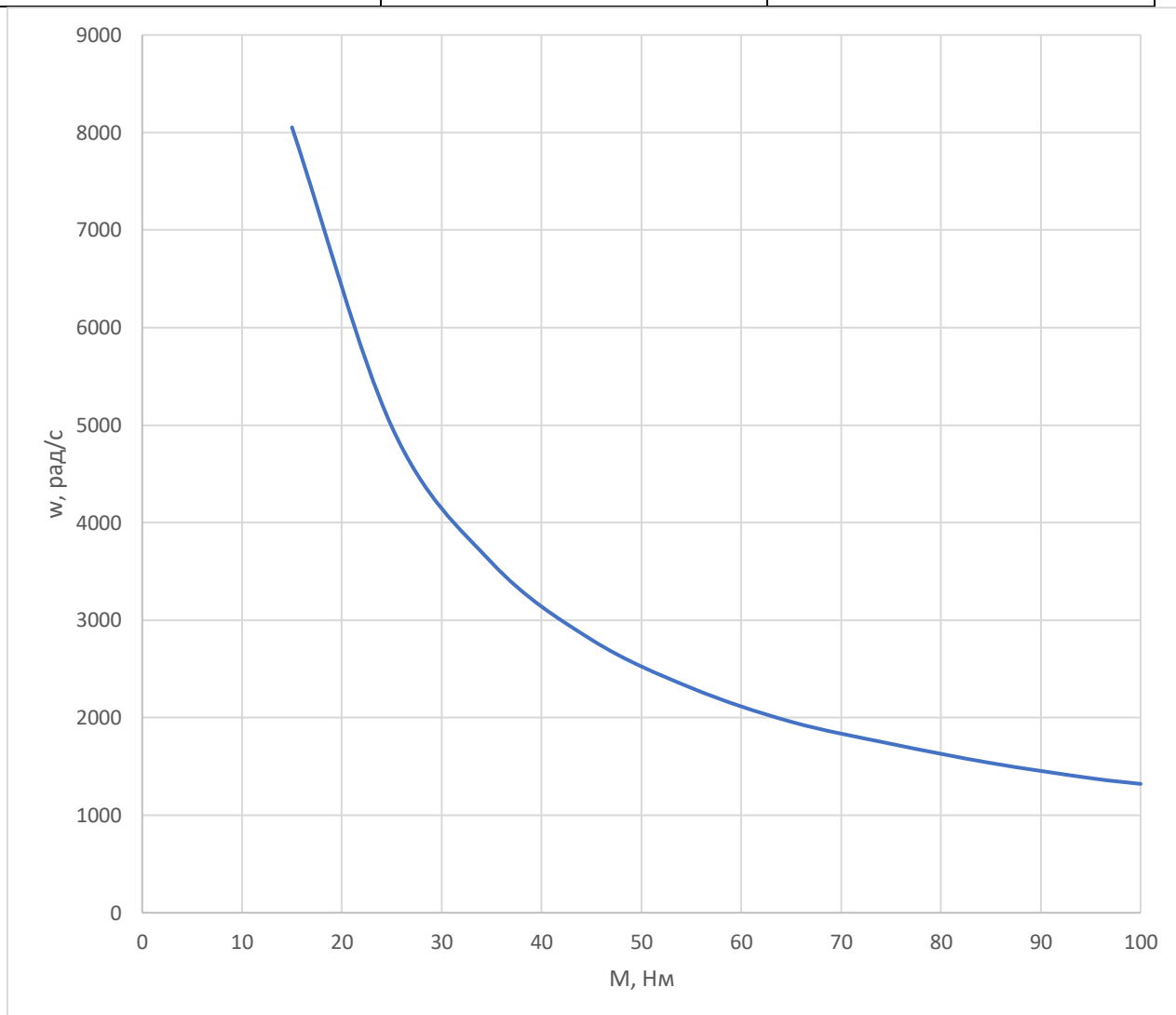


Рисунок 2.2 – Естественная механическая характеристика.

Для проверки выбранного двигателя по нагрузочной способности необходимо выполнение следующего условия:

$$P_H \geq P_{нд}$$

$$P_H = 142 \text{ кВт} \geq P_{нд} = 111 \text{ кВт}$$

Выбранный двигатель удовлетворяет заданному условию.

2.5 Разработка схемы электрической принципиальной системы управления

2.5.1 Выбор рода тока, величины напряжений системы управления

Электропривод электровоза получает питание от контактной сети постоянного напряжения 660 В.

Цепи управления. Питание напряжением 48 В цепи управления получают от аккумуляторной батареи или от мотор-генератора.

2.5.2 Описание работы схемы электрической принципиальной

Схема электрическая принципиальная электровоза представлена в графической части работы.

В исходной схеме управления электроприводом электровоза представлены следующие элементы силовых цепей и цепей управления:

- приводные электродвигатели постоянного тока последовательного возбуждения, которые включены в группы по два электродвигателя;
- группы пусковых и тормозных ящиков сопротивлений, обеспечивающих требуемые режимы работы электропривода;
- электрические аппараты защиты и коммутации силовых цепей и цепей управления электропривода электровоза.

Пуск и разгон электрического привода электровоза осуществляется по схеме с включением последовательно обмотке двигателя постоянного тока независимого возбуждения активного сопротивления. Переключение ступеней сопротивлений, а, следовательно, и регулирование скорости электровоза, осуществляется оператором при помощи кулачкового контроллера. На ходовой позиции кулачкового контроллера все ступени пусковых сопротивлений зашунтированы.

Кроме того, исходная схема управления тяговым электроприводом электровоза позволяет переключаться между параллельным и последовательным включением якорных обмоток электродвигателей постоянного тока. Режим «медленного хода» электровоза предполагает последовательное включение двух электродвигателей постоянного тока.

Для обеспечения режима торможения электропривода электровоза применяется схема динамического торможения, при которой двигатели отключаются от сети и включаются на тормозное сопротивление.

Схема управления электропривода электровоза состоит из следующих элементов:

- контроллера управления;
- пакетных переключателей;
- кнопочного поста управления.

					13.03.02.2021.00935 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

3 ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОЙ ЦЕПИ

В качестве основы при модернизации системы тягового электропривода электровоза принимаем систему на базе импульсного преобразователя напряжения в электроприводе постоянного тока.

Приводным электродвигателем является двигатель постоянного тока независимого возбуждения, якорная обмотка которого подключена к импульсному преобразователю постоянного напряжения.

Основным преимуществом применения импульсно-ключевого управления является получение требуемых значений скорости электродвигателя за счет изменения величины подаваемого на якорную цепь двигателя напряжения, что исключает необходимость применения регулировочных пуско-тормозных резисторов. Это позволяет значительно улучшить энергетические показатели работы электрического привода электровоза, поскольку при частых пусках и торможениях, характерных для электроподвижного состава, энергия от источника напряжения не расходуется на реостатный пуск и торможение электродвигателя.

Вторым важным преимуществом применения импульсного преобразователя является снижение динамических нагрузок на механические части кинематической схемы в связи с плавным регулированием скорости вращения двигателя, а не ступенчатым, характерным для реостатного регулирования скорости.

В качестве приводного двигателя выбираем двигатель постоянного тока независимого возбуждения 2ПН315L со следующими техническими характеристиками:

- 1) напряжение - 440 В;
- 2) ток якоря - 330 А;
- 3) мощность - 132 кВт;
- 4) коэффициент полезного действия - 91 %;
- 5) номинальная скорость 1500 об/мин;
- 6) номинальное сопротивление якорной цепи 0,037 Ом;
- 7) номинальная индуктивность якорной цепи 25,2 мГн.

В номинальном режиме двигатель постоянного тока работает при продолжительной нагрузке.

3.1 Выбор преобразователя

Источником напряжения для электропривода электровоза является контактная сеть напряжением 600 В. В качестве импульсного преобразователя выбираем преобразователь ПСМ-17 со следующими техническими характеристиками:

- 1) входное напряжение 400...900 В;
- 2) выходной ток 250...400 А;
- 3) номинальная мощность 160 кВт.

Блок с аппаратурой БА-128-01 и БА-89-01 является составной частью общей электрической схемы, предназначенной для приведения в движение и торможения электровоза. Блоки резисторов типа ПТР-101 предназначены для размещения пусковых и тормозных резисторов, резисторов ослабления тока обмоток возбуждения двигателей.

3.2 Выбор коммутационных аппаратов

3.2.1 Выбор датчика тока

В качестве датчика тока для обеспечения гальванической развязки силовых цепей и цепей управления выбираем датчик тока LT 505-S со следующими техническими данными:

- 1) напряжение питания 24 В;
- 2) диапазон преобразования от 0 до ±1200 А;
- 3) сопротивление нагрузки 15 Ом;
- 4) номинальный первичный ток 500 А;
- 5) режим работы длительный.

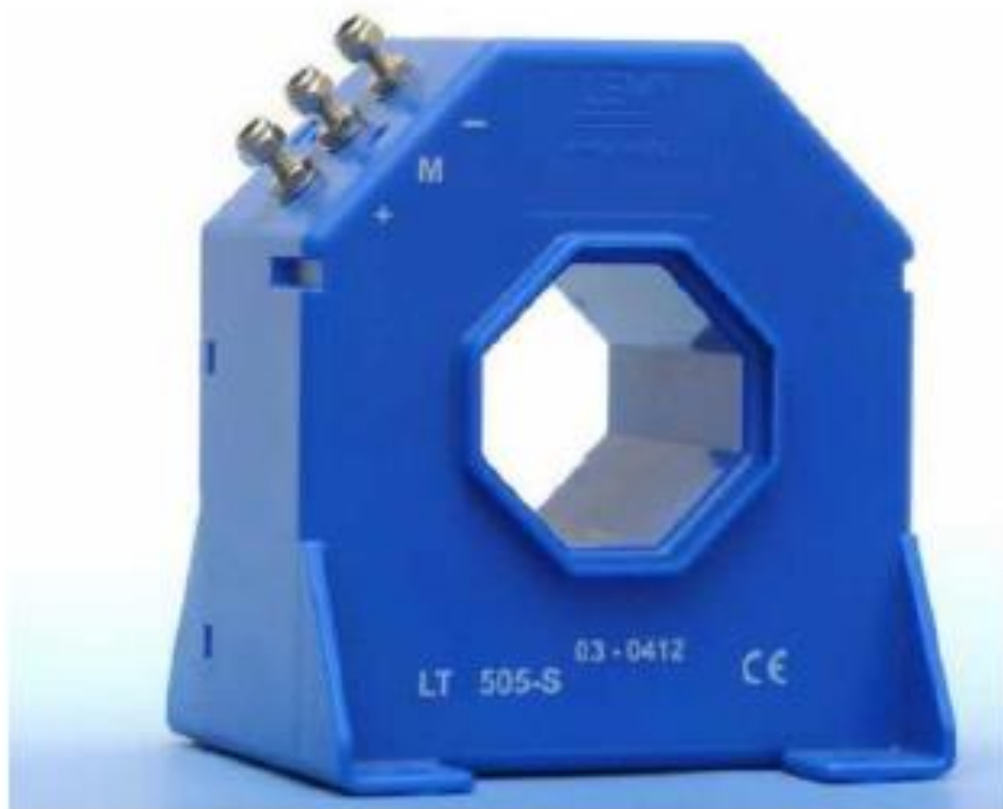


Рисунок 3.1 – Общий вид датчика тока.

3.2.2 Выбор датчика скорости

Для обеспечения замкнутой системы управления электропривода электровоза выбираем датчик скорости типа 2СР со следующими техническими характеристиками:

- 1) пределы измерения скорости от 1 до 50 км/ч;
- 2) емкость счетчика пройденного пути 9999,9 км;
- 3) дискретность измерения: скорости 0,1 км/ч, пройденного пути 0,1 м;
- 4) питание - от сети постоянного тока напряжением 24 В;
- 5) потребляемая мощность 10 Вт.



Рисунок 3.2 – Общий вид датчика скорости.

3.2.3 Выбор датчика напряжения

Для контроля напряжения в силовой цепи электропривода выбираем датчик напряжения АУ 100-750 с техническими характеристиками:

- 1) преобразование напряжения от 750 до 1125 В;
- 2) напряжение питания 24 В;
- 3) рабочий температурный диапазон: от - 40 °С до + 85 °С.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

20



Рисунок 3.3 – Общий вид датчика напряжения.

3.2.4 Выбор сопротивлений

Блоки резисторов типа КФ-38В1 предназначены для изменения тока тяговых двигателей.

Технические характеристики:

- 1) номинальное напряжение - 550 В;
- 2) род тока - постоянный;
- 3) степень защиты - IP00;
- 4) допустимая температура нагрева отводов в местах подсоединения проводов внешнего монтажа, не более 150 °С;
- 5) номинальный режим работы - повторно-кратковременный, при пв 40 %.

3.3 Шкаф управления электроприводом

Все электрическое оборудование электропривода электровоза размещается непосредственно на раме электровоза. Для удобства обслуживания энергетического оборудования импульсные преобразователи и коммутационная оборудования располагаются в одном шкафу управления, который имеет разъемные соединения для подключения кабельных линий для

получения информации с датчиков, а также подключения силовых кабельных линий.

В шкафу управления установлены релейно-контакторные элементы, элементы управления и сигнализации.

					<i>13.03.02.2021.00935 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		22

4 РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для выбранного электродвигателя произведем расчет естественной и искусственных механических характеристик. Искусственные механические характеристики двигателя будем рассчитывать при изменении величины напряжения.

В двигателе с независимым возбуждением механические характеристики машины определяются выражением

$$\omega(M) = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_a}{(k\Phi)^2} \cdot M$$

Произведем расчет номинальной угловой скорости вращения двигателя:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}$$
$$\omega_H = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с}$$

Постоянная двигателя:

$$k\Phi = \frac{U_H - R_a \cdot I_H}{\omega_H}$$
$$k\Phi = \frac{440 - 0,037 \cdot 330}{157} = 2,72$$

Скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi}$$
$$\omega_0 = \frac{440}{2,72} = 161,8 \text{ рад/с}$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}$$
$$M_H = \frac{132000}{157} = 841 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Тогда выражение для расчета естественной механической характеристики:

$$\omega(M) = \frac{440}{2,72} - \frac{0,037}{(2,72)^2} \cdot M$$

Произведем построение естественной механической характеристики.

					13.03.02.2021.00935 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

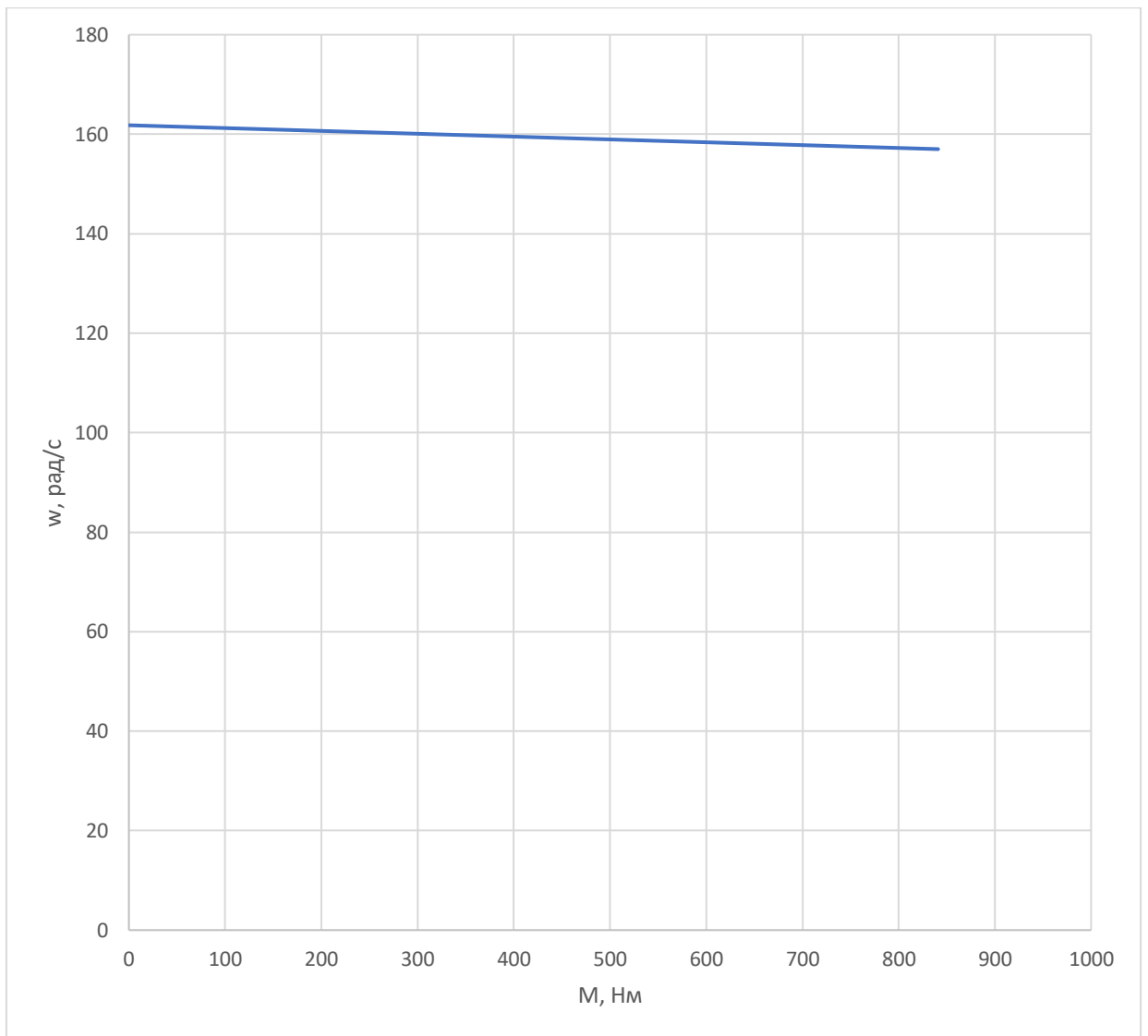


Рисунок 4.1 – Естественная механическая характеристика.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

24

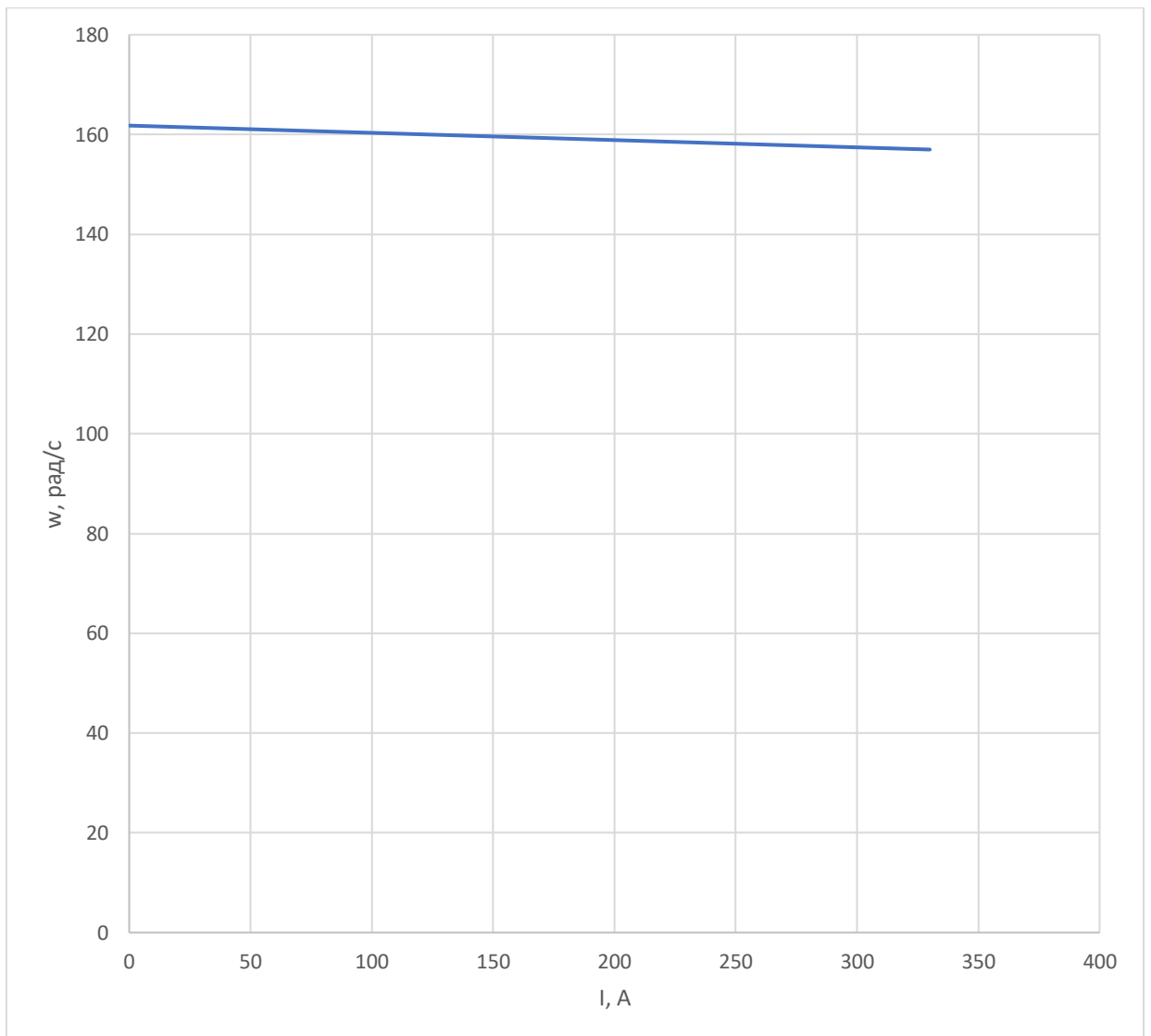


Рисунок 4.2 – Естественная электромеханическая характеристика.

Выражение для расчета искусственной механической характеристики при изменении напряжения:

$$\omega(M) = \frac{\alpha \cdot 440}{2,72} - \frac{0,037}{(2,72)^2} \cdot M$$

Произведем построение искусственных механических характеристик.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

25

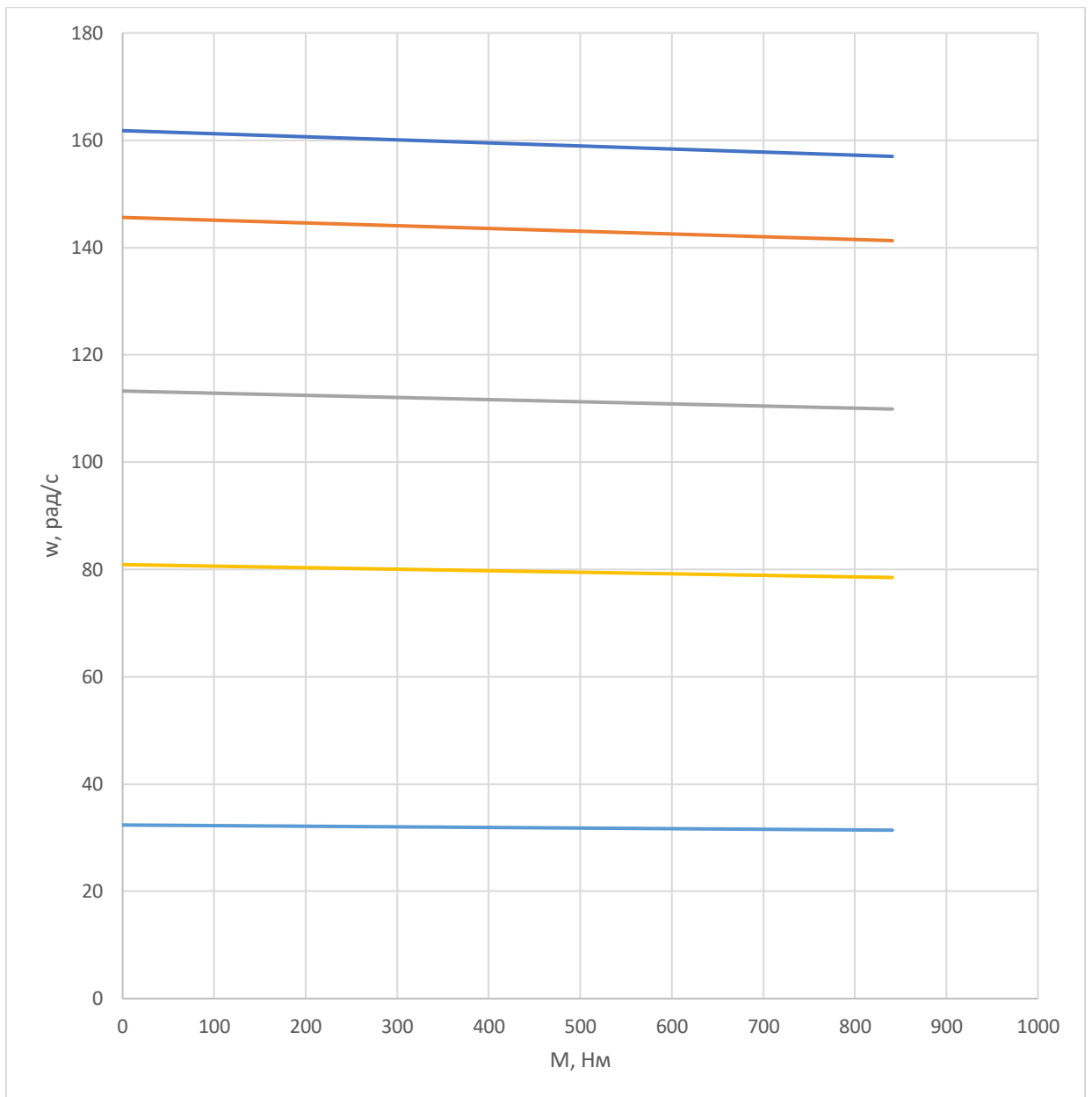


Рисунок 4.3 – Естественная и искусственные механические характеристики.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

26

5 РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

На рисунке 5.1 приведена функциональная схема тягового привода электровоза при импульсном регулировании. На рисунке 5.1 обозначены:

- РС - регулятор скорости;
- РТ - регулятор тока;
- ДТ - датчик тока;
- ДС - датчик скорости;
- М – двигатель постоянного тока;
- П - преобразователь;
- U_3 – задающее напряжение;
- U_{pc} - выходное напряжение регулятора скорости;
- ΔU – разница между задающей величиной тока и выходной;
- U_{pm} - выходное напряжение регулятора тока;
- $U_{ост}$ - выходное напряжение датчика тока;
- $U_{осс}$ - выходное напряжение датчика скорости.

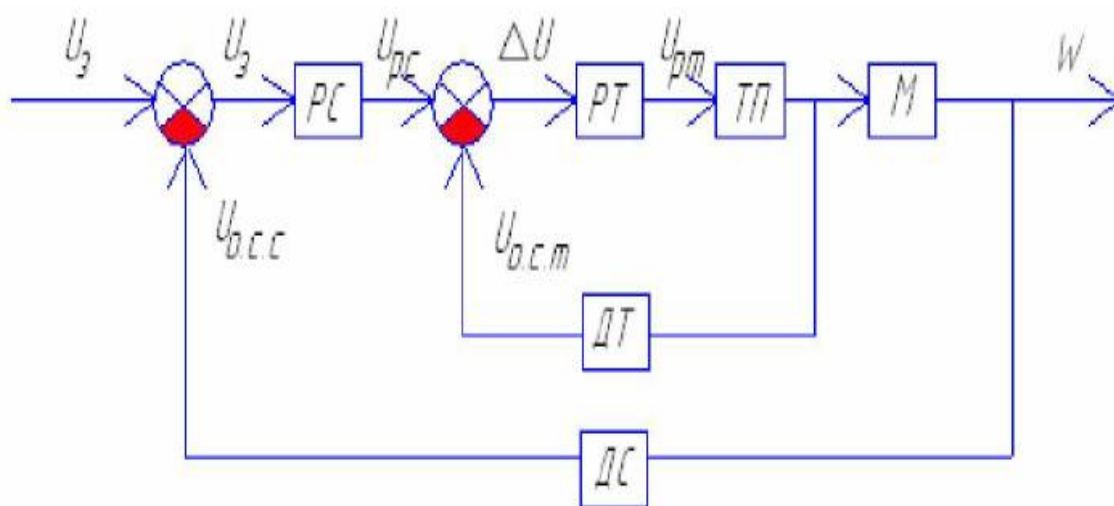


Рисунок 5.1 - Схема тягового привода электровоза функциональная

Структурная схема неизменяемой части САУ содержит динамическую модель двигателя постоянного тока, тиристорный преобразователь и датчики.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

27

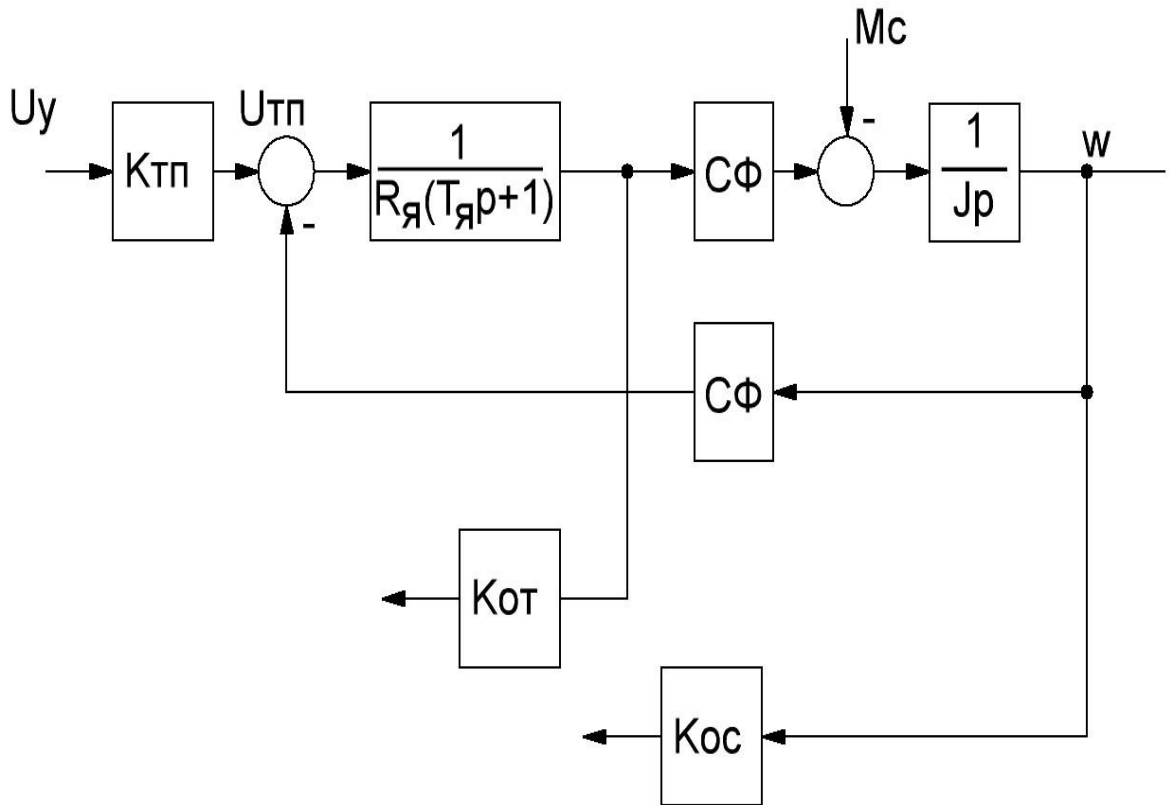


Рисунок 5.2 - Структурная схема неизменяемой части САУ

Максимальный уровень входных сигналов, действующих в системе, определяется элементной базой, на которой выполнена система управления. Поэтому предел напряжения синтезируемой САУ принимается равным: $U_{\text{сау, max}} = 10 \text{ В}$.

Коэффициент передачи датчика тока:

$$K_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{БР}}}{I_{\text{Я(max)}}},$$

где $I_{\text{Я(max)}}$ - максимальный ток якоря по перегрузочной способности двигателя.

$$K_{\text{дт}} = \frac{10}{330} = 0,03.$$

Важным параметром системы подчиненного регулирования является некомпенсируемая постоянная времени. Она определяет быстродействие и помехоустойчивость САУ. Принимаем постоянную $T_{\mu} = 0,008 \text{ с}$.

Для дальнейших расчетов потребуются ряд данных двигателя, которые не приведены в справочнике. Выполним расчет недостающих данных двигателя.

Номинальная ЭДС якоря:

$$\begin{aligned} E_{\text{H}} &= U_{\text{h}} - I_{\text{H}} \cdot R_{\text{я}}, \\ E_{\text{H}} &= 440 - 330 \cdot 0,037 = 427,8 \text{ В} \end{aligned}$$

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a},$$

$$T_a = \frac{0,0252}{0,037} = 0,68 \text{ с}$$

Коэффициент передачи преобразователя:

$$K_n = \frac{E_{d0}}{U_{y \max}},$$

где $U_{y \max} = 10 \text{ В}$ - максимальное напряжение управления СИФУ.

$$K_n = \frac{900}{10} = 90$$

Система подчиненного регулирования должна обеспечивать правление током и скоростью двигателя.

При синтезе системы управления внутренняя отрицательная обратная связь по противо-ЭДС двигателя не учитывается.

Таким образом, объект управления будет содержать последовательно соединенные 2 апериодические звена (якорную цепь двигателя и модель преобразователя) и 1 интегрирующее (модель механической части).

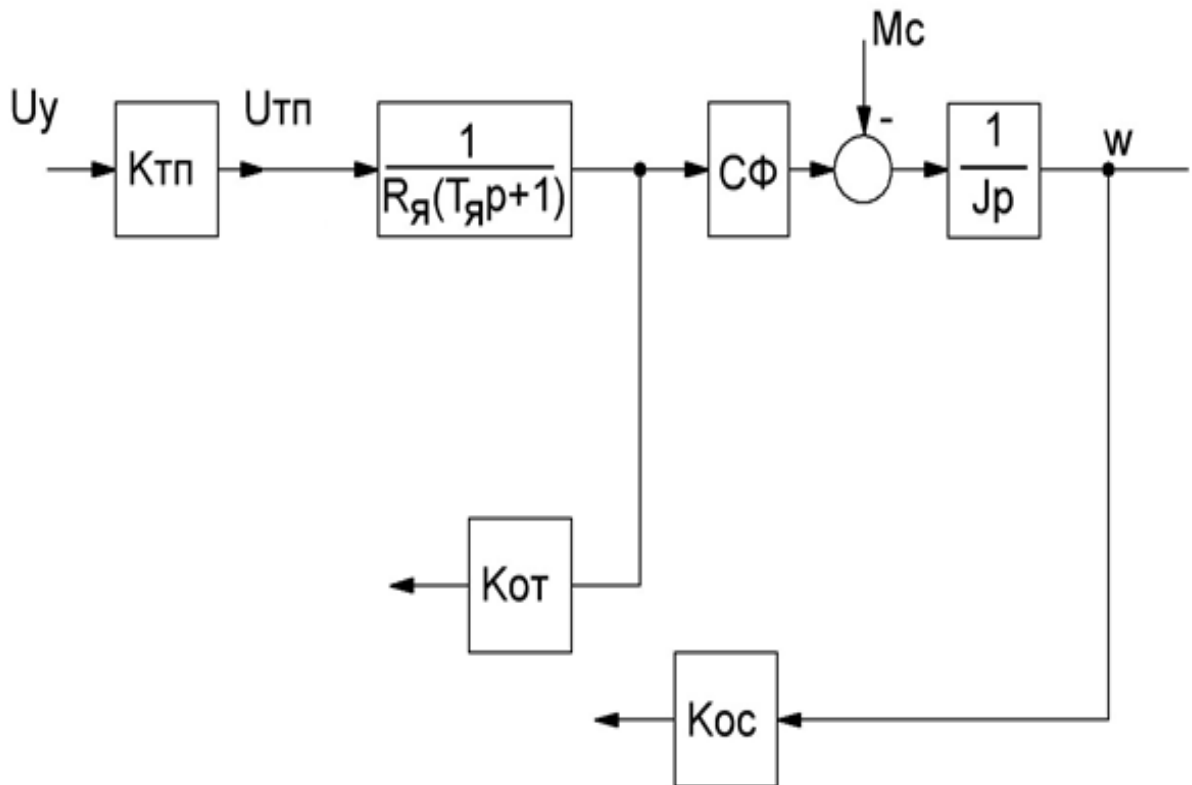


Рисунок 5.3 – Структурная схема ДПТ.

Объектом управления в контуре тока является тиристорный преобразователь и якорная цепь двигателя.

Датчик обратной связи представлен безынерционным звеном с коэффициентом передачи $k_{от}$.

Структурная схема контура тока представлена на рисунке.

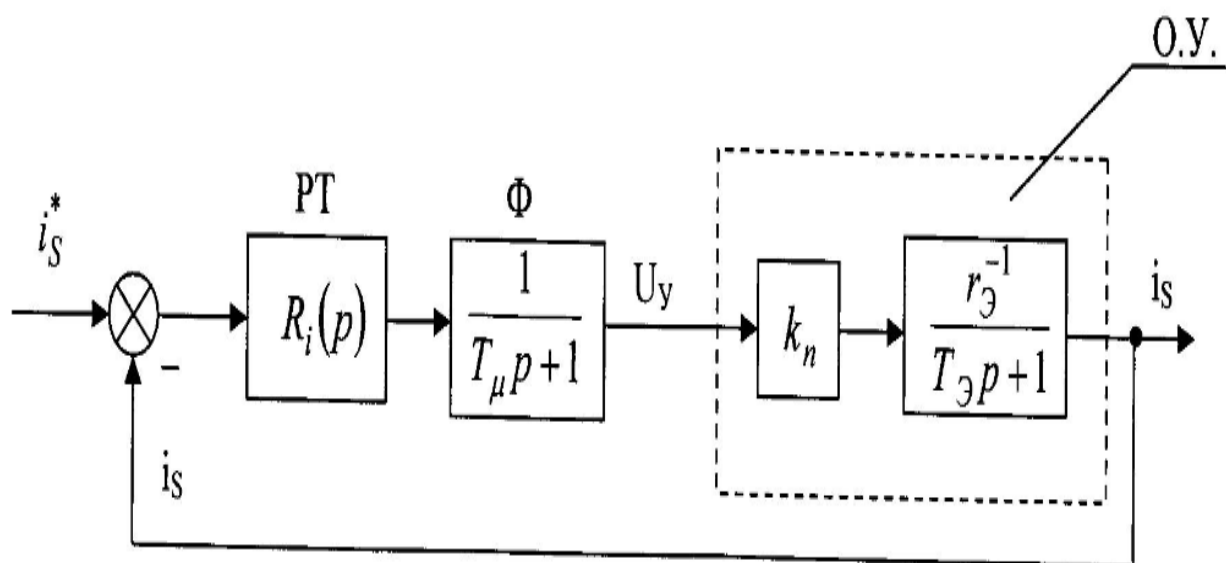


Рисунок 5.4 - Структурная схема контура тока

Контур тока настраивается на технический оптимум.

Желаемая передаточная функция замкнутого контура тока будет иметь 2 порядок, так как оптимальная функция 1 порядка уже входит в контур тока.

Таким образом, желаемая передаточная функция замкнутого контура тока будет иметь вид:

$$w_{жзкт}(p) = \frac{1}{k_{от}(2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1)}$$

Определение передаточной функции регулятора тока удобно проводить по желаемой передаточной функции разомкнутого контура

$$w_{жркт}(p) = \frac{1}{2T_{\mu} p(2T_{\mu} p + 1)}$$

С другой стороны, реальная передаточная функция разомкнутого контура тока равна произведению передаточных функций всех звеньев, входящих в этот контур.

$$w_{реал.ркт}(p) = w_{рт} * \frac{k_{п}}{T_{\mu} p + 1} * \frac{1}{R_a(T_{\mu} p + 1)} * k_{от}$$

Из равенства следует:

$$w_{жркт}(p) = w_{реал.ркт}(p)$$

Передаточная функция регулятора тока представляет собой изодромное звено (ПИ регулятор).

Определим передаточную функцию регулятора тока и выделим из этой функции П и И части.

$$W_{\text{рт}} = \frac{R_a(T_{ap} + 1)}{2T_{\mu}k_{\text{п}}k_{\text{отр}}} = \frac{R_a T_{ap}}{2T_{\mu}k_{\text{п}}k_{\text{отр}}} + \frac{R_a}{2T_{\mu}k_{\text{п}}k_{\text{отр}}} = k_{\text{рт}} + \frac{1}{T_{\text{рт}}}$$

Полученную передаточную функцию регулирования тока можно реализовать на ОУ.

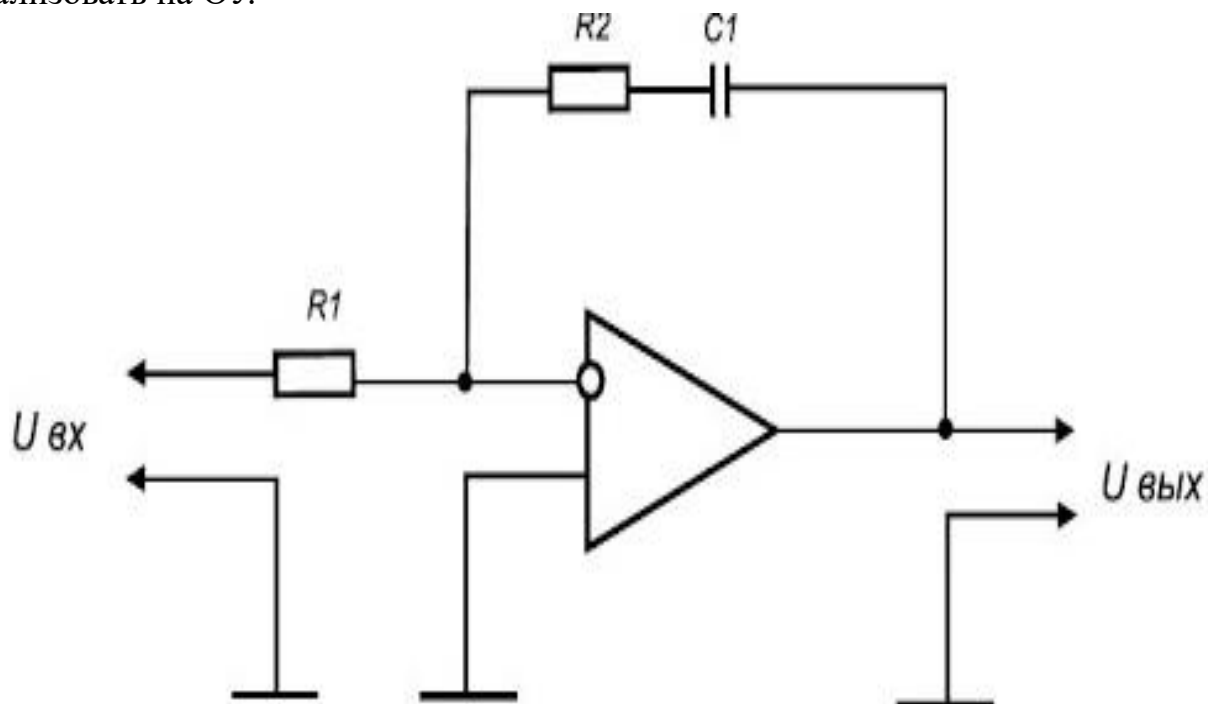


Рисунок 5.5 - Принципиальная схема регулятора тока, выполненного на ОУ

Между параметрами принципиальной схемы, реализованной на ОУ и параметрами передаточной функции, существует некоторая связь.

$$|k_{\text{рт}}| = \left| \frac{R_2}{R_1} \right|;$$

$$T_{\text{рт}} = R_2 * C_1$$

Учитывая, что максимальные уровни сигнала задания и сигнала обратной связи одинаковы, то можно принять что $R_1 = R_2$

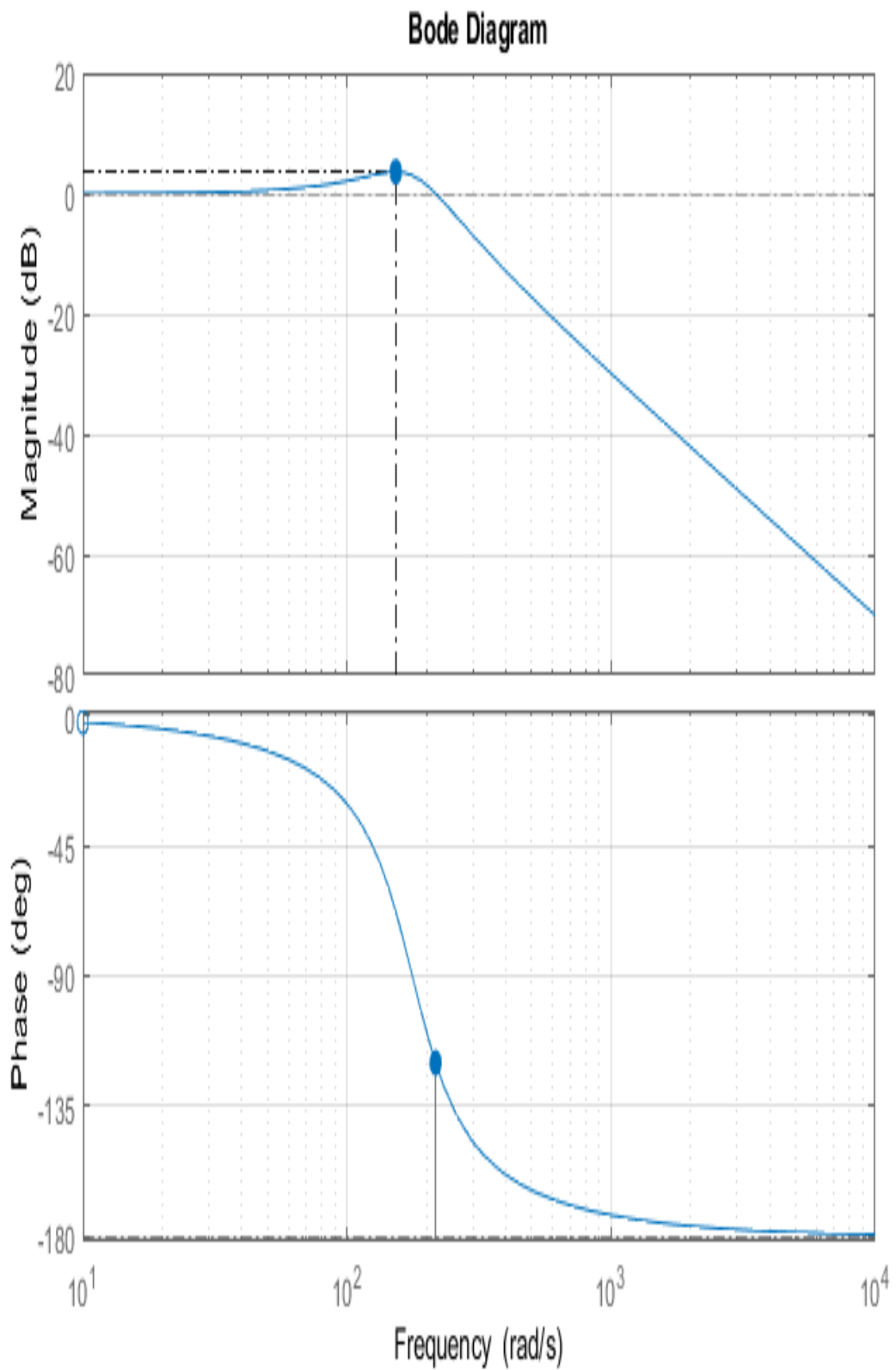


Рисунок 5.6 - ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура тока.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

32

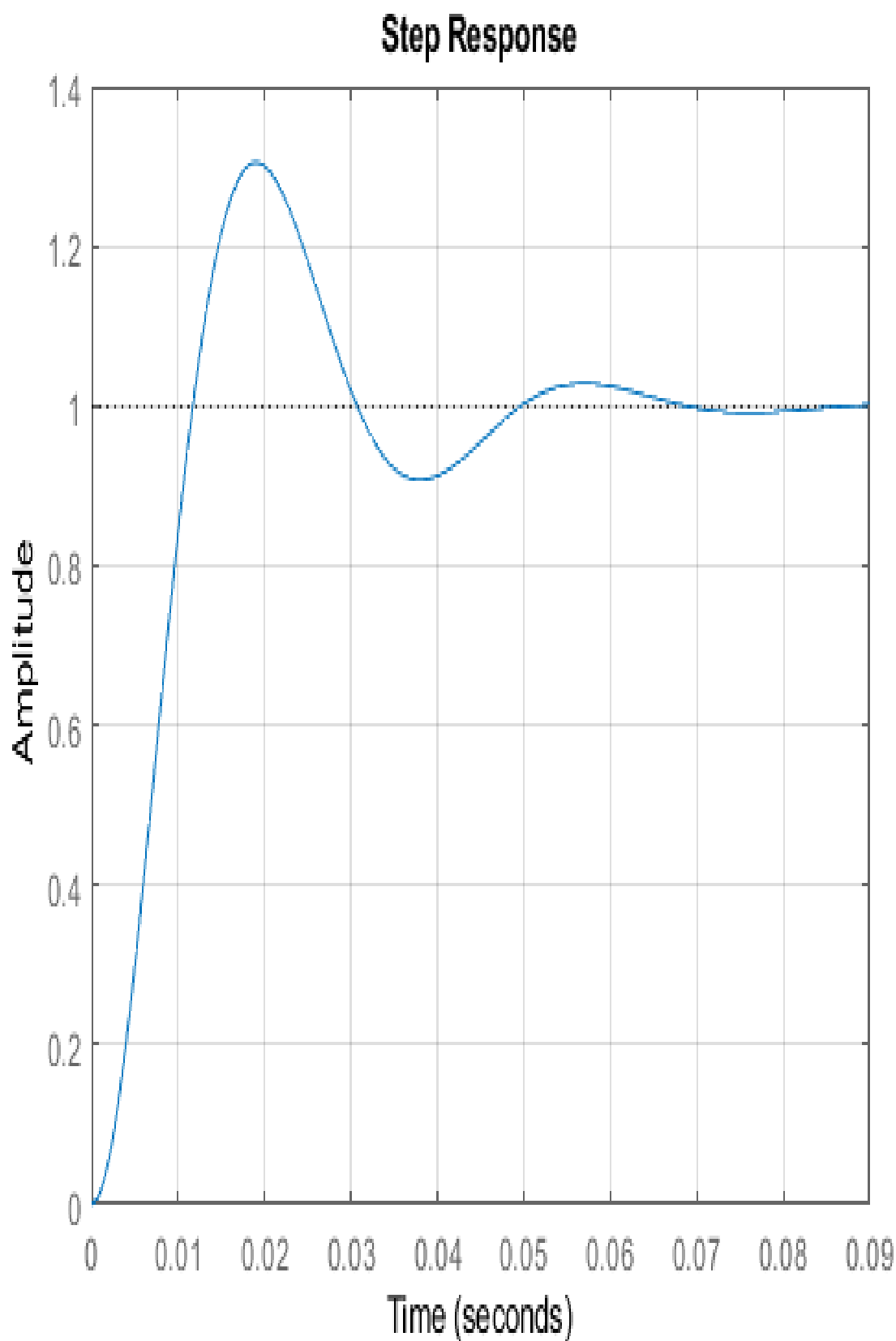


Рисунок 5.7 - Переходная характеристика контура тока.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

33

Объектом управления в контуре скорости является электромеханическая часть двигателя и замкнутый контур тока, настроенный на технический оптимум.

Структурная схема контура скорости имеет вид.

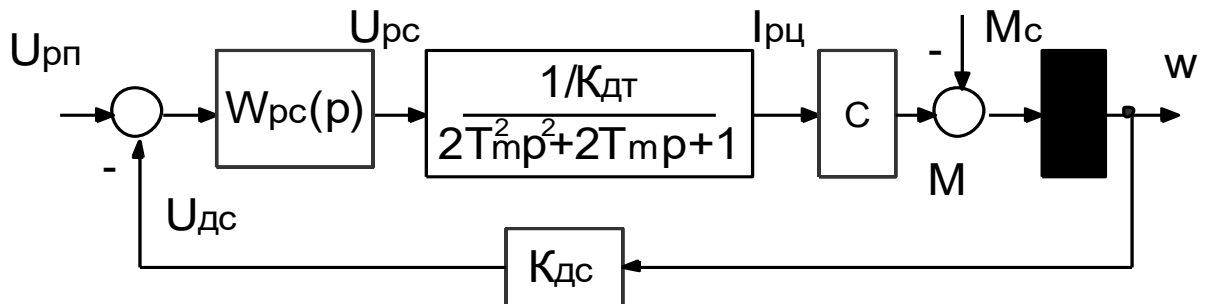


Рисунок 5.8 - Структурная схема идеализированного (без учета внутренней ООС по противо-эдс двигателя) контура скорости

При настройке на технический оптимум желаемая передаточная функция замкнутого контура скорости будет равна.

Однако с целью упрощения расчетов в передаточной функции замкнутого контура тока составляющими высших порядков можно пренебречь.

Таким образом,

$$w_{зкт} = \frac{1}{k_{от}(2T_{\mu}p + 1)}$$

$$T'_{\mu} = 2T_{\mu}$$

$$w'_{зкт} = \frac{1}{k_{от}(T'_{\mu}p + 1)}$$

При такой замене желаемая передаточная функция замкнутого контура скорости будет равна:

$$w'_{зкс} = \frac{1}{k_{ос}(2T'_{\mu}{}^2 p^2 + 2T'_{\mu}p + 1)}$$

Такой желаемой характеристике замкнутого контура соответствует желаемая характеристика разомкнутого контура скорости с единичным сигналом.

$$w_{жркс} = \frac{1}{2T'_{\mu}p(2T'_{\mu}p + 1)} * \frac{(2T'_{\mu}p + 1)}{2T'_{\mu}p}$$

С другой стороны, реальная передаточная функция разомкнутого контура скорости равна произведению всех звеньев, входящих в этот контур

$$w_{реал.ркс} = w_{ркс} * \frac{1}{k_{от}(T'_{\mu}p + 1)} * C\Phi * \frac{1}{Jp} * k_{ос}$$

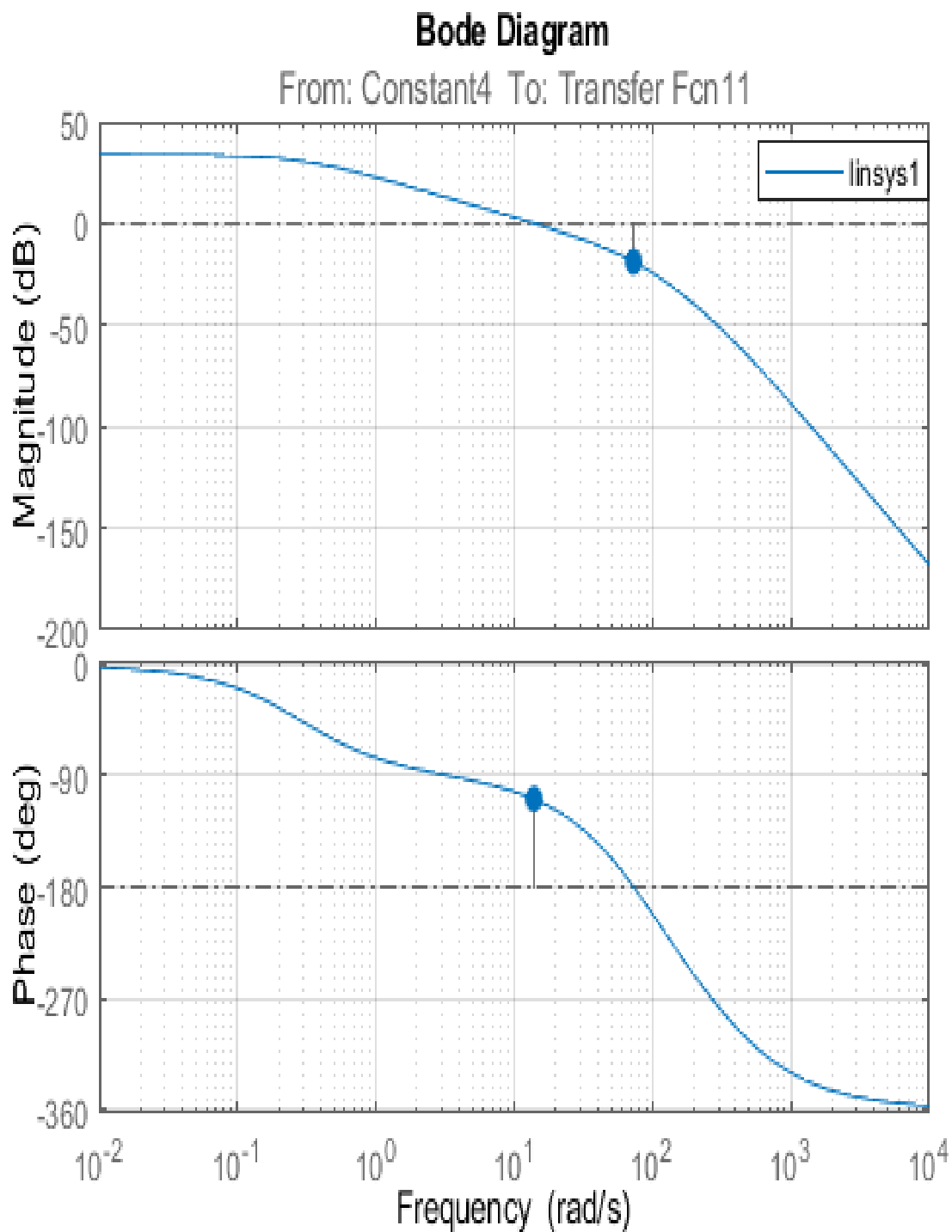


Рисунок 5.9 - ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого идеализированного (без учета внутренней ООС по противо-эдс двигателя) контура скорости.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

35

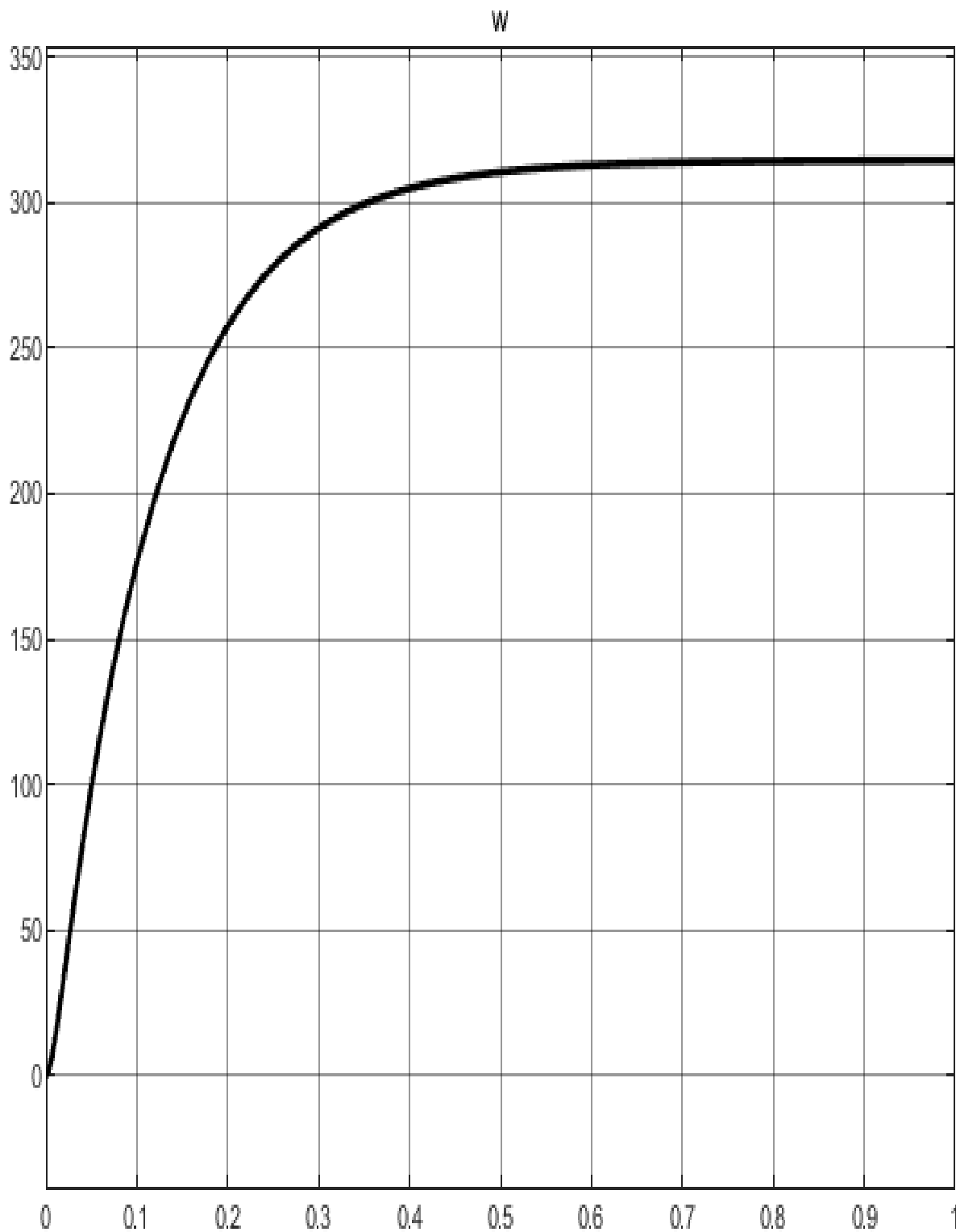


Рисунок 5.10 - Переходная характеристика идеализированного (без учета внутренней ООС по противо-эдс двигателя) контура скорости.

Учет влияния внутренней отрицательной обратной связи по противо-эдс двигателя. Расчет корректирующей параллельной обратной связи.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

36

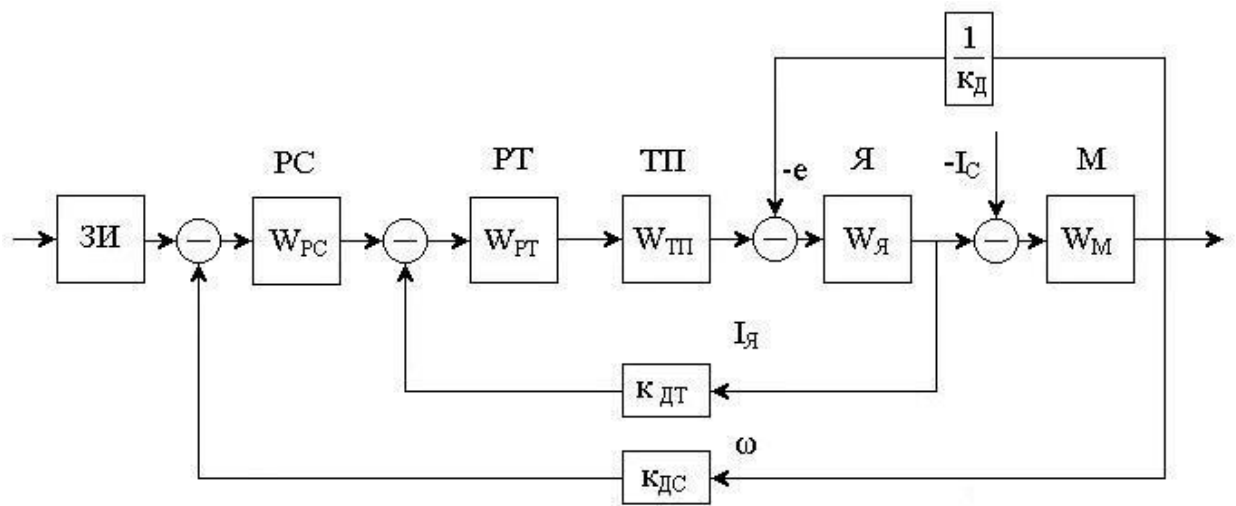


Рисунок 5.11 - Структурная схема САУ

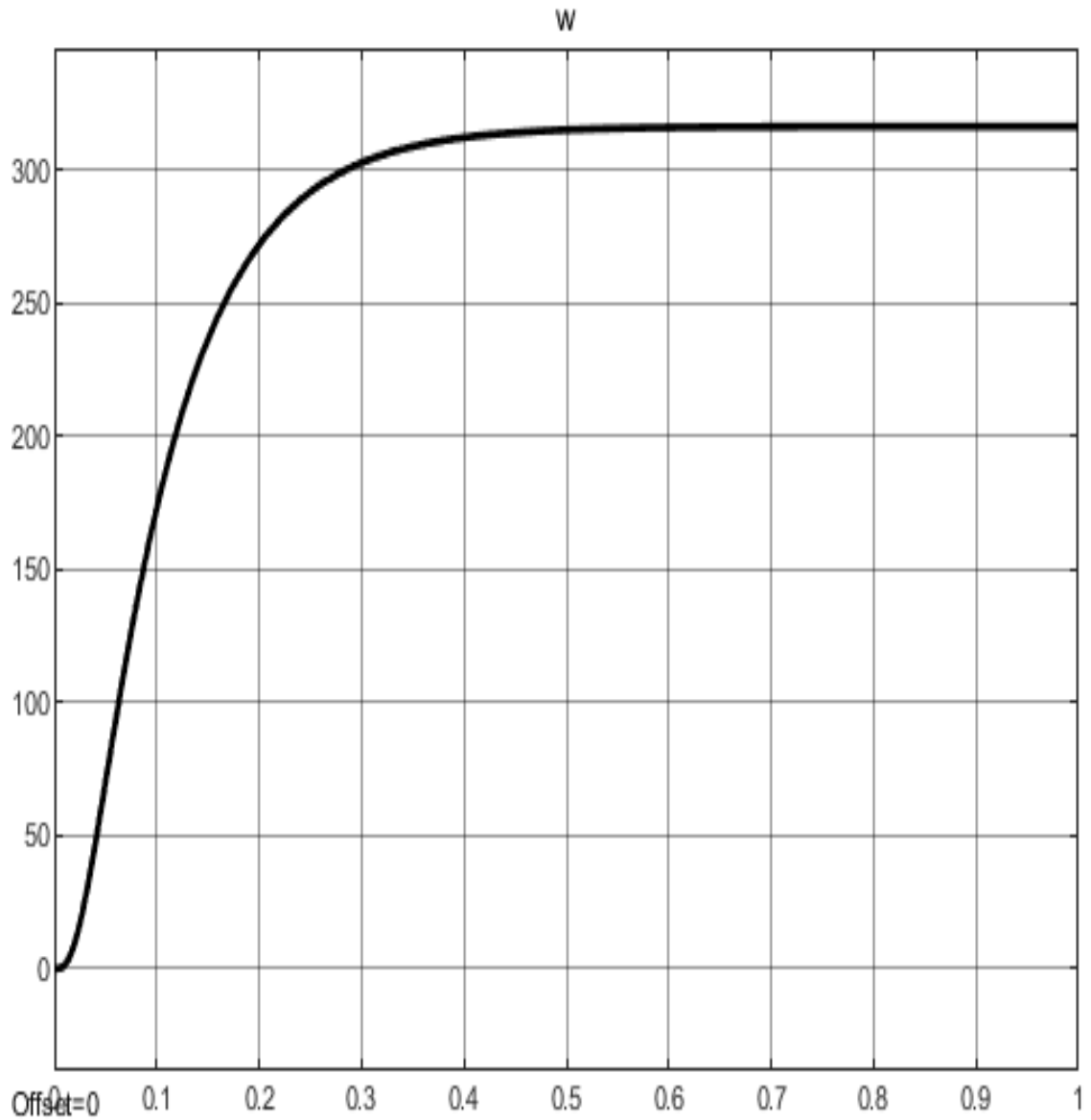


Рисунок 5.12 - Переходная характеристика контура скорости.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

37

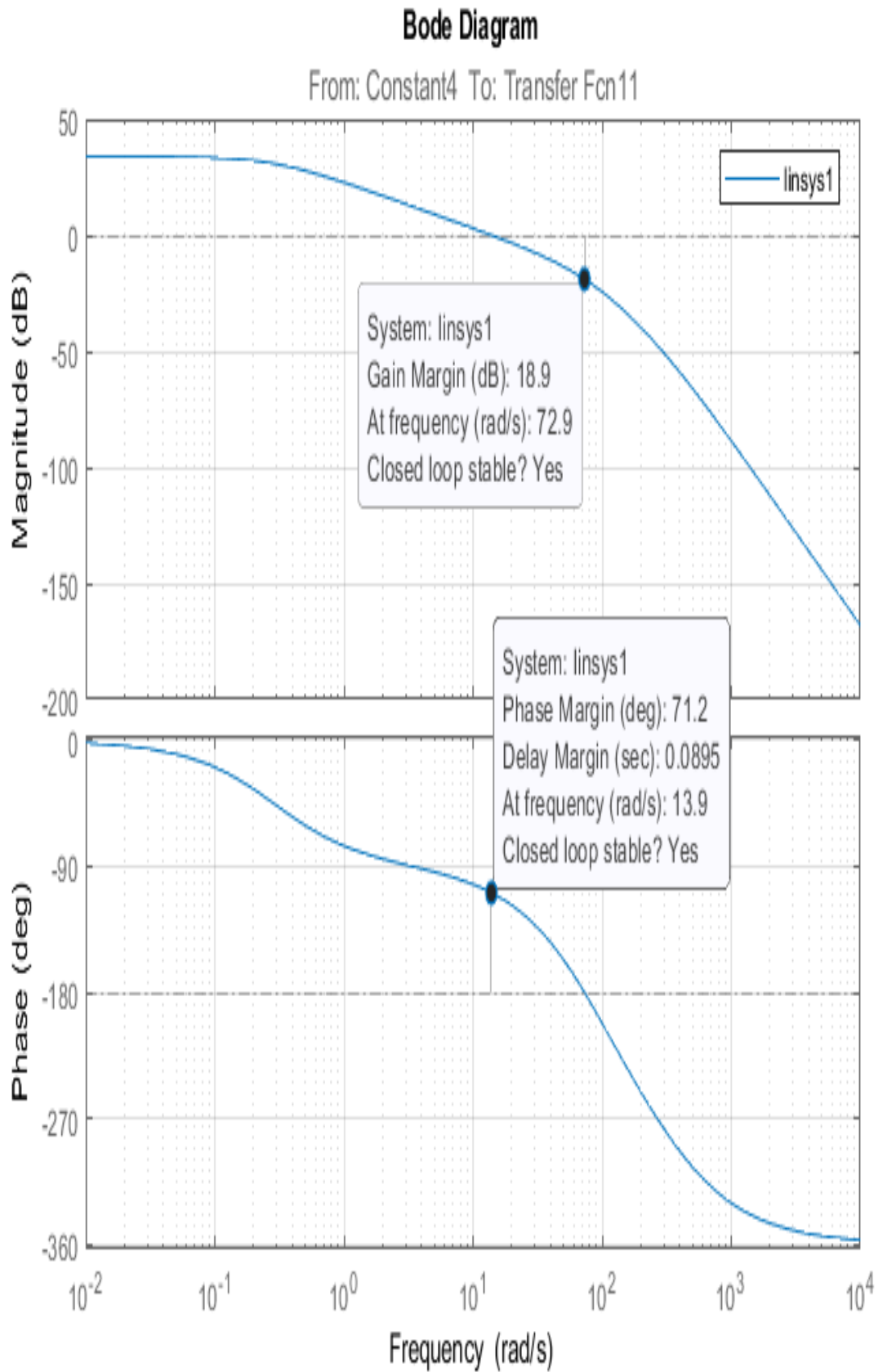


Рисунок 5.13 - ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура скорости.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

38

Показатели качества САУ

- время регулирования $t_p = 0,35$ с;
- статическая ошибка не превышает 0,01;
- величина перерегулирования не более 0 %;
- запас устойчивости по модулю ΔL 18,9 дБ, по фазе $\Delta\varphi - 71,2^\circ$.

					<i>13.03.02.2021.00935 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		39

6 ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

6.1 Проверка двигателя и преобразователя по нагреву

Проверка выполняется сравнением среднеквадратичного тока двигателя за время работы с номинальным выходным током преобразователя. Так как в рассматриваемой схеме в качестве приводного электродвигателя используется двигатель постоянного тока независимого возбуждения, то среднеквадратичное значение тока двигателя пропорционально среднеквадратичному значению момента.

При пуске двигателя с номинальной нагрузкой среднее значение тока двигателя не превышает номинального тока преобразователя электропривода.

6.2 Проверка на перегрузочную способность

Выбранные двигатель и преобразователь напряжения выполняют требования перегрузочной способности, т.к. нагрузочные диаграммы показывают, что максимальные значения момента двигателя не превышают допустимых значений.

					<i>13.03.02.2021.00935 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		40

7 АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для создания системы автоматизации электропривода электровоза применим систему на базе программируемого логического контроллера с сенсорной панелью для отображения информации о параметрах работы электропривода. Сенсорная панель располагается в кабине управления оператора электровоза и отображает скорость движения электровоза, а также информационные сигналы о параметрах работы электропривода и питающей сети.

7.1 Выбор ПЛК

Программируемые логические контроллеры представляет собой конечный (дискретный) автомат, имеющий конечное количество входов и выходов, подключенных посредством датчиков, ключей, исполнительных механизмов к объекту управления, и предназначенный для работы в режимах реального времени.

Применяем программируемый логический контроллер ОВЕН, обеспечивающий следующие функциональные возможности:

- получения сигналов управления с сенсорной панели оператора;
- вывод технологических параметров электропривода на сенсорную панель.

В качестве программируемого логического контроллера принимаем ОВЕН ПЛК-210.

В качестве сенсорной панели оператора выбираем панель ОВЕН СП307-Б, которая подключается к программируемому логическому контроллеру для управления электроприводом и отображением параметров его работы. Сенсорная панель подключается к программируемому логическому контроллеру по средствам стандартного интерфейса обмена данными.

									Лист
									41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2021.00935 ПЗ



Рисунок 7.1 – Общий вид ОВЕН ПЛК-210.

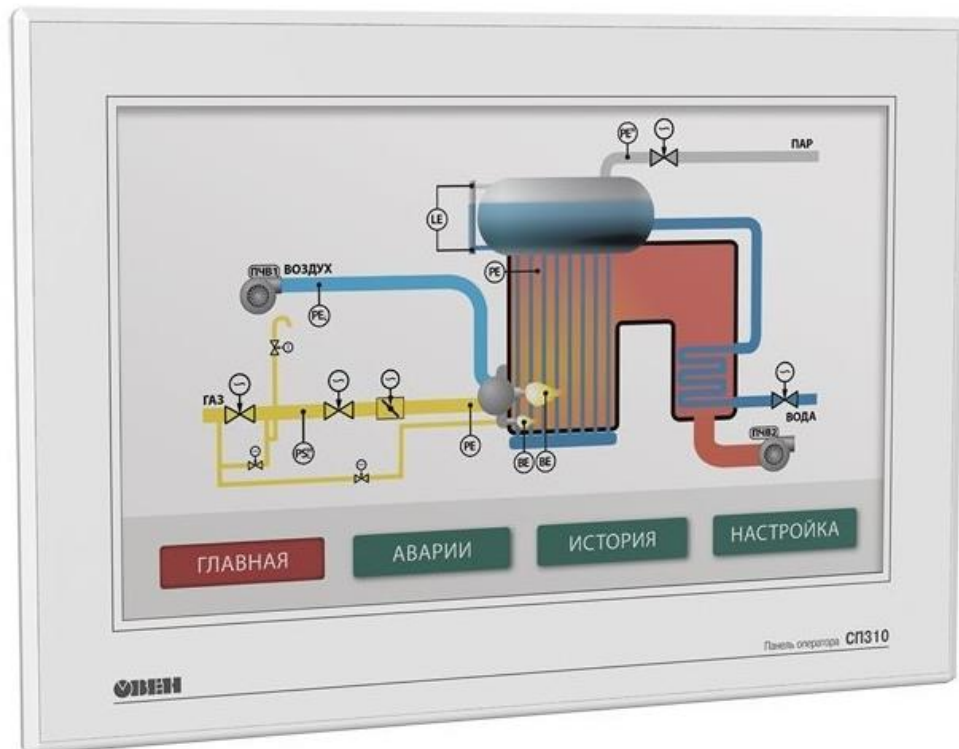


Рисунок 7.2 – Общий вид сенсорной панели.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

42

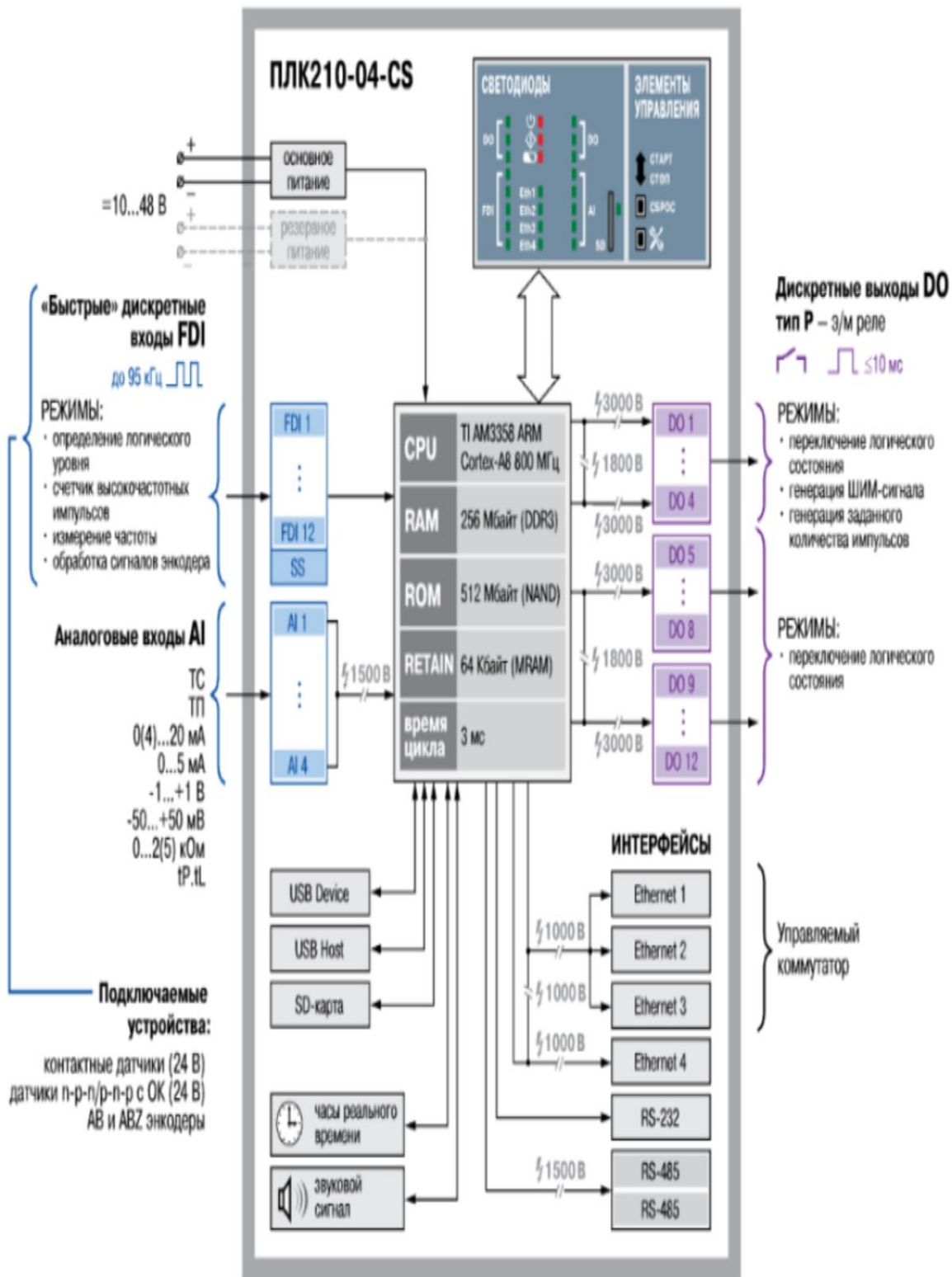


Рисунок 7.3 – Функциональная схема ОВЕН ПЛК-210.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

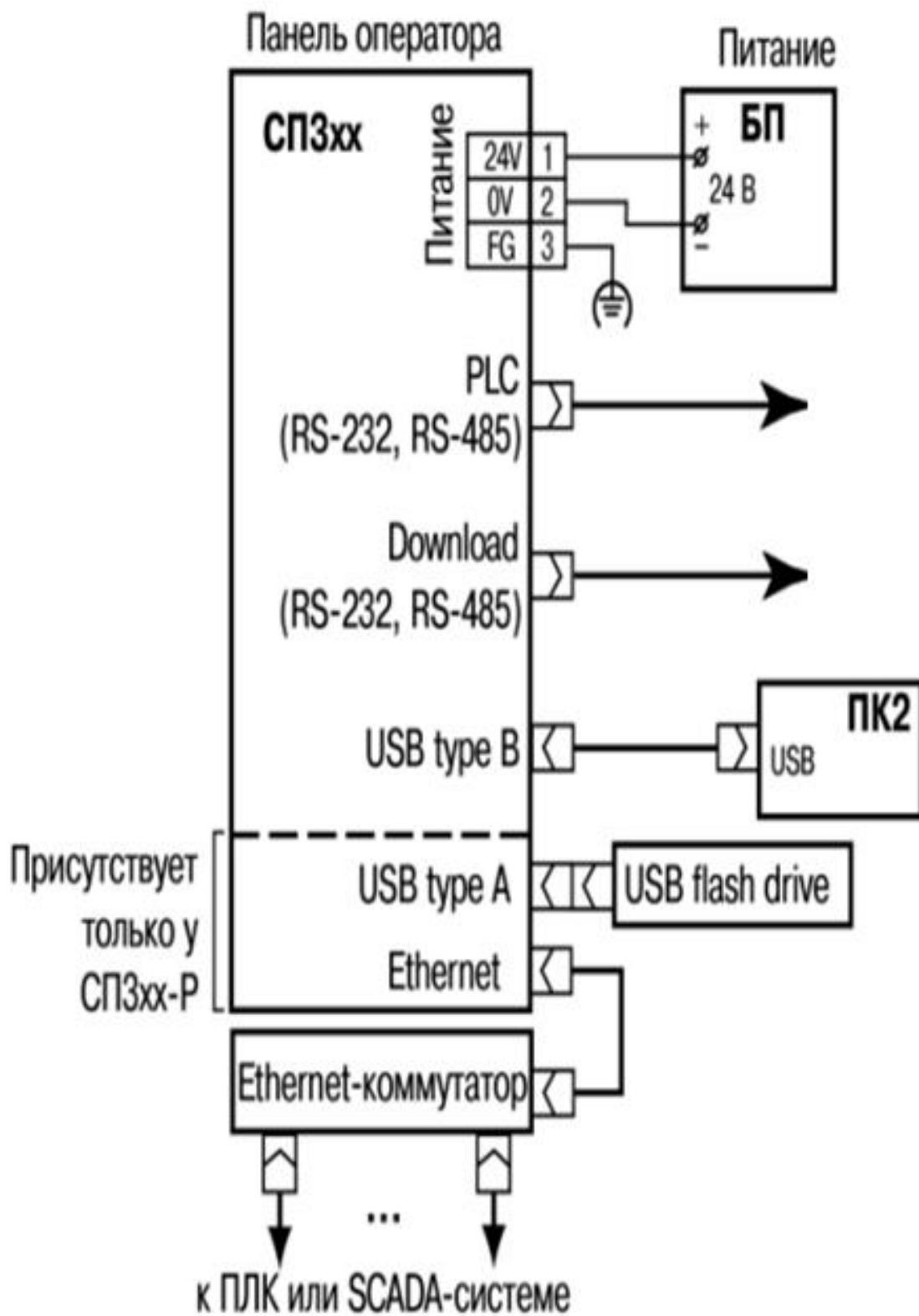


Рисунок 7.4 – Схема подключения сенсорной панели.

7.2 Логические уравнения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

44

Для рассматриваемой схемы управления электропривода электровоза нет необходимости задания алгоритмов работы программируемого логического контроллера, поскольку его назначение заключается в получении информации с датчиков обратных связей электропривода и ее передача на сенсорную панель.

7.3 Программирование ПЛК

Современные ПЛК универсального назначения, поддерживающие стандарт МЭК 61131-3, программируются на ПК с помощью специализированных комплексов, среди которых наиболее популярным является CoDeSys, разработанный фирмой 3S (Smart Software Solutions). Этот универсальный инструмент программирования.

Прикладная программа становится переносимой, т. е. ее можно использовать в любом ПЛК, отвечающем требованиям стандарта МЭК.

Простейшее и наиболее популярное применение ПЛК - это создание автономной системы управления каким-либо технологическим процессом. В случае проектирования автоматизированной системы управления производством (АСУП) или разветвленным технологическим процессом (АСУТП) на ПЛК возлагаются функции нижнего звена в обработке входных сигналов и выработке управляющих воздействий в пределах каждого локального участника.

Используя стандартные протоколы обмена данными, среди которых обычно отдают предпочтение технологии OPC (OLE for Process Control), можно войти в SCADA - систему.

Рассмотрим этапы программирования ПЛК:

1 Определение конфигурации ПЛК.

2 Создание программных компонентов.

3 Написание программного кода на выбранном языке программирования.

4 Компиляция проекта и исправление ошибок.

5 Отладка проекта. При этом осуществляется изменение входных параметров с целью контроля реагирования программируемого логического контроллера на эти изменения.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2021.00935 ПЗ	
						Лист
						45

8 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Схема электрическая принципиальная электропривода электровоза представлена на рисунке 8.1.

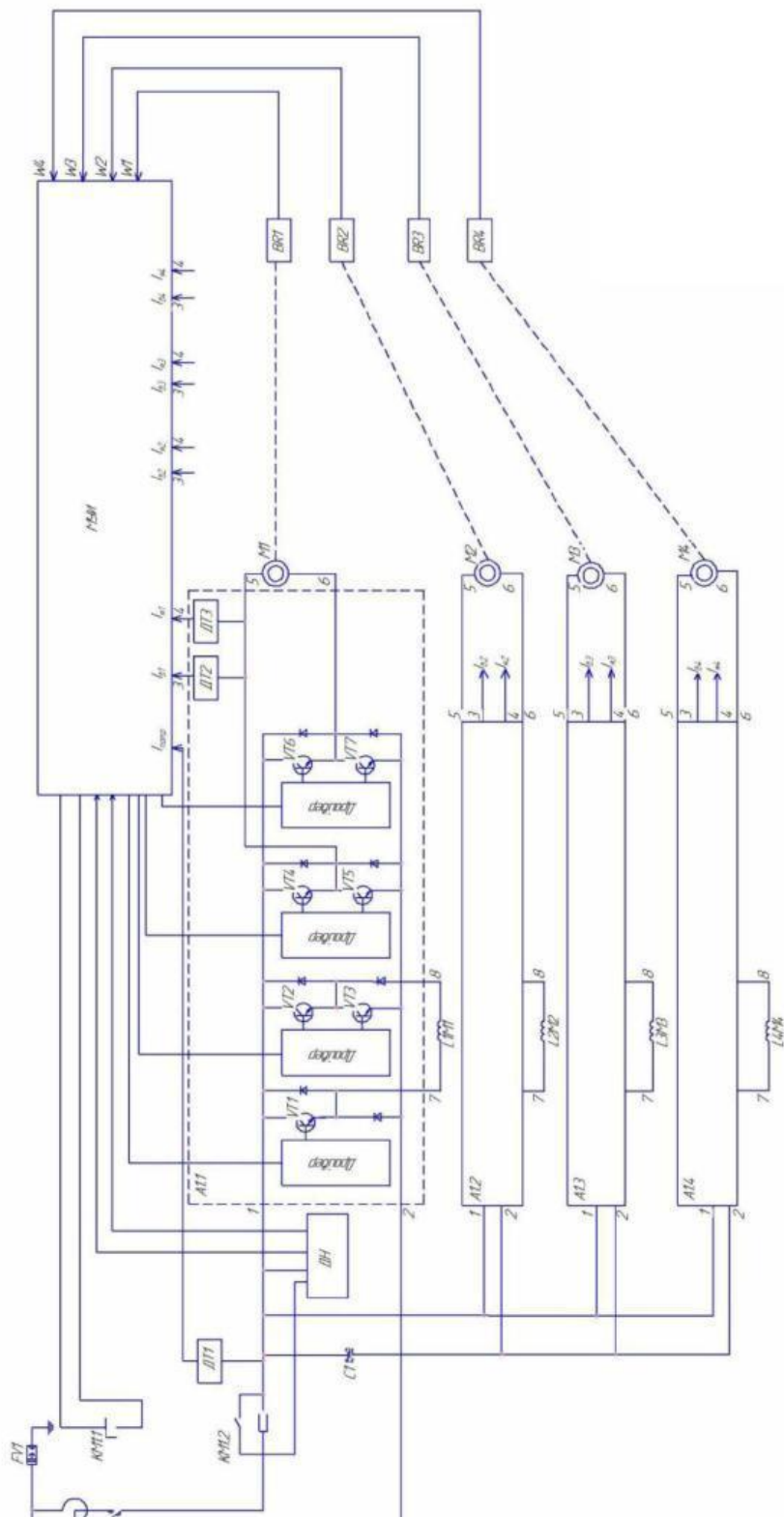


Рисунок 8.1 - Схема электрическая принципиальная электропривода электровоза.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

46

Схема электрическая принципиальная силовой части включает:

- M1-M4 – приводные двигатели постоянного тока независимого возбуждения;
- BR1-BR4 – датчики обратной связи по скорости;
- ДТ – датчики тока якоря и обмотки возбуждения;
- ДН – датчик напряжения;
- VT – силовые транзисторные полупроводниковые ключи;
- драйверы управления транзисторами.

Подключение силовой цепи и цепи управления электропривода электровоза осуществляется через однополюсный автоматический выключатель.

Силовые транзисторы позволяют обеспечивать реверс электропривода по обмотке возбуждения или по обмотке якоря двигателя постоянного тока. Для этого в соответствии с сигналом задания производится соответствующее переключение силовых полупроводниковых ключей.

Управления транзисторными ключами осуществляется схемой драйвера, который получает сигналы от блока управления.

На вход системы управления электропривода электровоза поступают сигналы со следующих датчиков:

- датчика скорости;
- датчика тока обмотки возбуждения;
- датчика тока обмотки якоря;
- датчика напряжения.

Информация с датчиков используется для управления электроприводами, а также передачи для визуального отображения на сенсорную панель в кабину управления.

Алгоритм управления силовыми ключами обеспечивает включение и отключение силовых полупроводниковых ключей с требуемым значением длительности управляющего импульса.

Замыкание и размыкание выключателя производятся с периодом повторения T . В течение промежутка времени At выключатель замкнут, в остальную часть времени $T - At$ разомкнут (рисунок 8.2).

Следовательно, изменяя значение At или T (или то и другое одновременно), можно регулировать напряжение, подводимое к двигателю. Если, сохраняя неизменным At , изменяют период T , то есть частоту включения ключа K , то получают так называемую частотно-импульсную систему регулирования.

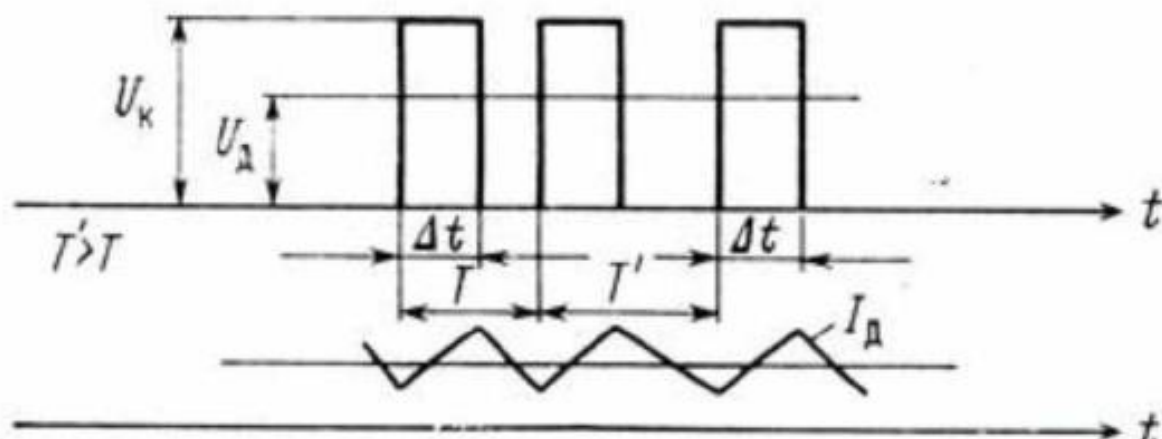


Рисунок 8.2 - Диаграмма мгновенных значений напряжения и тока при импульсном регулировании

Таким образом, ток обмотки возбуждения становится меньше первоначального значения, т.е. меньше, чем ток в обмотке якоря. Чем с большим коэффициентом заполнения импульсного цикла работает импульсный преобразователь, тем большая доля тока обмотки якоря, минуя цепь обмотки возбуждения, ответвляется в цепь дросселя и тем больше коэффициент регулирования тока возбуждения, определяемый, как правило, отношением величины тока в обмотке возбуждения к величине тока в обмотке якоря.

В процессе регулирования тока в обмотке возбуждения напряжение на импульсном преобразователе в течение каждого цикла достигает величины напряжения контактной сети. Это происходит при отпирании диода.

Таким образом, условия работы коммутационного узла импульсного преобразователя в значительной мере определяемые уровнем напряжения на коммутирующем конденсаторе, являются стабилизированными, что существенно повышает надежность работы устройства в целом и позволяет исключить преждевременные срывы режима регулирования.

Система управления преобразователем связана с контроллером машиниста. Машинист, перемещая рукоятку контроллера, обеспечивает изменение частоты открывающих импульсов, подаваемых на управляющие электроды. При частотно-импульсном регулировании происходит естественное закрытие тиристоров без использования вспомогательных цепей, что является преимуществом.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

48

9 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Функциональная схема автоматизации электропривода представлена на рисунке 9.1.

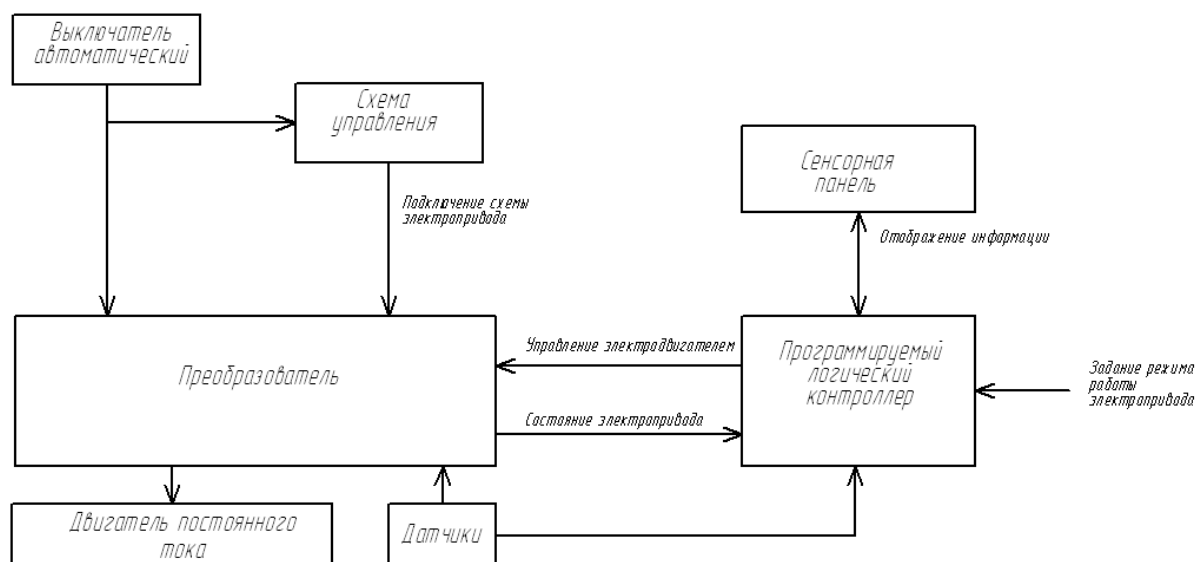


Рисунок 9.1 - Функциональная схема автоматизации электропривода.

В рассматриваемой схеме преобразователь получает сигналы от схемы управления и обеспечивает требуемый режим работы (величину напряжения на якорной обмотке) двигателя. Программируемый логический контроллер позволяет организовать дополнительные информационные линии связи с сенсорной панелью, на которой отображается информация о параметрах работы электропривода электровоза.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.00935 ПЗ

Лист

49

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы рассмотрели вопрос модернизации электропривода электровоза ЕЛ-3, построенного на базе электропривода постоянного тока с реостатным ступенчатым регулированием скорости.

Актуальность применения реостатных систем регулирования скорости в автоматизированных электроприводах в текущее время не может быть обоснована с точки зрения энергетических показателей работы электропривода и простоты реализации схем управления.

Реостатное регулирование характеризуется наибольшими потерями электрической энергии в переходных процессах пуска и торможения, что особенно актуально для рассматриваемого электропривода электровоза, работающего при частых пусках и торможениях.

Выпуск унифицированных преобразователей постоянного напряжения позволяет оптимизировать процесс построения схемы управления электропривода и значительно сократить затраты на его дальнейшую эксплуатацию.

Принятая для реализации схема управления на базе двигателя постоянного тока независимого возбуждения с импульсным преобразователем постоянного напряжения в замкнутой системе управления имеет ряд преимуществ перед реостатными системами управления, а именно:

- 1) плавность регулирования скорости;
- 2) снижение потерь в переходных режимах;
- 3) контроль параметров работы электропривода.

									Лист
									50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2021.00935 ПЗ				

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Дудкин, Е.П. Выбор и обоснование параметров ходовых частей вагонов промышленного транспорта / Е.П. Дудкин, К.Э. Аракелян // Промышленный транспорт XXI век. - 1990. - № 5. - С. 7-11.
- 2 Электровозы и тяговые агрегаты промышленного транспорта: учебник / под ред. В.А. Браташа. - М.: Транспорт, 1977. - 528 с.
- 3 Машинный паспорт электровоза EL3. - Берлин: Henningsdorf, 1962. - 90 с.
- 4 Крайцберг, М.И. Импульсные методы регулирования цепей постоянного тока с помощью тиристоров / М.И. Крайцберг, Э.В. Шикуть. - М.: Энергия, 1969. - 88 с.
- 5 Ключев, В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с., ил.
- 6 Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов/М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2004.-576 с.
- 7 Дьяков В.И. Типовые расчеты по электрооборудованию: Метод. пособие. - 6-е изд., перераб. и доп.-М.: Высш. шк., 1985.-143 с., ил.
- 8 Большам Я.М., Крупович В.И., Самовер М.Л. (ред.). Справочник по проектированию электропривода, силовых и осветительных установок Издание второе, переработанное и дополненное. — М.: Энергия, 1975. — 728 с.
- 9 Чунихин, А. А. Электрические аппараты (общий курс). Учебник для энергетических и электротехнических институтов и факультетов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1975. 648 с. с ил.
- 10 Калинин Ц.И., Куницын Р.А., Багаев А.А. Программируемые логические контроллеры в системах автоматизации. Учебное пособие. – Барнаул: Алтайский ГАУ, 2016. – 111 с.
- 11 Электрический привод : учебное пособие / М. Б. Фомин, В. Г. Петько, И. А. Рахимжанова [и др.]. — Оренбург : Оренбургский ГАУ, 2020. — 180 с. — ISBN 978-5-600-02859-3.
- 12 Усольцев, А. А. Электрический привод : учебное пособие / А. А. Усольцев. — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2012. — 238 с.
- 13 Фролов, Ю. М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу : учебное пособие для вузов / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 368 с. — ISBN 978-5-8114-8201-6.
- 14 Епифанов, А. П. Электропривод : учебник / А. П. Епифанов, Л. М. Малайчук, А. Г. Гущинский. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 400 с. — ISBN 978-5-8114-1234-1.

15 Епифанов, А. П. Основы электропривода : учебное пособие / А. П. Епифанов. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 192 с. — ISBN 978-5-8114-0770-5.

16 Васильев, Б. Ю. Электропривод. Энергетика электропривода : учебник / Б. Ю. Васильев. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2015. — 268 с. — ISBN 978-5-91359-155-5.

17 Базулина, Т. Г. Основы электропривода : учебное пособие / Т. Г. Базулина, Н. А. Равинский. — Минск : РИПО, 2020. — 183 с. — ISBN 978-985-7234-19-6.

18 Сеньков, А. Г. Электропривод и электроавтоматика : учебное пособие / А. Г. Сеньков, В. А. Дайнеко. — Минск : РИПО, 2020. — 177 с. — ISBN 978-985-7234-38-7.

					<i>13.03.02.2021.00935 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		52