



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа «Электропривод и автоматика мостового крана» содержит 58 страниц текстового документа, 16 иллюстраций, 15 использованных источников, 3 таблицы.

**МОСТОВОЙ КРАН, MATLAB & SIMULINK, РЕГУЛИРУЕМЫЙ КРАНОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ, ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ.**

Объект проекта – двух-балочный мостовой кран общего назначения. Основной задачей проекта является модернизация электропривода механизма мостового крана, а также выполняется моделирование проектируемой и базовой систем электроприводов в программе Matlab & Simulink.

Цели проекта:

- Выполнить расчёт и оценку базовой системы, с указанием на необходимость ее модернизации;
- Выбрать двигатель для модернизируемой системы, а также систему управления для заданного электродвигателя;
- Выполнить исследование базовой и модернизированной систем;
- Произвести сравнение базовой и модернизированной систем на основе полученных характеристик.

В пояснительной записке к проекту описаны технологический процесс, проанализированы технические требования к крану, выбран электродвигатель для базовой системы, выполнено исследование базовой системы и переходных процессов скорости и момента для режима пуска, произведено обоснование принципа модернизации, выбран электродвигатель для системы ТП-Д, выполнено исследование системы ТП-Д и переходных процессов скорости и момента для режима пуска, произведено сравнение модернизированной и исходной систем.

					БР–13.03.02.10 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Мироненко В.А.			Лит.	Лист	Листов
Провер.		Федий К.С.				5	
Реценз.					Кафедра ЭТ		
Н. контр.							
Утверд.							
Электропривод и автоматика мостового крана							

## Содержание

РЕФЕРАТ.....	5
Введение.....	7
1 Технологическая часть.....	8
1.1 Описание мостового крана.....	8
1.2 Анализ кинематической схемы, определение параметров в проектирование расчётной схемы механической части электропривода.....	10
2 Выбор системы электропривода и автоматизация промышленной установки.....	10
2.1 Литературный обзор по теме выпускной квалификационной работы.....	10
2.2 Определение возможных вариантов и выбор рациональной системы электропривода.....	12
3 Расчетная часть.....	13
3.1 Выбор электропривода. Определение времени работы и построение скоростной диаграммы механизма.....	13
3.2 Расчет статических и динамических усилий в механизме и построение упрощенной нагрузочной диаграммы.....	14
3.3 Расчет потребной мощности и выбор двигателя по каталогу.....	17
3.4 Определение передаточного числа и выбор редуктора по каталогу.....	19
3.5 Приведение параметров движения к валу двигателя и предварительная проверка двигателя.....	22
3.6 Естественные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.....	30
3.7 Расчет искусственных характеристик и параметров схем включения двигателя постоянного тока при питании от сети.....	34
3.8 Расчет переходных процессов и построение полной нагрузочной диаграммы электропривода.....	36
3.9 Особенности расчета переходных процессов в различных режимах работы электропривода.....	38
3.10 Проверка двигателя по нагреву и перегрузочной способности....	40
3.11 Расчет энергетических показателей электропривода.....	43
4 Модернизация системы автоматизации мостового крана.....	48
4.1 Обоснование принципа модернизации.....	48
4.2 Моделирование базовой системы в среде Matlab Simulink.....	50
4.3 Оценка показателей качества базовой системы.....	51
4.4 Моделирование системы ТП-Д в среде Matlab Simulink.....	53
4.5 Оценка показателей качества системы ТП-Д.....	54
Заключение.....	56
Список использованных источников.....	57

Ине. № подл.	
Подп. и дата	
Ине. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

БР – 13.03.02.10 ПЗ

Лист

6

## Введение

Крановое электрооборудование считается одним из самых основных средств комплексной механизации всех отраслей народного хозяйства. Отраслевое расширение машиностроения, которое занимается производством грузоподъемных машин, является одним из важных направлений развития народного хозяйства для решения проблемы всемирного сокращения и ликвидации тяжелого ручного труда людей. Основное большинство грузоподъемных машин, которые изготавливаются отечественной промышленностью, имеет привод основных рабочих механизмов, и поэтому действия этих машин в значительной степени зависит больше всего от качественных показателей используемого кранового оборудования.

Электропривод большей части грузоподъемных машин характеризуется повторно-кратковременным режимом работы при большей частоте включений, широким диапазоном регулирования скорости и часто возникающих значительных перегрузок при торможении и разгоне механизмов. Такие особые условия электропривода в грузоподъемных машинах являются основой для создания специальных серий электрических двигателей и аппаратов кранового использования.

В крановом электроприводе достаточно широко применяются различные системы тиристорного регулирования и дистанционного управления по радиоканалу или одному проводу.

Для проведения практических инженерных расчётов в наше время были созданы новые прогрессивные и доступные для большого круга работников методы проектирования большинства крановых электроприводов, которые отражают современные направления оптимизации систем и их технико-экономического обоснования.

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР – 13.03.02.10 ПЗ

Лист

7

## 1 Технологическая часть

### 1.1 Описание мостового крана

Мостовой кран – это кран мостового типа, мост которого опирается на надземный рельсовый крановый путь, а грузозахватный орган подвешен к грузовой тележке или электротали, перемещающейся по мосту. Мостовые краны общего назначения изготавливают грузоподъемностью до 320 т, специального назначения до 630 т, пролёты – 60 м, а высота подъёма – 50 м.

Мостовой кран условно можно разделить на две основные группы элементов: механические узлы и электрооборудование, которые позволяют управлять работой крана.

#### Механические узлы мостового крана

Мост крана, который также имеет другое название – пролётная балка – это несущая конструкция крана, которая предназначена для движения по ней грузовой тележки. Мост крана состоит из одной или двух пролетных балок, которые соединены с концевыми балками, которые в свою очередь могут передвигать всю конструкцию мостового крана по подкрановым балкам. На мосту крана располагаются одна или две грузовые тележки, на одном или двух независимых путях.

Грузовая тележка мостового крана или просто крановая тележка предназначена для перемещения и подъема груза вдоль пролета (пролетной балки мостового крана). Конструкция тележки представляет собой раму, которая сварена из поперечных и продольных балок, которая опирается на ходовые колеса и имеет очень жесткую конструкцию. На раме тележки располагается подъемный механизм (вспомогательного и основного подъемов), механизм для передвижения самой тележки вдоль моста крана, токоприемник, и устройства безопасности. На однобалочных мостовых кранах устанавливают таль или тельфер, двухбалочный кран оснащается грузовой тележкой.

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

					БР – 13.03.02.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		8

Таль или тельфер – подвесное грузоподъемное устройство с ручным или механическим приводом (обычно электрическим). Тали широко применяются как в качестве самостоятельного грузоподъемного механизма, так и в тележках однобалочных мостовых кранов.

Таль с электрическим приводом (тельфер) представляет из себя лебедку с редуктором, электродвигателем, барабаном или звездочкой, тормозом и крюковой подвеской. Различаются тали на стационарные и передвижные (механизированные), подвешенные к специальным тележкам, перемещающимся по подвесным монорельсовым путям.

Концевая балка является составной частью мостового крана и выполняет функции механизма передвижения моста крана по расположенными перпендикулярно подкрановым путям и также служит в качестве опоры моста. Балка концевая состоит из корпуса, колесных блоков, а также мотор-редуктора. Балки концевые, входящие в состав крана мостового, называют комплектом концевых балок.

Подкрановый путь предназначен для перемещения мостового крана по подкрановой балке. Для мостового крана подкрановый путь может быть выполнен как опорным (для опорных мостовых кранов), так подвесным (для подвесных мостовых кранов). В зависимости от этого подкрановые пути разделяют на два типа: рельсовый или балочный. В качестве рельсов применяется квадратная или полосовая сталь, железнодорожные рельсы или специальные крановые рельсы.

Подкрановые балки – основной несущий элемент крановой конструкции, который воспринимает и передает крановые нагрузки на неподвижное основание и обеспечивающий безопасную работу крана на всем пути его передвижения. На ней находится подкрановый путь. Подкрановые балки выполняются из металлических балок или железобетона. Подкрановые балки являются конструктивным элементом крановой эстакады.

Крановая эстакада – это глобальное инженерное сооружение, которое состоит из опор и пролетного горизонтального строения, являющегося

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	БР – 13.03.02.10 ПЗ

несущей конструкцией для мостового крана. Крановая эстакада устанавливается в производственном помещении или под открытым небом.

При работе крана направления движения крана, тележки и крюка постоянно чередуются. Работа механизма подъема состоит из периодов подъема и опускания груза, и периодов подъема и опускания пустого крюка. Для увеличения производительности крана используют совмещение операций, например, одновременное передвижение крана и тележки.

## 1.2 Анализ кинематической схемы, определение параметров в проектировании расчётной схемы механической части электропривода

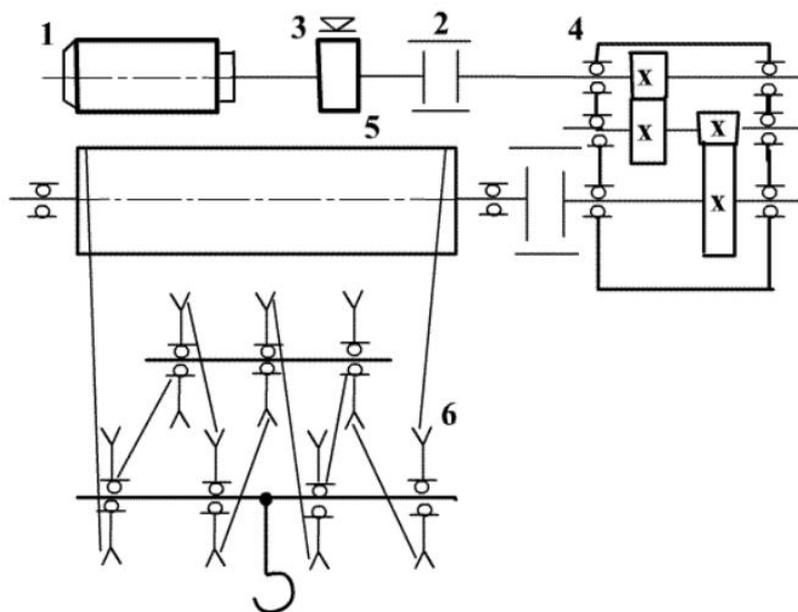


Рис. 1 – Кинематическая схема механизма подъема

- |                       |                |
|-----------------------|----------------|
| 1 – электродвигатель; | 5 – барабан;   |
| 2 – муфта;            | 6 – полиспаст. |
| 3 – тормоз;           |                |
| 4 – редуктор;         |                |

## 2 Выбор системы электропривода и автоматизация промышленной установки

### 2.1 Литературный обзор по теме выпускной квалификационной работы

Ине. № дубл.	Ине. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Подп. и дата
Ине. № подл.				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

БР – 13.03.02.10 ПЗ

Лист

10

Основную роль в осуществлении комплексной механизации и автоматизации производственных процессов и ликвидации ручных погрузочно-разгрузочных работ играет подъемно-транспортное машиностроение. За счёт их автоматизации грузозахватных операций, автоматизации процессов управления грузоподъёмными машинами и точной установки грузов осуществляется большое сокращение тяжелого труда. Из-за того, что такие задачи решаются с помощью электропривода, значит их значение совершенствования и внедрение гораздо более современных электроприводов постоянно возрастает.

В крановом электроприводе в настоящее время широко используются неуправляемые и управляемые полупроводниковые выпрямители, полностью тиристорные системы регулирования, а также отдельные силовые полупроводниковые приборы, это позволяет, из-за не высоких затрат, получить системы с достаточным регулированием скорости перемещения механизмов. Чтобы сократить персонал эксплуатации, применяют системы управления грузоподъёмными машинами, в частности кранами, по радиоканалу. В таких системах достигается максимальный большой эффект при обеспечении устойчивого регулирования скорости.

Механизмы подъёма мостовых кранов относятся к механизмам циклического действия с активной нагрузкой. У этих механизмов цикл работы определяется технологическим процессом, но на выбор приводных двигателей большое влияние оказывают динамические режимы: пуск, реверс, торможение.

Значительная часть грузоподъёмных кранов характеризуется постоянно меняющимися условиями использования при переработке грузов, поэтому механизмы кранов, которые имеют в своём составе электроприводы, должны быть в максимальной степени приспособлены к постоянно видоизменяющейся работе с грузами.

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Ине. № подл.	Лист
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	Дата

БР – 13.03.02.10 ПЗ



### 3 Расчетная часть

#### 3.1 Выбор электропривода. Определение времени работы и построение скоростной диаграммы механизма.

##### Подъем и спуск пустого крюка:

Определяем время переходного процесса, с:

$$t_{пуст.кр} := \frac{v_0}{a_{ср}} = 2.5$$

Определяем длину пройденного участка, м:

$$L_{пуст.кр} := \frac{a_{ср} \cdot t_{пуст.кр}^2}{2} = 1.25$$

Определяем время спуска и подъема пустого крюка, с:

$$t_{общ.пуст.кр} := \frac{h - (2 \cdot L_{пуст.кр})}{v_0} = 9.5$$

##### Подъем и спуск нагруженного крюка:

Определяем время переходного процесса, с:

$$t_{нагр.кр} := \frac{v_{ном}}{a_{ср}} = 0.625$$

Определяем длину пройденного участка, м:

Ине. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Ине. № подл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$L_{\text{нагр.кр}} := \frac{a_{\text{ср}} \cdot t_{\text{нагр.кр}}^2}{2} = 0.078$$

Определяем время спуска и подъема нагруженного крюка, с:

$$t_{\text{общ.нагр.кр}} := \frac{h - (2 \cdot L_{\text{нагр.кр}})}{v_{\text{ном}}} = 47.375$$

Определяем суммарное время работы, с:

$$\Sigma t := 2 \cdot (t_{\text{общ.нагр.кр}} + t_{\text{нагр.кр}}) + 2 \cdot (t_{\text{общ.пуст.кр}} + t_{\text{пуст.кр}}) = 120$$

Определяем суммарное время работы, при заданной продолжительности включения, с:

$$t_{\text{ц}} := \frac{\Sigma t}{\text{ПФ}_{\text{факт}}} = 571.429$$

Определяем время паузы, с:

$$t_{\text{п}} := \frac{t_{\text{ц}} - \Sigma t}{4} = 112.857$$

где  $n_{\text{паузы}} = 4$  - количество пауз за время работы механизма за весь технологический процесс.

### 3.2 Расчет статических и динамических усилий в механизме и построение упрощенной нагрузочной диаграммы.

Предварительный выбор двигателя по мощности производится приближенно, так как на начальном этапе проектирования неизвестна полная (статическая и динамическая) нагрузка. Самый наиболее распространенный метод предварительного расчета мощности двигателя основан на учете лишь статических нагрузок, которые определяются из исходных данных на проектирование. Далее рассчитываются полная нагрузочная диаграмма работы предварительного выбранного двигателя, и проводится его проверка по критериям нагрева, перегрузочной способности и по условиям пуска.

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР – 13.03.02.10 ПЗ

Лист

14

Определяем коэффициент загрузки:

$$\chi := \frac{m_k}{m_{zp} + m_k} = 0.029$$

Определяем КПД механизма при частичной загрузке, %:

$$\eta_{мех} := \frac{1}{\frac{1}{\eta} + 0.07 \cdot \left(\frac{1}{\chi} - 1\right)} = 0.29$$

Различают силовой и тормозной спуск. Силовой спуск имеет место при опускании пустого крюка или легких грузов, сила тяжести которых не способна преодолеть силы трения в механизме.

Определяем статический момент при силовом спуске (спуске пустого крюка),  $H \cdot м$ :

$$M_{с.с.0} := \frac{g \cdot m_k \cdot D_6}{2} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{мех}} - 2\right) = 850.2$$

Определяем статический момент подъема груза с учетом потерь в механизме,  $H \cdot м$ :

$$M_{с.с.} := \frac{g \cdot (m_k + m_{zp}) \cdot D_6}{2} \cdot \eta = 1.819 \cdot 10^4$$

Определяем статический момент при тормозном спуске (спуске груза),  $H \cdot м$ :

$$M_{с.т.} := \frac{g \cdot (m_k + m_{zp}) \cdot D_6}{2 \cdot \eta} = 2.245 \cdot 10^4$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	
Ине. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Определяем статический момент при подъеме пустого крюка,  $H \cdot м$ :

$$M_{c.л.0} := \frac{g \cdot m_k \cdot D_6}{2 \cdot \eta_{мех}} = 2.027 \cdot 10^3$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения.

На рисунке 2 и 3 приведены упрощенная скоростная и нагрузочная диаграммы

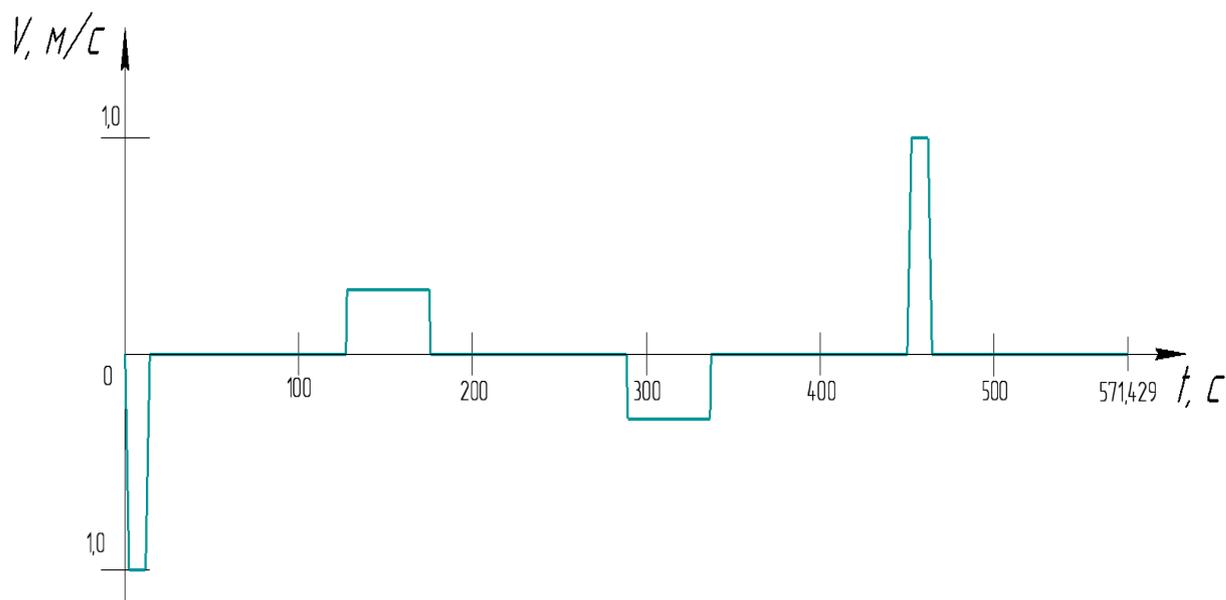


Рис. 2 – Упрощенная скоростная диаграмма

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	Дата

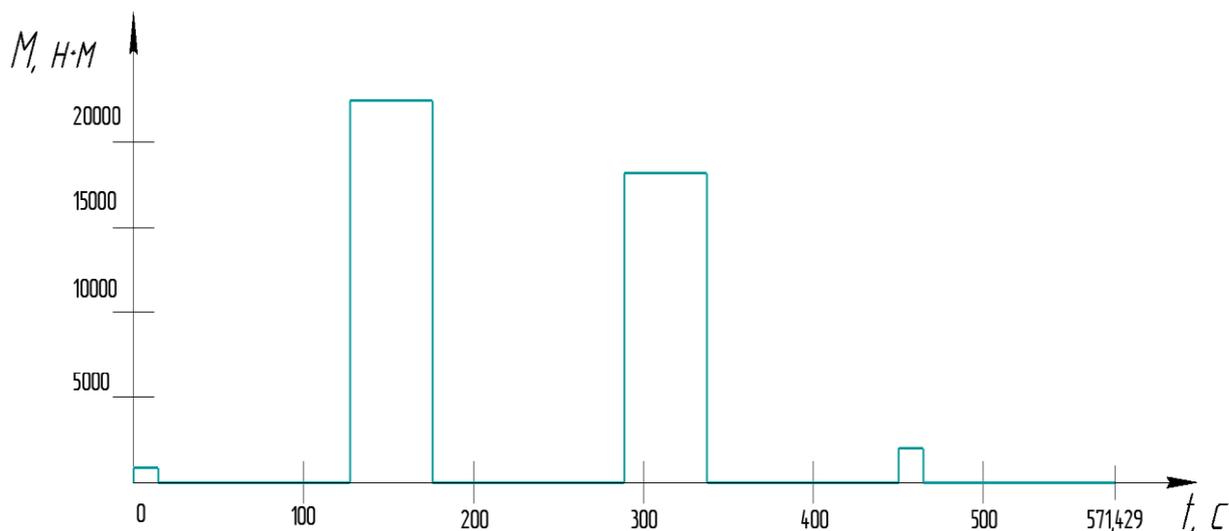


Рис. 3 – Упрощенная нагрузочная диаграмма.

### 3.3 Расчет потребной мощности и выбор двигателя по каталогу

Для механизмов, которые работают в повторно – кратковременном режиме S3 – S5, предварительный выбор мощности двигателя осуществляется с пересчетом на стандартную продолжительность включения  $ПВ_{ст}$  (%), указанную в каталоге:

$$P_{дв} = K_{зан} \cdot \omega_{ро1} \cdot M_{ро сркв} \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}}$$

Где  $K_{зан} = 1,1 - 1,5$  - коэффициент запаса, который учитывает потери мощности в редукторе и все действие неучтенных динамических нагрузок, обусловленных вращающимися элементами электропривода. Эта величина зависит от отношения времени переходных процессов к времени установившегося движения ЭП, а также от отношения максимальных моментов рабочей машины к статическим моментам – большие значения  $K_{зан}$  берутся для нагрузочной диаграммы с большим числом включений и большими пиками.

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инв. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$\omega_{po1}$  - основная угловая скорость вращения рабочего органа механизма,  $c^{-1}$ .

При однозонном регулировании скорости (реостатном, якорном) основной скоростью будет скорость, соответствующая естественной.

$M_{po\text{ сркв}}$  - среднеквадратичное значение момента на нагрузочной диаграмме механизма,  $H \cdot м$ .

В каталоге двигателей указывается стандартная продолжительность включения двигателя. Следует выбрать ближайшее большее из ряда  $ПВ_{cm} = 15, 25, 40, 60, 100 \%$

Определяем скорость рабочего органа при пустом крюке,  $c^{-1}$ :

$$\omega_{po.осч1} := \frac{2 \cdot v_0}{D_6} = 5$$

Определяем скорость рабочего органа при нагруженном крюке,  $c^{-1}$ :

$$\omega_{po.осч2} := \frac{2 \cdot v_{ном}}{D_6} = 1.25$$

Определяем среднеквадратичное значение момента на нагрузочной диаграмме,  $H \cdot м$ :

$$M_{po.сркв} := \sqrt{\frac{M_{с.с.}^2 \cdot t_{с.с} + M_{с.с.0}^2 \cdot t_{с.с.0} + M_{с.п.}^2 \cdot t_{с.п.} + M_{с.п.0}^2 \cdot t_{с.п.0}}{t_{с.с} + t_{с.с.0} + t_{с.п.} + t_{с.п.0}}} = 1.866 \cdot 10^4$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Определяем момент инерции рабочего органа при опускании пустого груза,  $кг \cdot м^2$  :

$$J_{PO1} := J_{м.у.т} + \frac{D_6^2}{4} \cdot m_k = 12.75$$

Определяем момент инерции рабочего органа при подъеме груза,  $кг \cdot м^2$  :

$$J_{PO2} := J_{м.у.т} + \frac{D_6^2}{4} \cdot (m_k + m_{zp}) = 412.75$$

Определяем фактическое значение продолжительности включения электропривода, %;

$$ПВ_{факт} = 21\%$$

Выбираем ближайшее большее значение продолжительности включения:

$$ПВ_{ст} = 25\%$$

Определяем предварительную мощность двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме, Вт:

$$P_{дв} := k_{зан} \cdot \omega_{ро.осч1} \cdot M_{ро.срkv} \cdot \sqrt{\frac{ПФ_{факт}}{ПФ_{ст}}} = 1.069 \cdot 10^5$$

где  $K_{зан} = 1,25$  - коэффициент запаса.

Ине. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата

### 3.4 Определение передаточного числа и выбор редуктора по каталогу

После определения потребной мощности двигателя при неизвестном передаточном числе редуктора необходимо по каталогу подобрать двигатель.

Для данного условия по мощности из каталогов подходит только 1 двигатель:

Таблица 1 – Двигатель с подходящей мощностью

Тип двигателя	$P_{дв}, кВт$	$n_{дв}, об / мин$	$J_{дв}, кг \cdot м^2$	$i_{тр}$	$i_{онт}$
МП-82	106	420	25,3	8,796	5,4

Определяем номинальную скорость двигателя:

$$\omega_{дв.н1} := \frac{\pi \cdot n_{дв.н1}}{30} = 43.982$$

Определяем требуемое передаточное число редуктора:

$$i_{тр1} := \frac{\omega_{дв.н1}}{\omega_{ро.осн1}} = 8.796$$

Определяем момент инерции вала двигателя с вращающимися элементами на валу

Ине. № дубл.	Ине. № дубл.	Взам. инв. №	Ине. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	БР – 13.03.02.10 ПЗ	Лист
						20

$кг \cdot м^2$  :

$$J_{\partial\partial 1} := \delta \cdot J_1 = 29.095$$

где  $\delta = 1.15$  - коэффициент, учитывающий неучтенные маховые массы элементов на валу двигателя

Определяем момент инерции рабочего органа,

$кг \cdot м^2$  :

$$J_{p01} := 15 \cdot J_{\partial\partial 1} + \frac{D_6^2}{4} \cdot (m_k + m_{z\rho}) = 848.425$$

Определяем оптимальное передаточное число редуктора, обеспечивающее максимальное быстродействие системы в переходных режимах:

$$i_{opt1} := \sqrt{\frac{J_{p01}}{J_{\partial\partial 1}}} = 5.4$$

Технические данные краново-металлургический двигатель МП-82:

$$P_{\partial\partial} = 106000 \text{ Вт}; \omega_{\partial\partial.n} = 44,1 \text{ с}^{-1}; I_{ян} = 530 \text{ А}; r_{нос} = 0,0068 \text{ Ом}$$

$$\Phi = 0,107 \text{ Вб}; J_{\partial\partial} = 25,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; U_n = 220 \text{ В}; N = 552; a = 4; p = 2;$$

$$C_m = 43,927;$$

Выбираем редуктор, исходя из условия:

$$i_{факт} < i_{тр}$$

Выбираем редуктор **РЦД-1150-8**

Ине. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Ине. № подл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Определяем отклонение фактического передаточного отношения от требуемого значения:

$$\Delta i := \frac{i_{ред} - i_{факт}}{i_{тр1}} \cdot 100 = 1.324$$

где  $i_{факт} = 8$

КПД редуктора:

$$\eta_{ред.н} := \eta_{подш}^2 \cdot \eta_{ступ1} \cdot \eta_{ступ2} = 0.951$$

где  $\eta_{подш} = 0,995$  - КПД подшипников;  $j = 2$  - число пар подшипников.

$\eta_{сшi}$  - КПД цилиндрической передачи.

$$\eta_{сш1} := 0.99 \quad \eta_{сш2} := 0.98$$

### 3.5 Приведение параметров движения к валу двигателя и предварительная проверка двигателя

На этапе предварительного расчета мощности электродвигателя рассчитали статические и динамические моменты рабочего органа. После выбора двигателя и редуктора, когда известны КПД и передаточное число редуктора, все моменты рабочего органа пересчитываются на ось вала двигателя. Так, для двигательного режима работы, когда потери в редукторе покрываются со стороны двигателя, статический момент рабочего органа приведенный к валу, рассчитывается по формулам:

Определяем момент при опускании пустого крюка,  $H \cdot m$ :

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$M_{c1} := \frac{M_{c.c.0}}{\eta_{ред.н} \cdot i_{факт}} = 103.008$$

Определяем момент при подъеме груза,  $H \cdot м$ :

$$M_{c2} := \frac{M_{c.п.}}{\eta_{ред.н} \cdot i_{факт}} = 2.72 \cdot 10^3$$

Определяем момент при опускании груза (генераторный режим),  $H \cdot м$ :

$$M_{c3} := \frac{M_{c.c.} \cdot \eta_{ред.н}}{i_{факт}} = 1.992 \cdot 10^3$$

Определяем момент при подъеме пустого крюка,  $H \cdot м$ :

$$M_{c4} := \frac{M_{c.п.0}}{\eta_{ред.н} \cdot i_{факт}} = 245.634$$

Определяем номинальный момент на валу двигателя,  $H \cdot м$ :

$$M_{вал.ном} := \frac{P_{дв.ном}}{\omega_{дв.н1}} = 2.41 \cdot 10^3$$

Определяем номинальный момент двигателя,  $H \cdot м$ :

$$M_{ном} := C_M \cdot \Phi \cdot I_H = 2.491 \cdot 10^3$$

Определяем момент холостого хода,  $H \cdot м$ :

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	Дата

$$M_{xx} := M_{НОМ} - M_{вал.НОМ} = 81.04$$

Определяем полный приведенный к валу двигателя статический момент для каждого участка,  $H \cdot м$ :

При спуске пустого крюка:

$$M_1 := M_{c1} + M_{xx} = 184.047$$

При подъеме груза:

$$M_2 := M_{c2} + M_{xx} = 2.801 \cdot 10^3$$

При опускании груза:

$$M_3 := M_{c3} + M_{xx} = 2.074 \cdot 10^3$$

При подъеме пустого крюка:

$$M_4 := M_{c4} + M_{xx} = 326.673$$

Определяем приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции системы электропривода,  $кг \cdot м^2$ :

При пустом крюке:

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$J_{np1} := J_{дв1} + \frac{J_{PO1}}{i_{факт}^2} = 29.264$$

При нагруженном крюке:

$$J_{np2} := J_{дв1} + \frac{J_{PO2}}{i_{факт}^2} = 34.573$$

Определяем приведенный к валу двигателя максимальный динамический момент системы,  $H \cdot m$ :

При пустом крюке:

$$M_{динmax1} := J_{np1} \cdot \frac{2 \cdot a_{ср} \cdot i_{факт}}{D_6} = 508.027$$

При нагруженном крюке:

$$M_{динmax2} := J_{np2} \cdot \frac{2 \cdot a_{ср} \cdot i_{факт}}{D_6} = 600.193$$

Пересчет скоростной и нагрузочной диаграмм.

Определяем установившуюся скорость при подъеме и опускании пустого крюка,  $c^{-1}$ :

$$\omega_{c1} := \omega_{рo.осч1} \cdot i_{факт} = 43.4$$

Определяем установившуюся скорость при подъеме и опускании груза,  $c^{-1}$ :

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$\omega_{c2} := \omega_{ро.очн2} \cdot i_{факт} = 10.85$$

Определяем ориентировочные время работы в переходных режимах, с:

При пустом крюке:

$$t_{nn1} := \frac{J_{np1} \cdot \omega_{c1}}{k_{дин} \cdot M_{динmax1}} = 3.571$$

При нагруженном крюке:

$$t_{nn2} := \frac{J_{np2} \cdot \omega_{c2}}{k_{дин} \cdot M_{динmax2}} = 0.893$$

где  $K_{дин} = 0,7$  - коэффициент, характеризующий уменьшение динамического момента в переходных режимах по сравнению с  $M_{дин max}$  ( при питании двигателя от сети  $K_{дин} = 0,5 - 0,7$ )

Определяем угол поворота вала в переходных режимах, град.

При работе без груза:

$$\varphi_{nn1} := \frac{t_{nn1} \cdot \omega_{c1}}{2} = 77.5$$

При работе с грузом:

$$\varphi_{nn2} := \frac{t_{nn2} \cdot \omega_{c2}}{2} = 4.844$$

Определяем установившуюся линейную скорость, м/с:

Ине. № дубл.	Ине. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Подп. и дата
Ине. № подл.				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

При подъеме и опускании пустого крюка:

$$v_{po1} := \frac{\omega_{c1} \cdot D_6}{2 \cdot i_{факт}} = 1$$

При подъеме и опускании груза:

$$v_{po2} := \frac{\omega_{c2} \cdot D_6}{2 \cdot i_{факт}} = 0.25$$

Определяем длину пройденного участка, м:

При пустом крюке:

$$l_{nn1} := \frac{\varphi_{nn1} \cdot v_{po1}}{\omega_{c1}} = 1.786$$

При нагруженном крюке:

$$l_{nn2} := \frac{\varphi_{nn2} \cdot v_{po2}}{\omega_{c2}} = 0.112$$

Уточняем линейную скорость, м/с:

При работе без груза:

Ине. № дубл.	Ине. № дубл.	Взам. инв. №	Ине. № подл.	Подп. и дата	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

$$v'_1 := v_0 \cdot \frac{i_{mp1}}{i_{факт}} = 1.013$$

При работе с грузом:

$$v'_2 := v_{НОМ} \cdot \frac{i_{mp1}}{i_{факт}} = 0.253$$

Пересчитываем все времена, с:

Определяем общее время спуска и подъема пустого крюка:

$$t_{cc0} := \frac{h - 2 \cdot l_{nn1}}{v_0} = 8.429$$

Определяем общее время спуска и подъема нагруженного крюка:

$$t_{cpr} := \frac{h - 2 \cdot l_{nn2}}{v_{НОМ}} = 47.107$$

Определяем суммарное время работы, с:

$$t_{\Sigma} := 2 (t_{cc0} + t_{cpr} + t_{nn1} + t_{nn2}) = 120$$

Определяем суммарное время работы, при заданной продолжительности включения, с:

$$t := \frac{t_{\Sigma}}{\text{ПФ}_{факт}} = 571.429$$

Определяем суммарное время паузы, с:

$$t_{паузы\Sigma} := t - t_{\Sigma} = 451.429$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Определяем время паузы, с:

$$t_{\text{паузы}} := \frac{t_{\text{паузы}\Sigma}}{4} = 112.857$$

где  $n_{\text{паузы}} = 4$  - количество пауз за время работы механизма за весь технологический процесс.

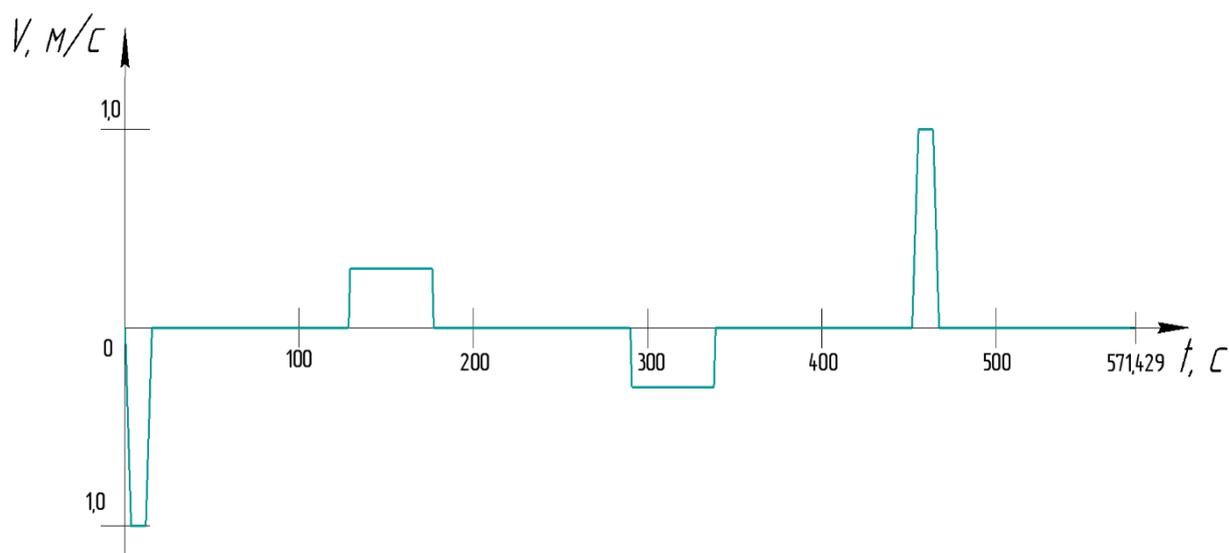


Рис. 4 – Уточненная скоростная диаграмма

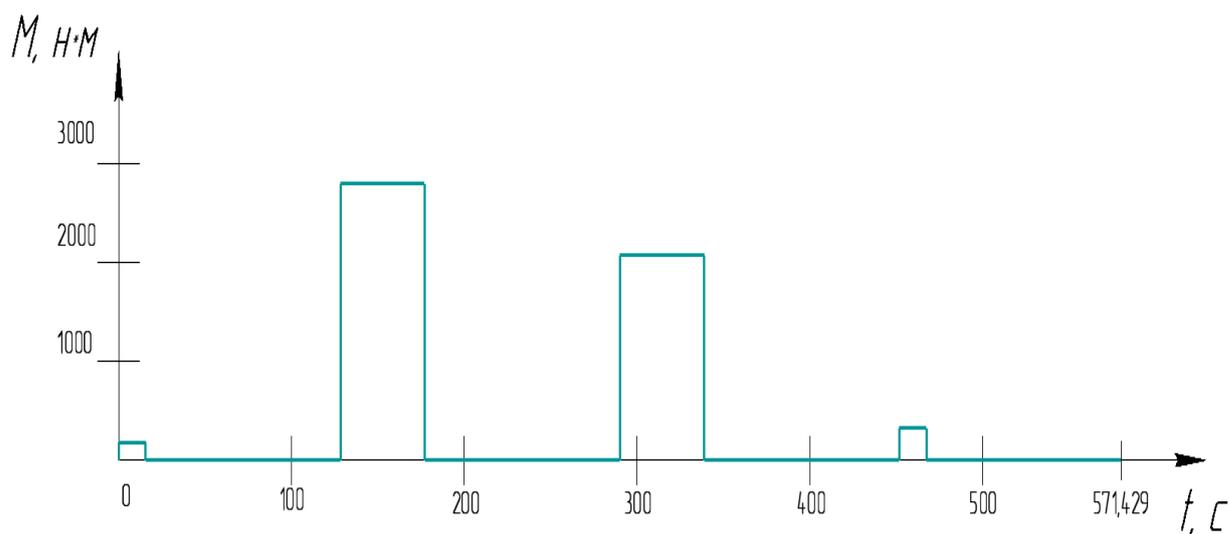


Рис. 5 – Уточненная нагрузочная диаграмма

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Ине. № подл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Предварительная двигателя по нагреву осуществляется по величине среднеквадратичного момента нагрузочной диаграммы двигателя определяется по формуле,  $H \cdot м$ :

$$M_{сркв} := \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_{сс0} + M_2^2 \cdot t_{срр} + M_3^2 \cdot t_{срр} + M_4^2 \cdot t_{сс0}}{t_{\Sigma}}} = 2.186 \cdot 10^3$$

Определяем номинальный момент двигателя при заданной ПВ,  $H \cdot м$ :

$$M_{н.ПВ} := M_{ном} \cdot \sqrt{\frac{\Pi\Phi_{факт}}{\Pi\Phi_{ст}}} = 2.283 \cdot 10^3$$

$$M_{сркв} \leq M_{н.ПВ}$$

$$2186 \leq 2283$$

Выбранный двигатель проходит по нагреву.

Проверка двигателя на максимальную перегрузку,  $H \cdot м$ :

$$M_{max} := M_2 + M_{дунmax2} = 3.402 \cdot 10^3$$

$$M_{кр} := \lambda_M \cdot M_{ном} = 7.473 \cdot 10^3$$

где  $\lambda_M = 3$  – перегрузочная способность выбранного двигателя по моменту

$$3402 \leq 7473$$

Двигатель проходит по перегрузке.

Ине. № дубл.				
Взам. инв. №				
Подп. и дата				
Ине. № подл.				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР – 13.03.02.10 ПЗ

Лист

30

### 3.6 Естественные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Расчет естественных характеристик ДПТ последовательного возбуждения производится графоаналитическим методом на основании каталожных универсальных зависимостей момента на валу  $M_e^*(I^*)$  и частоты вращения вала  $n^*(I^*)$  от тока якоря в относительных единицах.

Зададимся базовыми величинами:

$$I_n = 530 \text{ А}$$

$$M_{нв} = 2410 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$n_n = 420 \text{ об/мин}$$

$$\omega_{дв.н} = 43,982 \text{ с}^{-1}$$

Построение естественной электромеханической характеристики  $\omega_e(I)$  осуществляется простым пересчетом зависимости  $n^*(I^*)$  в абсолютные единицы и переходом к угловой скорости  $\omega_{дв.н} = 43,982 \text{ с}^{-1}$ . Построения зависимости электромагнитного момента от тока якоря  $M(I)$  производится аналогично.

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

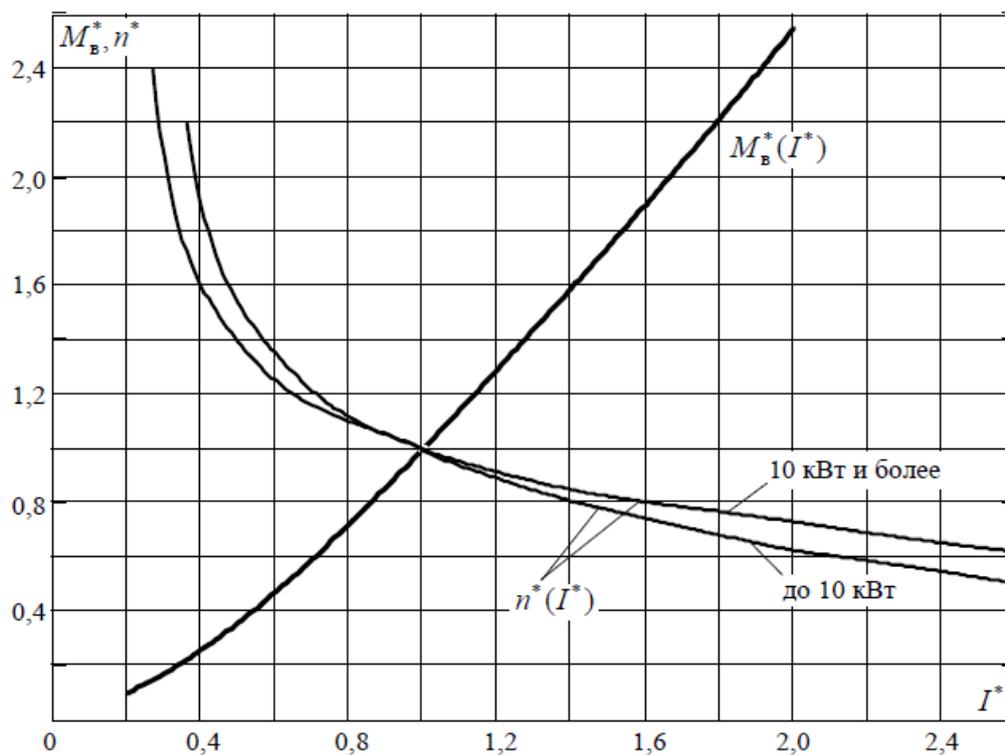


Рис. 6 – Естественные универсальные характеристики ДПТ последовательного возбуждения.

Для расчета естественной механической и естественной электромеханической характеристик  $\omega(M)$ ,  $\omega(I)$  воспользуемся зависимостью электромагнитного момента от тока якоря  $M(I)$  задаваясь несколькими значениями токов якоря  $I_i$  (не менее пяти точек) для каждого из которых находим значения  $I$ ,  $M$  и  $\omega$ .

Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчета механической и электромеханической характеристик

$I, A$	212	424	636	848	1060
$M, H \cdot m$	541,4	1813	3218	4669	6443
$\omega, c^{-1}$	83,56	48,4	39,5	35,2	30,8

Ине. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Ине. № подл.	Подп. и дата

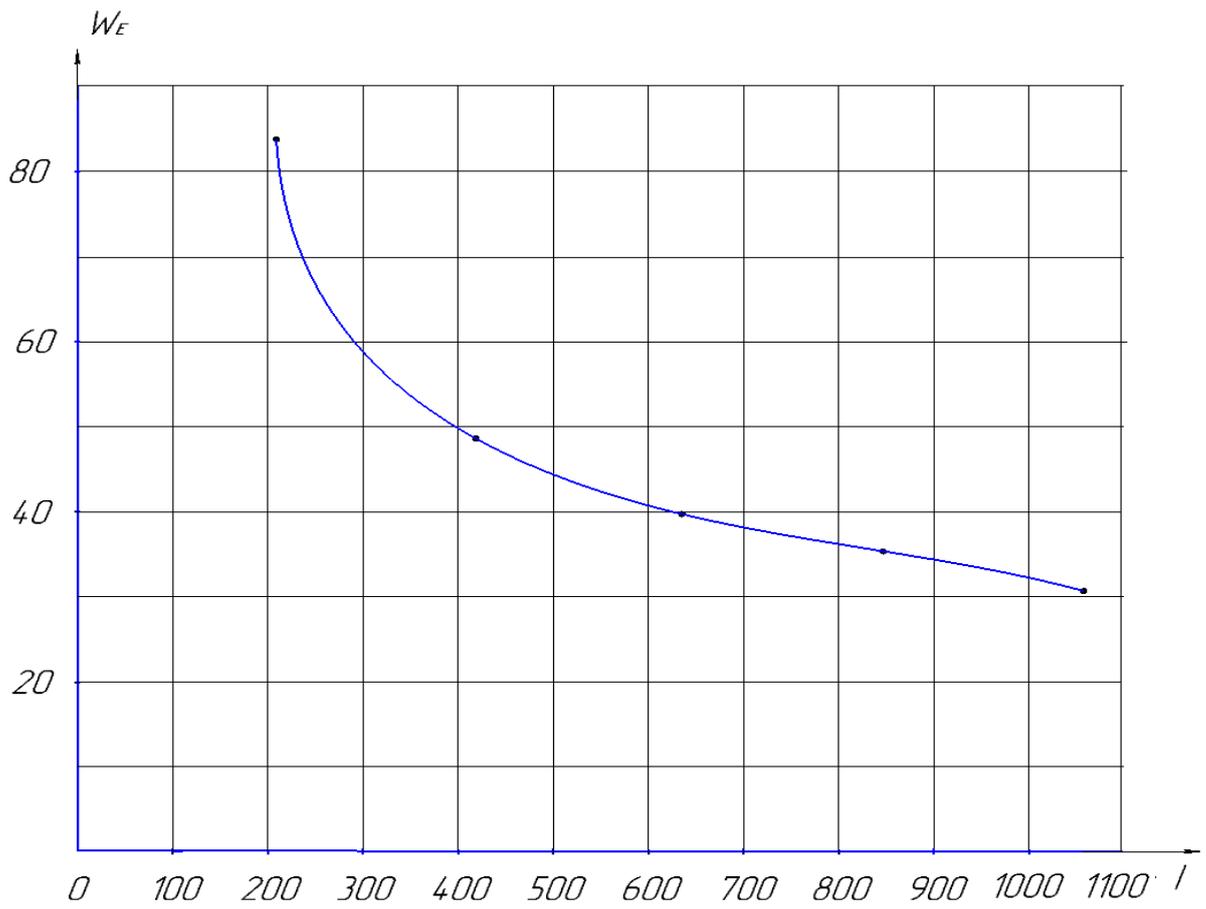
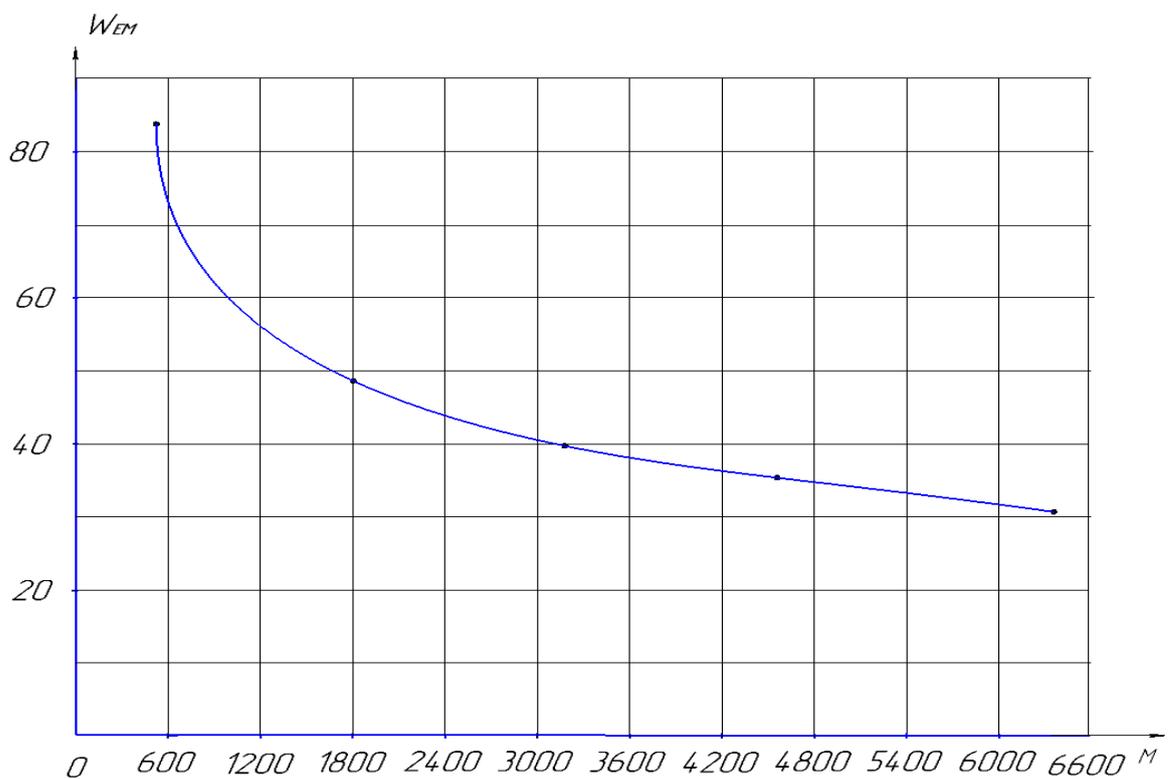


Рис. 7– Естественная электромеханическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения.



Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР – 13.03.02.10 ПЗ

Рис. 8– Естественная механическая характеристика ДПТ  
последовательного возбуждения.

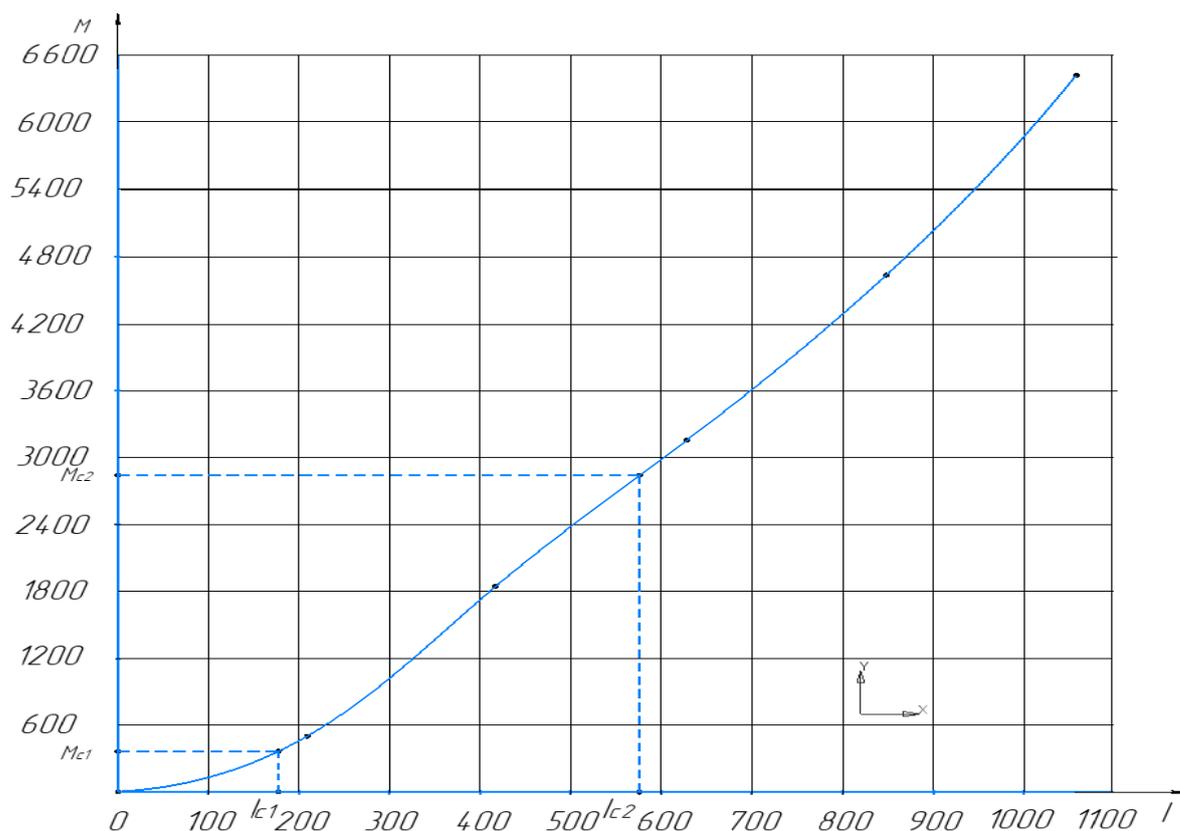


Рис. 9 – Моментная характеристика

### 3.7 Расчет искусственных характеристик и параметров схем включения двигателя постоянного тока при питании от сети

Определяем внутреннее сопротивление двигателя, приведенное к нагретому состоянию, Ом:

$$r_{яд} := k_t \cdot (1 - \eta) \cdot \frac{U_H}{I_H} = 0.031$$

где  $k_t = 0,75$  - коэффициент нагрева, значение которого зависят от типа габаритов двигателя.

Найдем статический ток, А:

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$M_c := M_3 = 2.074 \cdot 10^3 \quad I_c := \frac{M_c}{C_m \cdot \Phi} = 441.153$$

Зададимся токами переключения  $I_1$  и  $I_2$  причем  $I_c \leq I_2$ :

$$I_1 = 1060 \text{ A}$$

$$I_2 = 636 \text{ A}$$

Найдем сопротивления в виде зависимости угловой скорости двигателя от сопротивления  $\omega = f(R_{яц})$  при неизменном токе якоря, Ом:

$$R_{яц1} := \frac{U_H}{I_1} = 0.208$$

$$R_{яц2} := \frac{U_H}{I_2} = 0.346$$

Для ДПТ последовательного возбуждения расчет искусственных характеристик, проходящих через заданную точку, выполняется по формуле:

$$\omega_{ui} = \omega_{ei} \cdot \frac{U - I_i \cdot (r_{яд} + R_{доб})}{U - I_i \cdot r_{яд}}$$

где  $I_i$  и  $\omega_{ei}$  - находятся по построенной ранее естественной характеристике  $\omega_e(I)$ ,  $R_{доб}$  - находится графически по пусковой диаграмме.

Число ступеней берем  $m = 2$

Добавочные сопротивления равны, Ом:

$$R_{доб1} := 0.074 \quad R_{доб2} := R_{яц1} - r_{яд} - R_{доб1} = 0.103$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

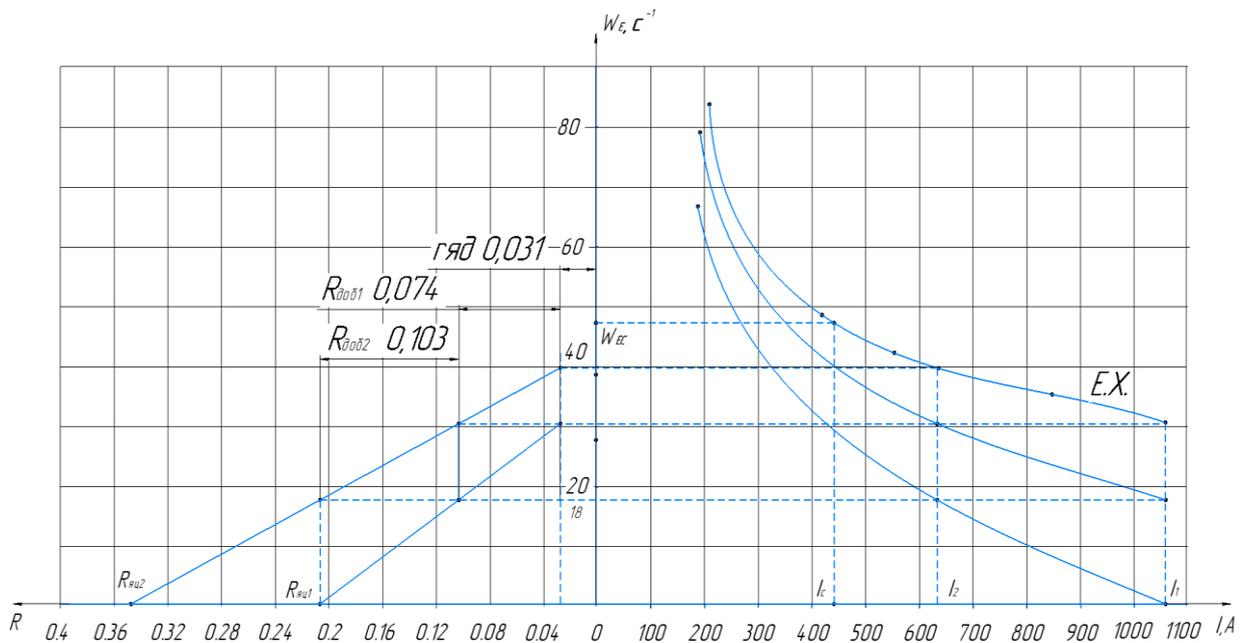


Рис. 10– Искусственные характеристики

### 3.8 Расчет переходных процессов и построение полной нагрузочной диаграммы электропривода

Переходные процессы электропривода возникают при изменении управляющих (напряжение, частота) и возмущающих (момент нагрузки) воздействий. Расчет переходных процессов заключается в определении зависимостей момента  $M(t)$ , скорости  $\omega(t)$ , угла поворота вала двигателя  $\varphi(t)$ , тока  $I(t)$  во времени и необходим для определения длительности и характера их протекания, что позволяет построить полные нагрузочные диаграммы совместно с переходными и установившимися режимами работы электропривода. Нагрузочные диаграммы позволяют проверить выбранный двигатель по условиям заданной производительности, по нагреву, кратковременной перегрузке и условиям пуска. Они также используются для

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Ине. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

проверки по нагреву пусковых и тормозных резисторов и для проверки по допустимой перегрузке силовых преобразователей.

На длительность и характер переходного процесса основное влияние оказывают звенья электропривода, которые могут аккумулировать энергию в виде механической, запасенной в движущихся элементах механизмов, и электромагнитную энергию, обусловленную индуктивностью обмоток электрических машин. Переходные процессы называют *механическими*, если при анализе динамики электропривода учитывается только механическая инерция. Переходные процессы, рассматриваемые при совместном действии механических и электромагнитных явлений, называют *электромеханическими*.

Из-за того, что расчет переходных процессов для ДПТ последовательного возбуждения сложен, (из-за нелинейной механической характеристики) поэтому упрощаем задачу, линеаризовав электромеханические характеристики. Теперь можно рассчитывать переходные процессы как ДПТ независимого (параллельного) возбуждения.

Найдем электромеханические постоянные времени при пуске:

$$T_{M1} := \frac{J_{\partial\partial} \cdot R_{яц\Sigma}}{(C_M \cdot \Phi)^2} = 0.238$$

$$T_{M2} := \frac{J_{\partial\partial} \cdot (r_{я\partial} + R_{\partial\partial\partial 1})}{(C_M \cdot \Phi)^2} = 0.12$$

$$T_{Me} := \frac{J_{\partial\partial} \cdot r_{я\partial}}{(C_M \cdot \Phi)^2} = 0.036$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

$$\text{где } R_{яц\Sigma} = \frac{U_H}{I_1} = \frac{220}{1060} = 0,208 \text{ Ом}$$

Определяем время переходного процесса при пуске, с:

$$t_1 := T_{M1} \cdot \ln \left( \frac{I_1 - I_c}{I_2 - I_c} \right) = 0.275$$

$$t_2 := T_{M2} \cdot \ln \left( \frac{I_1 - I_c}{I_2 - I_c} \right) = 0.139$$

$$t_3 := 3 \cdot T_{ME} = 0.108$$

Рассчитаем угловые скорости при пуске,  $c^{-1}$ :

$$\omega_1 := \frac{U_H - I_2 \cdot R_{яц\Sigma}}{C_M \cdot \Phi} = 18.723$$

$$\omega_2 := \frac{U_H - I_2 \cdot (r_{я\partial} + R_{\partialоб1})}{C_M \cdot \Phi} = 32.599$$

$$\omega_e := \frac{U_H - I_2 \cdot r_{я\partial}}{C_M \cdot \Phi} = 42.612$$

### 3.9 Особенности расчета переходных процессов в различных режимах работы электропривода

Определяем сопротивление при торможении противовключением, Ом:

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$R_{mn} := \frac{C_M \cdot \Phi \cdot (U_H + C_M \cdot \Phi \cdot \omega_c)}{I_1} - r_{я\partial} = 1.903$$

где  $\omega_c = 46 \text{ с}^{-1}$  - скорость при статическом токе на естественной характеристике.

Определяем электромеханическую постоянную при торможении:

$$T_{mnp} := \frac{J_{\partial\delta} \cdot R_{mn}}{(C_M \cdot \Phi)^2} = 2.06$$

Определяем просадку скорости ДПТ,  $\text{с}^{-1}$ :

$$\Delta\omega_c := \frac{I_c \cdot R_{яц\sigma}}{C_M \cdot \Phi} = 19.48$$

Найдем величину статической скорости,  $\text{с}^{-1}$ :

$$\omega_c' := -\omega_0 - \Delta\omega_c = -66.287$$

где  $\omega_0 = 46,807$  - скорость холостого хода на линейной естественной характеристике.

Найдем время переходного процесса при торможении, с:

$$\omega_{нач} = \omega_c'$$

$$t_{mn} := T_{mnp} \cdot \ln\left(\frac{\omega_c - \omega_{нач}}{\omega_c}\right) = 1.945$$

Расчет переходных процессов:

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взаим. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$T_{m1} := 0.238$$

$$I_1 := 1060$$

$$I_c := 441.153$$

$$t := 0 \quad I_{0\partial} := I_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{m1}}}\right) + I_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_{m1}}} = 1.06 \cdot 10^3$$

$$t := 0.06875 \quad I_{1\partial} := I_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{m1}}}\right) + I_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_{m1}}} = 904.739$$

$$t := 0.1375 \quad I_{2\partial} := I_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{m1}}}\right) + I_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_{m1}}} = 788.431$$

$$t := 0.20625 \quad I_{3\partial} := I_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{m1}}}\right) + I_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_{m1}}} = 701.304$$

$$t := 0.275 \quad I_{4\partial} := I_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{m1}}}\right) + I_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_{m1}}} = 636.035$$

Остальные расчеты сведём в таблицу 3.

Таблица 3 – Переходные процессы

Время переходного процесса t, с	Ток I, А					Скорость $\omega$ , с <sup>-1</sup>				
	0.275	1060	904.7	788.4	701.3	636	0	8.2	12.6	15.4
0.139	1060	904.4	787.9	700.7	636	18.7	22.2	27.4	29.6	32.6
0.108	1060	733.5	579.2	506.4	441.1	32.6	36.4	39.2	41.3	42.6
47.107	441.1					42.6				
1.945	-1060	-665.2	-524.5	-470.3	-441.1	42.6	31.5	21.2	11.6	0

Ине. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Ине. № подл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР – 13.03.02.10 ПЗ

Лист

40

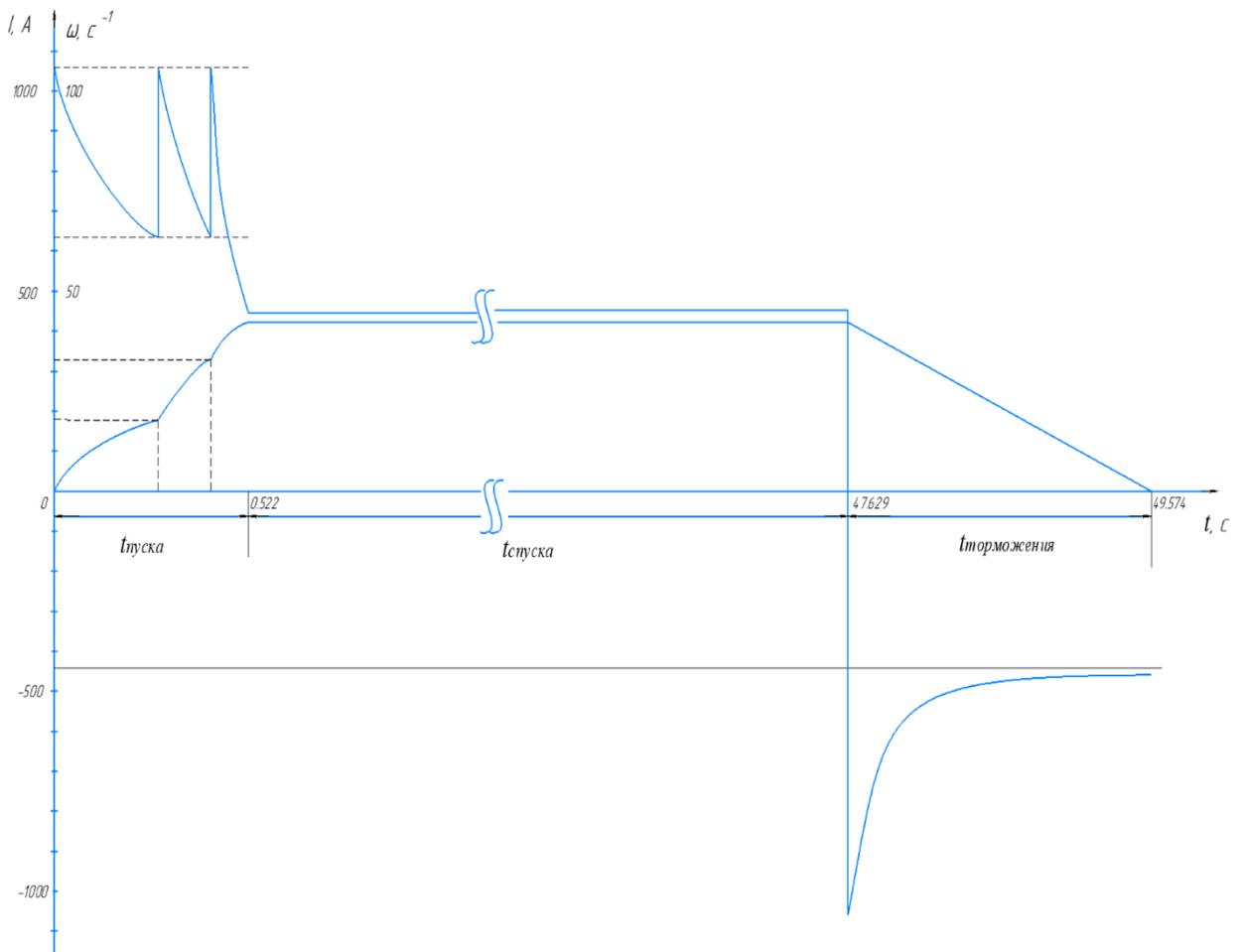


Рис. 11 – Нагрузочная диаграмма электропривода

### 3.10 Проверка двигателя по нагреву и перегрузочной способности

Условие правильного выбранного двигателя по условиям нагрева имеет вид:

$$I_{\text{экв}} \leq I_{\text{доп}}$$

Разбиваем график нагрузочной диаграммы на отдельные прямолинейные участки, для каждого из которых определяем среднеквадратичное значение тока по формуле:

$$I_{\text{ск } i} = \sqrt{\frac{I_{\text{нач } i}^2 + I_{\text{нач } i} \cdot I_{\text{кон } i} + I_{\text{кон } i}^2}{3}}$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

где  $I_{нач\ i}$  и  $I_{кон\ i}$  - значение тока в начале и в конце  $i$ -го прямолинейного участка нагрузочной диаграммы.

Определяем среднеквадратичные значения токов на  $i$ -м участке нагрузочной диаграммы, А:

$$I_{ck1} := \sqrt{\frac{1060^2 + 1060 \cdot 636 + 636^2}{3}} = 856.788$$

$$I_{ck2} := \sqrt{\frac{1060^2 + 1060 \cdot 636 + 636^2}{3}} = 856.788$$

$$I_{ck3} := \sqrt{\frac{1060^2 + 1060 \cdot 441.153 + 441.153^2}{3}} = 771.544$$

$$I_{ck4} := \sqrt{\frac{441.153^2 + 441.153 \cdot 441.153 + 441.153^2}{3}} = 441.153$$

$$I_{ck5} := \sqrt{\frac{(-1060)^2 + (-1060) \cdot (-441.153) + (-441.153)^2}{3}} = 771.544$$

Определяем значение допустимого по нагреву тока двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме, А:

$$I_{дон} := I_H \cdot \sqrt{\frac{ПФ_{ст}}{ПФ_{факт}}} = 578.277$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Определяем эквивалентный ток, А, характеризующий нагрев двигателя за весь цикл работы:

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum_i I_{\text{СК}i}^2 \Delta t_i}{\sum_i \beta_i \Delta t_i}},$$

$$I_{\text{экв}} := \sqrt{\frac{856.788^2 \cdot 0.275 + 856.788^2 \cdot 0.139 + 771.544^2 \cdot 0.108 + 441.153^2 \cdot 47.107 + 771.544^2 \cdot 1.945}{0.75 \cdot 0.275 + 0.75 \cdot 0.139 + 1 \cdot 0.108 + 1 \cdot 47.107 + 0.75 \cdot 1.945}} = 467.238$$

где  $\beta_i = \begin{cases} \beta_0, & \text{если } 0 \leq \omega_{\text{ср}} \leq \omega_n \\ 0,75, & \text{если } 0,2 \cdot \omega_n \leq \omega_{\text{ср}} \leq 0,8 \cdot \omega_n \\ 1, & \text{если } \omega_{\text{ср}} \geq 0,8 \cdot \omega_n \end{cases}$  при  $\beta_0 = 0,5$  - коэффициент

ухудшения теплоотдачи двигателя.

Двигатель проходит проверку по условиям нагрева:

$$I_{\text{экв}} \leq I_{\text{дон}}$$

$$467,238 \leq 578,277$$

Двигатель проходит проверку по условиям по перегрузке:

$$I_{\text{max}} \leq 2 \cdot I_n$$

$$1060 = 1060$$

где  $I_{\text{max}} = I_1$

### 3.11 Расчет энергетических показателей электропривода

Энергетические показатели электропривода характеризует экономичность преобразования энергии системой электропривода

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

БР – 13.03.02.10 ПЗ

Лист

43

(коэффициент полезного действия  $\eta$ ) и экономичность потребления энергии из сети (коэффициент мощности  $\cos \varphi$ ). Мгновенное значение  $\eta$  и  $\cos \varphi$  могут характеризовать экономичность работы электропривода только в установившихся режимах работы. Средневзвешенное значение КПД двигателя за время «однотипного» цикла работы механизма является универсальной оценкой энергетических показателей ЭП.

Механическая энергия за время переходного процесса:

$$A_{\text{мех}} = \sum_{i=1}^n (M_{\text{ср}i} - M_{\text{xx}}) \cdot \omega_{\text{ср}i} \cdot \Delta t_i$$

где  $M_{\text{ср}i}$  и  $\omega_{\text{ср}i}$  - средние значения момента и скорости на  $i$ -м участке работы длительностью  $\Delta t_i$ .

Задаемся токами на каждом участке нагрузочной диаграммы и подставляя их в естественные универсальные характеристики ДПТ и находим средние значения моментов,  $H \cdot M$ :

$$M_{\text{ср}1} := \frac{4982 + 4252 + 3706 + 3296 + 3000}{5} = 3.847 \cdot 10^3$$

$$M_{\text{ср}2} := \frac{4982 + 4252 + 3706 + 3296 + 3000}{5} = 3.847 \cdot 10^3$$

$$M_{\text{ср}3} := \frac{4982 + 3447 + 2723 + 2380 + 2218}{5} = 3.15 \cdot 10^3$$

$$M_{\text{ср}4} := 2074$$

$$M_{\text{ср}5} := \frac{4982 + 3447 + 2723 + 2380 + 2218}{5} = 3.15 \cdot 10^3$$

Ине. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Определяем средние значения скорости на каждом участке нагрузочной диаграммы,  $c^{-1}$  :

$$\omega_{cp1} := \frac{6 + 12 + 18.723}{3} = 12.241$$

$$\omega_{cp2} := \frac{18.723 + 25 + 32.599}{3} = 25.441$$

$$\omega_{cp3} := \frac{32.599 + 38 + 42.612}{3} = 37.737$$

$$\omega_{cp4} := 42.612$$

$$\omega_{cp5} := \frac{42.612 + 28 + 14}{3} = 28.204$$

Находим механическую энергию на каждом участке, Дж:

$$A_{мех1} := (M_{cp1} - M_{xx}) \cdot \omega_{cp1} \cdot t_1 = 1.268 \cdot 10^4$$

$$A_{мех2} := (M_{cp2} - M_{xx}) \cdot \omega_{cp2} \cdot t_2 = 1.332 \cdot 10^4$$

$$A_{мех3} := (M_{cp3} - M_{xx}) \cdot \omega_{cp3} \cdot t_3 = 1.251 \cdot 10^4$$

$$A_{мех4} := (M_{cp4} - M_{xx}) \cdot \omega_{cp4} \cdot t_{уст} = 4.001 \cdot 10^6$$

$$A_{мех5} := (M_{cp5} - M_{xx}) \cdot \omega_{cp5} \cdot t_{mn} = 1.684 \cdot 10^5$$

Определяем суммарная механическая энергия, Дж:

$$A_{мех} := A_{мех1} + A_{мех2} + A_{мех3} + A_{мех4} + A_{мех5} = 4.207 \cdot 10^6$$

Определяем полные потери двигателя, Вт:

$$\Delta p := P_{дв.ном} \cdot \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) = 1.178 \cdot 10^4$$

Определяем переменные потери в двигателе, Вт:

Име. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	
Име. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$\Delta p_{пер} := \frac{\Delta p}{a_n + 1} = 7.852 \cdot 10^3$$

где  $a_n = 0,5$  - коэффициент переменных потерь.

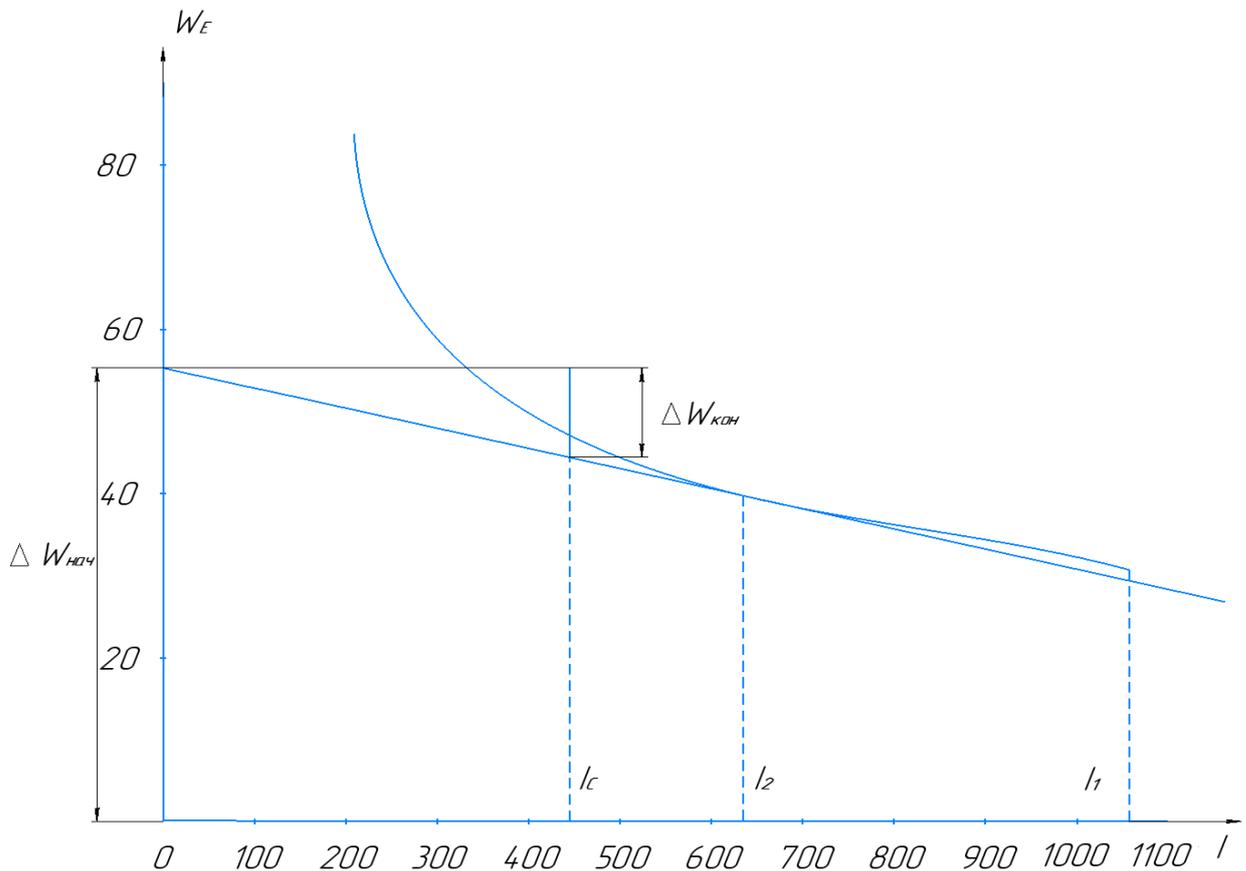


Рис. 12 – Линеаризованный график естественной характеристики

Линеаризуя график естественной характеристики до пересечения с осью ординат получим:

$$\Delta \omega_{нач} := 56$$

$$\Delta \omega_{кон} := 12$$

Теперь найдем потери энергии в двигателе, работающем вхолостую,  
Вт:

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата
Ине. № подл.	Ине. № дубл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$\Delta A_{пер.хх} := \frac{J_{np1}}{2} \cdot (\Delta\omega_{нач}^2 - \Delta\omega_{кон}^2) = 4.378 \cdot 10^4$$

Определяем средний ток при пуске, А:

$$I_{дв.срп} := \frac{1060 + 636}{2} = 848$$

Определяем средний ток при торможении, А:

$$I_{дв.срм} := \frac{1060 + 441.153}{2} = 750.577$$

Определяем потери энергии в переходных режимах работы двигателя под нагрузкой, Вт:

При пуске:

$$\Delta A_{пер.п} := \Delta A_{пер.хх} \cdot \frac{I_{дв.срп}}{I_{дв.срп} - I_c} = 9.125 \cdot 10^4$$

При торможении:

$$\Delta A_{пер.т} := \Delta A_{пер.хх} \cdot \frac{I_{дв.срм}}{I_{дв.срм} - I_c} = 1.062 \cdot 10^5$$

Определяем сумму потерь энергии двигателя, работающего под нагрузкой, Вт:

$$\Delta A_{пер} := \Delta A_{пер.п} + \Delta A_{пер.т} = 1.974 \cdot 10^5$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Определяем постоянные потери в двигателе, Вт:

$$\Delta p_{пост} := \Delta p - \Delta p_{пер} = 3.926 \cdot 10^3$$

Определяем потребление активной энергии двигателем, Вт:

$$W_{потр} := A_{мех} + \Delta p_{пер} \cdot t_{уст} + \Delta A_{пер} + \Delta p_{пост} \cdot t = 7.018 \cdot 10^6$$

где

$$t := \frac{t_{\Sigma}}{ПФ_{факт}} = 571.429$$

Определяем среднецикловой КПД двигателя:

$$\eta_{дв.срц} := \frac{A_{мех}}{W_{потр}} = 0.6$$

Определяем среднецикловой КПД электропривода:

$$\eta_{эл.срц} := \eta_{дв.срц} \cdot \eta = 0.54$$

## 4 Модернизация системы автоматизации мостового крана

### 4.1 Обоснование принципа модернизации

Ине. № дубл.	Ине. № дубл.	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

На мостовых кранах в настоящее время используют в большинстве случаев электродвигатели постоянного тока. Электродвигателями постоянного тока комплектуются крановые установки, которым производят частые выключения в течении часа или всей рабочей смены. Кроме того, они позволяют регулировать частотный диапазон в достаточно широком диапазоне. Конструктивно в целом выпускаются на мощность от 2 до 190 кВт, в зависимости от величины питающего напряжения группы обмоток возбуждения могут иметь последовательное или параллельное соединение.

Как и сами краны, так и электродвигатели постоянного тока имеют недостатки. К основным недостаткам базового электрооборудования относится:

- дорогое по стоимости изготовление оборудование
- необходимое профилактическое обслуживания коллекторно-щёточных узлов
- ограниченный срок службы из-за износа коллектора
- замедление скорости движения крана
- большой износ ряда элементов устройства
- частая замена элементов грузоподъемных кранов, с целью сократить затраты на них и др.

Для того, чтобы уменьшить количество недостатков или же снизить их влияние на работу необходимо проводить модернизацию электрооборудования мостового крана.

Модернизация мостовых кранов – это один из важных процессов, которые рано или поздно нужно проводить с любым мостовым краном, исходя из конкретной степени физического и морального износа.

Модернизация мостового крана подразумевает выполнение работ, направленных на улучшение и восстановление характеристик оборудования, процессом модификации основных и вспомогательных узлов. В результате повышается функциональность, производительность и удается адаптировать технику к новым условиям эксплуатации, продлить срок службы.

Ине. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Ине. № дубл.	
Подп. и дата	

Своевременно проведенная модернизация электрооборудования мостового крана предотвращает незапланированные простои и аварийные остановки, а также снижает затраты на техническое обслуживание. Все эти факторы обуславливают актуальность выбранной темы.

Цель модернизации заключается в том, чтобы устранить недостатки грузоподъемной машины, которые появились в результате морального износа элементов устройства, замене элементов мостовых грузоподъемных кранов в целях уменьшения затрат на техническое обслуживание оборудования, переводе оборудования на иной тип привода в целях экономии энергозатрат, модернизации в целях соблюдения норм техники безопасности на предприятии.

Задачи модернизации:

- выбрать современное электрооборудование, помогающее решить проблему повышения надёжности работы крана;
- определить на сколько возможно правильно установить современное оборудование на кране.

Поэтому принимаем решение – заменить базовую систему на систему тиристорный преобразователь – двигатель (система ТП-Д)

Система ТП-Д – электропривод, где двигатель постоянного тока получает питание от тиристорного преобразователя переменного тока в постоянный. Также позволяет регулировать угловую скорость двигателя, вращающий момент и др. параметры.

Система имеет следующие достоинства:

- большая надежность
- достаточно высокое быстродействие
- широкое и точное регулирование частоты вращения двигателя
- обеспечивает производительность эффективнее, чем другие системы
- безотказна в работе и проста в эксплуатации
- КПД у преобразователя не ниже 95%

Ине. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Ине. № подл.	Подп. и дата
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	БР – 13.03.02.10 ПЗ

– Габаритные размеры и малая масса, позволяющие уменьшить площадь, необходимую для расположения устройства

– Также, как правило имеет блочную компоновку тиристоров, которая позволяет при выходе какого – то тиристора из строя быстро его заменить.

Далее смоделируем базовую систему электродвигателя и модернизированную систему ТП-Д в среде Matlab Simulink

#### 4.2 Моделирование базовой системы в среде Matlab Simulink

На рисунке 13 представлена модель двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

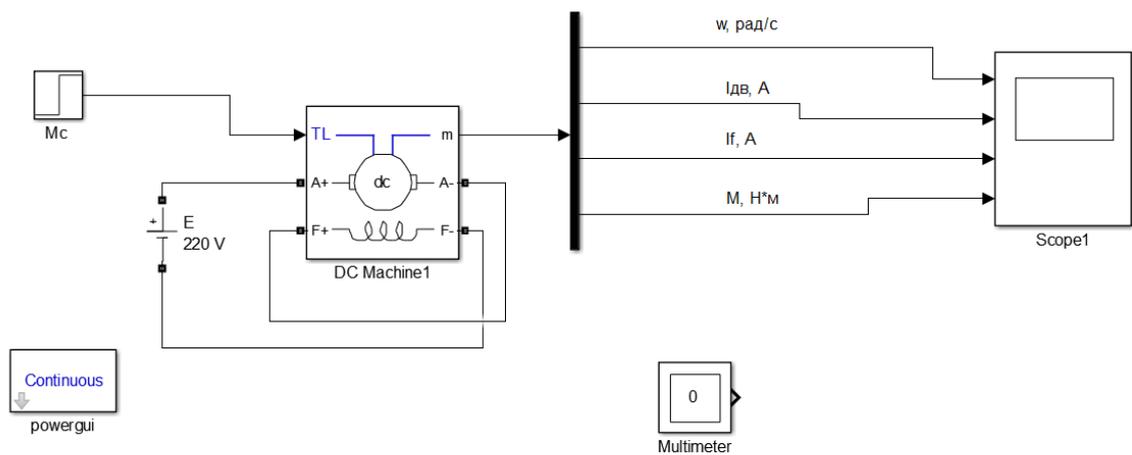


Рис. 13 – Модель двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Осуществляем моделирование и получаем графики переходных процессов, представленных на рисунке 14.

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	
Ине. № инв.	

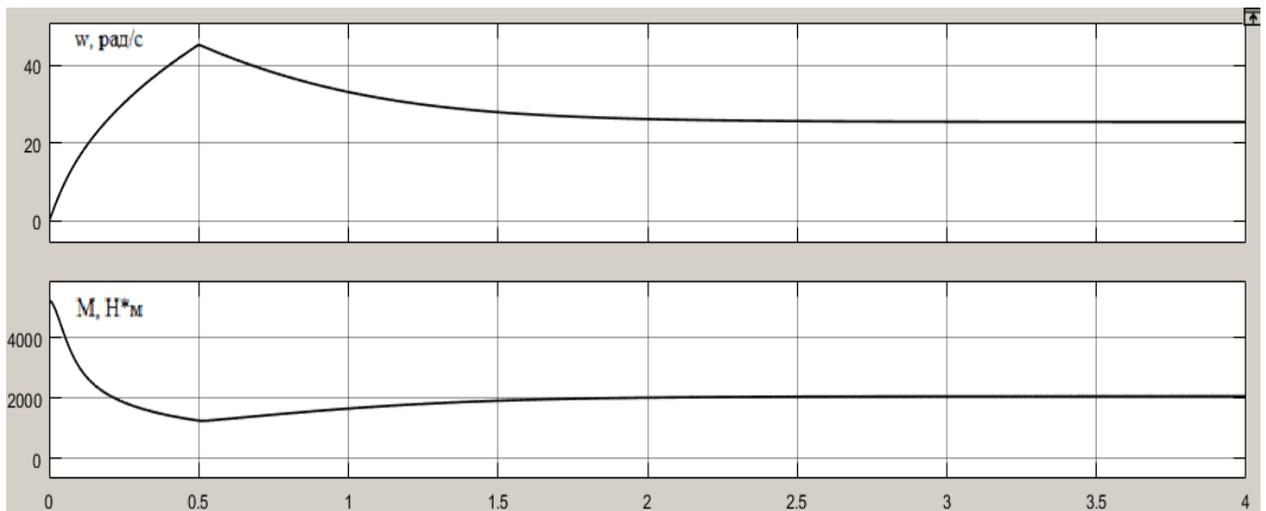


Рис. 14 – Переходные процессы скорости и момента для ДПТ ПВ

### 4.3 Оценка показателей качества базовой системы

Проанализируем переходной процесс угловой скорости вращения (рис. 14).

- максимальное значение угловой скорости  $44,5 \text{ с}^{-1}$ ;
- установившееся значение угловой скорости  $27,42 \text{ с}^{-1}$ ;
- статическая ошибка угловой скорости

$$\Delta\omega_{\text{ст}} = \frac{\omega_{\text{зад}} - \omega_{\text{уст}}}{\omega_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{43,9 - 27,42}{27,42} \cdot 100\% = 60,1 \%;$$

- перерегулирование скорости

$$\sigma = \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{уст}}}{\omega_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{44,5 - 27,42}{27,42} \cdot 100\% = 62,3 \%;$$

- время регулирования скорости  $t_p = 2 \text{ с}$ ;
- колебательность скорости

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	
Ине. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$\mu = \frac{\omega_{max}}{\omega_{уст}} = \frac{44,5}{27,42} = 1,62.$$

Проанализируем переходной процесс момента на валу двигателя (рис. 14).

- максимальное значение момента на валу двигателя 5326 с<sup>-1</sup>;
- установившееся значение момента на валу двигателя 2069 с<sup>-1</sup>;
- статическая ошибка момента на валу двигателя

$$\Delta\omega_{ст} = \frac{M_{зад} - M_{уст}}{M_{уст}} \cdot 100\% = \frac{2074 - 2069}{2069} \cdot 100\% = 0,24\%;$$

- перерегулирование

$$\Delta\omega_{ст} = \frac{M_{max} - M_{уст}}{M_{уст}} \cdot 100\% = \frac{5326 - 2069}{2069} \cdot 100\% = 157,4\%;$$

- время регулирования момента  $t_p = 2$  с;
- колебательность момента на валу двигателя

$$\mu = \frac{M_{max}}{M_{уст}} = \frac{5326}{2069} = 2,57.$$

Чтобы качественно выполнять рабочий процесс, электропривод крана должен соответствовать следующим требованиям:

- кратность перегрузки до  $\lambda = 3$ ;
- перерегулирования в  $\sigma = 3\%$ ;
- время регулирования в  $t_p = 1$  с;
- статическая просадка по скорости  $\Delta\omega_{ст} = 3\%$ ;

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	
Ине. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Рассчитанные показатели качества указывают нам на то, что система не удовлетворяет требованиям. Следовательно, системе нужна модернизация.

#### 4.4 Моделирование системы ТП-Д в среде Matlab Simulink

На рисунке 15 представлена модель системы ТП – Д.

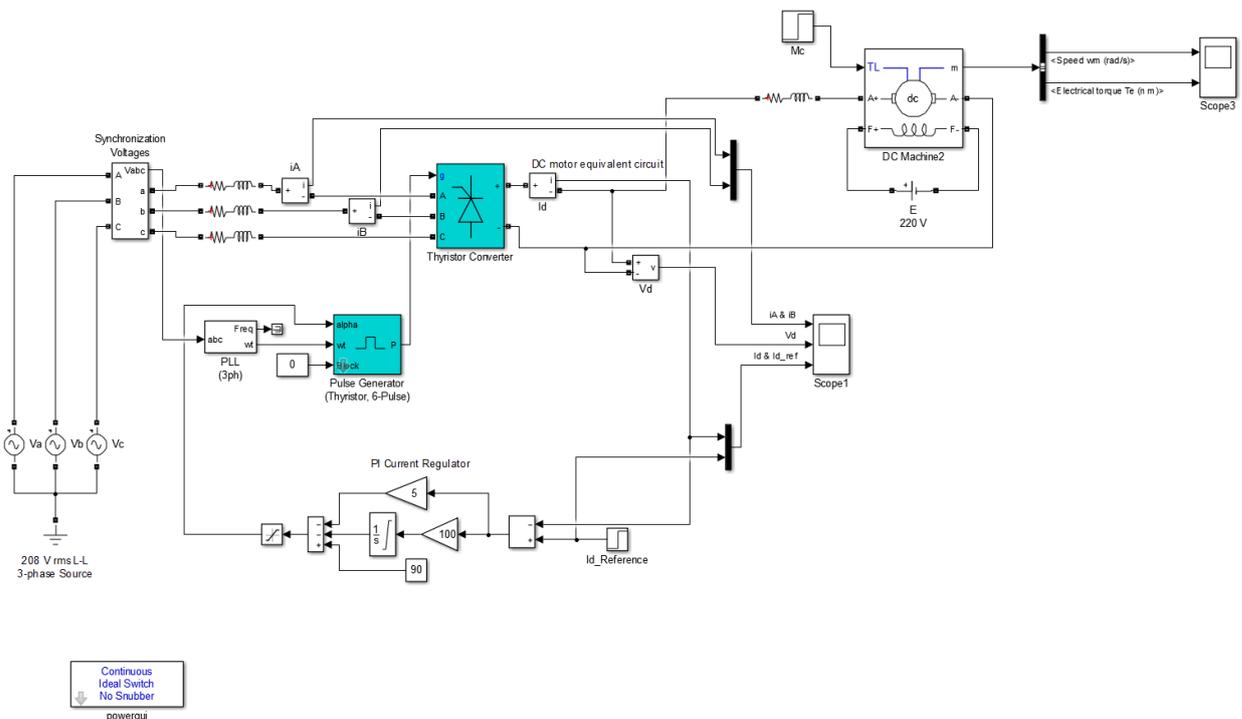


Рис. 15 – Модель системы ТП – Д

Данная модель содержит следующие основные блоки:

- 1) ПИ-регулятор тока (PI Current Regulator);
- 2) Блок синхронизации напряжений (Synchronization Voltages);
- 3) система генерации импульсов (Pulse Generator);
- 4) ДПТ ПВ (DC Machine);
- 5) Нагрузка ДПТ ПВ,  $M_c$  (блок Step);
- 6) измерительные приборы для измерения угловой скорости, момента, напряжения на статоре ДПТ (блоки Scope);
- 7) Тиристорный преобразователь (Thyristor Converter)

Результаты моделирования переходных процессов скорости и момента представлены на рисунке 16.

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

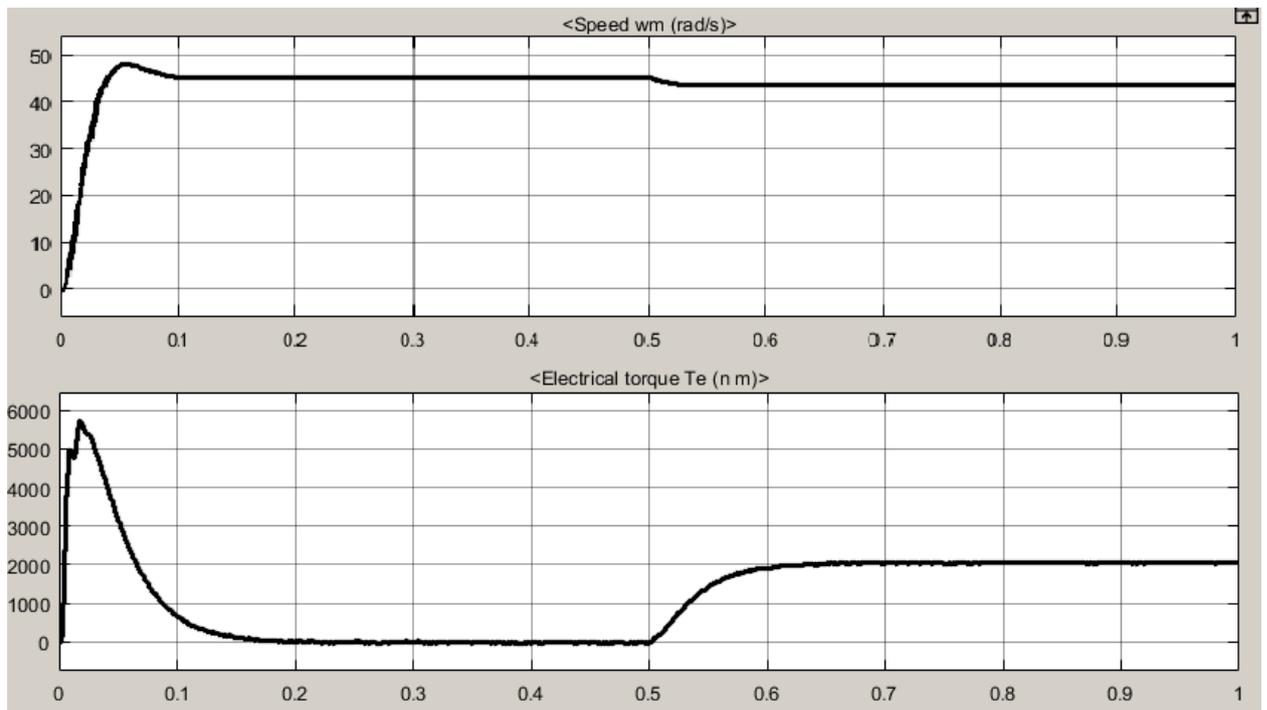


Рис. 16 – Переходные процессы скорости и момента при системе ТП-Д

#### 4.5 Оценка показателей качества системы ТП-Д

Проанализируем переходной процесс угловой скорости вращения системы ТП-Д (рис. 16).

- максимальное значение угловой скорости  $47,2 \text{ с}^{-1}$ ;
- установившееся значение угловой скорости  $44,89 \text{ с}^{-1}$ ;
- статическая ошибка угловой скорости

$$\Delta\omega_{\text{ст}} = \frac{\omega_{\text{зад}} - \omega_{\text{уст}}}{\omega_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{45,8 - 44,89}{44,89} \cdot 100\% = 2,02 \%;$$

- перерегулирование скорости

$$\sigma = \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{уст}}}{\omega_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{47,2 - 44,89}{44,89} \cdot 100\% = 4,2 \%;$$

- время регулирования скорости  $t_p = 0,7 \text{ с}$ ;

Ине. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Ине. № подл.	Изм. Лист

Таким образом, из рисунков 14 и 16 мы видим, что время переходного процесса и перерегулирование значительно больше для базовой системы, чем для системы ТП-Д. При системе ТП-Д все показатели максимально приближены к показателям качественного выполнения рабочего процесса.

Переходный процесс при системе ТП-Д заканчивается раньше, чем при базовой системе.

При достижении момента максимального значения в базовой системе скорость моментально снижается, при системе ТП-Д некоторое время остается постоянной, затем незначительно снижается, переходя к установившемуся значению.

Рассчитанные показатели качества также указывают на то, что система удовлетворяет необходимым требованиям. Следовательно, модернизация была проведена успешно.

Ине. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

## Заключение

В данной выпускной квалификационной работе произведено исследование между базовой системой и системой тиристорный преобразователь – двигатель (ТП-Д) и сравнение их эффективности и характеристик, вследствие этого можно сказать, что при базовой системе показатели выполнения рабочего процесса электропривода сильно отличаются от качественного выполнения рабочего процесса в электроприводе.

Поэтому для данной работы базовая система не удовлетворяет нашим условиям. Система ТП-Д по отношению к базовой системе в данном случае имеет значительные преимущества, что доказали исследования.

Преимущества векторного метода управления асинхронным двигателем:

- большая надежность
- достаточно высокое быстродействие
- широкое и точное регулирование частоты вращения ДПТ
- обеспечивают производительность выше чем другие системы
- довольно безотказна в работе и проста в эксплуатации
- КПД преобразователя не ниже 95%
- Малая масса и габаритные размеры, что позволяет уменьшить площадь, необходимую для расположения устройства
- Как правило имеет блочную компоновку тиристоров, что позволяет при выходе какого – то тиристора из строя быстро его заменить.

Вследствие всего был разработан электропривод двух-балочного мостового крана общего назначения, грузоподъемностью 10 т, режима А3, на радиоуправлении с системой ТП-Д в соответствии с требованиями технического задания.

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

					БР – 13.03.02.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		57

### Список использованных источников

1. Справочник по электрическим машинам. Под общ. ред. И. П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
2. Ключев В.И. Теория Электропривода – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с
3. Справочник по кранам: в 2-х т. Под общ. ред. проф. Гохберга М.М.: Машиностроение, 1988
4. Джендубаев А.-З.Р., Алиев И. И. MATLAB, Simulink и SimPowerSystems в электроэнергетике. – Черкесск: Электроснабжение, 2014. – 22 с.
5. Теория электропривода: учеб. пособие по курсовому проектированию / А.Н. Пахомов, М.В. Кривенков. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 148 с.
6. Пахомов, А. Н. Теория электропривода. Переходные процессы: метод. указания к практическим занятиям / А. Н. Пахомов. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2007. – 55 с.
7. Ключев, В. И. Теория электропривода: учебник для вузов / В. И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.: ил.
8. Александров, М. П., Гохберг, М. М., Ковин, А. А. и др. Справочник по кранам: в 2 т. Т. 2. Крановые механизмы и узлы. Техническая эксплуатация кранов / Под общ. ред. проф. Гохберга М. – М.: Машиностроение, 1988. – 559 с.: ил.
9. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. / С. Г. Герман-Галкин – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
10. Герман-Галкин, С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink.: Учебник. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 448 с.: ил.
11. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами.: Энергоатомиздат, 1982. – 392 с., ил.
12. Терехин, В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В. Б. Терехин; Национальный исследовательский

Ине. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Ине. № дубл.	
Подп. и дата	

Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.

13. Онищенко Г.Б., Ред. Автоматизированный электропривод промышленных установок: Уч. пособие для ВУЗов, М.: Энергоатомиздат, 2001 – 520 с.: ил.

14. Брауде, В. И., Гохберг, М. М., Звягин, И. Е. и др. Справочник по кранам: в 2 т. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кра-нов, их приводов и металлических конструкций / Под общ. ред. проф. Гохберга М. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.: ил.

15. Ильинский, Н.Ф. Основы электропривода: учеб. пособие для вузов / Н.Ф. Ильинский. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 224 с.

Ине. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата	БР – 13.03.02.10 ПЗ					Лист
										59
										Изм.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический институт  
институт  
Электротехника  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В. Н. Тимофеев  
подпись      инициалы, фамилия

« 17 » 06 2021 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника

«Электропривод и автоматика мостового крана»

Пояснительная записка

Руководитель

С. Ю. Федосеев 17.06.21  
подпись, дата

К.Т.Н. Доцент  
должность, учетная степень

Федий К.С.  
инициалы, фамилия

Выпускник

В.И.У. 17.06.21  
подпись, дата

Мироненко В.А.  
инициалы, фамилия

Красноярск 2021