

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования

«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»
институт
Электроэнергетика
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
Г. Н. Чистяков
подпись инициалы, фамилия

« » _____ 2018 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код – наименование направления

Двухдвигательный электропривод механизма поворота экскаватора

ЭКГ–8и
тема

Руководитель _____
подпись, дата

профессор д.т.н
должность, ученая степень

В. П. Кочетков
инициалы, фамилия

Выпускник _____
подпись, дата

В. А. Туртугешев
инициалы, фамилия

Нормоконтролер _____
подпись, дата

И. А. Кычакова
инициалы, фамилия

Абакан 2018

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Двухдвигательный электропривод механизма поворота экскаватора ЭКГ–8и» содержит 57 страниц текстового документа, 25 рисунков, 7 таблиц, 26 использованных источников, 3 листа графического материала.

ЭЛЕКТРОПРИВОД, КАРЬЕРНЫЙ ЭКСКАВАТОР, ДВИГАТЕЛЬ, ГЕНЕРАТОР, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ОГРАНИЧЕНИЕ КООРДИНАТ.

Объект исследований – поворотные механизмы карьерных экскаваторов.

Предмет исследований – силовая часть экскаваторного электропривода.

Цель работы заключается в выборе силовой части электропривода механизма поворота карьерного экскаватора с разомкнутой системой управления.

Значимость работы обусловлена тем, что парк экскаваторов насчитывает десятки тысяч машин. Переходные процессы, возникающие при работе экскаваторного электропривода с рекомендуемым быстродействием, оказывают существенное влияние как на нагрев, так и на перегрузку и надежность механической части машины.

Область применения – работа может быть полезна горнодобывающим предприятиям, как возможность снижения упругих моментов, ломающих механизмы экскаватора, без уменьшения быстродействия, что в свою очередь приведет к уменьшению межремонтных сроков.

Задачи выпускной квалификационной работы:

Выполнить предварительный выбор мощности двигателя и преобразователя для электропривода поворотного механизма. Рекомендовать классические и нетрадиционные системы автоматического управления электроприводом, обеспечивающие ограничение динамических нагрузок в механической части экскаватора.

ABSTRACT

Final qualifying work on "Twin-engine electric drive of the turning mechanism of the excavator ECG – 8I" contains 57 pages of a text document, drawings 25, 7 tables, 26 used sources, 3 sheets of graphic material.

ELECTRIC DRIVE, CAREER EXCAVATOR, ENGINE, GENERATOR, TRANSITION PROCESSES, COORDINATE LIMITATION.

The object of research is the rotary gearmechanisms of quarry excavators.

The subject of research is the power part of the excavator electric drive.

The purpose of the work is to select the power part of the electric drive mechanism for rotary gear a quarry excavator with an open control system.

The significance of the work consists is the Park of excavators has tens of thousands of machines. Transient processes arising during the operation of the excavator electric drive with the recommended speed, they have a significant impact on both heating and overload and reliability of the mechanical part of the machine.

Scope – the work can be useful to mining companies as an opportunity to reduce the moments breaking mechanisms of the excavator, without reducing the speed, which in turn will lead to a decrease in overhaul time.

The tasks of the final qualifying work:

Perform a preliminary selection of the motor power and the converter for the electric drive of the rotary gear mechanism. Recommend classical and non-traditional automatic control systems of electric drive, providing restriction of dynamic loads in the mechanical part of the excavator.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Теоретическая часть.....	6
1.1 Карьерные экскаваторы.....	6
1.2 Электропривод карьерного экскаватора	7
1.3 Выбор типа электропривода	9
1.4 Выбор двигателя и генератора.....	10
1.5 Расчет динамических характеристик электропривода.....	11
2 Аналитическая часть.....	12
2.1 Исходные данные	12
2.2 Общая характеристика.....	14
2.3 Предварительный выбор двигателя и генератора.....	14
2.4 Переходные процессы в электроприводе по системе Г–Д	18
2.4.1 Электромагнитные переходные процессы	19
2.4.2 Электромеханические переходные процессы	24
3 Практическая часть	35
3.1 Технические условия	35
3.2 Предварительный выбор мощности	35
3.3 Расчет параметров, определяющих динамику электропривода.....	39
3.5.1 Расчет электромеханической постоянной привода	39
3.4.2 Определение электромагнитной постоянной.....	42
3.4 Расчет переходных процессов	42
3.4.1 Переходные процессы при пуске	43
3.4.2 Переходные процессы при торможении.....	45
3.5 Ограничения координат.....	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	55

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы – карьерные гусеничные экскаваторы (ЭКГ) занимают центральное место в технологической цепи добычи полезных ископаемых открытым способом. Очевидно, что их высокопроизводительная работа напрямую влияет на эффективность ведения горных работ. Учитывая, что парк экскаваторов насчитывает десятки тысяч машин, то даже незначительное повышение динамических показателей машины позволит в целом получить существенный экономический эффект.

Цель работы – выбор силовой части электропривода поворота с разомкнутой системой управления и возможность использования систем управления, улучшающих работу механической части экскаватора.

Задачи:

1. Предварительный выбор мощности двигателя и преобразователя для электропривода поворотного механизма.
2. Расчет переходных процессов, возникающих при работе механизмов, построение уточненной нагрузочной диаграммы.
3. Применение классических и нетрадиционных систем автоматического управления электроприводом, уменьшающих нагрузки в механике.

Объект исследования – поворотные механизмы карьерных экскаваторов.

Предмет исследования – силовая часть экскаваторного электропривода.

Практическая значимость – в настоящее время большинство экскаваторов оснащены электроприводом постоянного тока, поэтому мы рассматриваем именно этот тип привода. Несколько экскаваторов оснащены электроприводами переменного тока с импортным электрооборудованием. Серийно начала выпускать отечественные экскаваторные электропривода переменного тока на базе векторно–индукторных двигателей с простейшей системой управления фирма ООО «ВИЭМ», которая связана с СУЭК.

1 Теоретическая часть

1.1 Карьерные экскаваторы

Карьерный экскаватор – это крупногабаритная техника, которая способна на длительную работу и выполнение нескольких задач. Поэтому для проведения землеройных работ в карьерах применяют данную машину.

Карьерные экскаваторы используются, добывая полезные ископаемые при открытых разработках, выполняя вскрышные работы. Эти машины спроектированы с учетом эксплуатации в самых разнообразных, в том числе жестких, климатических условиях, с разными типами грунтов и предназначены для интенсивного использования. Без таких экскаваторов не обойтись на горных разработках в угольной промышленности, на добыче строительных пород, в цветной и черной металлургии.

Современный карьерный экскаватор состоит из ряда функционально законченных конструктивных узлов, позволяющих эффективно обслуживать и ремонтировать их. Можно привести следующие функциональные части: рама с гусеницами, двуногая стойка, нижняя рама, поворотная платформа, кузов, стрела с рукоятью, ковш.

Карьерные экскаваторы можно классифицировать по типу ходовой части: гусеничные, шагающие; по принципу работы: циклического действия (одноковшовые) и непрерывного действия (роторные). Тип используемого двигателя: дизельные, электрические, одноmotorные или многоmotorные. Тип привода: гидравлический, гидромеханический, механический, электрический и т.д.

Гусеничные – этот вид экскаваторов разделяют на несколько типов по количеству гусениц, установленных на платформе: двух-, четырех- и восьмигусеничные. В качестве рабочих приспособлений применяются обратные или прямые ковши емкостью до 50 м³ и более.

Роторные – эти экскаваторы могут быть гусеничными или шагающими. На конце стрелы находится вращающееся роторное колесо, на котором закреплены ковши. Объем каждого из них может достигать 6 м³. Сама стрела может быть как выдвижной, так и не выдвижной. Роторная и отвальная стрелы могут подниматься и опускаться. Диапазон действия при разработках пород – вверх до 50 м и до 25 м в глубину.

Гидравлические – это один из наиболее распространенных видов землеройной техники, используемых при добыче руд, минералов в карьерах. Эти машины применяют для погрузки пород в транспорт. Экскаваторы такого вида оборудуются ковшами прямого и обратного типов. Устанавливаются дизельные двигатели или электрические моторы.

Шагающие – этот тип экскаваторов часто можно встретить на вскрышных работах, в большинстве случаев они оборудованы драглайном. Своё название – шагающие – получили от способа передвижения. В рабочем положении экскаватор соприкасается с грунтом при помощи опорной рамы. Когда появляется необходимость в смене местоположения, выдвигаются опорные «лыжи», экскаватор приподнимается на гидроопорах, перемещается на некоторое расстояние (делает «шаг») и вновь ложится на раму. Учитывая большой вес таких механизмов, до сотен и тысяч тонн, такая конструкция позволяет добиться низкого значения давления на грунт, что было бы невыполнимо при использовании гусеничного движителя. Длина стрелы может достигать 100 м, а объём ковша – превышать 100 м³. [11]

1.2 Электропривод карьерного экскаватора

В карьерных экскаваторах типа ЭКГ или ЭШ используется большое количество систем, разнообразных по назначению и принципу работы. Практически все известные на сегодня схемы преобразования энергии, такие как гидравлика, пневматика, электропривод, электроника, нашли применение на этих ма-

шинах. Первичной и главной ступенью преобразования энергии – а в современных тяжелых экскаваторах это электрическая энергия, поступающая в экскаватор через высоковольтную питающую цепь, – является электропривод.

Эволюция электропривода карьерных экскаваторов за последние тридцать лет привнесла некоторые изменения в конструкцию, но по-настоящему новых принципиальных решений, уже внедренных на «живых» машинах, мало.

Классически для привода главных механизмов применяются двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, питаемые от регулируемых генераторов (система Г–Д) или регулируемых статических тиристорных преобразователей (система ТП–Д). [8, 10]

Экскаваторные электропривода постоянного тока в основном оснащены системой ТВ–Г–Д (тиристорный возбудитель – генератор – двигатель). В нашей стране была попытка заменить систему Г–Д на современную систему ТП–Д. С 1970 года «НПО Уралэнергоцветмет», г. Свердловск (Екатеринбург) произвели замену пятимашинных преобразовательных агрегатов системы Г–Д экскаваторов ЭКГ–4.6 – ЭКГ–5 на систему ТП–Д на всех разрезах Минцветмета. Замену преобразователей осуществляли без замены существующих двигателей, которые имели низкий темп нарастания тока, что могло привести к коллекторному огню. В результате на всех экскаваторах установили старую систему Г–Д. С 1982 года «ВНИИЭлектропривод», г. Москва» в Якутии на угольном разрезе "Нерюнгринский" на экскаваторы ЭКГ–20 установили электропривод по системе ТП–Д. Для уменьшения негативного влияния ТП на сеть, в этих экскаваторах используются фильтрокомпенсирующие устройства, расположенные на крыше экскаватора.

До настоящего времени серийно существовали в основном два вида экскаваторного электропривода постоянного тока, работающая в системе Г–Д либо по системе ТП–Д. Электропривод переменного тока по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ПЧ–АД) начинает конкурировать с другими системами электроприводов, но для элек-

троприводов экскаваторов находится на стадии разработок и внедрение в производство. В данной работе рассматриваем электропривод постоянного тока по системе ТВ–ГД. [12]

Первый экскаваторный электропривод на основе НПЧ был разработан на кафедре АЭП МЭИ под руководством профессора Ключева В.И. и успешно работает на нескольких шагающих экскаваторах.

Несколько экскаваторов оснащены электроприводами переменного тока по системе ПЧ–АД со звеном постоянного тока с импортным электрооборудованием. Серийно начала выпускать отечественные экскаваторные электропривода переменного тока на базе векторно–индукторных двигателей с простейшей системой управления фирма ООО «ВИЭМ», которая связана с СУЭК.

1.3 Выбор типа электропривода

Современный карьерный экскаватор является сложной высокопроизводительной машиной, которая по насыщенности электрооборудованием, по установленной мощности электрических машин сравнима со средним промышленным предприятием. Совершенство технологического процесса экскавации зависит от совершенства применяемого экскаваторного электропривода.

На основании данных технического задания, руководствуясь известными регулировочными свойствами электроприводов и их технико–экономическими показателями, выбирается тип электропривода, так как заданные техническими условиями показатели могут удовлетворяться несколькими разновидностями электроприводов [1, 2].

Перспективным является электропривод переменного тока системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ–АД), в котором электродвигатель переменного трехфазного тока получает питание от сети переменного тока неизменной частоты и напряжения, которое преобразуется в преобразователе частоты в переменный ток, регулируемый по частоте и напряжению.

Если заданные техническими условиями показатели удовлетворяются несколькими типами электроприводов, то наиболее перспективные из них подвергаются более детальному анализу и сравнению. С этой целью для каждого сравниваемого варианта электропривода определяется система управления, производится расчет и выбор элементов силовой части двигателя, преобразовательных устройств и аппаратуры управления. Затем определяют полные затраты труда и время безотказной работы. По результатам сравнения этих показателей принимается окончательное решение по выбору типа электропривода. [5, 9, 18, 19].

1.4 Выбор двигателя и генератора

Надежная работа электропривода возможна лишь при правильном выборе мощности электродвигателя. Установка двигателей излишней мощности не целесообразна, так как неоправданно возрастают габариты машины, её вес и первоначальная стоимость, ухудшаются энергетические показатели – машина работает с пониженным значением КПД, а в случае асинхронных двигателей – с низким коэффициентом мощности. Снижение установленной мощности по сравнению с требуемой влечет за собой неизбежное повышение температуры отдельных частей машины и ее обмоток сверх допустимой нормы, а, следовательно, возможность быстрого вывода машины из строя и большую вероятность аварий.

Выбор мощности двигателя идет по двум этапам:

- 1) предварительный выбор мощности;
- 2) расчет динамических характеристик и окончательный выбор электродвигателя и других элементов электропривода по условиям нагрева и перегрузки и по пусковым условиям.

Предварительный выбор мощности обычно производится на основании:

- 1) эмпирических формул;

- 2) данных о статических нагрузках двигателя;
- 3) данных о мощности двигателя аналогичных установок.

Наиболее просто мощность двигателя находится в электроприводах, где нагрузка в основном определяется статическими силами сопротивления, а динамические усилия относительно малы. В этом случае предварительный выбор мощности двигателя может быть сделан на основании определения статической мощности механизма или среднеквадратического момента за время цикла.

Предварительный выбор мощности встречает серьезные трудности в приводах, работающих в интенсивном повторно–кратковременном режиме. В этом случае задача усугубляется тем, что одновременно с выбором мощности двигателя необходимо решать вопрос о рациональном графике движения механизма и оптимальном передаточном числе редуктора, так как последние значительно влияют на величину потребной мощности двигателя. [9,10]

1.5 Расчет динамических характеристик электропривода

Содержание этого раздела проекта представляет собой комплекс расчетов, по результатам которых строятся кривые изменения во времени тока электродвигателя, его момента, скорости, ускорения и других величин за цикл работы механизма (установки). Эти кривые являются динамическими характеристиками привода. Расчет динамических характеристик может производиться аналитическими, графоаналитическими или графическими методами.

Характер и продолжительность протекания переходных процессов в электроприводе определяются как механическими характеристиками его элементов, так и количеством содержащихся в системе инерционностей. Последние характеризуются постоянными времени: электромеханической T_m , электромагнитной T_s .

Одновременный учет этих инерционностей в расчетах динамических характеристик необходим лишь в тех редких случаях, когда величины перечисленных постоянных времени имеют одинаковый или близкий порядок. В ряде случаев процессы изменения во времени тока двигателя, обусловленные электромагнитной инерцией, протекают во много раз быстрее, чем процессы изменения скорости (случай $T_3 \ll T_M$) и поэтому могут не учитываться, при расчете последних. Возможны случаи и обратного соотношения. Поэтому перед расчетом динамических характеристик электропривода необходимо определить величины T_M и T_3 и решить вопрос об учете электромеханической и электромагнитной инерции системы. [20, 25]

2 Аналитическая часть

2.1 Исходные данные

Электропривод механизма поворота экскаватора ЭКГ–8И [1, 16, 18]. На рисунке 2.1 представлена кинематическая схема электропривода поворота экскаватора ЭКГ–8И.

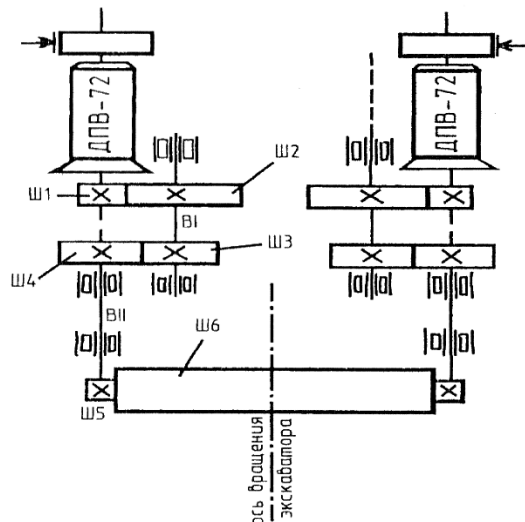


Рисунок 2.1 – Кинематическая схема механизма поворота экскаватора ЭКГ–8И

Таблица 2.1 Параметры кинематической схемы

Наименование	Число зубьев	Модуль	Диаметр вала наибольший, мм	Длина вала, мм	Вес, Кг
Шестерня 1	26	8	–	–	29
Шестерня 2	173	8	–	–	268
Шестерня 3	14	12	–	–	72
Шестерня 4	70	12	–	–	570
Шестерня 5	12	30	–	–	86
Шестерня 6	144	30	–	–	
Вал 1	–	–	150	625	43
Вал 2	–	–	220	1400	860

Таблица 2.2 Параметры нагрузочной диаграммы

Наименование	Обозначение	
Время копания, с	t_1	7,8
Момент при копании, [Н·м]x10	M_1	0
Время разгона с груженым ковшем, с	t_2	4,1
Момент при разгоне (момент пуска), [Н·м]x10	M_2	3850
Время поворота с установившейся скорости при груженом ковше, с	t_3	3,7
Поворот с установившейся скоростью, [Н·м]x10	M_3	2000
Время торможения при груженом ковше, с	t_4	3,1
Момент тормозной с груженым ковшем, [Нм]x10	M_4	–3000
Время разгрузки, с	t_5	2,0
Момент при разгрузке, [Н·м]x10	M_5	0
Время разгона с порожним ковшем, с	t_6	3,4
Момент пуска с порожним ковшем, [Н·м]x10	M_6	3850
Время поворота с установившейся скоростью, с	t_7	3,7
Момент поворота с установившейся скоростью, [Н·м]x10	M_7	2000
Время торможения с порожним ковшем, с	t_8	2,7
Момент торможения с порожним ковшем, [Н·м]x10	M_8	–3000

2.2 Общая характеристика

ЭКГ–8и предназначен для погрузки в транспортные средства расположенные на уровне стояния экскаватора.

Поворотный механизм экскаватора служит для вращения поворотной платформы с механизмами и рабочим оборудованием. Привод поворота осуществляется двумя одинаковыми механизмами.

В нашей стране была попытка заменить систему Г–Д, схема которой показана на рисунке 2.2, на современную систему ТП–Д, которая окончилась неудачей, так как замену преобразователей осуществляли без замены двигателей на современные. Поэтому в данной работе далее будет рассматриваться система Г–Д, принципиальная схема которой приведена на рис. 2.2.

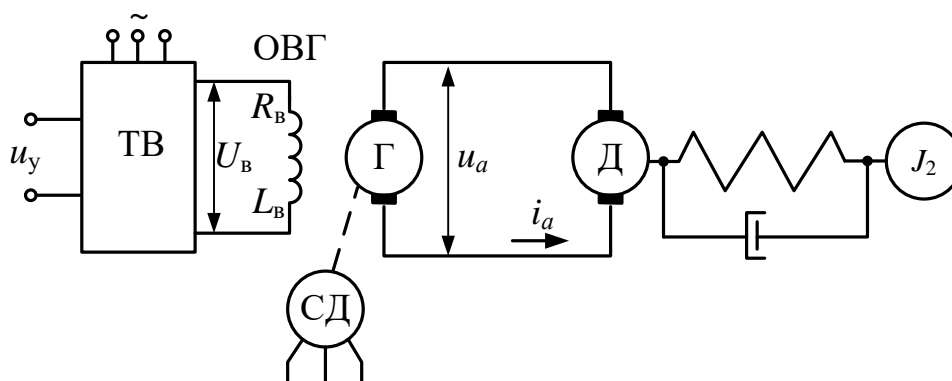


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема электропривода по системе генератор – двигатель

2.3 Предварительный выбор двигателя и генератора

В данной работе в качестве исходных данных задана нагрузочная диаграмма момента механизма, и учитывая, что момент двигателя пропорционален току, можно воспользоваться методом эквивалентного момента.

Эквивалентный момент – это такой постоянный момент нагрузки, который вызывает такой же нагрев двигателя, как и реально изменяющийся момент в соответствии с графиком работы механизма [1, 2]:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} M^2(t) dt} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i + t_0}} \quad (2.1)$$

Условие правильности выбора $M_{\text{экв.с}} \leq M_H$.

Рассмотрим выбор мощности двигателя для механизма поворота.

По нагрузочной диаграмме, представленной на рисунке 2.4, определяется эквивалентный момент согласно формуле (2.1):

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i + t_0}} = \sqrt{\frac{\sum M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4 + M_5^2 t_5 + M_6^2 t_6 + M_7^2 t_7 + M_8^2 t_8}{t_u}}$$

где $t_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8$ – время цикла.

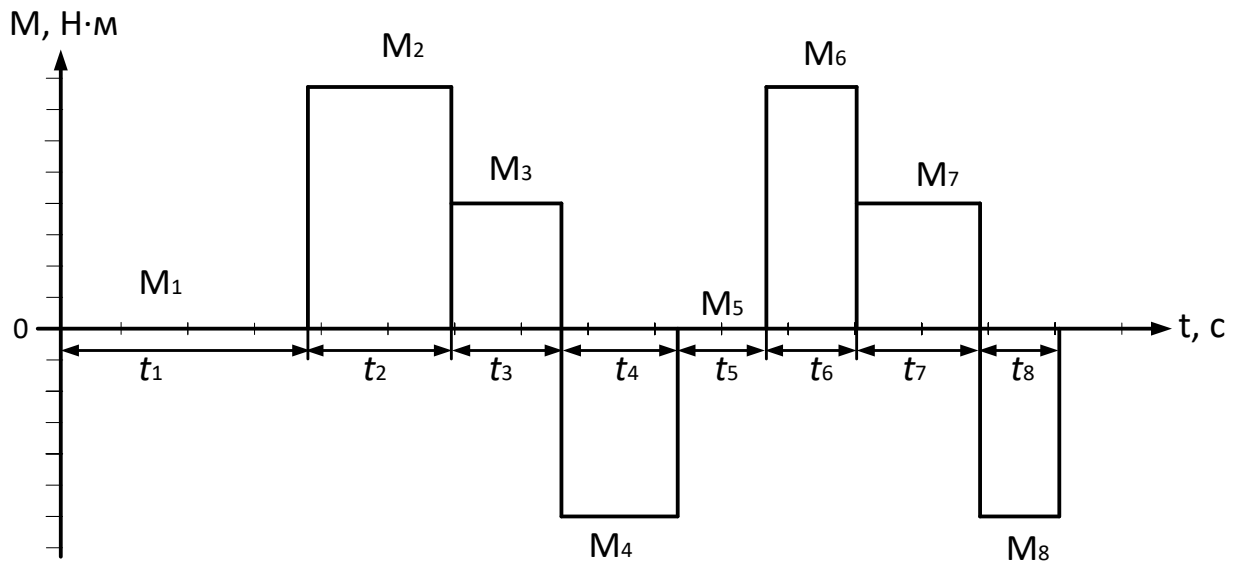


Рисунок 2.3 – Нагрузочная диаграмма механизма поворота экскаватора

Для дальнейшего выбора двигателя необходимо знать его номинальную частоту вращения.

Из кинематической схемы определим общее передаточное число редуктора как произведение передаточных чисел каждой ступени по формуле (2.2):

$$i_{ред} = i_1 i_2 = \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} \quad (2.2)$$

где i_i – передаточные числа;

i -й ступени;

z_i – число зубьев;

i -й шестерни.

Далее определяем необходимую частоту вращения двигателя:

$$n_{дв} = n_{мех} i_{ред} \quad (2.3)$$

где $n_{дв}$ – частота вращения двигателя,

$n_{мех}$ – частота вращения исполнительного механизма (для механизма подъема – подъемного барабана, для механизма напора – напорного барабана или кремальерной шестерни, для поворотного механизма – платформы).

В приложении [1] задан возможный диапазон $n_{мех}$ в зависимости от типа экскаватора и механизма, таким образом получаем диапазон в котором находится необходимая номинальная частота вращения двигателя.

Далее рассчитывается эквивалентная мощность двигателя для верхней и нижней границы диапазона номинальной частоты вращения по формуле (2.4):

$$P_{эkv} = \frac{M_{эkv} \omega_{дв}}{1000n} \quad (2.4)$$

где $\omega_{\partial e} = \frac{\pi n_{\partial e}}{30}$ – угловая частота вращения двигателя;

n – число двигателей.

По частоте двигателя и мощности выбирается двигатель из справочных данных, приведенных в приложениях. Затем выполняется проверка двигателя:

$$M_{ном} = \frac{1000nP_{ном}}{\omega_{ном}} \quad (2.5)$$

Проверяем соотношение неравенства:

$$M_{эkv} \leq M_{ном} \sqrt{ПВ_{ст}/ПВ_{зр}} \quad (2.6)$$

где $ПВ_{ст}$ – стандартное значение ПВ двигателя.

Продолжительность включения по имеющейся нагрузочной диаграмме находится по формуле (2.7).

$$ПВ_{зр} = \frac{\sum t_{раб.i}}{t_u} 100\% \quad (2.7)$$

В системе Г–Д режим работы каждого из генераторов преобразовательного агрегата повторяет режим работы соответствующего двигателя. Однако с точки зрения условий охлаждения генераторы работают в лучших условиях, так как якоря генераторов независимо от нагрузки вращаются с постоянной частотой. Постоянная частота вращения и возможность регулирования величины тока в обмотках возбуждения генераторов позволяют в системе Г–Д обеспечивать необходимую мощность и момент двигателей во всех их режимах работы, даже при стопорениях [1].

Поэтому номинальная мощность генератора может быть:

$$P_{ном.г} \geq \frac{nP_{ном.д}}{\eta_г} \quad (2.8)$$

где n – число двигателей, получающих питание от данного генератора.

Требуемое напряжение генератора зависит от числа двигателей и схемы их соединения:

$U_{ном.г} \geq U_{ном.д}$ – при параллельном соединении двигателей,

$U_{ном.г} \geq nU_{ном.д}$ – при последовательном соединении двигателей.

В электроприводе экскаватора получило распространение последовательное соединение двигателей, так как при таком соединении двигатели загружены равномерно и нет необходимости в дополнительных мероприятиях по выравниванию нагрузки.

2.4 Переходные процессы в электроприводе по системе Г–Д

В системе Г–Д быстродействие определяется инерционностью как механической части так и электрической части.

При изменении напряжения, тока, параметров двигателя и генератора, изменение нагрузки в двигателе или в рабочем механизме приводит к тому, что привод переходит из одного устойчивого состояния в другое.

Тогда переход с одного состояния в другое называется Переходным процессом. В системе Г–Д как в генераторе, так и в двигателе быстродействие определяется в основном электромагнитный процесс в обмотке возбуждения, поэтому все переключения для создания пусковых, тормозных и реверсивных движений располагаются в цепи обмотки возбуждения генератора.

2.4.1 Электромагнитные переходные процессы

Как правило, цепь обмотки возбуждения подключается непосредственно к источнику постоянного тока жестким сцеплением, в противном случае при реверсе, двигатель может пойти вразнос. Поэтому все переключения делают в цепи обмотки возбуждения генератора. Цепь обмотки возбуждения генератора могут подключаться к источнику постоянного тока или к возбудителям (устройства питания для обмотки возбуждения). Они могут быть вращающимися или статическими.

Известно множество всевозможных схем питания обмоток возбуждения от сети.

2.4.1.1 Нормальная схема

Обмотка возбуждения подключена к источнику постоянного напряжения.

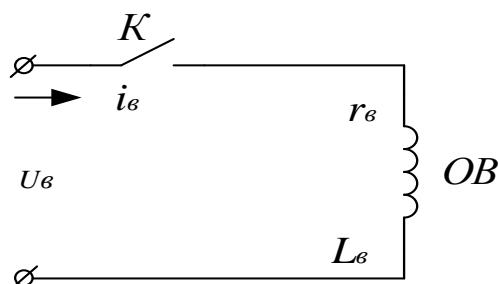


Рисунок 2.4 – Нормальная схема

При замыкании рубильника K ток мгновенно нарости не может из-за наличия противоЭДС. Переходный процесс протекает согласно рисунку 2.5.

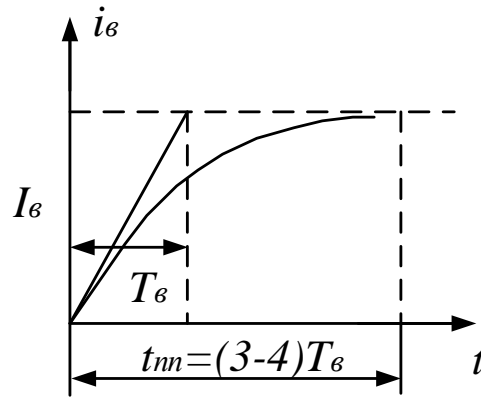


Рисунок 2.5 – Кривая переходного процесса

Баланс напряжений в рассматриваемой схеме, изображенной на рисунке 2.4, имеет следующий вид:

$$U_B = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} \quad (2.9)$$

Разделим обе части уравнения(2.9) на r_ϵ . Считаем что $L_\epsilon = const$.

Введем обозначения:

$$L_\epsilon / r_\epsilon = T_\epsilon - \text{электромагнитная постоянная времени};$$

$$U_\epsilon / r_\epsilon = I_\epsilon - \text{установившееся значение тока.}$$

Дифференциальное уравнение изменения тока возбуждения таково:

$$\frac{di_B}{dt} + \frac{1}{T_B} i_B = \frac{1}{T_B} I_B \quad (2.10)$$

$$i_B = I_B \left(1 - e^{-\frac{t}{T_B}} \right)$$

Кривая переходного процесса тока возбуждения, показанная на рисунке 2.5, представляет экспоненту.

Так как считаем что e_2 пропорционально i_ϵ , то

$$e_\Gamma = E_\Gamma \left(1 - e^{-\frac{t}{T_B}} \right) \quad (2.11)$$

Физический смысл T_ϵ – это время, в течение которого ток достиг бы установившегося значения, если бы не было потерь.

Геометрический смысл T_ϵ – это время, в течение которого ток достигает значения $0,632I_\epsilon$

T_B колеблется в пределах от 0,1 с. – для малых, до нескольких минут для больших машин. Время переходного процесса может колебаться до 0,3 с до нескольких десятков минут, поэтому применяют схемные решения, позволяющие увеличить быстродействие переходного процесса [24].

2.4.1.2 Схема с добавочным сопротивлением

Схема с $r_{доб}$ изображенная на рисунке 2.6 позволяет уменьшить время переходного процесса представленного на рисунке 2.7. Подбирают $r_{доб}$ таким, чтобы ток I_B оставался номинальным, а напряжение увеличивается:

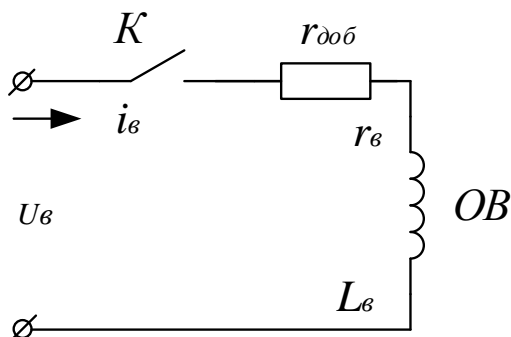


Рисунок 2.6 – Схема с добавочным сопротивлением

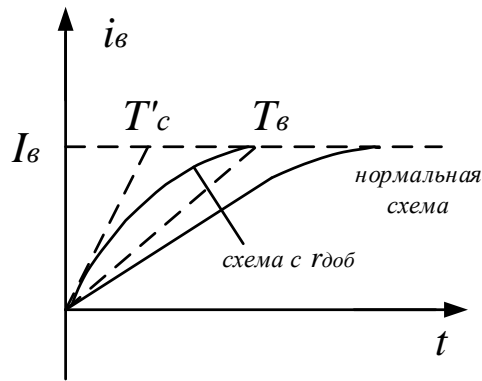


Рисунок 2.7 – Кривые переходного процесса

$$\frac{U'}{r_{\epsilon} + r_{доб}} = I_{\epsilon}; U'_b > U_{\epsilon};$$

Закон изменения тока:

$$i_{\epsilon} = I_{\epsilon} \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_{\epsilon}}} \right), T'_{\epsilon} = \frac{L_{\epsilon}}{r_{\epsilon} + r_{доб}}$$

В схеме с $r_{доб}$ переходный процесс вначале идет форсированно, а затем коэффициент форсировки уменьшается, как это показано на рисунке 2.8.

Поэтому время переходного процесса несущественно уменьшается по сравнению с нормальной схемой. Схема с $r_{доб}$ применяется для маломощных генераторов.

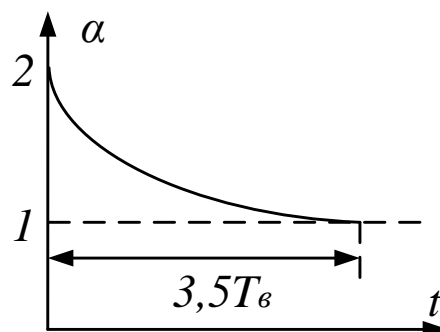


Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициента форсировки от времени

2.4.1.3 Схема с форсировочным сопротивлением

При сравнительной простоте практической реализации в схеме с форсировочным сопротивлением, представленной на рисунке 2.9, можно получить наилучшие динамические показатели.

На время пуска форсировочное сопротивление выведено из цепи контактом КФ форсировочного контактора КФ. По достижении током установившегося значения контакт КФ размыкается и вводится сопротивление r_ϕ . Постоянная времени возбуждения такая же, как в нормальной схеме и равна T_ϵ . Сравнение кривых переходного процесса в различных схемах представлено на рисунке 2.10, показывает, что время переходного процесса можно существенно сократить, только применив схему с r_ϕ .

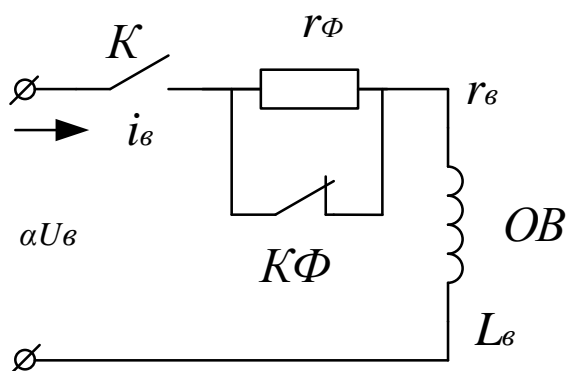


Рисунок 2.9 – Схема с форсировочным сопротивлением

Форсировочное сопротивление выбирают таким, чтобы установившееся значение тока было равно I_ϵ (такое же, как в нормальной схеме).

Время переходного процесса существенно зависит от коэффициента форсировки, но его рациональная величина лежит в пределах 2,5–4,5, так как дальнейшее его увеличение нецелесообразно, как это показано на рисунке 2.11.

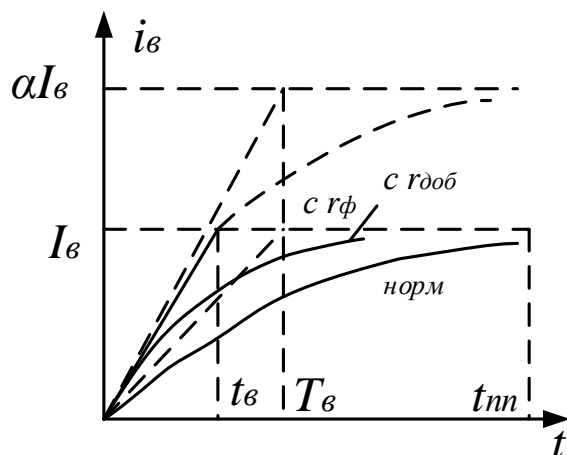


Рисунок 2.10 – Кривые переходного процесса

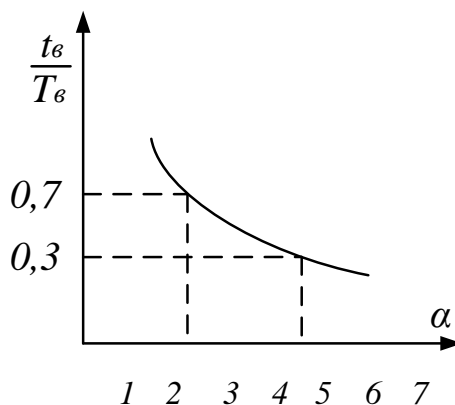


Рисунок 2.11 – Кривая зависимости коэффициента форсировки от времени переходного процесса

2.4.2 Электромеханические переходные процессы

2.4.2.1 Пуск в системе Г–Д

Механическая часть учитывается при помощи основного уравнения динамики. Проведем с ним ряд преобразований, представленных ниже, чтобы получить ток якоря i_a .

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}$$

$$i_a - I_c = \frac{J_{\Sigma}}{C} \frac{d\omega}{dt}$$

$$i_a = \frac{J_{\Sigma}}{C} \frac{d\omega}{dt} + I_c$$

ЭДС генератора будет изменяться так же, как ток возбуждения. В качестве схемы питания обмотки возбуждения генератора принимаем схему с форсировочным сопротивлением, позволяющую обеспечить наилучший переходный процесс тока возбуждения.

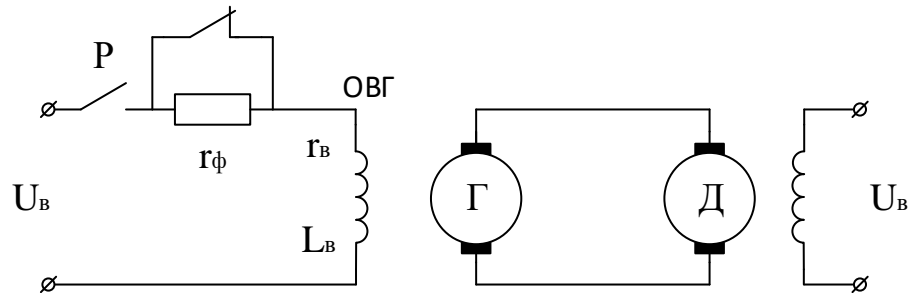


Рисунок 2.12– Принципиальная схема системы Г–Д при пуске

Исходными уравнениями, описывающими динамику электропривода с системой Г–Д, являются следующие:

$$\begin{cases} e_2 = \alpha E_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_B}} \right) \\ i_a = \frac{J_{\Sigma}}{C} \frac{d\omega}{dt} + I_c \\ e_2 = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + C\omega \end{cases} \quad (2.12)$$

Сделаем ряд преобразований, из системы уравнений (2.12).

$$\alpha E_2 \left(1 - e^{\frac{-t}{T_B}}\right) = \frac{J_\Sigma}{C} R_a \frac{d\omega}{dt} + I_c R_a + C\omega$$

$$\frac{\alpha E_2}{C} \left(1 - e^{\frac{-t}{T_B}}\right) = \frac{J_\Sigma}{C^2} R_a \frac{d\omega}{dt} + \frac{I_c R_a}{C} + \omega$$

$$\alpha \omega_0 \left(1 - e^{\frac{-t}{T_B}}\right) - \Delta\omega_c = T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega$$

Дифференциальное уравнение первого порядка с правой частью, решение состоит из общего и частного решения. Проведя несложные преобразования, получим следующий закон изменения скорости при пуске в системе Г–Д.

$$\omega = \frac{\alpha \omega_0}{T_B - T_M} \left[T_B \left(1 - e^{\frac{-t}{T_B}}\right) - T_M \left(1 - \psi e^{\frac{-t}{T_M}}\right) \right] - \Delta\omega_c$$

где $T_M = \frac{J_\Sigma}{C^2} R_a$ – электромеханическая постоянная времени,

ψ – коэффициент задержки.

Из последнего выражения видно, что скорость состоит из двух экспонент. Первая зависит от T_B , а вторая, отрицательная, зависит от T_M , (рисунок 2.13)

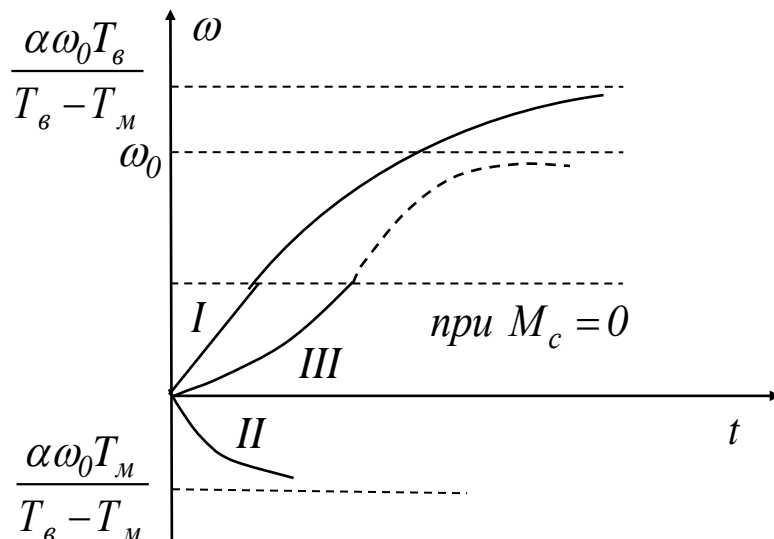


Рисунок 2.13 – Кривые переходных процессов при пуске

Выведем закон изменения тока из основного уравнения динамики взяв производную по скорости из уравнения (2.12) и после поставив производную $\frac{d\omega}{dt}$ в выражение для тока якорной цепи:

$$i_a = \frac{J_\Sigma}{C} \frac{d\omega}{dt} + I_c$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\alpha\omega_0}{T_B - T_M} \left(\frac{T_B}{T_B} e^{\frac{-t}{T_B}} - \frac{\psi T_M}{T_M} e^{\frac{-t}{T_M}} \right)$$

$$i_a = \frac{J_\Sigma}{C} \frac{\alpha\omega_0}{(T_B - T_M)} \left(e^{\frac{-t}{T_B}} - \psi e^{\frac{-t}{T_M}} \right) + I_c$$

Ток якорной цепи зависит от разности ЭДС генератора и ЭДС двигателя.

$$i_a = \frac{e_g - e_d}{R_a}$$

Качественную характеристику можно получить из сравнения ЭДС генератора и ЭДС двигателя

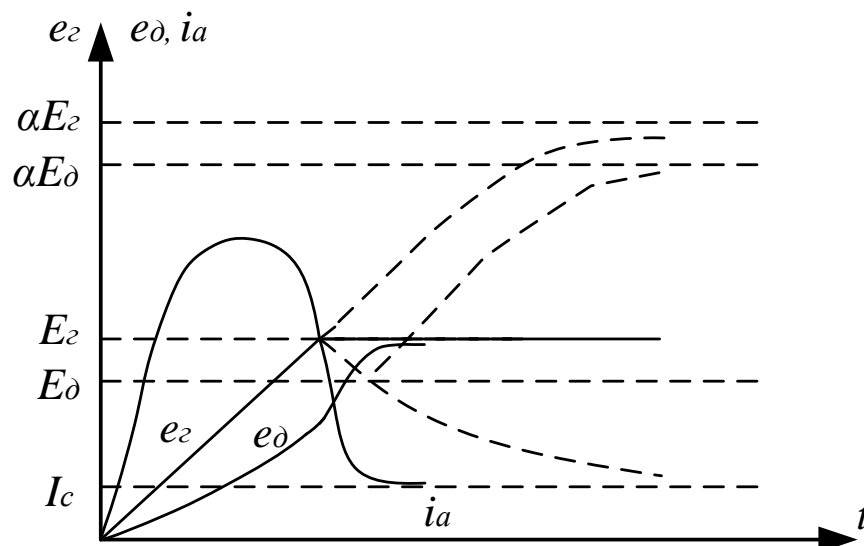


Рисунок 2.14 –Графики переходных процессов при пуске

ЭДС генератора (e_2) стремилось бы к αE_2 , если бы не было форсировочного сопротивления. При достижении E_2 заканчивается электромагнитный переходный процесс, вводится форсировочное сопротивление и e_2 дальше не увеличивается [4, 7].

ЭДС двигателя (e_d) вначале имеет затянутый переходный процесс, а затем стремилось бы к αE_d , если бы не было форсировочного сопротивления и всё время длился бы электромагнитный переходный процесс.

После окончания электромагнитного переходного процесса, переходный процесс будет определяться электромеханической постоянной времени, которая на порядок меньше чем электромагнитная [20, 24].

$T_B \gg T_M$, поэтому переходный процесс заканчивается значительно быстрее и в кривой e_d наблюдается изгиб.

Ток якорной цепи начинает нарастать, достигает максимума, а затем начинает убывать, после окончания электромагнитного переходного процесса в кривой тока происходит изгиб, достигая значения I_c .

Возьмем производную по току и приравняем её к нулю, найдем t_{\max} .

$$\frac{J_\Sigma}{C} \frac{\alpha \omega_0}{(T_B - T_M)} = \frac{J_\Sigma}{C^2} R_a \alpha \frac{\omega_0 C}{R_a} \frac{1}{(T_B - T_M)}$$

Учитывая что: $\frac{J_\Sigma}{C^2} R_a = T_M$, $\frac{\omega_0 C}{R_a} = I_{кз}$, $T_B = T_\Gamma$, получим уравнение

$$i_a = \frac{\alpha I_{кз} T_M}{T_\Gamma - T_M} \left(e^{\frac{-t}{T_\Gamma}} - \psi e^{\frac{-t}{T_M}} \right) + I_c \quad (2.13)$$

где $I_{кз}$ – ток короткого замыкания;

Возьмем производную тока якоря по времени, и приравняем к нулю

$$\frac{di}{dt} = \frac{\alpha I_{кз} T_M}{T_\Gamma - T_M} \left(-\frac{1}{T_B} e^{\frac{-t}{T_B}} + \frac{\psi}{T_M} e^{\frac{-t}{T_M}} \right) = 0$$

Приравняв выражение в скобках к нулю, получим:

$$\frac{1}{T_B} e^{\frac{-t_{max}}{T_B}} = \frac{\psi}{T_M} e^{\frac{-t_{max}}{T_M}}$$

Умножим обе части на T_B и на $e^{\frac{t_m}{T_M}}$

$$\frac{\psi T_B}{T_M} = e^{-t_{max} \left(\frac{T_B - T_M}{T_M T_B} \right)}$$

$$\ln \frac{\psi T_B}{T_M} = t_{max} \left(\frac{T_B - T_M}{T_M T_B} \right)$$

Ордеделим t_{max} - время достижения максимального тока [24].

$$t_{max} = \left(\frac{T_M T_B}{T_B - T_M} \right) \ln \left(\frac{\psi T_B}{T_M} \right) \quad (2.14)$$

Подставив (2.14) в (2.13), определим допустимое значение максимального тока. Приравняв его допустимому значению (стопорному), получим допустимый коэффициент форсировки (2.15).

$$\alpha = \left(\frac{I_{стоп}}{\left(\frac{T_M}{T_B} \right)^{\frac{T_B - T_M}{T_B}} + I_c} \right) : I_{кз} \quad (2.15)$$

2.4.2.2 Торможение в системе Г–Д

Торможение в системе Г–Д (принципиальная схема представлена на рисунке 2.15) – рекуперативное, с отдачей энергии в сеть.

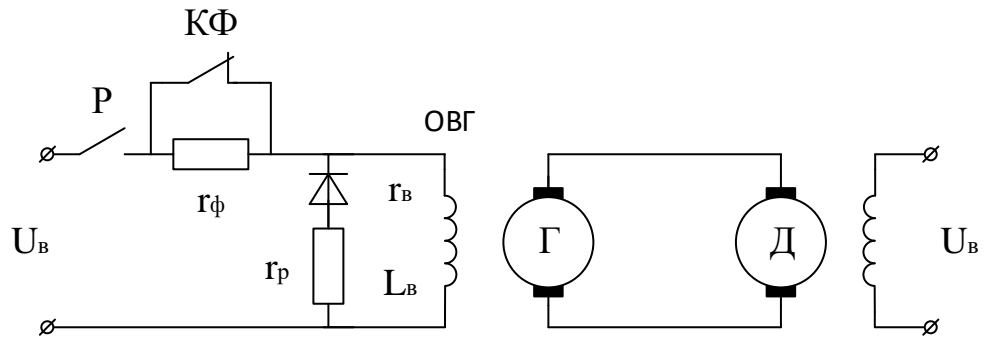


Рисунок 2.15 – Принципиальная схема системы Г–Д при торможении.

Если разомкнуть ключ, то $T_B = \frac{L_B}{\infty} \rightarrow 0$, возможен большой бросок напряжения, которое может пробить изоляцию ОВГ. Поэтому в обмотку возбуждения включаем разрядное сопротивление (r_p), чтобы разрядное сопротивление не мешало работе – ставим диод. Если принять $r_p = 3r_e$, тогда T_{BT} (постоянная времени при торможении) находится по формуле (2.16):

$$T_{BT} = \frac{L_B}{r_p + r_B} = \frac{T_B}{4} \quad (2.16)$$

Таким образом переходный процесс при торможении идет в 4 раза быстрее, чем при пуске.

Исходной для вывода закона изменения скорости является система уравнений (2.17):

$$\begin{cases} e_2 = i_a R_a + C_e \omega \\ e_2 = E_2 e^{\frac{-t}{T_{BT}}} \\ i_a = \frac{J_{\Sigma}}{C} \frac{d\omega}{dt} + I_c \end{cases} \quad (2.17)$$

Приравняем правые части первого и второго уравнений системы (2.17) и с учетом третьего уравнения, получим:

$$E_2 e^{\frac{-t}{T_{BT}}} = \frac{J_{\Sigma} R_a}{C} \frac{d\omega}{dt} + I_C R_a + C\omega$$

$$\frac{E_2}{C} e^{\frac{-t}{T_{BT}}} = \frac{J_{\Sigma} R_a}{C^2} \frac{d\omega}{dt} + \frac{I_C R_a}{C} + \omega$$

$$\text{Обозначим: } \frac{J_{\Sigma} R_a}{C^2} = T_M$$

$$\frac{I_C R_a}{C} = \Delta\omega_C \quad (2.18)$$

$$\frac{E_2}{C} = \omega_0 \quad (2.19)$$

В результате получим дифференциальное уравнение первого порядка с правой частью:

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \Delta\omega_C$$

Решение его состоит из суммы общего и частного решений. Проведя несложные преобразования, получим следующий закон изменения скорости при торможении в системе Г–Д [19].

$$\omega = \frac{\omega_0}{T_{BT} - T_M} \left(T_{BT} e^{\frac{-t}{T_{BT}}} - T_M e^{\frac{-t}{T_M}} \right) - \Delta\omega_C \quad (2.20)$$

Как видно из выражения (2.20) скорость состоит из двух спадающих экспонент.

Так как $T_{BT} \gg T_M$, то первая экспонента спадает быстрее чем вторая, что представлено на рисунке 2.16.

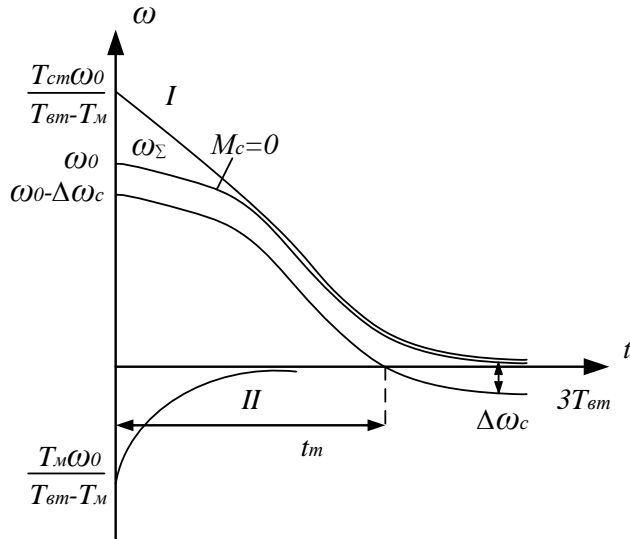


Рисунок 2.16 –Кривые переходных процессов при торможении

Определим время переходного процесса при торможении (t_T).

$$0 = \frac{\omega_0}{T_{BT} - T_M} \left(T_{BT} e^{\frac{-t}{T_{BT}}} - T_M e^{\frac{-t}{T_M}} \right) - \Delta\omega_c$$

$$\frac{\omega_0}{T_{BT} - T_M} T_{BT} e^{\frac{-t}{T_{BT}}} = \Delta\omega_c$$

$$e^{\frac{-t}{T_{BT}}} = \frac{\Delta\omega_c (T_{BT} - T_M)}{\omega_0 T_{BT}}$$

$$\frac{-t}{T_{BT}} = \ln \left(\frac{\Delta\omega_c (T_{BT} - T_M)}{\omega_0 T_{BT}} \right)$$

Так как время не может быть отрицательным, то выражение под логарифмом переворачивается. Так же выразим время торможения в формулу (2.21)

$$-t_T = T_{BT} \ln \left(\frac{\Delta\omega_c (T_{BT} - T_M)}{\omega_0 T_{BT}} \right)$$

Упрощенное выражение (пренебрегаем T_M) можно принять в виде:

$$t_T = T_{BT} \ln \frac{\omega_0}{\Delta\omega_C} \quad (2.21)$$

Для того чтобы вычислить закон изменения тока (2.22), воспользуемся третьим уравнением (2.17).

$$i_a = \frac{J_\Sigma}{C} \frac{d\omega}{dt} + I_c$$

Проведем ряд преобразований:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{\omega_0}{T_{BT} - T_M} \left(e^{\frac{-t}{T_{BT}}} - e^{\frac{-t}{T_M}} \right) \\ i_a &= \frac{-J_\Sigma R_a}{C^2} \frac{\omega_0 C}{(T_{BT} - T_M) R_a} \left(e^{\frac{-t}{T_{BT}}} - e^{\frac{-t}{T_M}} \right) + I_c \\ \text{где } \frac{J_\Sigma R_a}{C^2} &= T_M, I_{кз} = \frac{\omega_0 C}{R_a} \\ i_a &= -\frac{T_M I_{кз}}{(T_{BT} - T_M)} \left(e^{\frac{-t}{T_{BT}}} - e^{\frac{-t}{T_M}} \right) + I_c \end{aligned} \quad (2.22)$$

Определим время достижения максимального значения тока, взяв производную от (2.22) и приравняем ее к нулю.

$$\begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= \frac{-T_M I_{кз}}{(T_{BT} - T_M)} \left(\frac{1}{T_{BT}} e^{\frac{-t}{T_{BT}}} - \frac{1}{T_M} e^{\frac{-t}{T_M}} \right) = 0, \quad \frac{1}{T_{BT}} e^{\frac{-t_{\max}}{T_{BT}}} = \frac{1}{T_M} e^{\frac{-t_{\max}}{T_M}}, \\ \frac{T_{BT}}{T_M} &= e^{t_{\max} \left(\frac{1}{T_{BT}} - \frac{1}{T_M} \right)} \end{aligned}$$

Прологарифмируя обе части последнего уравнения, определим время достижения максимума тока (2.23).

$$t_{\max} \left(\frac{T_{\text{BT}} - T_{\text{M}}}{T_{\text{BT}} T_{\text{M}}} \right) = \ln \left(\frac{T_{\text{BT}}}{T_{\text{M}}} \right)$$

$$t_{\max} = \left(\frac{T_{\text{BT}} T_{\text{M}}}{T_{\text{BT}} - T_{\text{M}}} \right) \ln \left(\frac{T_{\text{BT}}}{T_{\text{M}}} \right) \quad (2.23)$$

Ток якорной цепи зависит от разности ЭДС генератора и ЭДС двигателя, для того чтобы показать качественную характеристику изменения тока торможения, покажем вид переходного процесса ЭДС генератора и ЭДС двигателя.

$$i_a = \frac{e_2 - e_\partial}{R_a}$$

График переходных процессов представлен на рисунке 2.17. До тех пор, пока $e_2 > e_\partial$, ток будет рекуперировать в сеть.

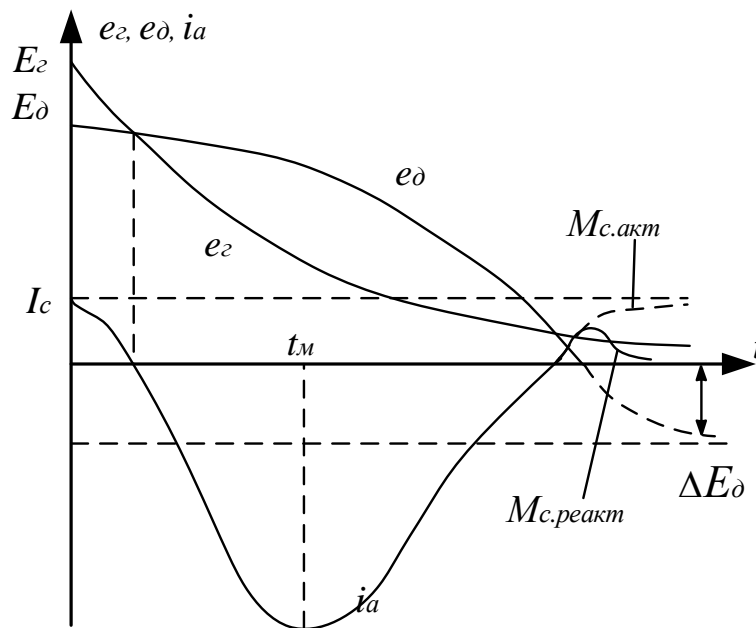


Рисунок 2.17 – Графики переходных процессов при торможении

3 Практическая часть

3.1 Технические условия

Нагрузочная диаграмма механизма поворота экскаватора ЭКГ–8и приведена на рисунке 3.1.

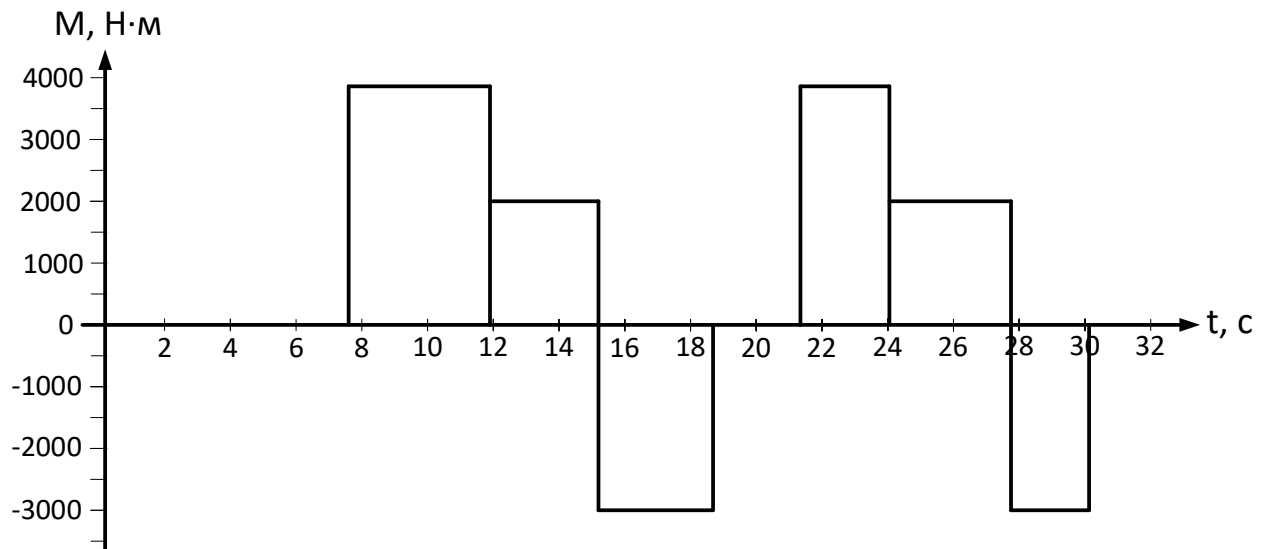


Рисунок 3.1 – Нагрузочная диаграмма механизма поворота экскаватора ЭКГ–8и

Такая диаграмма работы механизма возможна теоретически в сыпучих грунтах. Данная диаграмма имеет характерные режимы пуска и торможения.

Маховые моменты кинематических звеньев определяются из кинематической схемы и таблицы, представленной на рисунке 2.1

Электропривод должен обеспечивать экскаваторную характеристику.

3.2 Предварительный выбор мощности

Определяем эквивалентный момент механизма по формуле (2.1).

$$M_{с.экв} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i + t_0}} = \sqrt{\frac{3850^2 \cdot 4,1 + 2000^2 \cdot 3,7 + -(3000)^2 \cdot 3,1 +}{7,8 + 4,1 + 3,7 + 3,1 + 2}}$$

$$\sqrt{\frac{+3850^2 \cdot 3,4 + 2000^2 \cdot 3,7 + (-3000)^2 \cdot 2,7}{+3,4 + 3,7 + 2,7}} = 2515 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Скорость вращения платформы для экскаваторов ЭКГ–8и меняется в пределах:

$$n_{мех} = (2 - 3,5) \text{ об/мин.}$$

Из кинематической схемы определяем общее передаточное число по формуле (2.2):

$$i_{общ} = \frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdot \frac{z_4}{z_3} = \frac{173}{26} \cdot \frac{70}{14} \cdot \frac{144}{12} = 400$$

Скорость вращения двигателя находим по формуле (2.3):

$$n_{дв} = n_{мех} \cdot i_{общ} = (2 - 3,5) \cdot 400 = (800 - 1400) \text{ об/мин;}$$

$$\omega_{дв} = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot (800 - 1400)}{30} = (83,7 - 146,5) \text{ с}^{-1}.$$

Эквивалентная мощность определяется по формуле (2.4):

$$P_{экв} = \frac{M_{с.экв} \cdot \omega_{дв}}{n \cdot 1000}$$

$$P_{экв1} = \frac{M_{с.экв} \cdot \omega_{дв1}}{n \cdot 1000} = \frac{2515 \cdot 83,7}{2 \cdot 1000} = 105,3 \text{ кВт}$$

$$P_{экв2} = \frac{M_{с.экв} \cdot \omega_{дв2}}{n \cdot 1000} = \frac{2515 \cdot 146,5}{2 \cdot 1000} = 184,3 \text{ кВт}$$

По полученным значениям из каталога[1] выбираем двигатель ДПВ–72/8.

$$P_{\text{НОМ}}=145 \text{ кВт}, \quad ПВ_{\text{СТ}}=75\%, \quad n_{\text{НОМ}}=800 \text{ об/мин};$$

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{30} = \frac{\pi \cdot 800}{30} = 83,8 \text{ с}^{-1}.$$

Уточняем $P_{\text{ЭКВ}}$ по формуле (2.4):

$$P_{\text{ЭКВ1}} = \frac{M_{\text{С.ЭКВ}} \cdot \omega_{\text{НОМ}}}{n \cdot 1000} = \frac{2515 \cdot 83,8}{2 \cdot 1000} = 105,4 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{ЭКВ1}} \leq P_{\text{НОМ}};$$

$$105,4 \leq 145 \text{ кВт}.$$

Пересчитаем двигатель на стандартное ПВ используя формулы (2.5) и (2.6):

$$M_{\text{С.ЭКВ}} \leq M_{\text{H}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\text{СТ}}}{ПВ_{\text{Граф}}}};$$

$$M_{\text{H}} = 1000 \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot n}{\omega_{\text{НОМ}}} = 1000 \frac{145 \cdot 2}{83,8} = 3460,6 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Определяем продолжительность включения графика по формуле (2.7).

$$\begin{aligned} ПВ_{\text{Граф}} &= \frac{t_2 + t_3 + t_4 + t_6 + t_7 + t_8}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8} \cdot 100\% = \\ &= \frac{4,1 + 3,7 + 3,1 + 3,4 + 3,7 + 2,7}{7,8 + 4,1 + 3,7 + 3,1 + 2 + 3,4 + 3,7 + 2,7} \cdot 100\% = 67,9\%; \end{aligned}$$

$$M_{\text{С.ЭКВ}} \leq 3460,6 \sqrt{\frac{75}{67,9}} \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$2515 \leq 3637 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Неравенство выполняется, поэтому выбираем два двигателя ДПВ–72/8.

Технические и обмоточные данные двигателя ДПВ–72/8 представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1– Технические и обмоточные данные двигателя

Мощность, кВт	Режим работы, %	Напряжение, В	Ток якоря, А		Частота вращения, об/мин		Напряжение возбуждения, В	Ток возбуждения, А	Сопротивления обмотки, Ом		Число полюсов	Момент инерции, кг·м ²	Число двигателей
			номинальный	стопорный	номинальная	максимальная			якоря	дополнительных полюсов			
145	75	365	1026	2160	800	1600	115	26,3	0,0049	0,0043	4	8	2

Выбираем генератор по формуле (2.8), при этом $\eta_{\text{Г}}$ –КПД генератора принимаем равным – 0,9:

$$P_{\text{ген}} = \frac{n \cdot P_{\text{дв}}}{\eta_{\text{Г}}} = \frac{2 \cdot 145}{0,9} = 322,2 \text{ кВт}.$$

Выбираем генератор ПЭМ – 141–4к/9,

Технические и обмоточные данные генератора ПЭМ – 141–4к/9 представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Технические и обмоточные данные генератора ПЭМ – 141–4к/9

Тип генератора	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток якоря, А		Частота вращения, об/мин	Напряжение возбуждения, В	Ток возбуждения, А	Сопротивление обмотки, Ом				Число полюсов
			номинальный	стопорный				якоря	дополнительных полюсов	компенсационной	Возбуждения	
ПЭМ – 141– 4к/9	334	914	576	1450	1000	44,2	18,1	0,0486	0,0078	0,0202	5,568	4

3.3 Расчет параметров, определяющих динамику электропривода

На переходные процессы в системах электропривода оказывают влияние различные виды инерции:

- механическая инерция вращающихся и движущихся частей, поступательно работающих механизмов, передач, двигателей, генераторов и т.д.;
- электромагнитная инерция, обусловленная индуктивностью обмоток электрических машин;
- тепловая инерция электрических машин и элементов аппаратуры, которую мы не учитываем в расчетах.

3.5.1 Расчет электромеханической постоянной привода

Двухдвигательный привод, как в нашем случае может выполняться с последовательным и параллельным включением якорей машины. При расчете механических характеристик и переходных процессов считают, что двигатели по

своим электромеханическим свойствам совершенно идентичны и каждый из них воспринимает половинную нагрузку, создаваемую механизмом.

Тогда двухдвигательный привод можно заменить однодвигательным приводом со следующими параметрами:

- 1) суммарный момент инерции равен сумме моментов инерции механизма и удвоенному значению момента инерции двигателя;
- 2) при последовательном соединении, сопротивление эквивалентного двигателя равно $2R_a$.

На переходный процесс влияет инерционность элементов механической схемы двигателей и генераторов. Инерционность электромагнитных переходных процессов определяется электромеханической постоянной T_M , представленной в формуле (3.1).

$$T_M = \frac{(\sum J'_M + 2J_{дв})R_a}{4C^2} \quad (3.1)$$

где J'_M - момент инерции элемента кинематической цепи;

$J_{дв}$ - момент инерции двигателя;

R_a - сопротивление якорной цепи.

Сопротивление якорной цепи определим по формуле

Полное сопротивление якорной цепи (3.3):

$$R_a = nR_{ад} + R_{аг} \quad (3.2)$$

где n - число двигателей;

$R_{ад}$ - сопротивление якорной цепи двигателя;

$R_{аг}$ - сопротивление якорной цепи генератора.

Для определения сопротивлений пользуемся таблицей 3.1 и таблицей 3.2

Сопротивление якорной цепи двигателя (3.3):

$$R_{ад} = (R_{я} + R_{дп})K_t + \frac{2}{I_{нд}}, \quad (3.3)$$

где $R_{я}$ – сопротивление обмотки якоря двигателя;

$R_{дп}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов;

$K_t = 1,24$ – температурный коэффициент.

Подставив значения из таблицы 3.1 в формулу (3.3) получим

$$R_{ад} = (0,0049 + 0,0043)1,24 + \frac{2}{1026} = 0,0133 \text{ Ом}$$

Сопротивление якорной цепи генератора (3.4):

$$R_{аг} = (R_{яг} + R_{дпг} + R_{ком})K_t + \frac{2}{I_{нг}}, \quad (3.4)$$

где $R_{яг}$ – сопротивление обмотки якоря генератора;

$R_{дпг}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов;

$R_{ком}$ – сопротивление компенсационной обмотки.

Подставив значения из таблицы 3.2 в формулу (3.4) получим:

$$R_{аг} = (0,0486 + 0,0078 + 0,0202)1,24 + \frac{2}{576} = 0,098 \text{ Ом}$$

Полное сопротивление якорной цепи (3.2):

$$R_a = 2 * 0,0133 + 0,098 = 0,125 \text{ Ом}$$

$$C = \frac{U_{\text{двн}} - I_{\text{двн}} \cdot R_{\text{ад}}}{\omega_{\text{двн}}} = \frac{365 - 1026 \cdot 0,0133}{83,3} = 4,2$$

$$T_M = \frac{(70 + 2 * 8)0,125}{4 * 4,2^2} = 0,14 \text{ с.}$$

3.4.2 Определение электромагнитной постоянной

Электромагнитная постоянная времени определяется по обмотке возбуждения генератора при постоянном токе двигателя.

В зависимости от мощности двигателя, по таблице 3.3 применяем следующие значения T_r :

Таблица 3.3 – Зависимость электромагнитной постоянной от мощности двигателя

$P_n = P_r \leq 50 \text{ кВт}$	$T_r = 1,4 \text{ с}$
$P_n = 50 \div 100 \text{ кВт}$	$T_r = 1,6 \text{ с}$
$P_n = 100 \div 150 \text{ кВт}$	$T_r = 1,8 \text{ с}$
$P_n = 150 \div 200 \text{ кВт}$	$T_r = 2 \text{ с}$
$P_n = 200 \div 250 \text{ кВт}$	$T_r = 2,2 \text{ с}$
$P_n > 250 \text{ кВт}$	$T_r = 2,4 \text{ с}$

По полученным данным выбираем $T_r = 1,8 \text{ с}$.

3.4 Расчет переходных процессов

Переходные режимы в системе Г–Д при работе в зоне от основной скорости и ниже в основном определяются электромагнитной постоянной времени и при постоянном магнитном потоке двигателя. В таких случаях оказывается предпочтительным аналитический метод расчета [1, 16, 22].

3.4.1 Переходные процессы при пуске

При пуске/замыкании рубильника Р схемы 2.13, ЭДС генератора (e_r) начинает возрастать согласно закону из уравнения (2.12):

$$e_r = \alpha E_r \left(1 - e^{\frac{-t}{T_2}} \right);$$

$$e^{\frac{-t}{T_2}} = \frac{\alpha - 1}{\alpha}.$$

Переходный процесс определяется по следующим величинам:

$$E_r = U_{нг} + I_{нг} R_{аген} \quad (3.5)$$

$$I_{кз} = \frac{E_r}{R_a} \quad (3.6)$$

$$t_{пп} = T_r \cdot \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1} \quad (3.7)$$

$$I_c = \frac{M_{с2}}{C} \quad (3.8)$$

где E_r – ЭДС генератора;

$I_{кз}$ – ток короткого замыкания;

$t_{пп}$ – время переходного процесса;

I_c – статический ток.

$\alpha = 2,5$ – коэффициент форсировки.

Найдем необходимые величины по формулам (3.3), (3.4), (3.5) и (3.6):

$$E_r = 914 + 576 * 0,098 = 970,45 \text{ В};$$

$$I_{кз} = \frac{E_r}{R_a} = \frac{970,45}{0,125} = 7763 \text{ А};$$

$$t_{\text{ин}} = T_{\Gamma} \cdot \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right) = 1,8 \cdot \ln\left(\frac{2,5}{2,5 - 1}\right) = 0,9 \text{ с};$$

$$I_c = \frac{M_{c2}}{C} = \frac{2000}{4,2} = 476,2 \text{ А.}$$

Закон изменения ЭДС генератора будет иметь следующий вид:

$$e_{\Gamma} = 2,5 \cdot 970,45 \left(1 - e^{\frac{-t}{1,8}}\right) = 2426,1 \left(1 - e^{\frac{-t}{1,8}}\right) \text{ В.}$$

Закон изменения тока якоря находится по формуле (2.13):

$$i_a = \frac{\alpha \cdot T_M \cdot I_{\text{кз}}}{(T_{\Gamma} - T_M)} \left(e^{\frac{-t}{T_{\Gamma}}} - e^{\frac{-t}{T_M}}\right) + I_{\text{ст}} = \frac{2,5 \cdot 0,14 \cdot 7763}{(1,8 - 0,1)} \left(e^{\frac{-t}{1,8}} - e^{\frac{-t}{0,14}}\right) + 476,2 = 1636,8 \left(e^{\frac{-t}{1,8}} - e^{\frac{-t}{0,14}}\right) + 476,2 \text{ А.}$$

Находим время достижения максимума по формуле (2.14):

$$t_{\text{max}} = \left(\frac{T_{\Gamma} T_M}{T_{\Gamma} - T_M}\right) \ln\left(\frac{T_{\Gamma}}{T_M}\right) = \left(\frac{1,8 \cdot 0,14}{1,8 - 0,14}\right) \ln\left(\frac{1,8}{0,14}\right) = 0,39 \text{ с.}$$

Составим таблицу 3.4 промежуточных значений тока якорной цепи и ЭДС генератора

Таблица 3.4 – Промежуточные значения тока якорной цепи и ЭДС генератора при пуске

t	0,10	0,20	0,30	0,39	0,50	0,60	0,8	0,9	1,00	1,10
$e^{-t/T_{\Gamma}}$	0,95	0,89	0,85	0,81	0,76	0,72	0,64	0,61	0,57	0,54

e^{-t/T_M}	0,48	0,23	0,11	0,06	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
$1 - e^{-t/T_T}$	0,05	0,11	0,15	0,19	0,24	0,28	0,36	0,39	0,43	0,46
i_a	1218, 17	1536, 40	1652, 15	1672, 86	1647, 90	1604, 07	1498, 91	1445, 83	532,6	476,2
e_z	130,5 8	254,1 0	370,9 5	462,7 6	586,0 4	684,9 5	867,0 2	970,4 5	970,4 5	970,4 5

Построим график тока якорной цепи и ЭДС генератора на рисунке 3.2

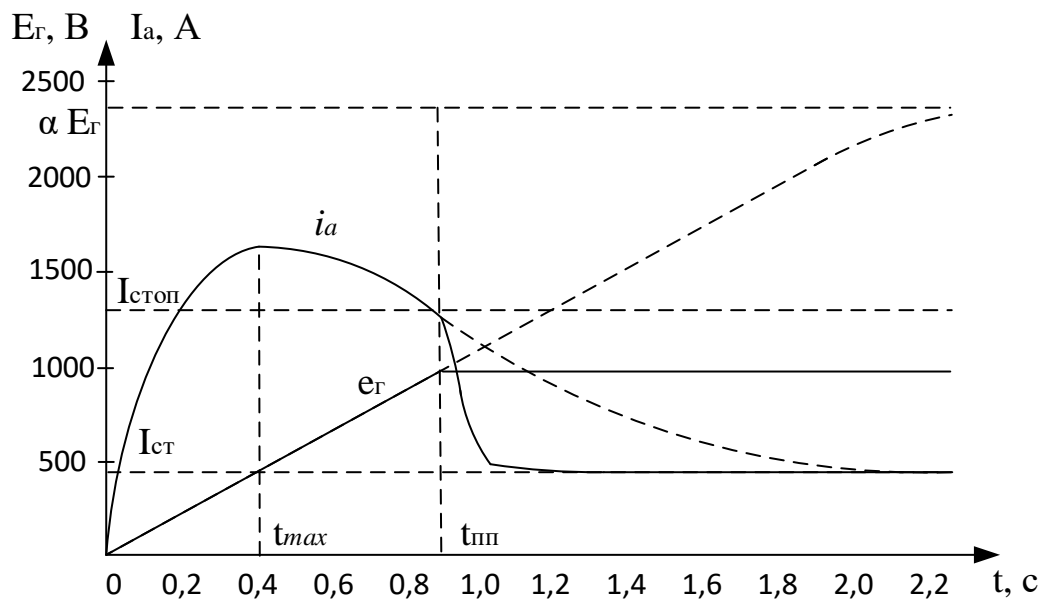


Рисунок 3.2– Диаграмма тока якорной цепи и ЭДС генератора

3.4.2 Переходные процессы при торможении

При торможении ЭДС генератора (e_γ) начинает спадать по экспоненте, согласно закону из уравнения (2.17)

$$e_\gamma = E_\gamma e^{-\frac{t}{T_B}}$$

Принимаем что значение статического тока равно от 20 до 40 % значения номинального тока

$$I_c = (20 \div 40\%)I_H$$

По формулам (3.8), (2.16), (2.18), (2.19) находим необходимые величины:

$$I_c = \frac{0,3 \cdot M_H}{C} = \frac{0,3 \cdot 3460,6}{4,2} = 247,2 \text{ A};$$

$$T_{BT} = \frac{L_B}{R_B + R_p} = \frac{T_B}{4} = \frac{1,8}{4} = 0,45 \text{ с};$$

$$\Delta\omega_c = \frac{I_c \cdot R_a}{C} = \frac{247,2 \cdot 0,125}{4,2} = 7,36 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_0 = \frac{E_r}{C} = \frac{970,45}{4,2} = 231 \text{ с}^{-1}.$$

Время торможения найдем по формуле (3.9)

$$t_T = T_{BT} \ln \frac{\omega_0}{\Delta\omega_c} \quad (3.9)$$

$$t_T = 0,45 \ln \frac{231}{7,36} = 1,7 \text{ с}$$

Ток якорной цепи находим по формуле (2.22)

$$i_a = -\frac{I_{к3} T_M}{T_{BT} - T_M} \left(e^{-\frac{t}{T_{BT}}} - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) + I_c$$

$$i_a = -\frac{7763 \cdot 0,45}{0,45 - 0,14} \left(e^{-\frac{t}{0,45}} - e^{-\frac{t}{0,14}} \right) + 247,2$$

Возьмем производные формулы (2.22) и найдем время достижения максимума по формуле (3.10).

$$t_{max} = \frac{T_{BT} \cdot T_M}{T_{BT} - T_M} \ln \frac{T_{BT}}{T_M} = \frac{0,45 \cdot 0,14}{0,45 - 0,14} \ln \frac{0,45}{0,14} = 0,3 \text{ с} \quad (3.10)$$

Составим таблицу 3.5 промежуточных значений тока якорной цепи и ЭДС генератора

Таблица 3.5 – Промежуточные значения тока якорной цепи и ЭДС генератора при торможении

t	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1	1,5	1,8	2,2	2,5
e^{-t/T_T}	1	0,80	0,59	0,41	0,33	0,11	0,04	0,00	0,00	0
e^{-t/T_M}	1	0,48	0,17	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0
i_a	247,2	-836,213	-968,86	-1158,46	-785,48	-619,9	125,63	134,75	125,6	0
e_z	970,45	773,9351	397,35	567,01	318,17	104,74	34,47	17,70	7,27	0

Построим график тока якорной цепи и ЭДС генератора при торможении
рисунок 3.3

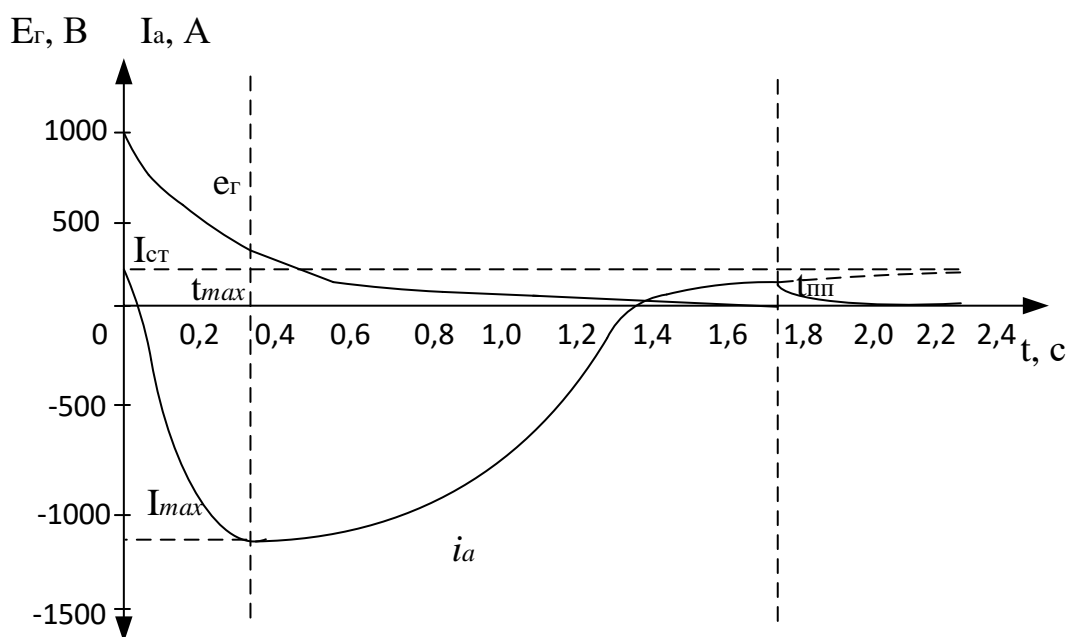


Рисунок 3.3 – Диаграмма тока якорной цепи и ЭДС генератора

3.5 Ограничения координат

Из диаграммы тока якорной цепи, изображенной на рисунке 3.2, видно, что максимальный ток, возникающий при пуске, превышает ток стопорный.

Ограничение координат электропривода можно получить при помощи классических замкнутых структур управления.

Получившие распространение системы подчиненного регулирования (СПР) состоят из типовых контуров, число которых, как правило, равно числу больших и средних постоянных времени.

Достоинствами систем электропривода, построенных по принципу подчиненного регулирования координат, являются простота расчета, настройки и ограничения предельных значений промежуточных координат системы.

Классической является трехконтурная СПР тока возбуждения, тока якорной цепи и скорости двигателя, применяемая к одномассовому объекту регулирования.

1. Контур тока возбуждения представлен на рисунке 3.4

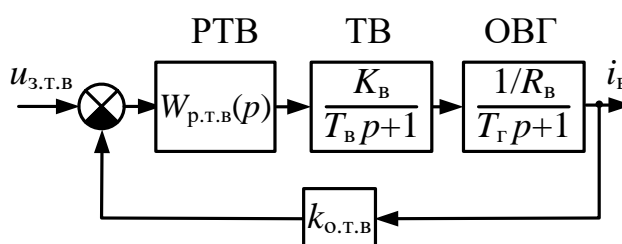


Рисунок 3.4 – Структурная схема контура тока возбуждения

Передаточная функция разомкнутого контура тока возбуждения:

$$W_{\text{раз.т.в}}(p) = W_{\text{р.т.в}}(p)W_{\text{т.в}}(p)W_{\text{о.в.г}}(p)k_{\text{о.т.в}};$$

$$W_{\text{раз.т.в}}(p) = W_{\text{р.т.в}}(p) \frac{K_B}{T_B p + 1} \frac{1/R_B}{T_Г p + 1} k_{\text{о.т.в}},$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура:

$$W_{\text{раз.т.в}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}.$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура и сократив обе части на $(T_{\mu} \delta + 1)$ получим регулятор пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения:

$$W_{\text{з.к.т.в}}(p) = \frac{W_{\text{р.т.в}}(p)W_{\text{т.в}}(p)W_{\text{о.в.г}}(p)}{1 + W_{\text{р.т.в}}(p)W_{\text{т.в}}(p)W_{\text{о.в.г}}(p)k_{\text{о.т.в}}};$$

2. Контур тока якорной цепи представлен на рисунке 3.5:

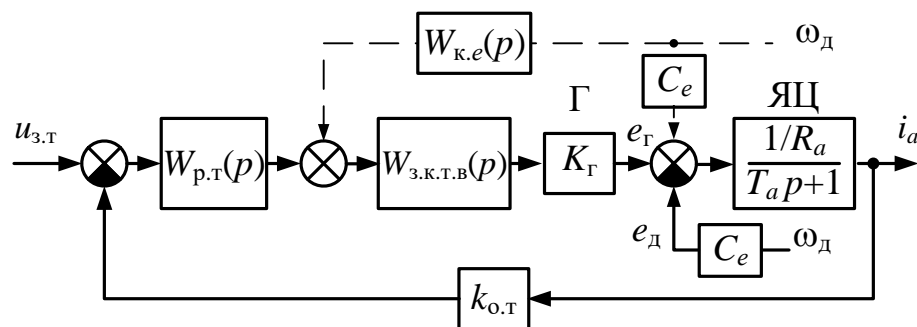


Рисунок 3.5 – Структурная схема контура тока якорной цепи

передаточная функция разомкнутого контура:

$$W_{\text{раз.т}}(p) = W_{\text{р.т.}}(p)W_{\text{з.к.т.в.}}(p)W_{\text{я.ц.}}(p)K_{\Gamma}k_{\text{о.т.}},$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура:

$$W_{\text{раз.т}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 2} p (T_{\mu 2} p + 1)}.$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура, и находим передаточную функцию получим регулятор пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура:

$$W_{\text{з.к.т}}(p) = \frac{W_{\text{р.т}}(p)W_{\text{я.ц}}(p)W_{\text{з.к.т.в}}(p)K_{\Gamma}}{1 + W_{\text{р.т}}(p)W_{\text{я.ц}}(p)W_{\text{з.к.т.в}}(p)K_{\Gamma}k_{\text{о.т}}};$$

3. Рассмотрим следующий контур – контур скорости, который изображен на рисунке 3.6

Обозначим передаточную функцию регулятора скорости $W_{\text{р.с}}(p)$.

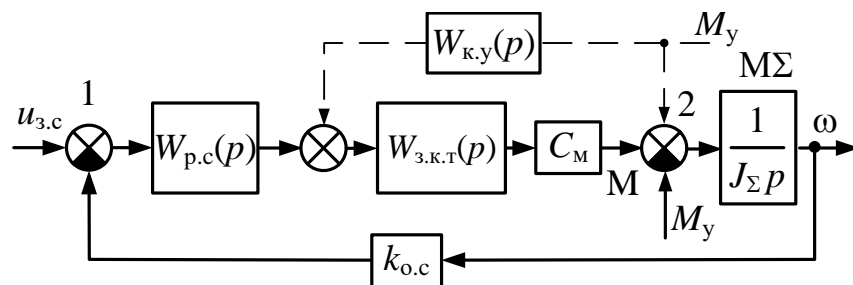


Рисунок 3.6 – Структурная схема контура скорости

Передаточная функция разомкнутого контура скорости:

$$W_{\text{раз.с}}(p) = W_{\text{р.с}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{з.к.т}}(p)k_{\text{о.с}}.$$

Найдя передаточную функцию регулятора получим регулятор пропорциональный (П-регулятор)

Структурная схема трехконтурной системы подчиненного регулирования представлена на рисунке 3.7.

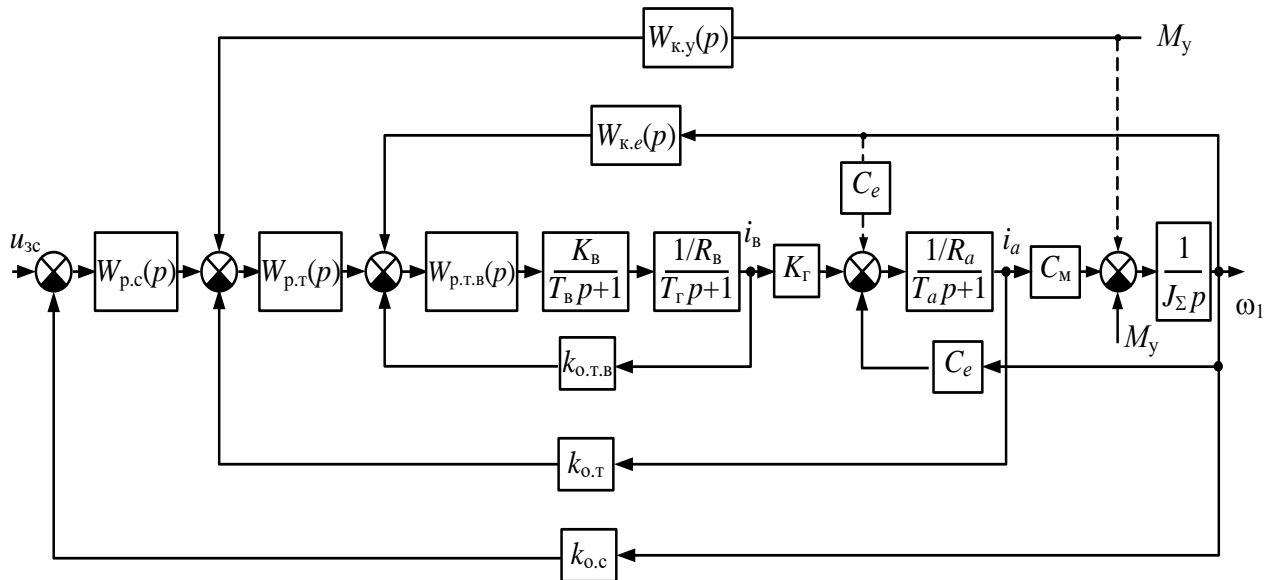


Рисунок 3.7 – Структурная схема трехконтурной системы подчиненного регулирования

Одномассовую систему, как правило, рассматривают в предварительных расчетах при синтезе, а дальнейший анализ проводят для двухмассовой электромеханической системы, которая включает структурную схему двухмассовой системы и электрической части электропривода по системе Г – Д. Двухмассовая структурная схема объекта управления без учета действия внутреннего демпфирования изображена на рисунке 3.8.

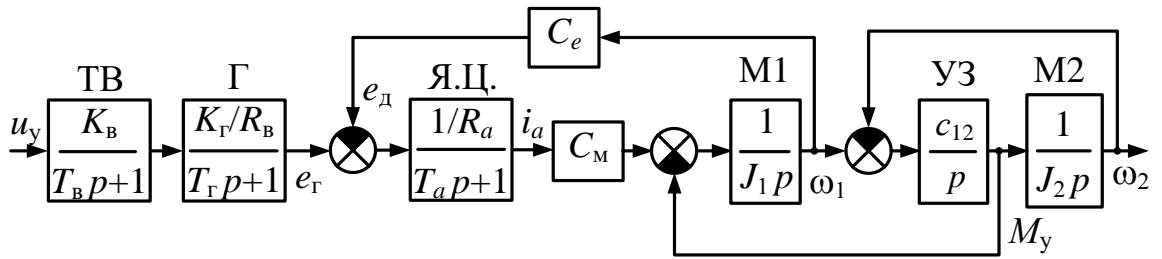


Рисунок 3.8 – Структурная схема двухмассовой электромеханической системы

Для двухмассового объекта регулирования могут использоваться многоконтурные СПР, т. е. от регулирования скорости двигателя переходят к регулированию скорости механизма. При этом для синтеза регуляторов временно пренебрегают перекрестными связями по ЭДС, упругому моменту и скорости механизма, которые будут компенсироваться в дальнейшем. Система электропривода в этом случае может быть четырех- либо пятиконтурная с дополнительными регуляторами упругого момента PM_y и скорости второй массы PC_2 (исполнительного механизма), на которые поступают сигналы обратных связей по этим координатам с соответствующими коэффициентами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе поставленная цель была достигнута путем выбора силовой части электропривода и расчета параметров, определяющих динамику электропривода.

Времена пусков и торможения, в соответствии с нагрузочными диаграммами, соизмеримы с временами статических рабочих режимов, поэтому были вычислены переходные процессы тока якорной цепи и ЭДС генератора по аналитическим зависимостям при пуске и торможении, построены уточненные нагрузочные диаграммы электропривода.

В результате выполнения ВКР было выявлено что разомкнутая система оказалась не эффективна, так как значения пусковых токов превышало допустимое значение. Для ограничения динамических нагрузок в механической части могут применяться такие системы управления, как системы подчиненного регулирования или последовательной коррекции координат.

При переходе к реальному электроприводу необходимо учитывать жесткости элементов кинематической схемы, моменты в упругих элементах (моменты упругие – M_y) и скорости рабочих механизмов. Моменты упругие могут достигать значений от двух до трех $(2 - 3) M_{доп}$, что приводит к поломке механической части.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

Г–Д – генератор – двигатель.

ТП–Д – тиристорный преобразователь – двигатель.

ТВ–Г–Д – тиристорный возбудитель – генератор – двигатель.

ПЧ–АД – преобразователь частоты – асинхронный двигатель.

НПЧ – непосредственный преобразователь частоты.

ЭМС – электромеханическая система.

СПР – система подчиненного регулирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кочетков, В. П. Электрический привод: учеб. пособие по выполнению курсовой работы / В.П. Кочетков, А.В. Коловский. – Сиб. Федер. Ун-т, ХТИ – филиал СФУ. – Абакан :Ред.-изд. Сектор ХТИ – филиала СФУ, 2013. - 128 с.
2. Кочетков, В. П. Основы электропривода: учеб. пособие. – Сиб. Федер. Ун-т, ХТИ – филиал СФУ. – Абакан : 2-е изд., испр., 2007. - 260 с.
3. Кочетков, В. П. Основы теории управления: учеб. пособие. – Абакан : изд. Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова, 2001. – 264 с.
4. Кочетков, В. П. Основы электромеханики: учеб. Пособие для студентов высш. учеб. Заведений / В. П. Кочетков, В. Я. Беспалов, Е. Я. Глушкин и др. ; под ред. В. П. Кочеткова. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2010. - 624 с.
5. Электрический привод : в 2 ч. Ч. 1 : лаб. Практикум / сост. Е. Я. Глушкин, А. В. Коловский ; Сиб. Федер. Ун-т, ХТИ – филиал СФУ. – Абакан : Ред.-изд. сектор ХТИ – филиала СФУ, 2013. – 130 с.
6. Современные проблемы разработки электропривода [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <https://moluch.ru/archive/114/30193>.
7. Москаленко, В. В. Электрический привод : учебник / В. В. Москаленко. - М.: ИНФРА-М, 2015. - 364 с.
8. Электропривод карьерного экскаватора –основные средства [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <https://os1.ru/article/7261-elektroprivod-karernogo-ekskavatora>.
9. Указания к расчету мощности и выбору электродвигателя [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <http://mylektsii.ru/3-12508.html>.
10. Элементы проектирования электроприводов [Электронный ресурс]. - Режим доступа : https://studref.com/359293/tehnika/elementy_proektirovaniya_elektroprivodov.

11. Обзор карьерных экскаваторов [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <http://magistraltrade.ru/obzor.html>.
12. Электропривод постоянного тока системы ТП–Д [Электронный ресурс]. - Режим доступа : https://revolution.allbest.ru/physics/00673106_0.html.
13. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники: В 3 - х т. Учебник для вузов. Том 2. - 4 -е изд. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. - СПб. : Питер, 2006. - 576 с.
14. Болдин, А. П. Основы научных исследований : учебник / А. П. Болдин, В. А. Максимов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Академия, 2014. - 352 с.
15. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. - 12-е изд., исправ. и доп. - М.: Юрайт, 2014. - 701 с.
16. С.Н. Вешеневский. “Характеристики двигателей в электроприводе”. изд. шестое, испр. Москва «Энергия», 2007. - 431 с.
17. Бекишев, Р. Ф. Электропривод: учебное пособие для академического бакалавриата / Р. Ф. Бекишев, Ю. Н. Дементьев. - 2-е изд. - М. : Издательство Юрайт, 2016. - 301 с.
18. Частотно-регулируемые асинхронные двигатели для экскаваторов [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <http://dislib.ru/elektrotehnika/13437-1-chastotno-reguliruemie-asinhronnie-dvigateli-dlya-ekskavatorov.php>.
19. Дементьев, Ю. Н. Электрический привод : учебное пособие для академического бакалавриата / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. - 2-е изд. - М. : Издательство Юрайт, 2016. - 223 с.
20. Электромагнитные переходные процессы [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <http://mirznanii.com/a/122428/elektromagnitnye-perekhodnye-protsessyю>.
21. Моделирование двухконтурной СПР [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <https://studfiles.net/preview/4414882/page:6>.

22. Капунцов, Ю. Д. Электрический привод промышленных и бытовых установок [Текст]: учебное пособие / Ю. Д. Капунцов. - 3-е изд., стереотипное. - М.: МЭИ, 2011. - 224 с.

23. Системы автоматизированного управления электроприводами: учеб. пособие; допущено МО Республики Беларусь / ред. : Ю. П. Петренко. - 2-е изд., испр. и доп. - Минск: Новое знание , 2007. - 394 с.

24. Определение времени возбуждения и самовозбуждения генератора постоянного тока и описание характеристики холостого хода [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <https://vunivere.ru/work14834>.

25. Острецов, В. Н. Электропривод и электрооборудование [Текст]: учебник и практикум для прикладного бакалавриата / В. Н. Острецов, А. В. Палицын. - М. : Издательство Юрайт, 2017. - 239 с.

26. Схемы генераторов постоянного тока и их характеристики [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/1201-skhemy-generatorov-postojannogo-toka-i.html>.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования

«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»
институт

Электроэнергетика
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Г.Н. Г. Н. Чистяков
подпись инициалы, фамилия

«11» 06 2018 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код – наименование направления

Двухдвигательный электропривод механизма поворота экскаватора

ЭКГ-8и
тема

Руководитель Г.Н. 11.06.18 профессор д. т. н.
подпись, дата должность, ученая степень

В. П. Кочетков
инициалы, фамилия

Выпускник Г.Н. 11.06.18
подпись, дата

В. А. Туртугешев
инициалы, фамилия

Нормоконтролер И.А. 13.06.18
подпись, дата

И. А. Кычакова
инициалы, фамилия

Абакан 2018