



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Факультет «Энергетический»
Кафедра «Электротехника и электромеханические системы»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, д.т.н., профессор
кафедры ЭПА


М.А. Григорьев
2016 г.

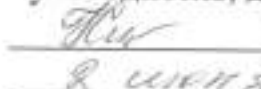
ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой,
д.т.н., профессор


С.Г. Воронин
16 06 2016 г.

Электропривод постоянного тока для шасси вилочного
электропогрузчика

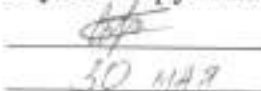
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ– 13.04.02.68.2016.411320. ВКР

Руководитель, доцент



Н.Ю.Сидоренко
8 июня 2016 г.

Автор

студент группы Э-207


В. В. Савин
30 мая 2016 г.

Нормоконтролер, ассистент



Р.М. Байтимеров
11 июня 2016 г.

Челябинск 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Факультет «Энергетический»
Кафедра «Электротехника и электромеханические системы»
Специальность «Автоматизированные электромеханические комплексы и
системы»

УТВЕРЖДАЮ:
Заведующий кафедрой,

д.т.н., профессор

 С.Г. Воронини

15.04.16 2016 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу студента

Савин Василий Вячеславович

Группа Э-207

1 Тема работы

Электропривод постоянного тока для шасси вилочного электропогрузчика,
утверждена приказом по университету от 15 апреля 2016 г. № 661.

2 Срок сдачи студентом законченной работы 10 июня 2016 г.

3 Исходные данные к работе

Номинальная мощность, кВт	4,6
Номинальное напряжение питания, В	40
Номинальный ток якорной цепи, А	143,7
Номинальная скорость вращения, об/мин	3000
Номинальное напряжение питания, В	40
Конструктивная постоянная	26,75

число пар полюсов	2
число параллельных ветвей якорной цепи, В	1
число витков обмотки возбуждения	430
число витков обмотки якоря	2
ток обмотки возбуждения, А	1,788
сопротивление якорной цепи, Ом	0,1
сопротивление обмотки возбуждения, Ом	1,78
коэффициент перекрытия	0,57
момент нагрузки, Нм	14,6
момент инерции, кг · м ²	0,017
коэффициент рассеяния	1,15

4 Перечень вопросов, подлежащих разработке

Дополнительные расчеты параметров двигателя;

Вывод уравнения ДПТ для расчета безреостатного пуска на холостом ходу;

Моделирование безреостатного пуска двигателя постоянного тока;

Аналитический расчет переходного процесса двигателя;

Моделирование динамических режимов работы двигателя с учетом индуктивностей;

Выбор преобразователя;

Расчет постоянной времени и выбор датчика скорости;

Синтез и предварительная настройка параметров регуляторов;

Выбор типа регуляторов и расчетов их параметров;

8 Построение характеристик;

6 Дата выдачи задания «10» марта 2016 г.

Исполнитель _____ | Сидоренко Н.Д.
(подпись) (расшифровка подписи)

Кто принял к исполнению _____ | Савин В.Р.
(подпись студента) (расшифровка подписи)

АННОТАЦИЯ

Савин В. В. Электропривод постоянного тока для шасси вилочного электропогрузчика. – Челябинск: ЮУрГУ, Э-207, 2016, 36 с., 24 иллюстрации, 5 таблиц, библиографический список – 4 наименования.

Данная дипломная работа заключается в разработке электропривода для шасси вилочного электропогрузчика.

Были проведены дополнительные расчеты для создания моделей и расчета безреостатного пуска на холостом ходу, после чего был проведен аналитический расчет для подтверждения правильности составленной модели. Далее была составлена модель и проведено моделирование динамических режимов работы двигателя с учетом индуктивностей.

После чего был проведен синтез электропривода, где присутствовал выбор преобразователя, расчет постоянной времени и выбор датчика скорости. После чего мы осуществили синтез и предварительную настройку параметров регуляторов и в конце работы были построены статическая, электромеханическая и механическая характеристики.

В завершении всей работы сделан вывод по проделанной работе.

				13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР			
Имя	№ докум.	Подпись	Дата	Электропривод постоянного тока для шасси вилочного электропогрузчика	Лист	Лист	Листов
Савин			30.05.16				
Сидоренко			2.06.16			3	36
Григорьев			11.06.16				
Войтинцов			11.06.16				
Варнин			16.06.16				
					ЮУрГУ Кафедра ЭМЭМС		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	34
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	35

									Лист
									5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР				

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день на многих предприятиях затруднено обслуживание складов. Данная ситуация возникает в связи с тем, что современные предприятия укомплектованы вилочными погрузчиками производства фирмы «Балканкар» старого образца. Основной причиной неработоспособности таких погрузчиков является выход из строя двигателя привода колёсной пары. Произвести ремонт этих машин невозможно, так как предприятие, обслуживающее эти двигатели, больше не выпускает соответствующие детали и ремонт не целесообразен с точки зрения экономики.

На основании предыдущей квалификационной работы нами был рассчитан двигатель, исходные данные которого были взяты у ранее используемого в данных погрузчиках прототипа с мощностью 4,6 киловатт, напряжением, подаваемым с аккумулятора в 40 вольт, и частотой вращения 3000 оборотов в минуту.

Целью данной выпускной квалификационной работы является расчет привода шасси для исследуемого двигателя. В соответствии с поставленной целью было решено провести анализ динамических свойств двигателя. Анализ проведен с помощью трёх моделей, демонстрирующих переходный процесс в двигателе.

Были установлены требования, которым должен соответствовать двигатель, а именно: разгон за 3,2 секунды (без груза) и скорость 17 км/час (без груза).

Для расчета использовались специализированные прикладные программы Mathcad, VisSim.

						Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР	

1 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ

Для проведения моделирования потребовалось провести дополнительные расчеты параметров двигателя.

1.1 Индукция в расчетных сечениях магнитной цепи

Индукция в воздушном зазоре:

$$B_{\delta n} = \Phi_{\delta n} / S_{\delta} = 4,524 \cdot \frac{10^{-3}}{7,61} \cdot 10^{-3} = 0,597 \text{ Тл.} \quad (1)$$

Индукция в сечении зубцов якоря:

$$B_z = \Phi_{\delta n} / S_z = 4,524 \cdot \frac{10^{-3}}{3,149} \cdot 10^{-3} = 1,106 \text{ Тл.} \quad (2)$$

Индукция в спинке якоря:

$$B_j = \Phi_{\delta n} / 2S_j = 4,524 \cdot 10^{-3} / 2 \cdot 2,666 \cdot 10^{-3} = 0,848 \text{ Тл.} \quad (3)$$

Индукция в сердечнике главного полюса:

$$B_r = \sigma_r \Phi_{\delta n} / S_{\delta r} = 1,15 \cdot 4,524 \cdot \frac{10^{-3}}{5,783} \cdot 10^{-3} = 0,9 \text{ Тл.} \quad (4)$$

По рекомендациям [2, приложение 1] для стали 3411 не должно превышать 1.5 Тл.

Индукция в станине:

$$B_c = \sigma_r \Phi_{\delta n} / 2S_c = 1,15 \cdot 4,524 \cdot 10^{-3} / 2 \cdot 2,001 \cdot 10^{-3} = 1,3 \text{ Тл.} \quad (5)$$

Индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной:

$$B_{cn} = B_r = 0,9 \text{ Тл.} \quad (6)$$

1.2 Магнитные напряжения

Магнитное напряжение в воздушном зазоре:

$$F_{\delta} = 0,8B_{\delta}L_{\delta}10^6 = 0,8 \cdot 0,6 \cdot 9,59 \cdot 10^{-4} \cdot 10^6 = 458,115 \text{ А.} \quad (7)$$

Коэффициент вытеснения потока:

$$k_z = t_{z1}l_{\delta 1} / b_z l_{ct} = 0,016 \cdot \frac{0,16}{6,907} \cdot 10^{-3} \cdot 0,152 = 1,852. \quad (8)$$

По приложению [2, приложение 1] для стали 2312 $H_z = 350 \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

					13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

Магнитное напряжение зубцов якоря:

$$F_z = H_z L_z = 350 \cdot 0,019 = 6,65 \text{ А.} \quad (9)$$

По приложению [2, приложение 1] для стали 3411 $H_j = 140 \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

Магнитное напряжение ярма якоря:

$$F_j = H_j L_j = 86 \cdot 0,028 = 3,92 \text{ А.} \quad (10)$$

По приложению [2, приложение 1] для стали 3411 $H_r = 164 \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

Магнитное напряжение между главным полюсом и станиной:

$$F_{\text{сп}} = 0,8 B_r L_{\text{сп}} 10^6 = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 1,321 \cdot 10^{-4} \cdot 10^6 = 94,99 \text{ А.} \quad (11)$$

Магнитная напряженность станины:

По приложению [2, приложение 1] для СТЗ $H_c = 1350 \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

Магнитное напряжение сердечника главного полюса:

$$F_c = H_c L_c = 1350 \cdot 0,076 = 102,6 \text{ А.} \quad (12)$$

Суммарная МДС на полюс:

$$\begin{aligned} F_{\Sigma} &= F_{\delta} + F_z + F_j + F_{\text{сп}} + F_c = \\ &= 458,115 + 6,65 + 5,326 + 94,99 + 102,6 = 666,274 \text{ А.} \end{aligned} \quad (13)$$

Расчет характеристик намагничивания машины приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет характеристик намагничивания машины

Расчетная величина	Расчетная формула	Ед. величины	$0,5\Phi_{\delta n}$	$0,75\Phi_{\delta n}$	$0,9\Phi_{\delta n}$	$\Phi_{\delta n}$	$1,1\Phi_{\delta n}$	$1,15\Phi_{\delta n}$	$1,5\Phi_{\delta n}$
			4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЭДС	E	B	19	28,5	34,2	38	41,8	43,7	57
Магнитный поток	$\Phi_{\delta n} = 60 E_n a / p N n_n$	Bб	0,002	0,003	0,0041	0,004	0,004	0,005	0,006
Индукция в воздушном зазоре	$B_{\delta} = \Phi_{\delta n} / \alpha_{\delta} \tau l_{\delta}$	Тл	0,299	0,448	0,538	0,6	0,657	0,687	0,885
МДС воздушного зазора	$F_{\delta} = 0,8 L_{\delta} B_{\delta} 10^6$	A	229	343,5	412,5	458,1	503,7	527	679
Индукция в зубцах якоря	$B_z = k_z B_{\delta}$	Тл	0,553	0,829	0,996	1,106	1,216	1,272	1,639

13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР

Лист

8

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напряженность в зубцах якоря для стали 2312	H_z	А/м	81	165	270	350	460	730	4700
МДС зубцов	$F_z = L_z H_z$	А	1,539	3,135	5,13	6,65	8,84	13,87	89,3
Индукция в спинке якоря	$B_j = \Phi_\delta / ZS_j$	Тл	0,424	0,636	0,764	0,848	0,932	0,975	1,257
Напряженность в спинке якоря	H_j	А/м	68	86	96	140	190	240	400
МДС ярма якоря	$F_j = L_j H_j$	А	1,904	2,408	2,668	3,92	5,32	6,72	11,2
Поток главного полюса	$\Phi_r = \sigma_r \Phi_\delta$	Вб	0,002	0,003	0,0046	0,005	0,005	0,005	0,007
Индукция в сердечнике главного полюса	$B_r = \Phi_r / S_r$	Тл	0,449	0,674	0,809	0,899	0,988	1,034	1,332
Индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной	$B_{сп} = B_r$	Тл	0,449	0,674	0,809	0,899	0,988	1,034	1,332
МДС воздушного зазора между гл. полюсом и станиной	$F_{сп} = 0,8 B_{сп} L_{сп} 10^6$	А	47,49	71,24	85,53	94,99	104,4	109,2	140,8
Индукция в станине	$B_c = \sigma_r \Phi_\delta / ZS_z$	Тл	0,65	0,975	1,17	1,3	1,43	1,495	1,925
Напряженность в станине	H_c	А/м	488	798	1090	1350	2090	2890	9400
МДС станины	$F_c = L_c H_c$	А	37,08	60,64	82,84	120,6	158,8	219,6	1474
Сумма МДС всех участков цепи	$F_\delta + F_z + F_j + F_{сп} + F_c = \Sigma F$	А	317	481	588,6	666,2	781	876,5	2395

13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР

Лист

9

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

2 РАСЧЕТ И СОЗДАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Исходные данные для моделирования приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Исходные данные

Обозначение	Наименование	Значение
P_n	Мощность, кВт	4,6
U	Напряжение, В	40
I_n	Ток якорной цепи, А	143,7
n	Частота вращения, об/мин	3000
C_0	Конструктивная постоянная	26,75
p	Число пар полюсов	2
a	Число параллельных ветвей якорной цепи	1
W_b	Число витков ОБ	430
W_a	Число витков ОЯ	2
$I_{вн}$	Ток обмотки возбуждения, А	1,788
R_a	Сопротивление якорной цепи, Ом	0,012
R_p	Пусковое сопротивление, Ом	0,1
R_b	Сопротивление ОБ, Ом	1,78
α	Полюсное перекрытие	0,57
M_n	Момент нагрузки, Нм	14,6
J	Момент инерции, кгм ²	0,017
γ	Коэффициент рассеяния	1,15

Таблица 3 – Зависимость магнитного потока от М.Д.С.

F, A	533,13	583,8	623,97	668,9	757,13	807,869	2395
$\Phi, 10^{-3} Вб$	2,26	3,39	4,07	4,52	4,97	5,2	6,7

2.1 Вывод уравнения ДПТ для расчета безреостатного пуска на холостом ходу

Схема двигателя постоянного тока параллельного возбуждения показана на рисунке 1.

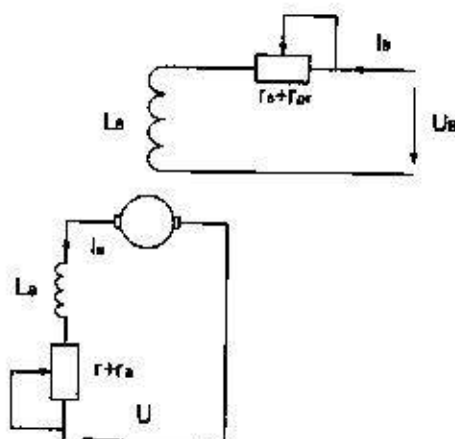


Рисунок 1 – Схема двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Уравнение баланса напряжений примет вид:

$$U = r_a \cdot i_a + L \frac{di_a}{dt} + \omega \cdot \psi_{ad}, \quad (2.1)$$

$$U = r_b \cdot i_b + \frac{d\psi_b}{dt}, \quad (2.2)$$

где $d\psi_b/dt$ – ЭДС возбуждения;

$\psi_b = L_{\omega} i_b$ – потокосцепление ОБ;

r_a – сопротивление ОБ;

r – сопротивление якорной цепи;

$E = -\omega \cdot \psi_{ad}$ – ЭДС вращения;

$\psi_{ad} = L_{ad} i_b$ – потокосцепление якоря и ОБ;

$d\psi/dt$ – ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции;

$\psi = (L_k + L_g + L_a) \cdot i_a + 2 \cdot (L_{kg} + L_{ka} + L_{ga}) \cdot i_a$ – потокосцепление цепи якоря;

L_{kg}, L_{ka}, L_{ga} – взаимоиндуктивности обмоток: компенсационной и добавочной, компенсационной и обмотки якоря, добавочной и обмотки якоря.

Примем ряд допущений, чтобы систему дифференциальных уравнений (2.1, 2.2) можно было свести к линейной.

1. Пренебрежём взаимоиндуктивностями обмоток добавочных полюсов и компенсационных обмоток.

2. Активные сопротивления и собственные индуктивности обмоток складываются.

3. Рассматриваем безреостатный пуск без нагрузки, моментом холостого хода пренебрегаем, считаем, что в момент подключения якоря к источнику питания переходный процесс в ОБ уже закончился.

4. Так как реакция якоря не влияет на основной магнитный поток машины, то при пуске $\psi_{ad} = \text{const}$.

5. ЭДС вращения и электромагнитный момент являются линейной функцией, так как индуктивности – const, а насыщение магнитной цепи – неизменное.

									Лист
									11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР				

В результате допущений имеем систему линейных дифференциальных уравнений, описывающих безреостатный пуск двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

$$U = r_a \cdot i_a + L_{aa} \cdot \frac{di_a}{dt} + K_\phi \cdot \omega, \quad (2.3)$$

$$K_\phi \cdot i_a = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.4)$$

2.2 Моделирование безреостатного пуска двигателя постоянного тока

По представленным выше уравнениям была составлена модель в пакете VisSim (см рис. 2).

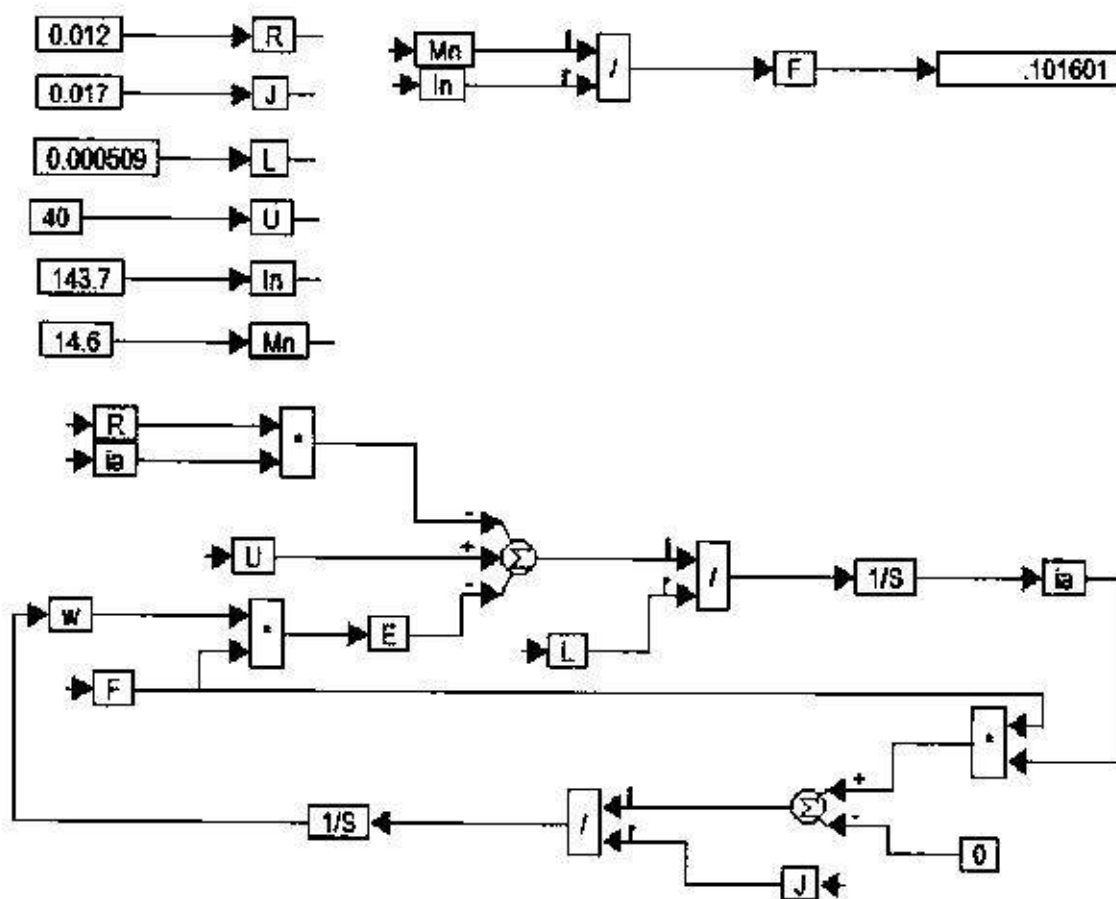


Рисунок 2 – Модель безреостатного пуска ДПТ

По этой модели был промоделирован пуск двигателя на холостом ходу, при моменте инерции двигателя $J=0,017 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, график которого представлен на рисунке 3.

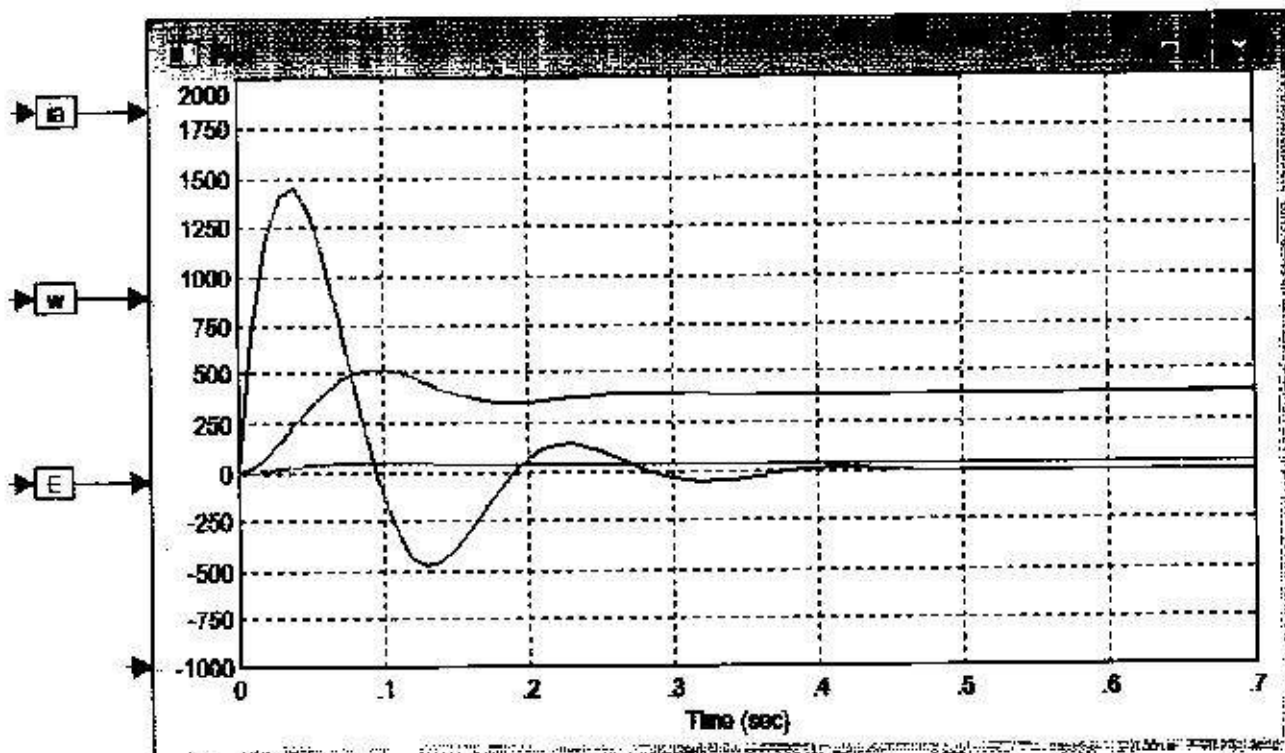


Рисунок 3 – Переходный процесс пуска двигателя на холостом ходу

В результате моделирования получили зависимость тока от времени и скорости от времени. При моделировании получен график, который представлен на рисунке 3. На графике мы видим колебательный процесс, длящийся 0,4 секунды, по истечении которых устанавливается скорость, несколько превышающая номинальную, полученную в результате классического электромагнитного расчета по методике Копылова. Так как ЭДС сохраняет свой знак, совпадающий со знаком скорости, и его величина близка к величине напряжения, то колебательность, с точки зрения привода можно пояснить близкими значениями $T_{эм} = \frac{L}{R_e}$ и $T_{мех} = f(j)$. Ток в диапазоне времени от 0,1 до 0,2 секунд становится отрицательным и кратковременно появляется момент торможения. В системе электропривода с транзисторным преобразователем, возврат тока в аккумулятор затруднён, этот ток может сбрасываться обратно в аккумулятор через обратные диоды. По окончании переходного процесса, ток становится равным значению тока холостого хода. Такой переходный процесс не является оптимальным и требует применения регулятора.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР

Лист

13

Но наш двигатель не работает на холостом ходу и момент инерции выше за счет нагрузки и статического момента холостого хода. Тогда проведем моделирование при $M_n=14,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Графики тока, ЭДС и частоты вращения показаны на рисунке 4.

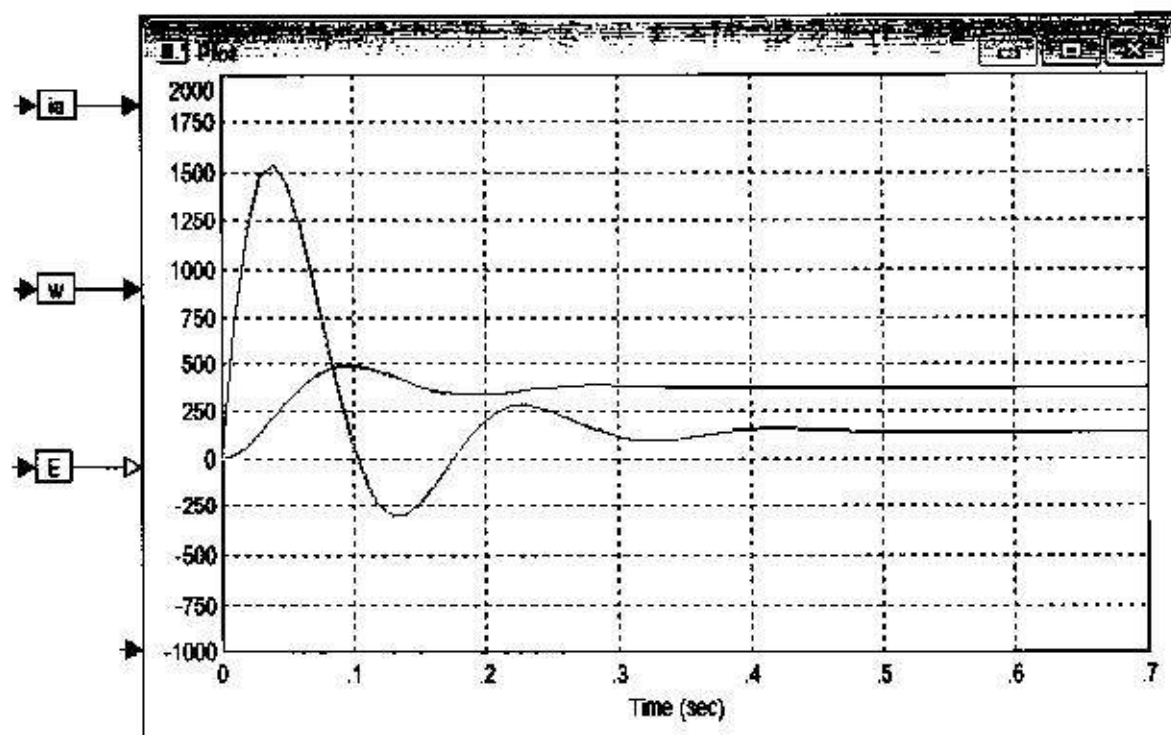


Рисунок 4 – Графики токов, частоты вращения и ЭДС

По ним определили время переходного процесса 0,5 секунды.

Установившееся значение выхода $I_a=143,2 \text{ А}$, $\omega=376,7 \text{ рад/с}$.

2.3 Аналитический расчет переходного процесса двигателя

С целью подтверждения полученных выше результатов и обнаружения возможных ошибок в модели был проведен аналитический расчет на холостом ходу и без нагрузки.

Для этого примем ряд допущений, чтобы систему дифференциальных уравнений (2.3–2.4) можно было свести к линейной.

1. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения является коллекторным, и при расчете мы не будем учитывать коммутацию на коллекторе.

2. Не будем учитывать вихревые токи.

3. Не учитываются колебания питающего напряжения. Считаем его строго неизменным

$$U = r_a \cdot i_a + L_{\sigma\sigma} \cdot \frac{di_a}{dt} + K_\phi \cdot \omega, \quad (2.5)$$

$$K_\phi \cdot i_a = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.6)$$

где

$$K_\phi = C_0 \cdot \Phi = 26,75 \cdot 0,0045 = 0,12. \quad (2.7)$$

Возьмем от первого уравнения системы (2.5) производную по времени

$$L_{\sigma\sigma} \cdot \frac{d^2 i_a}{dt^2} + r_a \cdot \frac{di_a}{dt} + K_\phi \cdot \frac{d\omega}{dt} = 0, \quad (2.8)$$

т.к.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K_\phi}{J} \cdot i_a, \quad (2.9)$$

$$\frac{d^2 i_a}{dt^2} + \frac{r_a}{L_{\sigma\sigma}} \cdot \frac{di_a}{dt} + \frac{1}{L_{\sigma\sigma} \cdot C} \cdot i_a = 0, \quad (2.10)$$

где $C = \frac{J}{K_\phi^2}$ — динамическая емкость.

Решим уравнение (2.10).

Найдем корни характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \beta^2}, \quad (2.11)$$

где

$$\alpha = \frac{R_a}{2 \cdot L_{\sigma\sigma}} = \frac{0,012}{2 \cdot 0,000509} = 11,788, \quad (2.12)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{C \cdot L_{\sigma\sigma}}} = \sqrt{\frac{0,12^2}{0,017 \cdot 0,000509}} = 40,922, \quad (2.13)$$

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \beta^2} = -11,788 \pm \sqrt{11,788^2 - 40,922^2} = -11,788 \pm 39,187. \quad (2.14)$$

Получили, что $p_1 = 27,399$, $p_2 = 50,975$.

Решение для тока якоря будет представлено в виде:

$$i_a = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t} = A_1 \cdot e^{27,3t} + A_2 \cdot e^{-50,9t}; \quad (2.15)$$

а для частоты вращения якоря:

$$\omega = \frac{1}{K_\phi} \cdot \left(U - r_a \cdot i_a - L_{aa} \cdot \frac{di_a}{dt} \right), \quad (2.16)$$

$$\omega = \frac{1}{K_\phi} \cdot \left(U - r_a \cdot (A_1 \cdot e^{27,3t} + A_2 \cdot e^{-50,9t}) - L_{aa} \cdot (27,3 \cdot A_1 \cdot e^{27,3t} - 50,9 \cdot A_2 \cdot e^{-50,9t}) \right), \quad (2.17)$$

при $t = 0$, $i_a(0) = 0$, $\omega(0) = 0$.

$$\begin{cases} 0 = A_1 + A_2 \\ 0 = \frac{1}{K_\phi} \cdot (U - A_1(r_a + 27,3 \cdot L_{aa}) - A_2(r_a - 50,9 \cdot L_{aa})) \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} A_1 = -A_2 \\ (27,3 \cdot A_2 + 50,9 \cdot A_2) = -\frac{U}{L_{aa}} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$A_2 = -\frac{U}{L_{aa} \cdot 78,3} = -\frac{40}{0,0105 \cdot 78,3} = 1003. \quad (2.20)$$

Значит $A_1 = -1003$.

Окончательные значения для тока и частоты вращения якоря

$$i_a = -1003 \cdot (e^{27,3t} - e^{-50,9t}), \quad (2.21)$$

$$\omega = 322,29 - 116,169 \cdot e^{27,3t} - 216,125 \cdot e^{-50,9t}. \quad (2.22)$$

Графики тока и частоты вращения якоря построены в программе MathCad и показаны на рисунке 5.

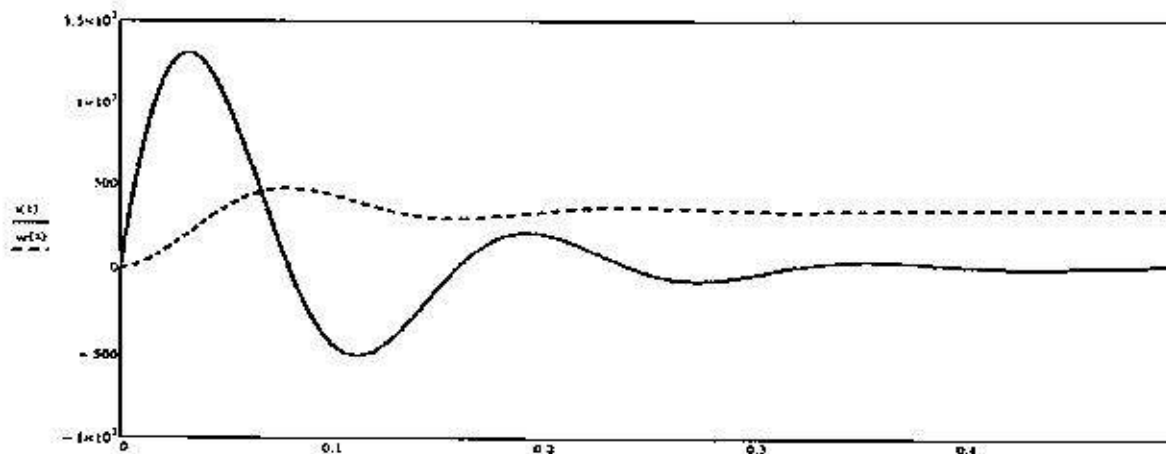


Рисунок 5 – График тока и частоты вращения

График тока и скорости во время переходного процесса имеет колебательный характер затухания, происходящий за 0,4 секунды, скачок тока до 1390 А. Результаты в пакете VisSim и MathCad по расчету и модели практически совпадают, что может подтвердить, что система составлена верно.

2.4 Моделирование динамических режимов работы двигателя с учетом индуктивностей

В представленном выше аналитическом расчете поток и индукция рассеяния якоря принимаются за постоянные значения. Также не присутствует переходный процесс в обмотке возбуждения. Интересно посмотреть, каково влияние обмотки возбуждения на переходный процесс, а также влияние изменения потока в соответствии с кривой намагничивания стали, а также, учитывая влияния взаимоиндуктивности между обмотками якоря и обмотками возбуждения, для проведения такого расчета опишем двигатель постоянного тока следующими уравнениями. Схема двигателя постоянного тока параллельного возбуждения показана на рисунке 1. В данной системе уравнений учтены допущения из пункта 2.3.

Переходный процесс в двигателе постоянного тока описывается следующими уравнениями:

$$U = C_0 \cdot \Phi \cdot \omega + i_a \cdot (r_a + r) + L_{a\sigma} \cdot \frac{di_a}{dt} + \frac{d\psi_{a\sigma}}{dt}, \quad (2.23)$$

$$U_B = i_B \cdot (r_B + r_{pa}) + L_{B\sigma} \cdot \frac{di_B}{dt} + \frac{d\psi_{B\sigma}}{dt}, \quad (2.24)$$

$$M_3 = C_0 \cdot \Phi \cdot i_a, \quad (2.25)$$

$$M_3 - M_H = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.26)$$

где i_a – ток якоря;

i_B – ток возбуждения;

U – напряжение питания на якоре;

U_B – напряжение питания ОБ;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР

Лист

17

C_0 – коэффициент, зависящий от типа обмотки и конструкции машины;

r_a – сопротивление цепи обмотки якоря;

r – пусковое сопротивление;

L_{aa} – индуктивность рассеяния якорной обмотки;

L_{oo} – индуктивность рассеяния ОВ;

ψ_{aq} – поперечная составляющая потокосцепления якоря;

r_o – сопротивление ОВ;

r_r – регулировочное сопротивление в цепи ОВ;

ψ_o – потокосцепление ОВ, соответствующее результирующему потоку по продольной оси;

M_e – электромагнитный момент;

M_n – момент нагрузки;

ω – круговая частота.

Магнитный поток Φ есть некоторая нелинейная функция – $\Phi = f(F_o, F_a)$,

где $F_a = W_a \cdot i_a$ – М.Д.С. возбуждения;

$F_o = \alpha \cdot W_o \cdot i_o / (2 \cdot a \cdot p) = W_o' \cdot i_o$ – М.Д.С. реакции якоря;

где W_o – число витков ОВ;

W_a – число витков обмотки якоря.

Полные производные от потокосцеплений, входящих в систему (2.23–2.26), можно представить в виде:

$$\frac{d\psi_{aq}}{dt} = \frac{\partial \psi_{aq}}{\partial i_a} \cdot \frac{di_a}{dt} + \frac{\partial \psi_{aq}}{\partial i_b} \cdot \frac{di_b}{dt} \quad (2.27)$$

$$\frac{d\psi_b}{dt} = \frac{\partial \psi_b}{\partial i_b} \cdot \frac{di_b}{dt} + \frac{\partial \psi_b}{\partial i_a} \cdot \frac{di_a}{dt} \quad (2.28)$$

Полученные при этом частные производные называют динамическими индуктивностями и взаимоиндуктивностями:

					13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

$\frac{\partial \psi_{aq}}{\partial i_{aq}} = L_{aq}(F_B, F_a)$ – динамическая индуктивность обмотки якоря;

$\frac{\partial \psi_{aq}}{\partial i_a} = M_{aq}(F_B, F_a)$ – динамическая взаимоиנדуктивность между обмоткой якоря и ОВ;

$\frac{\partial \psi_B}{\partial i_B} = L_B(F_B, F_a)$ – динамическая индуктивность ОВ;

$\frac{\partial \psi_B}{\partial i_a} = M_{aB}(F_B, F_a)$ – динамическая взаимоиנדуктивность между обмоткой якоря и ОВ.

Методика расчета динамических индуктивностей приведена в учебном пособии С.З. Зильберман «Математическое моделирование электрических машин» страница 15–16. Мы же воспользуемся конечными формулами.

$$L_B = p \cdot W_B^2 \cdot \frac{\Phi(F_B + F_a) - \Phi(F_B - F_a)}{2 \cdot F_a} \quad (2.29)$$

$\Phi(F_B + F_a)$ и $\Phi(F_B - F_a)$ возьмем из зависимости $\Phi(F)$, которая приведена на рисунке 6.

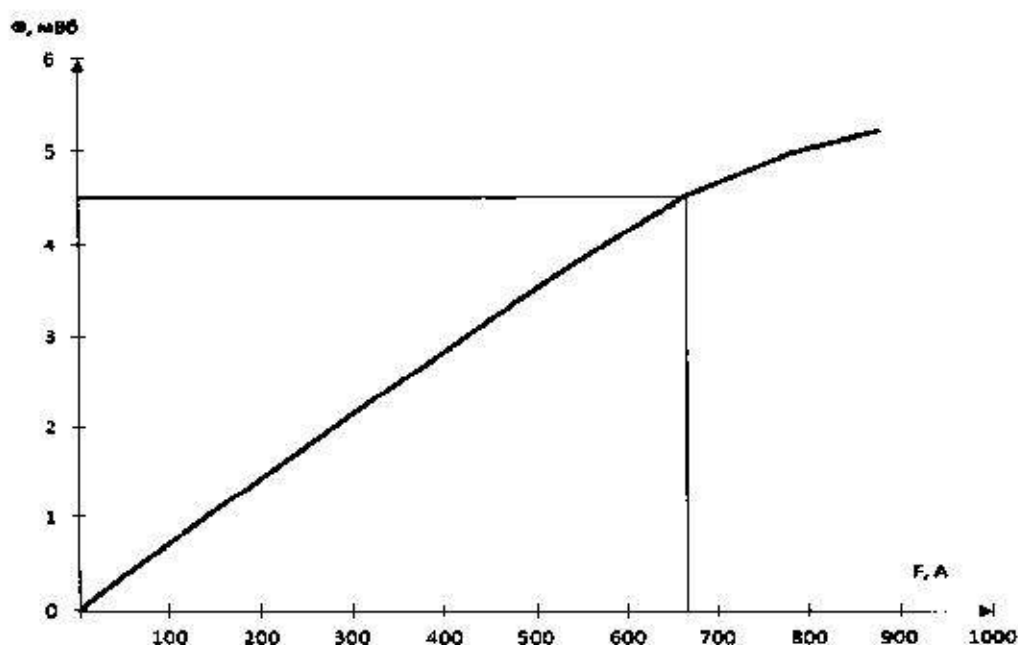


Рисунок 6 – Зависимость магнитного потока Φ от М.Д.С.

Для индуктивности якоря воспользуемся соотношением

$$L_{aq} = \left(\frac{W'_a}{W_a} \right)^2 * \frac{L_a}{3}, \quad (2.30)$$

Что касается взаимной индуктивности, то согласно принципу взаимности – $M_{ab} = M_{ba}$

$$M_{ab} = p \cdot W_b \cdot W'_a \cdot \frac{\left(\frac{\Phi(F_b + F_a) - \Phi(F_b - F_a)}{2} - \Phi \right)}{F_a}, \quad (2.31)$$

где Φ – результирующий магнитный поток воздушного зазора, соответствующий полюсному делению.

$$\Phi = \frac{1}{2 \cdot F_a} \cdot \int_{F_b - F_a}^{F_b + F_a} \Phi(F) dF. \quad (2.32)$$

Определим поток Φ по методу Гаусса, который является очень точным для двух точек, и погрешность при расчете минимальна:

$$\Phi = 0,5 \cdot (\varphi(t_0) + \varphi(t_1)), \quad (2.33)$$

где $\varphi(t) = \Phi(F_a t + F_a)$ и $t_0 = -1/\sqrt{3}$; $t_1 = 1/\sqrt{3}$.

Для определения $L_{a\sigma}$ $L_{a\sigma}$, индуктивности рассеяния якорной обмотки и ОВ, воспользуемся зависимостью Уманского-Ливилля, откуда и найдем $L_{a\sigma}$ и $L_{b\sigma}$.

$$L_{a\sigma} = \frac{\gamma \cdot U}{p \cdot n \cdot I_{як}} = \frac{0,57 \cdot 40 \cdot 60}{2 \cdot 3000 \cdot 143,7 \cdot \pi \cdot 2} = 5,095 \cdot 10^{-4} \text{ мГн}, \quad (2.34)$$

$$L_{b\sigma} = \frac{\gamma \cdot U}{p \cdot n \cdot I_{ан}} = \frac{0,57 \cdot 40 \cdot 60}{2 \cdot 3000 \cdot 1,788 \cdot \pi \cdot 2} = 0,041 \text{ мГн}. \quad (2.35)$$

Теперь подставим (2.23–2.35) в первых два уравнения (2.25–2.26) получим:

$$U - C_0 \cdot \Phi \cdot \omega + i_a \cdot (r_a + r) = (L_{a\sigma} + L_{aq}) \cdot \frac{di_a}{dt} + M_{ba} \cdot \frac{di_b}{dt}, \quad (2.36)$$

$$U_b - i_b \cdot (r_b + r_{pa}) = M_{ba} \cdot \frac{di_a}{dt} + (L_{b\sigma} + L_b) \cdot \frac{di_b}{dt}. \quad (2.37)$$

Для определения производных по току найдем определитель системы:

$$\Delta = (L_{a\sigma} + L_{aq}) \cdot (L_{b\sigma} + L_b) - M_{ba}^2, \quad (2.38)$$

									Лист
									20
Изн.	Лист	№ докум.	Повпись	Дата	13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР				

и частные определители:

$$\Delta_1 = (U - C_0 \cdot \Phi \cdot \omega - i_a \cdot (r_a + r)) \cdot (L_{в\sigma} + L_{в}) - (U_{в} - i_{в} \cdot (r_{в} + r_{па})) \cdot M_{ва}, \quad (2.39)$$

$$\Delta_2 = -(U - C_0 \cdot \Phi \cdot \omega - i_a \cdot (r_a + r)) M_{ва} + (U_{в} - i_{в} \cdot (r_{в} + r_{па})) \cdot (L_{а\sigma} + L_{аq}). \quad (2.40)$$

Тогда токи будут равны:

$$i_a = \int \left(\frac{\Delta_1}{\Delta} \right) dt, \quad (2.41)$$

$$i_{в} = \int \left(\frac{\Delta_2}{\Delta} \right) dt. \quad (2.42)$$

Частота вращения ротора определится так:

$$\omega = \int \left(\frac{C_0 \cdot \Phi \cdot i_a - M_{н}}{J} \right) dt. \quad (2.43)$$

2.4.1 Структурная схема с учетом индуктивностей

По вышеизложенным уравнениям составим структурную схему в VisSim, которая показана на рисунках 7–13.

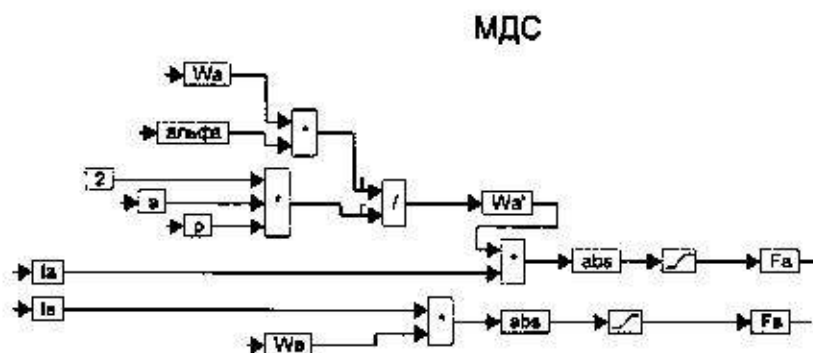


Рисунок 7 – Блок МДС

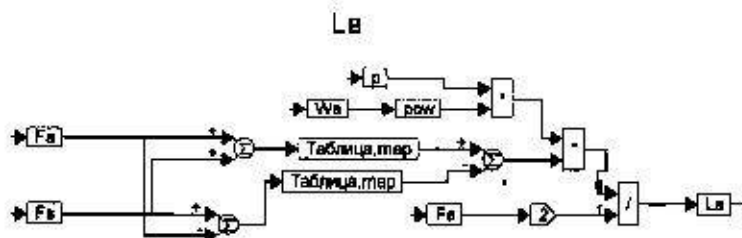


Рисунок 8 – Блок динамической индуктивности обмотки возбуждения

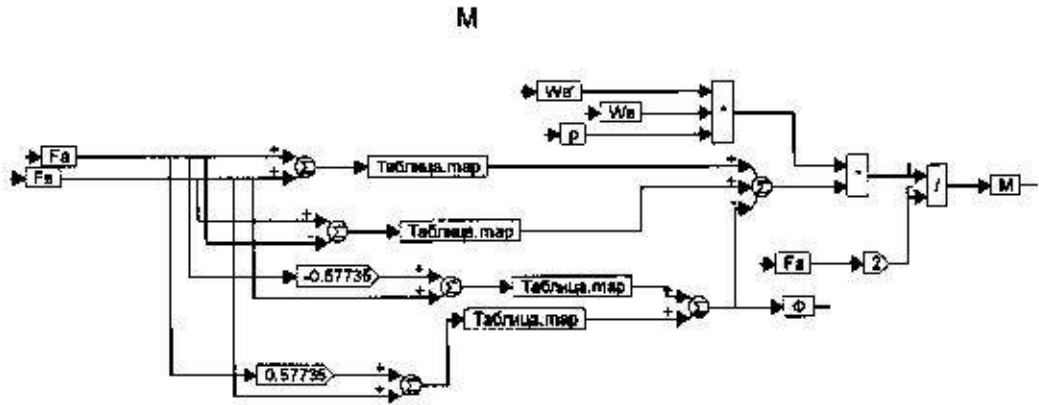


Рисунок 9 – Блок взаимной индуктивности

Определитель

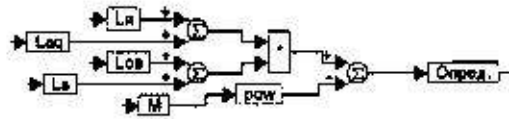


Рисунок 10 – Блок определителя

Определитель 1

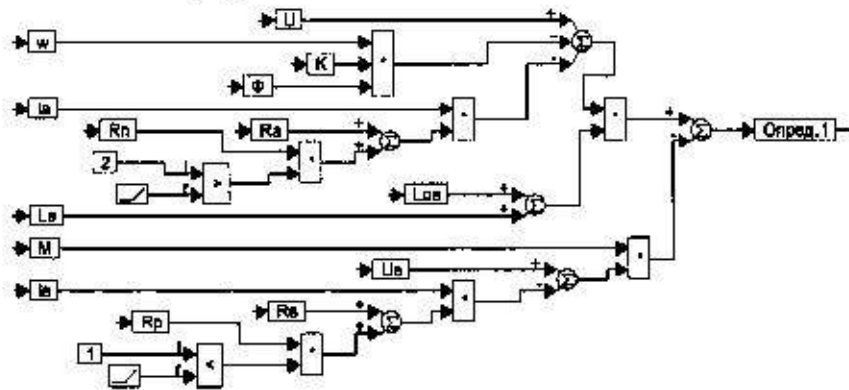


Рисунок 11 – Блок определителя 1

Определитель 2

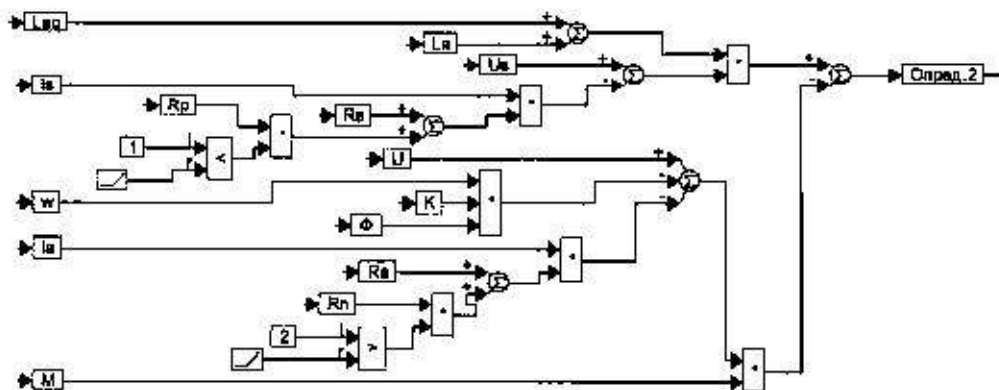


Рисунок 12 – Блок определителя 2

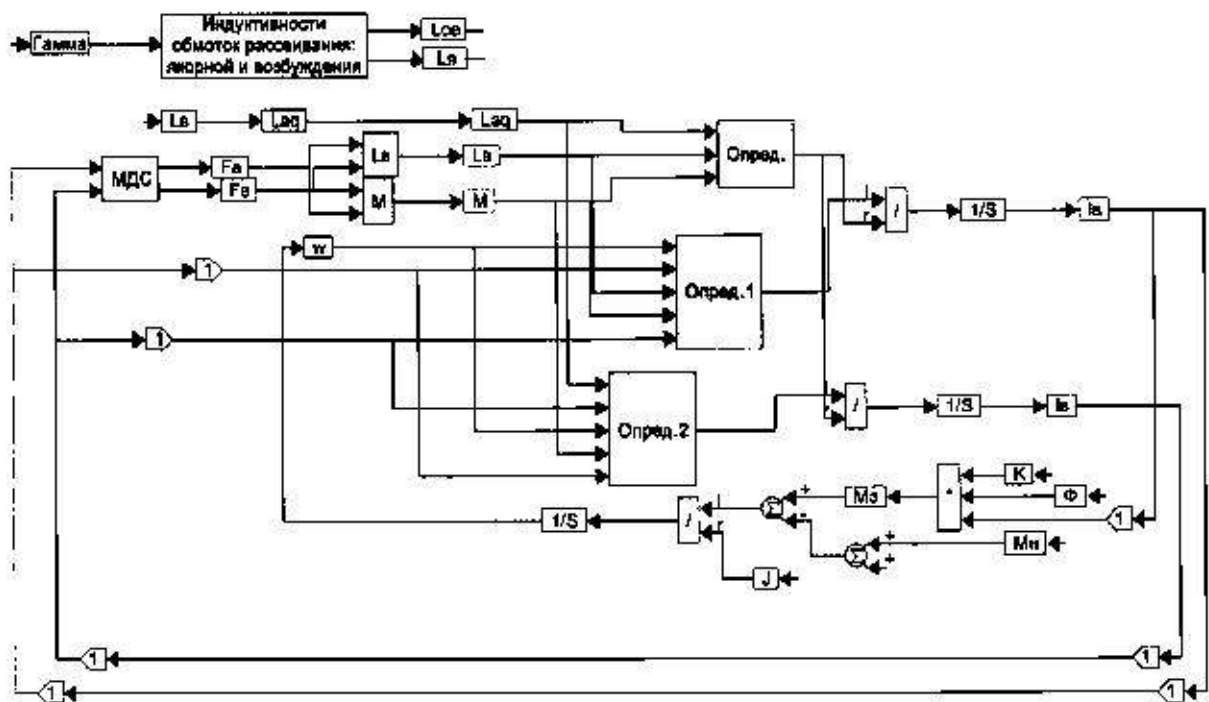


Рисунок 13 – Модель двигателя, представленная в VisSim

2.4.2 Результат моделирования переходного процесса двигателя постоянного тока с учетом индуктивностей

1. Проведем моделирование при $r = 0$.

Графики токов и частоты вращения показаны на рисунке 14.

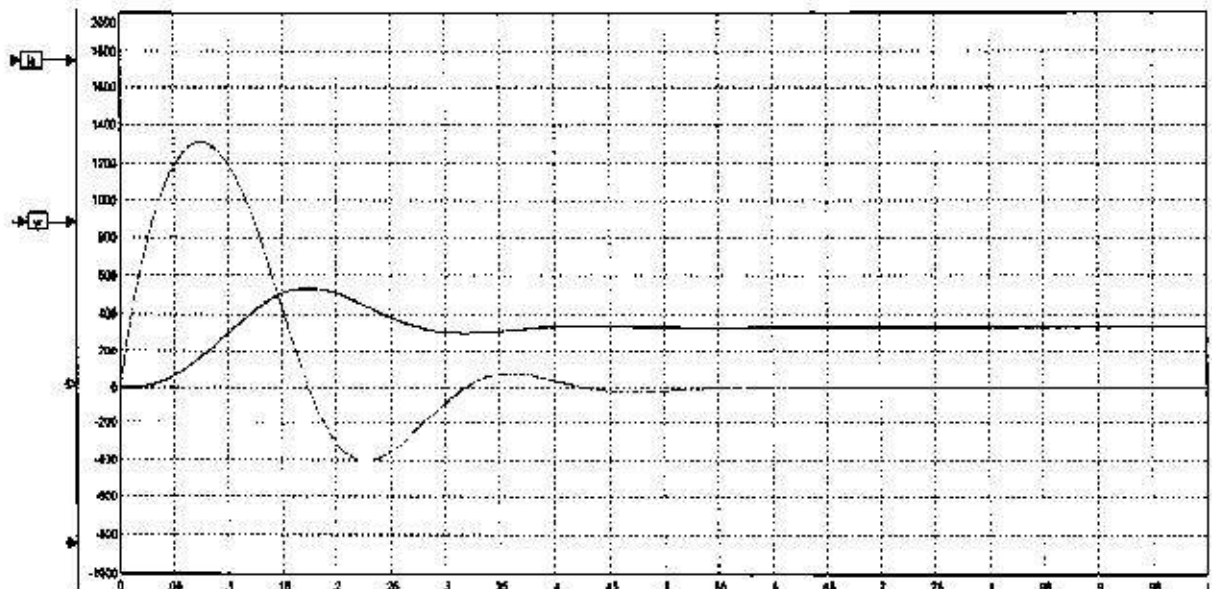


Рисунок 14 – Графики токов и частоты вращения

По ним определили, что переходный процесс длится 0,6 секунды, что на 0,1 секунды больше, чем на предыдущих графиках.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР

Лист

23

Установившееся значение выхода $I_a=0,01$, $I_e=2,2$, $\omega=326,2$ рад/с.

По характеристике видно, что процесс является колебательным и длится на 0,1 секунды дольше. Переходный процесс затянулся, что объясняется учетом индукций. Установившееся значение скорости соответствует предварительным расчетам.

2. Проведем моделирование при пусковом сопротивлении, равном $r=0,1$ Ом.

Графики тока и частоты вращения показаны на рисунке 15.

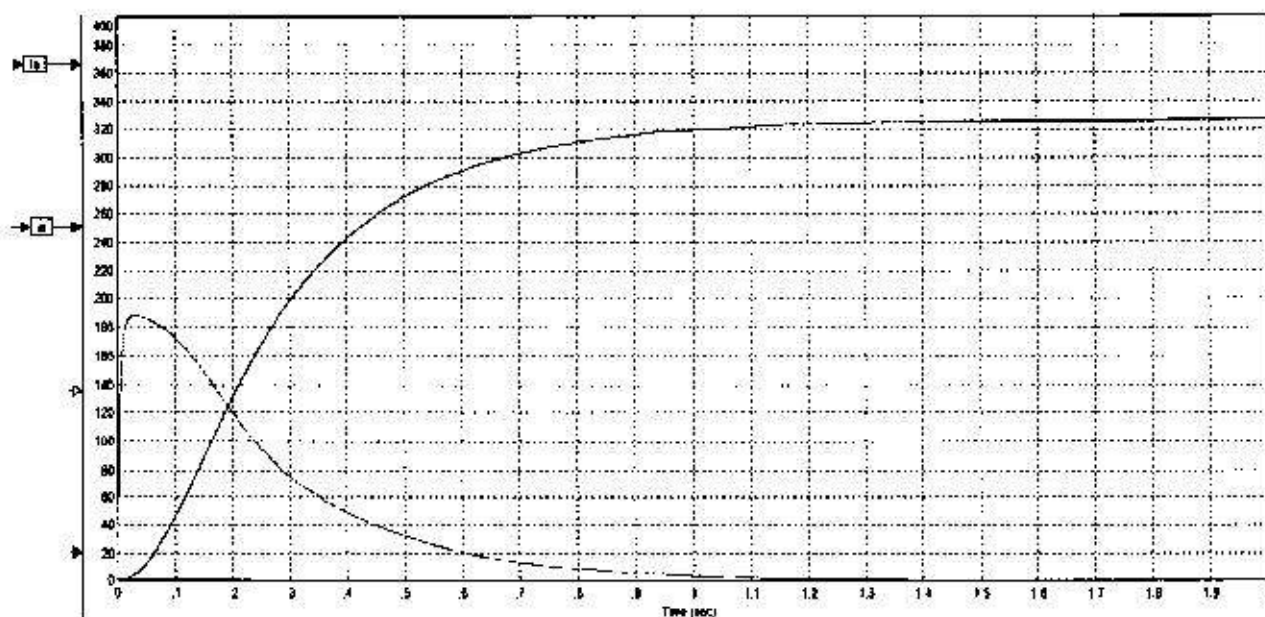


Рисунок 15 – Графики тока и частоты вращения при пусковом сопротивлении

Установившееся значение тока $I_a=0,1$ А, $\omega=326,1$ рад/с.

Но при этом видно, что максимум I_a уменьшился при пуске в 7 раз.

Время переходного процесса увеличилось до 1,4 секунды, значение установившегося тока $I_a=0,1$ А, $\omega=326,1$ рад/с, так как время переходного процесса должно быть не более 3,2 сек., то можно реализовать реостат пуск этого двигателя, но он не является энергетически выгодным.

3. Так как наш двигатель не работает на холостом ходу и момент инерции выше за счет нагрузки и статического момента холостого хода, тогда проведем моделирование при инерции якоря $J=0,17$. График приведен на рисунке 16.

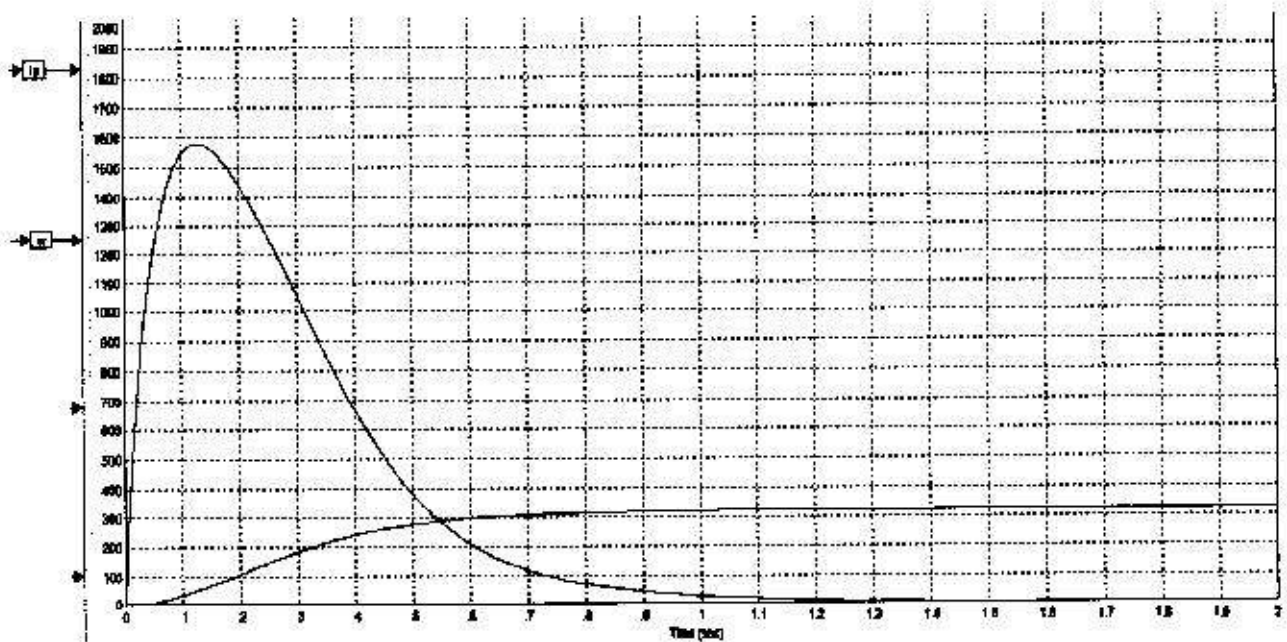


Рисунок 16 – Графики тока и частоты вращения завышенной инерции якоря

По ним определили, что переходный процесс затянулся до 1,2 секунд, что удовлетворяет требованиям.

Установившееся значение выхода $I_a=0,1$ А, $\omega=326,2$ об/сек.

Моделирование показало, что переходный процесс без нагрузочного момента и дополнительного момента инерции имеет характер колебательного переходного процесса и имеет время больше, чем при моделировании без учета индуктивности. Таким образом, если двигатель работает на холостом ходу, на его процесс оказывают влияние динамические индуктивности и взаимоиндуктивности. Модель при учете момента инерции нагрузки устройства и статическом моменте нагрузки показала, что колебания практически устраняются. Все эти недостатки устраняются при синтезе системы управления электропривода.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР

Лист

25

3 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Выбор преобразователя

В синтезируемом электроприводе источник питания – аккумуляторная батарея, следовательно, для обеспечения регулирования скорости выбирается транзисторный преобразователь, на котором реализуется широтно-импульсное преобразование напряжения.

Выбор преобразователя осуществляется по номинальным значениям напряжения якоря и тока якоря двигателя, при этом:

$$U_{итп} > U_{дн}, \quad (3.1)$$

$$I_{итп} > I_{дн}. \quad (3.2)$$

Также необходимо удостовериться, что ток упора электродвигателя не превышает ток транзисторного преобразователя; а также обратить внимание на номиналы тока возбуждения двигателя.

Поскольку источником питания является аккумулятор $U_n=40$ В, а ток $I_n=143$ А, то подобрать промышленный транзисторный преобразователь затруднительно, поэтому может появиться необходимость в синтезе преобразователя с выходным током нагрузки не менее 500 А, и напряжением не менее 40 В.

3.2 Расчет постоянной времени и выбор датчика скорости

1. Расчет некоторых постоянных времени и коэффициентов для дальнейшего построения структурной схемы электропривода.

Механическая постоянная времени T_d двигателя:

$$T_d = \frac{(J_d + J_m) \cdot \omega_n}{M_n} = \frac{(0,017 + 2,21 \cdot 10^{-3}) \cdot 314,159}{14,624} = 0,369 \text{ с}, \quad (3.3)$$

где J_m находится из соотношения ($J_m/J_d=0,013$).

Электромагнитная постоянная времени силовой цепи:

$$T_{яц} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{0,012} = 0,042 \text{ с}. \quad (3.4)$$

Кратность тока короткого замыкания:

$$K_{яц} = \frac{U_n}{I_n \cdot R_{яц}} = \frac{40}{143,75 \cdot 0,012} = 23,188. \quad (3.5)$$

2. Выбор датчика скорости

Необходимо выбрать датчик скорости, с напряжением питания не более 40 В, и максимальной скоростью не менее 6000 об/мин. Предпочтение отдаётся безинерционному оптическому датчику скорости – энкодеру, например, типа PROFIBUS 25 24В DC с максимальной скоростью 6000 об/мин.

3.3 Синтез и предварительная настройка параметров регуляторов

Произведем выбор типа регулятора в системе подчиненного регулирования.

При настройке контура регулирования тока якоря стремятся к увеличению максимального быстродействия контура для того, чтобы контур обеспечивал защиту от бросков тока при приложении статической нагрузки к валу электродвигателя. Также высокая полоса пропускания контура тока обеспечивает большой диапазон настроек контура регулирования скорости. Исходя из этих соображений, в контуре регулирования тока выберем ПИ-регулятор.

Настройка контура регулирования скорости ограничена по быстродействию следующими факторами: избыточное быстродействие ведет к возникновению перерегулирования системы и увеличению влияния обратных пульсаций на работу системы электропривода. Исходя из этих требований, а также для упрощения построения статических характеристик, выбираем ПИ-регулятор.

Время чистого запаздывания принимают равным периоду модуляции $\tau = T_{\text{мод}}$. Примем частоту ШИП равной 2000 Гц, тогда $\tau = 0.0005$ с.

Поскольку, частота модуляции в преобразователе велика, то τ мало и экспоненциальную зависимость можно заменить линейной. Тогда импульсный преобразователь можно представить апериодическим звеном первого порядка с малой постоянной времени. (Источник: Беляев В. П., Шуляк Р. И., «Электронные

устройства полиграфического оборудования», Белорусский государственный Технологический университет, Минск, 2011 г.)

$$W_{пр} = \frac{K_{пр}}{1+\tau \cdot p} \quad (3.6)$$

Для упрощения расчетов можно пренебречь перекрестной обратной связью по ЭДС. На практике частота среза ω_r лежит в диапазоне (80...150) рад/с, а ω , в диапазоне (20...40) рад/с.

Тогда получится структурная схема, представленная на рисунке 17.

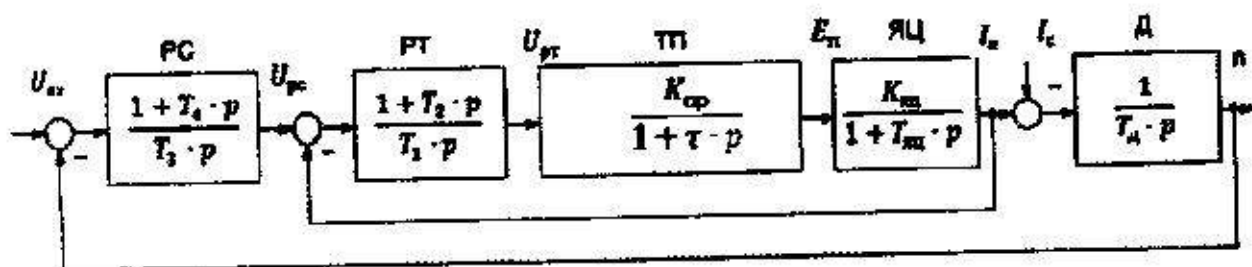


Рисунок 17 – Преобразованная структурная схема электропривода

3.4 Выбор типа регуляторов и расчетов их параметров

3.4.1 Контур регулирования тока якоря

Контур тока должен обеспечивать максимальное быстродействие для предотвращения бросков тока при приложении чрезмерной нагрузки. Поэтому выбираем пропорционально-интегральный регулятор тока.

Передаточная функция регулятора тока имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{1 + T_{2p}}{T_{1p}} \quad (3.7)$$

Структурная схема КРТЯ представлена на рисунке 18.

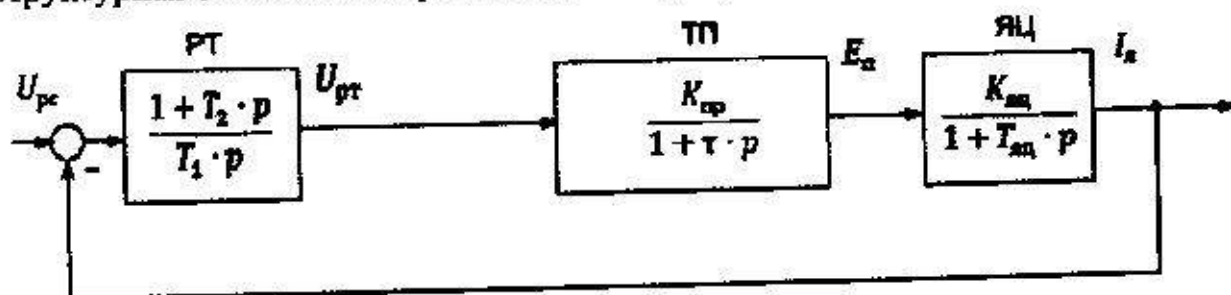


Рисунок 18 – Структурная схема КРТЯ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР

Лист

28

Такая настройка применяется для систем второго порядка, ее называют также настройкой на технический оптимум. Термин обусловлен тем, что если характеристический полином системы второго порядка представить в канонической форме, т.е. в виде

$$D(p) = T_1^2 p^2 + 2\zeta T_1 p + 1, \quad (3.8)$$

то при $2\zeta = \sqrt{2}$ обеспечивается переходный процесс, близкий к оптимальному, при котором будет небольшое перерегулирование и относительно высокое быстродействие.

Так как $T_{яц} > \tau$, то выберем постоянную времени T_2 :

$$T_2 = T_{\max} = T_{яц} = 0,012 \text{ с.} \quad (3.9)$$

Введем расчетную постоянную времени $T_{рт}$:

$$T_{рт} = \frac{T_1}{K_{яц}}. \quad (3.10)$$

Величину расчетной постоянной времени $T_{рт}$ принимаем равной 0,004 с.

Тогда постоянная времени T_1 :

$$T_1 = T_{рт} \cdot K_{яц} = 0,004 \cdot 23,188 = 0,093 \text{ с.} \quad (3.11)$$

Тогда передаточная функция примет вид:

$$W(p) = \frac{1 + 0,042 \cdot p}{0,093 \cdot p} = 0,44 + \frac{1}{0,093 \cdot p}. \quad (3.12)$$

Получили:

$$K=0,44, \quad (3.13)$$

$$T=0,093 \text{ с.} \quad (3.14)$$

3.4.2 Контур регулирования скорости

В ходе настройки контура регулирования скорости необходимо помнить, что нужно обеспечить поддержание заданного значения скорости в независимости от возмущений и поддержания качественных процессов пуска и торможения. Исходя из данных соображений, выберем ПИ регулятор скорости.

Передаточная функция регулятора скорости:

$$W(p) = \frac{1+T_{sp}p}{T_{sp}} = \frac{1}{T_{sp}} + K_{pc} \quad (3.15)$$

Структурная схема КРС изображена на рисунке 19.

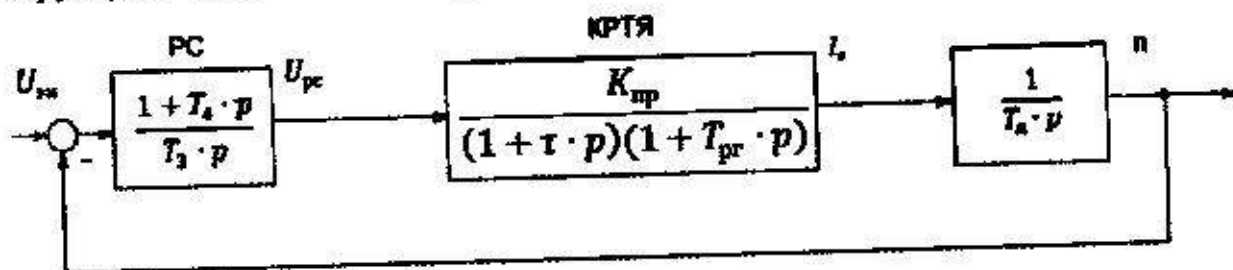


Рисунок 19 – Структурная схема КРС

$$T_4 = T_{max} = T_d = 0,369 \text{ с.} \quad (3.16)$$

Быстродействие контура регулирования скорости в современных электроприводах постоянного тока располагается на уровне 15...25 рад/с. Поэтому, постоянную времени T_3 можно получить из соотношения:

$$T_3 = \frac{2 \dots 4}{\omega_c} = \frac{2 \dots 4}{15 \dots 25} = 0,08 \dots 0,25 \text{ рад/с.} \quad (3.17)$$

Выбираем $T_3 =$, тогда передаточная функция примет вид:

$$W(p) = \frac{1 + 0,369 \cdot p}{0,12 \cdot p} = 3,07 + \frac{1}{0,12 \cdot p} \quad (3.18)$$

Получили:

$$K = 3,07, \quad (3.19)$$

$$T = 0,12. \quad (3.20)$$

3.5 Построение статических характеристик замкнутой системы электропривода

Для предварительной оценки, правильности выбора регуляторов построим электромеханическую $n=f(I_a)$ и внешнюю $U_a=f(I_a)$ и механическую $n=f(M)$ характеристики.

Построение естественной характеристики двигателя будем вести по двум точкам – при работе двигателя на холостом ходу и в номинальном режиме. При работе двигателя на холостом ходу отсутствует воздействие по каналу возбуждения, поэтому расчет ведем только по каналу задания. В статическом

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР

Лист

30

режиме оператор $p=0$. Тогда структурная схема имеет вид, представленный на рисунке 20.

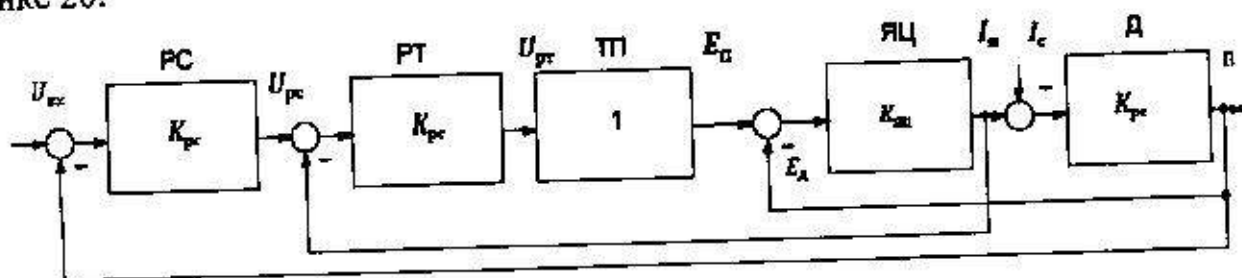


Рисунок 20 – Структурная схема электропривода для статических режимов

3.5.1 Построение электромеханической и механической характеристик

До точки насыщения регулятора скорости механическая и электромеханическая характеристика имеют жесткий характер. Как только ток якоря возрастет до значения $I_я = I_{макс}$, регулятор скорости насытится, контур регулирования скорости разомкнется, и дальнейшее увеличение нагрузки уже не будет вызывать увеличение $U_{рс}$. Это приведет к резкому снижению $E_н$ и скорости n . В схеме с пропорционально-интегральным регулятором тока, который обеспечивает точное выполнение равенства $I_я = U_{рс}$, электромеханическая характеристика привода при достижении током якоря значения $I_{макс}$ идет вертикально вниз.

Рассчитаем точки полученной статической характеристики:

$$\omega_0 = \frac{U_н}{k\Phi_н} = \frac{40}{0,122} = 328,318 \text{ рад/с}, \quad (3.21)$$

$$I_{макс} = I_н \cdot 1,8 = 143,75 \cdot 1,8 = 258,75 \text{ А}, \quad (3.22)$$

$$M_{макс} = I_м \cdot k\Phi_н = 258,75 \cdot 0,122 = 31,56 \text{ Нм}. \quad (3.23)$$

Механическая и электромеханическая характеристики электропривода представлены на рисунках 21 и 22.

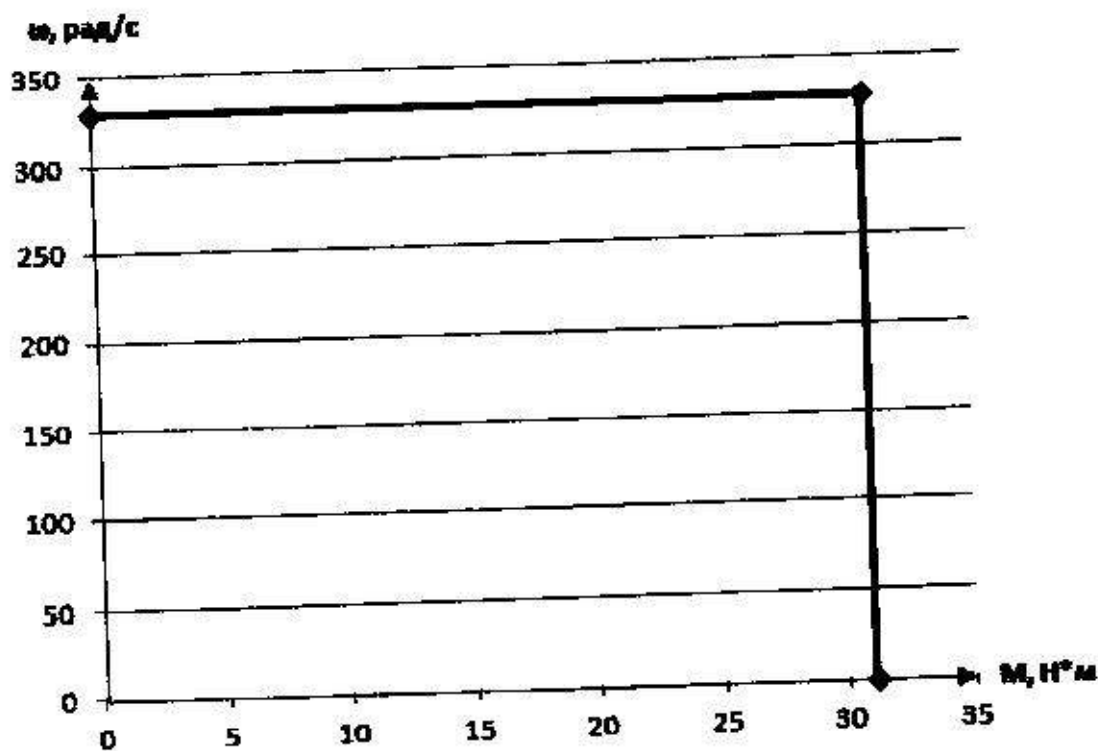


Рисунок 21 – Механическая характеристика $\omega=f(M_c)$

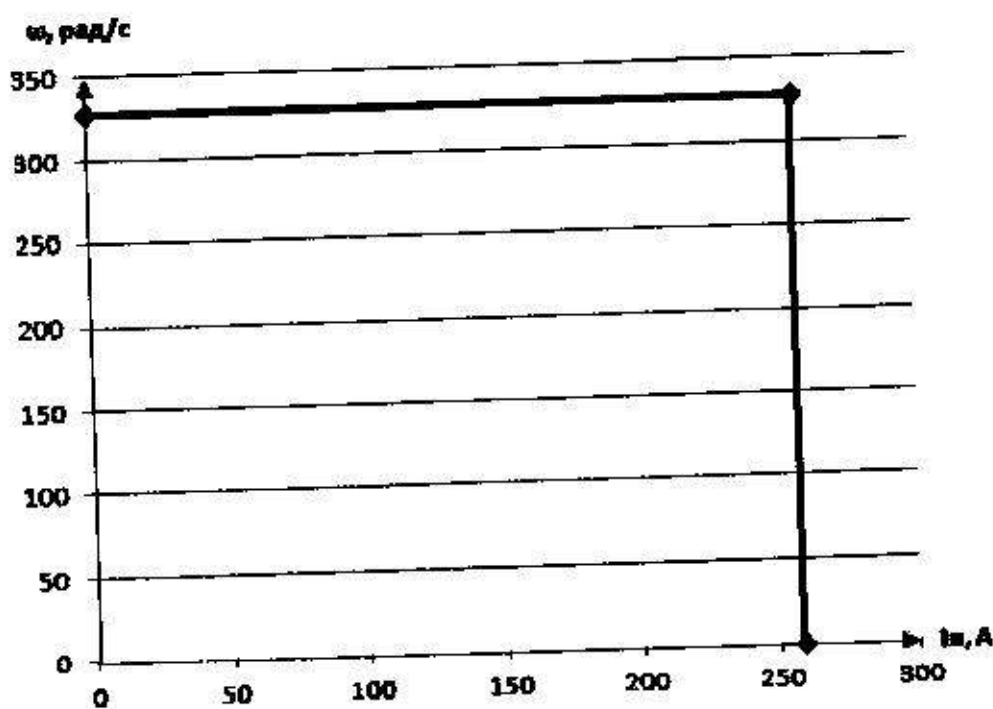


Рисунок 22 – Электромеханическая характеристика $\omega=f(I_a)$

3.5.2 Построение внешней характеристики

Внешнюю характеристику электропривода $U_a=f(I_a)$ строим по известной электромеханической характеристике:

$$U_a = E_d + I_a \cdot r_{яд} \quad (3.24)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР

Лист

32

В точке идеального холостого хода:

$$U_{\text{я}} = E_{\text{д}} = 40 \text{ В.} \quad (3.25)$$

В режиме упора:

$$U_{\text{я}} = E_{\text{д}} + I_{\text{ямакс}} \cdot r_{\text{яд}} = 40 \cdot 258,75 \cdot 0,012 = 43,105 \text{ В.} \quad (3.26)$$

Внешняя характеристика электропривода представлена на рисунке 23

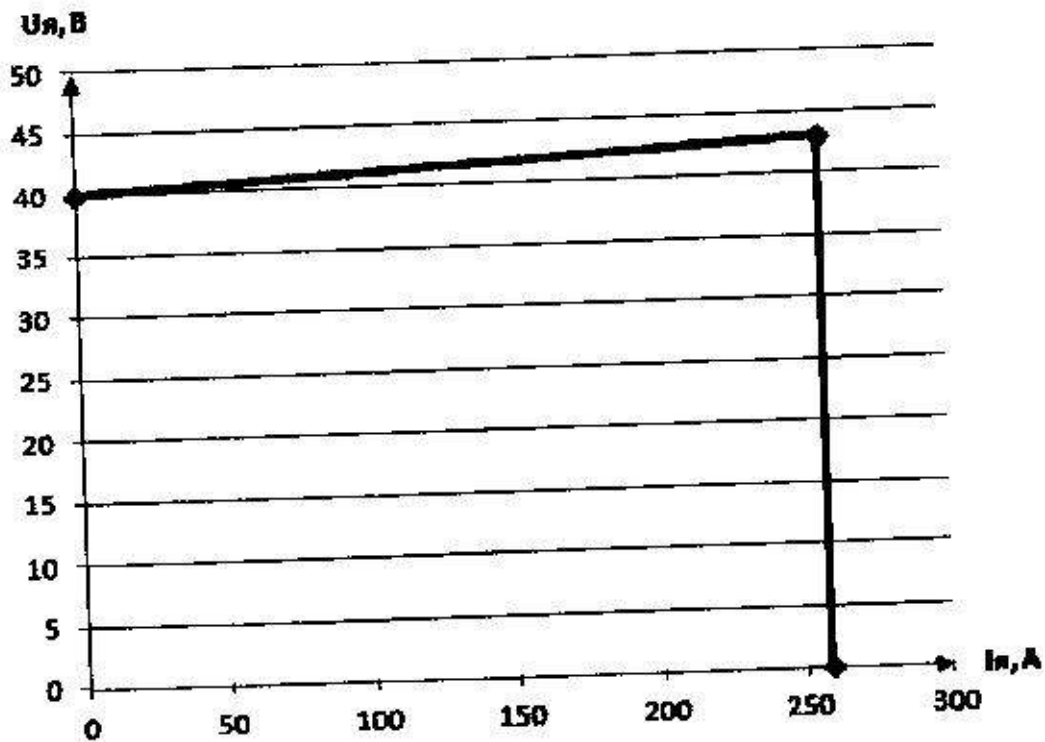


Рисунок 23 – Внешняя характеристика $U_{\text{я}}=f(I_{\text{я}})$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами был проведен анализ двигателя постоянного тока, построены модели демонстрирующие работу двигателя в момент пуска на холостом ходу, так же были приведены графики работы двигателя под нагрузкой. Был проведен аналитический анализ расчета, который подтвердил достоверность наших моделей. Было выявлено, как индуктивности влияют на работу двигателя.

Исходя из полученных данных, был выбран преобразователь, проведена настройка параметров регуляторов, выбраны типы регуляторов и произведен расчет их параметров и построены статические, электромагнитные и механические характеристики электропривода.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					34
13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР					

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 756 с.
3. Проектирование электрических машин: учебное пособие для вузов по направлению электротехника, электромеханика и энергетика / О.Д. Гольдберг, И.С. Свириденко; под ред. О.Д. Гольдберга. – М.: Высшая школа, 2001. – 430 с.
4. Лифанов В.А. Расчет электрических машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов: учебное пособие / В.А. Лифанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 164 с.
5. Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов: Конспект лекций. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. – Ч. 1. – 171 с.
6. Зильберман С.З. Математическое моделирование электрических машин. Учебное пособие к лабораторным занятиям. – Ч.: Издат. ЧГУ, 1992. – 59 с.

									Лист
									35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.04.02.68.2016.411320.ПЗ ВКР				