

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)»
(РУТ (МИИТ))**

Одобрено кафедрой
«ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНАЯ АВТОМАТИКА ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ»

Протокол № ____ от _____ 201__ г.
Автор: _____

**ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ С МЕТОДИЧЕСКИМИ
УКАЗАНИЯМИ**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Электромеханические системы

Уровень ВО: *Бакалавриат*

Форма обучения: *Заочная*

Курс: *4*

Специальность/Направление: *27.03.04 Управление в технических системах (УТб)*

Специализация/Профиль/Магистерская программа: *(УТ) Системы и технические средства автоматизации и управления*

Москва

Курсовая работа посвящена проблеме разработки электропривода для различных областей применения. Исходные данные для выполнения проекта приведены в таблице 1. Вариант исходных данных определяется последней (самой правой) цифрой шифра студента, указанного в зачетной книжке.

Таблица 1 Параметры электродвигателя постоянного тока

Параметр электропривода	Вариант (последняя цифра шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальный вращающий момент M_n Нм	157	170	188	256	244	179	181	183	197	162
Номинальная частота вращения n_n об/мин	2200	1500	4000	2000	2200	4000	1500	2000	2500	4400
Номинальная мощность P_n кВт	36	12	24	36	12	24	36	12	24	36
Номинальный ток I_n А	89,7	98,9	100,3	101,7	110,1	112,6	121,7	129,0	137,3	146,1
Номинальное напряжение U_n В	440	440	380	220	440	380	220	440	380	220
Номинальный магнитный поток Φ_n мВб	12,8	16,8	16,1	16,5	15,0	14,9	14,0	15,3	16,3	15,7
Момент инерции J кгм ²	0,25	0,5	0,75	1	0,25	0,5	0,75	1	0,25	0,5
Электромеханическая постоянная времени T_m мс	14	13,30	14,72	14,52	13,92	13,13	13,06	15,66	14,71	12,24
Электромагнитная постоянная времени T_α мс	21,56	21,27	22,71	20,53	23,06	19,10	22,66	22,17	18,62	22,82

Число витков обмотки якоря $Wя$	222	273	213	236	230	212	187	186	187	270
Сопротивление обмотки якоря $Rя Ом$	0,106	0,098	0,092	0,098	0,096	0,109	0,108	0,098	0,105	0,109
Сопротивление добавочных полюсов $Rдп Ом$	0,061	0,060	0,071	0,067	0,045	0,043	0,058	0,068	0,067	0,044
Индуктивность якорной цепи при полном поле $Ля мГн$	3,6	4,1	4,3	3,3	3,5	4,3	3,9	3,3	4,1	4,3
Число витков на полюс обмотки возбуждения $Wв$	1000	900	800	700	1200	1100	1000	900	800	700
Сопротивление обмотки возбуждения $Ом$	46	44	49	49	42	43	46	45	44	45

Во всех вариантах принять:

- Число полюсов $p=4$.
- Номинальное напряжение для обмотки возбуждения $U_{вн}=220в$.
- Кратность кратковременной перегрузки по току не менее 2,5 ($I_{макс.}=2,5I_n$).
- Момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя, составляет 30 % от момента инерции двигателя.
- Преобразователь считать безынерционным звеном с коэффициентом усиления $kп=60$.

Считать, что указанные электрические машины снабжены дополнительными полюсами, которые включаются последовательно в якорную цепь, активное сопротивление дополнительных полюсов ($R_{дп}$)

следует учитывать при выполнении работы.

На основе приведенных данных требуется:

- Осуществить расчёт параметров электрической машины.
- Дать краткое описание функциональной схемы электропривода.
- Произвести расчёт и анализ статических характеристик.
- Осуществить математическое описание электромеханических переходных процессов
- Составить структурную схему электропривода.
- Осуществить расчёт параметров структурной схемы электропривода.
- Составить математическую модель и осуществить исследование в среде Matlab протекающих в электроприводе процессов.

Пример выполнения курсового проекта приведен в Приложении 1.

Пример выполнения курсовой работы

1. Исходные технические данные двигателя

Номинальный вращающий момент M_n Нм	157
Номинальная частота вращения n_n об/мин	2200
Номинальная мощность P_n кВт	36
Номинальный ток I_n А	89,7
Номинальное напряжение U_n В	440
Номинальный магнитный поток Φ_n мВб	12,8
Момент инерции J кгм ²	0,25
Электромеханическая постоянная времени T_m мс	14
Электромагнитная постоянная времени T_ε мс	21,56
Число витков обмотки якоря W_ε	222
Сопротивление обмотки якоря R_ε Ом	0,106
Сопротивление добавочных полюсов $R_{дп}$ Ом	0,061
Индуктивность якорной цепи при полном поле L_ε мГн	3,6
Число витков на полюс обмотки возбуждения W_b	1000
Сопротивление обмотки возбуждения Ом	46

2. Расчёт параметров электрической машины

Воспользовавшись исходными данными, рассчитаем параметры двигателя, которые будут необходимы при выполнении дальнейших расчётов.

Номинальная скорость двигателя

$$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2200}{60} = 230 \text{ рад/с}$$

Сопротивление якоря двигателя с учётом дополнительных полюсов

$$R_{яд} = R_я + R_{дп} = 0,106 + 0,061 = 0,167 \text{ Ом}$$

Коэффициент ЭДС двигателя

$$c = \frac{U_n - I_n (R_я + R_{дп})}{\omega_n} = \frac{440 - 89,7(0,106 + 0,061)}{230} = 1,85 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$$

При выполнении расчётов в ряде случаев можно пренебречь нелинейностью кривой намагничивания машины $\Phi=f(I_b)$ и определять номинальный ток возбуждения по формуле

$$I_{вн} = \frac{U_b}{R_b} = \frac{220}{46} = 4,78 \text{ А}$$

3. Краткое описание функциональной схемы электропривода

В регулируемых электроприводах постоянного тока широко используется система “преобразователь-двигатель”. Функциональная схема изображена на рис.1. Преобразователь изображён в виде “чёрного ящика”,

который подключён к 3-х фазной сети переменного тока с линейным напряжением U_c . Это напряжение обычно 380В или 220В.

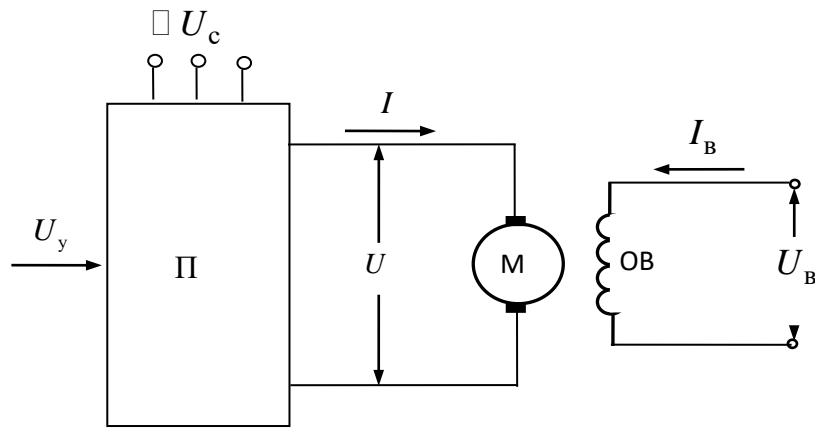


Рис.1. Функциональная схема

Функциональное назначение преобразователя сводится к преобразованию переменного напряжения в постоянное напряжение, регулируемое по величине. До 70-х годов в качестве преобразователя использовался генератор постоянного тока с приводным асинхронным двигателем, а сам электропривод называли системой “генератор-двигатель”, сокращённо Г – Д.

В настоящее время преобразователи выполняются на основе силовых полупроводниковых приборов: тиристоров или транзисторов. Для двигателей с номинальной мощностью $P_n \geq 1кВт$ в качестве преобразователя обычно используют комплектные устройства, выполненные на основе тиристоров, их называют тиристорными преобразователями или управляемыми выпрямителями.

Выпрямленная ЭДС регулируется напряжением управления U_y , которое поступает на вход преобразователя. Связь между входным и выходным напряжениями характеризуют зависимостью $E_n = f(U_y)$, которую называют характеристикой “вход-выход”. При инженерных расчетах эту характеристику обычно представляют в линеаризованном виде (рис.2). На основном рабочем участке ЭДС преобразователя изменяется по линейному

закону

$$E_{\pi} = K_{\pi} \cdot U_y, (3.1)$$

где K_{π} -коэффициент усиления преобразователя, его числовое значение указывается в задании.

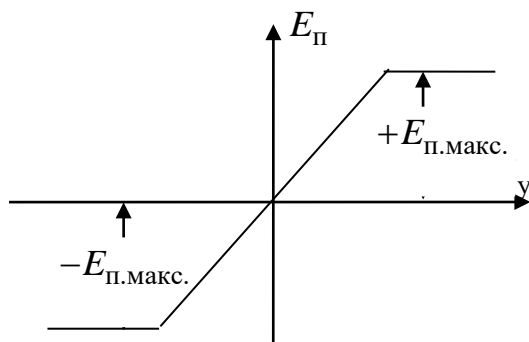


Рис.2. Характеристика “вход-выход”

Преобразователь обладает внутренним сопротивлением R_{π} . При выполнении расчётов предлагается принять, что сопротивление преобразователя составляет 50% от сопротивления якоря с учётом дополнительных полюсов

$$R_{\pi} = 0,5R_{яд} = 0,5 \cdot 0,167 = 0,083 \text{ Ом}$$

Для наглядного представления физической сущности протекающих процессов силовую электрическую часть удобно представлять в виде схемы замещения (рис.3).

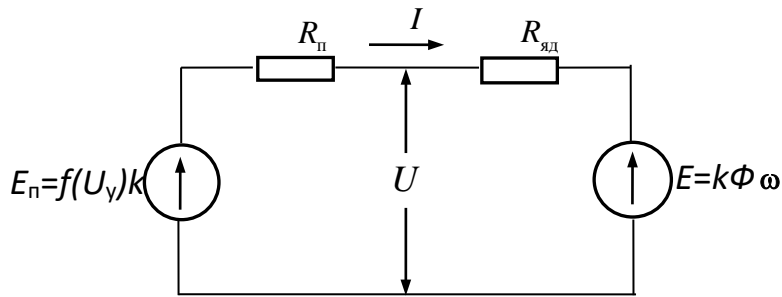


Рис.3. Схема замещения силовой цепи

Из схемы замещения следует, что протекающие процессы в установившихся режимах описываются равенствами:

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{п}} &= c \cdot \omega + I \cdot (R_{\text{п}} + R_{\text{яд}}), \\ U &= E_{\text{п}} - I \cdot R_{\text{п}} = c \cdot \omega + I \cdot R_{\text{яд}}. \end{aligned} \right\} (3.2)$$

Так как сопротивления преобразователя и двигателя включены последовательно, то их можно заменить одним сопротивлением, которое в дальнейшем будем называть сопротивлением якорной цепи

$$R_{\text{яц}} = R_{\text{п}} + R_{\text{яд}} = 0,167 + 0,083 = 0,250 \text{ Ом}.$$

В этом случае первое уравнение (3.1) принимает более простой вид $E_{\text{п}} = c \cdot \omega + I \cdot R_{\text{яц}}$.

Из (3.1) следует, что ЭДС преобразователя не зависит от тока нагрузки I , а определяется лишь заданным напряжением управления U_y . Напряжение же на выходе преобразователя (3.2) зависит от тока нагрузки по причине

падения напряжения в преобразователе.

4. Расчёт и анализ статических характеристик

Поведение привода в установившихся режимах поясняют с помощью соответствующих характеристик, которые называют статическими. Терминология “статический” свидетельствует о том, что процессы рассматриваются в статике, то есть в установившемся режиме. Так как связь между основными переменными описывается уравнениями прямых линий (3.1) и (3.2), то и все статические характеристики в графическом виде представляют собой прямые линии.

Цель расчёта сводится не к умению выполнять простейшие арифметические вычисления, а к представлению сущности основных физических явлений, протекающих при изменении управляющих или возмущающих внешних воздействий. Таких внешних воздействий два. Одно из них является управляющим воздействием U_y , а второе - возмущающим воздействием I .

Известно, что в установившемся режиме ток якоря протекает лишь тогда, когда имеется статический момент, приложенный к валу двигателя. Связь между током якоря и статическим моментом характеризуется равенством $I = M_c / c$. При номинальном токе двигатель обеспечивает номинальный электромагнитный момент $M_n = c \cdot I_n = 1,85 \cdot 89,7 = 165 \text{ Нм}$. Обратите внимание, что полученное числовое значение примерно на 5% больше указанного в технических данных двигателя $M_n = 157 \text{ Нм}$. В технических данных указан номинальный момент на валу, который меньше электромагнитного момента на величину момента трений в двигателе. Зная эту особенность, все инженерные расчёты обычно проводят применительно к электромагнитному моменту. Поэтому в дальнейшем будем считать, что номинальный момент для данного двигателя $M_n = 165 \text{ Нм}$, а термин

“электромагнитный” для простоты исключим.

На основании (3.1) и (3.2) запишем систему уравнений, которые характеризуют поведение основных переменных при изменении нагрузки на валу двигателя

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{E_n}{c} - I \frac{R_{яц}}{c}; \\ U &= E_n - I \cdot R_{пр}; \\ E_n &= K_n \cdot U_y. \end{aligned} \right\} (4.1)$$

Сформулируем условия для расчёта статических характеристик.

Рассчитайте статические характеристики для 3-х случаев: $E_n = U_n = 440B = const$, $U = U_n = 440B = const$ и $\omega = \omega_n = 230 \text{ рад} / c = const$. Результаты расчёта представьте в табличном виде. Нагрузку меняйте в пределах допустимых значений. Исходные данные для расчёта получены ранее:

$$c = 1,85 \frac{B \cdot c}{\text{рад}}, R_{яц} = 0,25 \text{ Ом}, R_n = 0,083 \text{ Ом}, K_n = 60.$$

Воспользовавшись уравнениями (4.1), рассчитаем статические характеристики при условии, что $E_n = U_n = 440B = const$. Результаты указаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Результаты расчета при $E_n = U_n = 440B = const$.

I / I_n	-2,5	-1	0	1	2,5
$I (A)$	-225	-89,7	0	89,7	225
$IR_n (B)$	-17	-7	0	7	17

$IR_{яц} (B)$	-56	-22	0	22	56
$E_n = 440 = const(B)$	440	440	440	440	440
$U_y = E_n / K_n = E_n / 60(B)$	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
$\omega_0 = \frac{E_n}{c} \text{ рад/с}$	238	238	238	238	238
$\Delta\omega = \frac{I \cdot R_{яц}}{c} \text{ рад/с}$	-30	-12	0	12	30
$\omega = \omega_0 - \Delta\omega (\text{рад/с})$	268	250	238	226	208
$U = E_n - I \cdot R_n (B)$	457	447	440	433	423
ω / ω_n	1,16	1,09	1,03	0,98	0,9
E_n / U_n	1	1	1	1	1
U_n / U_n	1,04	1,02	1	0,98	0,96

По результатам расчёта построены статические характеристики (рис.4), переменные представлены в относительных единицах.

На основании выполненных расчётов можно сделать следующие заключения:

1. При увеличении нагрузки падает напряжение на зажимах двигателя. Это объясняется падением напряжения в преобразователе и наглядно просматривается из схемы замещения (рис.3).

2. При увеличении нагрузки падает скорость двигателя. Это объясняется влиянием падения напряжения, как в преобразователе, так и в двигателе, и наглядно просматривается из схемы замещения (рис.3).

3. При номинальной нагрузке скорость меньше номинальной. Это объясняется падением напряжения в преобразователе.

4. Степень изменения переменных по абсолютной величине удобно оценивать по результатам расчёта в таблице 4.1.

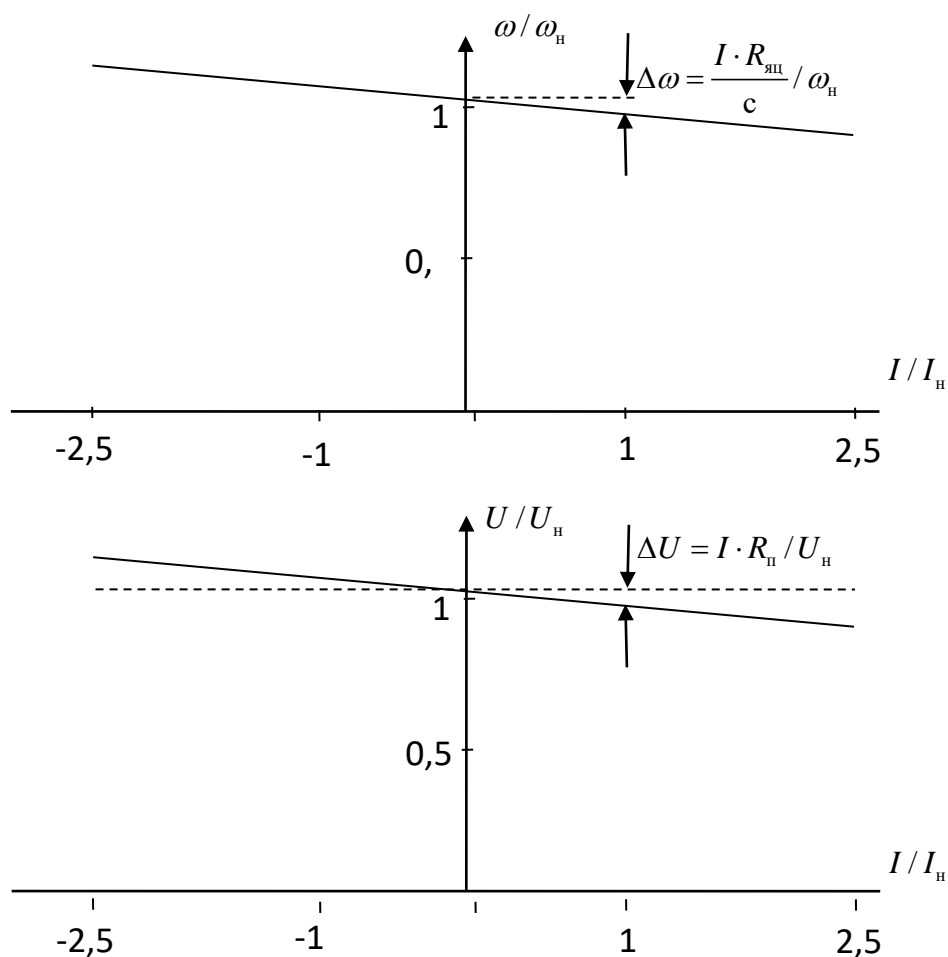


Рис.4. Статические характеристики при $E_n = 440B = const$

Рассчитаем статические характеристики при условии, что $U = U_n = 440B = const$. В этом случае систему уравнений (4.1) следует представить в несколько ином виде

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{U}{c} - I \frac{R_{яд}}{c}; \\ U &= 440; \\ E_n &= U + IR_n; U_y = \frac{E_n}{K_n}. \end{aligned} \right\} (4.2)$$

Результаты расчёта приводятся в таблице 4.2, а основные переменные в

графическом виде изображены на рис.3. На основании выполненных расчётов можно сделать следующие заключения:

1. Жёсткость электромеханической характеристики $\omega = f(I)$ стала выше в сравнении с ранее рассмотренным случаем. Объясняется это тем, что падение скорости с ростом нагрузки объясняется лишь падением напряжения в якоре двигателя.

2. При номинальной нагрузке $I = I_n$ двигатель вращается с номинальной скоростью $\omega = \omega_n = 230 \text{ рад/с}$.

3. Для стабилизации напряжения на зажимах двигателя необходимо автоматически повышать ЭДС преобразователя (рис.5) на величину падения напряжения в преобразователе.

Таблица 4.2. Результаты расчета при $U = U_n = 440 \text{ В} = \text{const}$.

I / I_n	-2,5	-1	0	1	2,5
$I \text{ (A)}$	-225	-89,7	0	89,7	225
$IR_n \text{ (В)}$	-17	-7	0	7	17
$IR_{яц} \text{ (В)}$	-56	-22	0	22	56
$U = U_n \text{ (В)}$	440	440	440	400	440
$E_n = U + IR_n \text{ (В)}$	423	433	440	447	457
$U_y = E_n / K_n = E_n / 60 \text{ (В)}$	7	7,2	7,3	7,4	7,6
$\omega_0 = \frac{E_n}{c} \text{ рад/с}$	229	234	238	242	247
$\Delta\omega = \frac{I \cdot R_{яц}}{c} \text{ рад/с}$	-30	-12	0	12	30
$\omega = \omega_0 - \Delta\omega \text{ (рад/с)}$	259	246	238	230	217
ω / ω_n	1,13	1,07	1,03	1	0,94

$E_{\text{II}} / U_{\text{II}}$	0,96	0,98	1	1,02	1,04
$U_{\text{II}} / U_{\text{II}}$	1	1	1	1	1

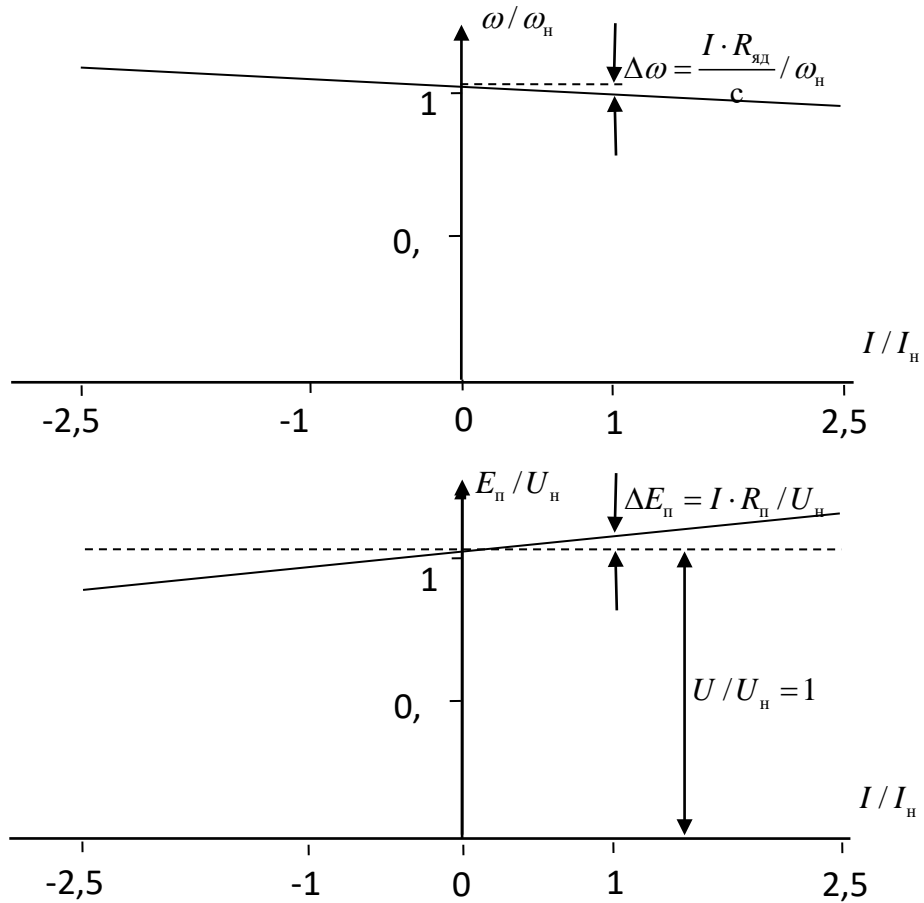


Рис.5. Статические характеристики при $U = 440B = const$

Перейдём к расчёту статических характеристик при условии, что $\omega = \omega_n = 230 \text{ рад} / \text{с} = const$. После простых преобразований исходная система уравнений (4.1) принимает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \omega_n = 230 \text{ рад} / \text{с}; \\ E_n &= c \cdot \omega + I \cdot R_{\text{ял}}; \\ U &= E_n - I \cdot R_n; \\ U_y &= \frac{E_n}{K_n}. \end{aligned} \right\} (4.3)$$

Как и ранее, задаваясь последовательно током якоря, рассчитываются

числовые значения всех переменных, результаты расчёта укажем в таблице 4.3, а изменение основных переменных показано на рис.6.

Таблица 4.3. Результаты расчета при $\omega = \omega_n = 230 \text{ рад/с} = \text{const}$.

I/I_n	-2,5	-1	0	1	2,5
$I (A)$	-225	-89,7	0	89,7	225
$IR_n (B)$	-17	-7	0	7	17
$IR_{яц} (B)$	-56	-22	0	22	56
$\omega = \omega_n = 230 (B \cdot c / \text{рад})$	230	230	230	230	230
$E_n = c \cdot \omega + IR_{яц} (B)$	369	403	425	447	481
$U = E_n - I \cdot R_n (B)$	386	410	425	440	464
$U_y = \frac{E_n}{K_n} = \frac{E_n}{60} (B)$	6,15	6,7	7,1	7,5	8
ω / ω_n	1	1	1	1	1
E_n / U_n	0,84	0,92	0,97	1,02	1,09
U_n / U_n	0,88	0,93	0,97	1	1,05

Рассмотренный режим характеризует поведение преобразователя при стабилизации скорости с изменением нагрузки. Особенности этого режима заключаются в следующем:

1. При работе в двигательном режиме ЭДС преобразователя с ростом нагрузки следует повышать по линейному закону на величину падения напряжения в якорной цепи.

2. Между ЭДС преобразователя E_n и напряжением на якоре двигателя имеется разница, обусловленная падением напряжения в преобразователе.

3. Абсолютная величина скорости определяется уровнем ЭДС преобразователя при идеальном холостом ходе. Отсюда следует, что с помощью преобразователя удаётся регулировать скорость и одновременно стабилизировать скорость при изменении нагрузки. Важно грамотно управлять преобразователем.

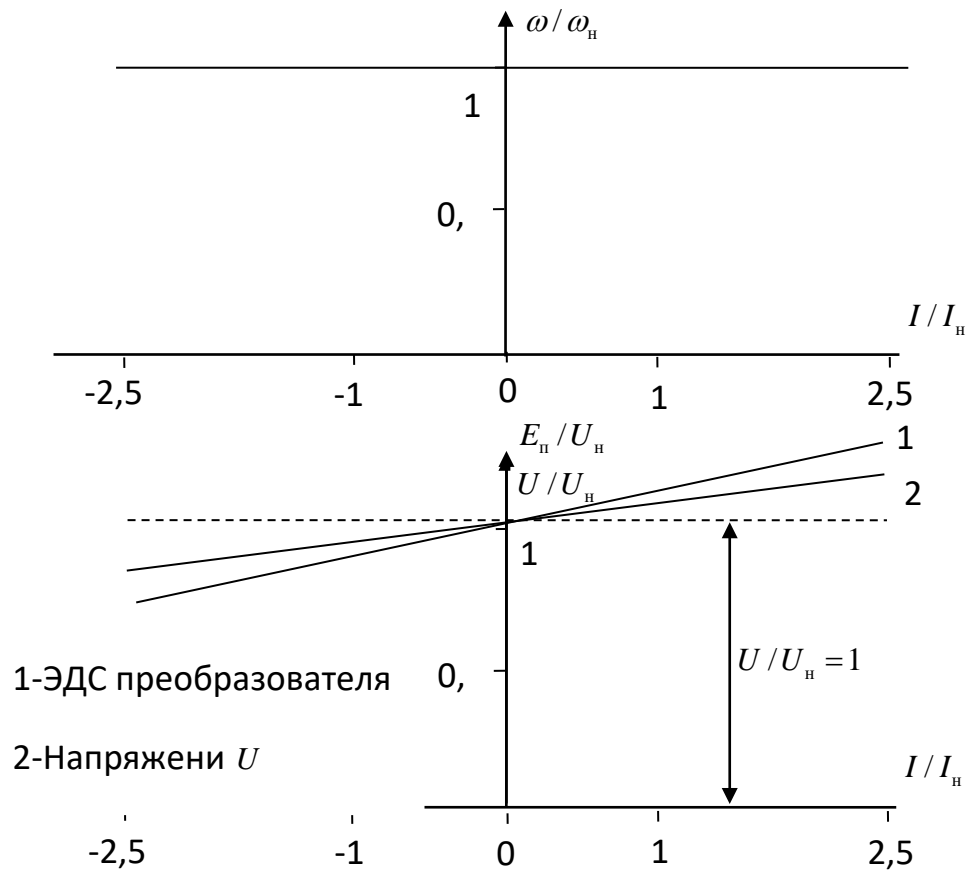


Рис.5. Статические характеристики при $\omega = \omega_n = 230 \text{ рад} / \text{с} = \text{const}$

Предлагается самостоятельно рассмотреть особенности работы электропривода в области генераторного режима работы. По личной инициативе проведите расчёт и анализ статических характеристик при других условиях, эти условия постарайтесь сформулировать сами, но они должны быть грамотно сформулированы. На этом четвёртый раздел можно закончить. Дома продумайте перечень непонятных вопросов, ответ получите при индивидуальной беседе. С целью удобства оформления пояснительной записки каждый раздел можно начинать с новой страницы.

5. Математическое описание электромеханических переходных процессов и составление структурной схемы

Ранее, с помощью схемы замещения силовой цепи на рис.3, рассматривались процессы в установившихся режимах. При рассмотрении переходных процессов эту схему дополним индуктивностью преобразователя $L_{пр.}$ и двигателя $L_{яд}$ (рис.5.1).

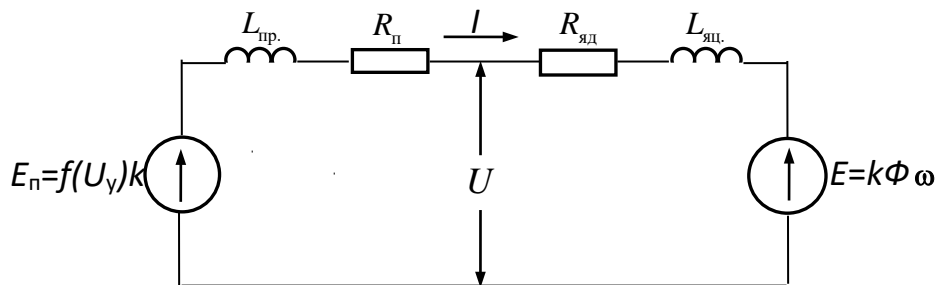


Рис.5.1. Схема замещения силовой цепи

Воспользовавшись этой схемой, запишем дифференциальное уравнение

$$e_n - c \cdot \omega = L_{яц} \frac{di}{dt} + R_{яц} \cdot i$$

где $c = k\Phi$ - коэффициент ЭДС двигателя;

$L_{яц} = L_{яд} + L_{пр.}$ - суммарная индуктивность якорной цепи;

$R_{яц} = R_{яд} + R_{пр.}$ - суммарное активное сопротивление якорной цепи;

Связь между электромагнитным моментом и током описывается равенством

$$M = k\Phi \cdot i \text{ или } M = c \cdot i .$$

Здесь коэффициент “с” является уже коэффициентом пропорциональности между моментом и током. Его обозначают тем же символом, что и для ЭДС двигателя.

Скорость и электромагнитный момент связаны между собой уравнением движения

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt} .$$

ЭДС преобразователя задаётся сигналом управления

$$E_n = K_n \cdot U_y .$$

Математическое описание переходных процессов становится компактным, если его представить в виде системы уравнений

Приведенные уравнения запишем для компактности в виде системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} e - c \cdot \omega &= L_{ял} \frac{di}{dt} + R_{ял} \cdot i; \\ M &= c \cdot i; \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}; \\ e_n &= K_n \cdot U_y \end{aligned} \right\} (5.1)$$

Решение этой системы дифференциальных уравнений удобно проводить символическим или операторным методом. В качестве символа выступает оператор дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$.

Приведём общие сведения из теории этого метода. Его сущность сводится к тому, что от функций времени $f(t)$ переходят к изображениям этих функций $F(p)$. Этот переход предложен Лапласом и описывается равенством

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt .$$

Такой приём оказался настолько удачным, что была разработана целая теория расчёта и анализа процессов, которые описываются системой дифференциальных уравнений. Предложенную теоретическую базу назвали теорией автоматического регулирования. Согласно этой теории от дифференциальных уравнений можно переходить к структурным схемам. Структурная схема состоит из отдельных элементов. Каждый элемент структурной схемы представляется передаточной функцией, под которой понимается отношение изображения выходной величины к изображению входной величины

$$W(p) = \frac{F_{\text{вых.}}(p)}{F_{\text{вх.}}(p)} .$$

Представим исходную систему дифференциальных уравнений (5.1) в операторной форме записи

$$\left. \begin{aligned}
 e_n(p) - c \cdot \omega(p) &= L_{\text{яц}} \cdot pi(p) + R_{\text{яц}} \cdot i(p); \\
 M(p) &= c \cdot i(p); \\
 M(p) - M_c(p) &= J \cdot p\omega(p); \\
 e_n(p) &= K_n \cdot U_y(p).
 \end{aligned} \right\} (5.2)$$

Путём простых математических преобразований эта система уравнений приводится к записи 4-х передаточных функций

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= \frac{e_{\text{н}}(p)}{U_y(p)} = K_{\text{н}}; \\ W_2 &= \frac{i(p)}{e_{\text{н}}(p) - c \cdot \omega(p)} = \frac{1/R_{\text{ящ}}}{T_{\text{я}}p + 1}; \\ W_3 &= \frac{M(p)}{i(p)} = c; \\ W_4 &= \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{1}{Jp}. \end{aligned} \right\} (5.3)$$

Здесь введено понятие электромагнитной постоянной времени якорной цепи

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{ящ}}}{R_{\text{ящ}}}.$$

Систему уравнений (5.3) представим в виде структурной схемы (рис.5.2)

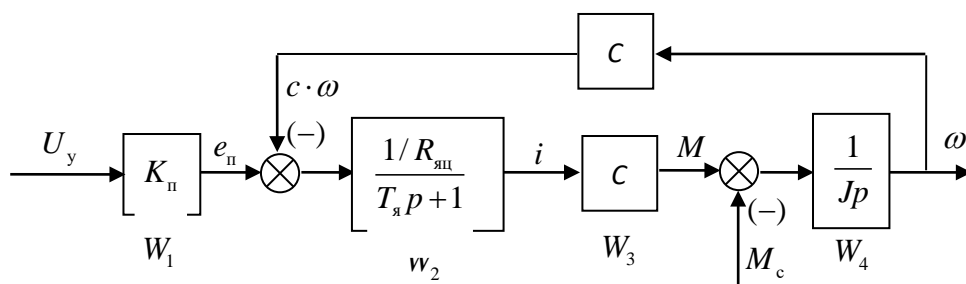


Рис.5.2. Структурная схема

Для проведения дальнейших расчётов следует определить числовые значения параметров, которые не были рассчитаны ранее.

При расчёте индуктивности якорной цепи будем считать, что индуктивность преобразователя имеет такое же числовое значение, как и у двигателя

$$L_{\text{яц}} = L_{\text{пр}} + L_{\text{яд}} = 0,0036 + 0,0036 = 0,0072 \text{ Гн}$$

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{яц}}}{R_{\text{яц}}} = \frac{0,0072}{0,25} = 0,0288 \text{ с}$$

Момент инерции привода

$$J = J_{\text{дв.}} + J_{\text{мех.}} = 0,25 + 0,3 \cdot 0,25 = 0,325 \text{ Кгм}^2$$

6. Составление математической и виртуальной моделей

Расчёт и анализ протекающих процессов.

Известно [1], что двигатель обладает механической инерционностью и электромагнитной. Переходные процессы могут быть монотонными и колебательными. Выясним характер ожидаемых переходных процессов. Если окажется, что процессы имеют колебательный характер, то с какой частотой. Найдём условие, при котором колебания будут отсутствовать.

Математической базой для решения поставленной задачи является система уравнений (5.2). Перепишем первое и третье уравнения этой системы

$$\left. \begin{aligned} e_n(p) - c \cdot \omega(p) &= L_{яц} \cdot pi(p) + R_{яц} \cdot i(p); \\ M(p) - M_c(p) &= J \cdot p\omega(p). \end{aligned} \right\} (6.1)$$

Уравнение движения выразим через ток якоря и учтём условие $M_c = 0$

$$\left. \begin{aligned} e_n(p) - c \cdot \omega(p) &= L_{яц} \cdot pi(p) + R_{яц} \cdot i(p); \\ c \cdot i(p) &= J \cdot p\omega(p). \end{aligned} \right\} (6.2)$$

Из второго уравнения находим ток якоря

$$i(p) = \frac{J}{c} p\omega(p)$$

Подставив это выражение в первое уравнение системы (6.2), получим

$$e_n(p) - c \cdot \omega(p) = \frac{L_{яц} \cdot J}{c} p^2 \cdot \omega(p) + \frac{R_{яц} \cdot J}{c} p \cdot \omega(p)$$

Сгруппируем члены, содержащие скорость

$$\left(\frac{L_{яц} \cdot J}{c^2} p^2 + \frac{R_{яц} \cdot J}{c^2} p + 1 \right) \cdot \omega(p) = \frac{e_n(p)}{c}$$

Рассмотрим отдельные члены этого равенства:

$$\frac{L_{\text{яц}} \cdot J}{c^2} = \frac{L_{\text{яц}} \cdot J}{c^2} \cdot \frac{R_{\text{яц}}}{R_{\text{яц}}} = \frac{L_{\text{яц}}}{R_{\text{яц}}} \cdot \frac{J \cdot R_{\text{яц}}}{c^2} = T_{\text{я}} \cdot T_{\text{м}},$$

здесь введены обозначения

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{яц}}}{R_{\text{яц}}} - \text{электромагнитная постоянная времени якорной цепи,}$$

$$T_{\text{м}} = \frac{J \cdot R_{\text{яц}}}{c^2} - \text{механическая постоянная времени электропривода.}$$

С учётом принятых обозначений получаем

$$(T_{\text{я}} \cdot T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1) \cdot \omega(p) = \frac{e_{\text{п}}(p)}{c}. \quad (6.3)$$

Это равенство представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка в операторной форме записи. Его можно решить как аналитически, так и с помощью компьютера, воспользовавшись одной из стандартных программ. В правой части этого равенства находится член, характеризующий установившуюся скорость после окончания переходного процесса. Принимая $p=0$, находим

$$\omega_{\text{уст.}} = \frac{E_{\text{п.уст.}}}{c} \quad (6.4)$$

Левая часть уравнения (6.3) отражает поведение привода в переходных

процессах. Выражение в скобках является характеристическим уравнением

$$T_{\text{я}} \cdot T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1 = 0. \quad (6.5)$$

Корни этого уравнения могут быть как действительные отрицательные числа, так и комплексно-сопряжёнными. При действительных корнях процессы монотонные без колебаний. Если корни комплексно-сопряжённые, то их мнимая часть характеризует частоту собственных колебаний.

Найдём корни характеристического уравнения (6.5)

$$p_{1,2} = \frac{-T_{\text{м}} \pm \sqrt{T_{\text{м}}^2 - 4 \cdot T_{\text{я}} \cdot T_{\text{м}}}}{2 \cdot T_{\text{я}} \cdot T_{\text{м}}} = -\alpha \pm j\Omega, \quad (6.6)$$

$\alpha = \frac{1}{2T_{\text{я}}}$ - коэффициент, характеризующий затухание переходного процесса

$$\Omega = \frac{\sqrt{T_{\text{м}}^2 - 4 \cdot T_{\text{я}} \cdot T_{\text{м}}}}{2 \cdot T_{\text{я}} \cdot T_{\text{м}}} \quad \text{- частота собственных колебаний}$$

Рассчитаем в числовом виде корни характеристического уравнения. Электромагнитная постоянная времени была рассчитана ранее $T_y = 0,03c$. Вычислим механическую постоянную времени T_m , α и Ω

$$T_m = \frac{J \cdot R_{\text{яц}}}{c^2} = \frac{0,325 \cdot 0,25}{1,85^2} = 0,024c;$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot T_y} = \frac{1}{2 \cdot 0,03} = 16,6;$$

$$\Omega = \frac{\sqrt{T_m^2 - 4 \cdot T_y \cdot T_m}}{2 \cdot T_y \cdot T_m} = \frac{\sqrt{0,024^2 - 4 \cdot 0,03 \cdot 0,024}}{2 \cdot 0,03 \cdot 0,024} = 33,3 \text{ рад}/c$$

Из выполненных расчётов видно, что корни получились комплексно-сопряжённые. Значит, ожидаемые переходные процессы должны носить колебательный характер. Период повторяемости колебаний $T = 2\pi / \Omega = 2\pi / 33,3 = 0,19c$.

Из (6.6) следует, что при выполнении условия

$$T_m / T_y \geq 4 \quad (6.7)$$

корни становятся действительными отрицательными числами. В этом случае процессы будут монотонными, колебания отсутствуют.

Имея общее представление о характере переходных процессов, можно переходить к их расчёту. Расчёт проведём с помощью пакета программ системы MATLAB 6.5. Схема математической модели (рис.6.1) составлена по структурной схеме (рис.5.2). Внутри каждого элемента записаны передаточные функции, числовые значения параметров указаны и в таблице

6.1.

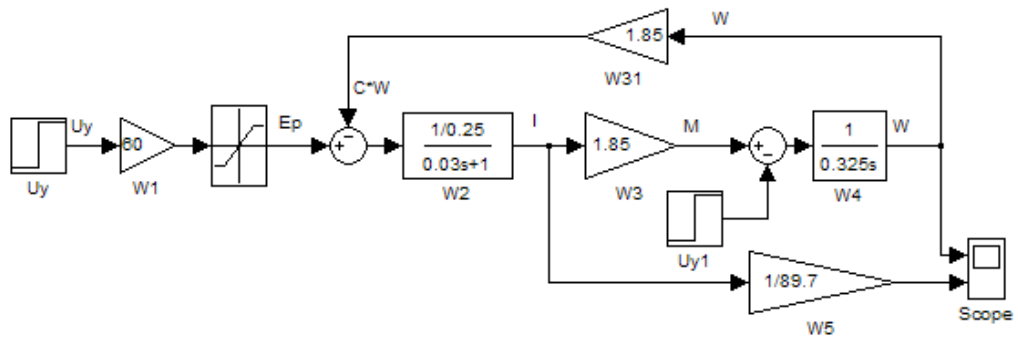


Рис.6.1. Схема математической модели

Таблица 6.1. Параметры модели

Параметр	Числовое значение
K_n	60
$R_{яц}, Ом$	0,25
$T_я, с$	0,03
$c, В \cdot с / рад$	1,85
$J, кгм^2$	0,325
$E_{пмакс}, В$	± 500
$I_n, А$	89,7

На рис.6.2. приводятся кривые переходных процессов при скачкообразном приложении управляющего воздействия, а затем в момент времени $t=0,4с$ скачком прикладывается статический момент $M_c = M_n$.

Ток представлен в относительных единицах. Процессы носят

колебательный характер, пол периода колебаний $0,5T \approx 0,1c$. Этот результат хорошо согласуется с ранее выполненными расчётами.

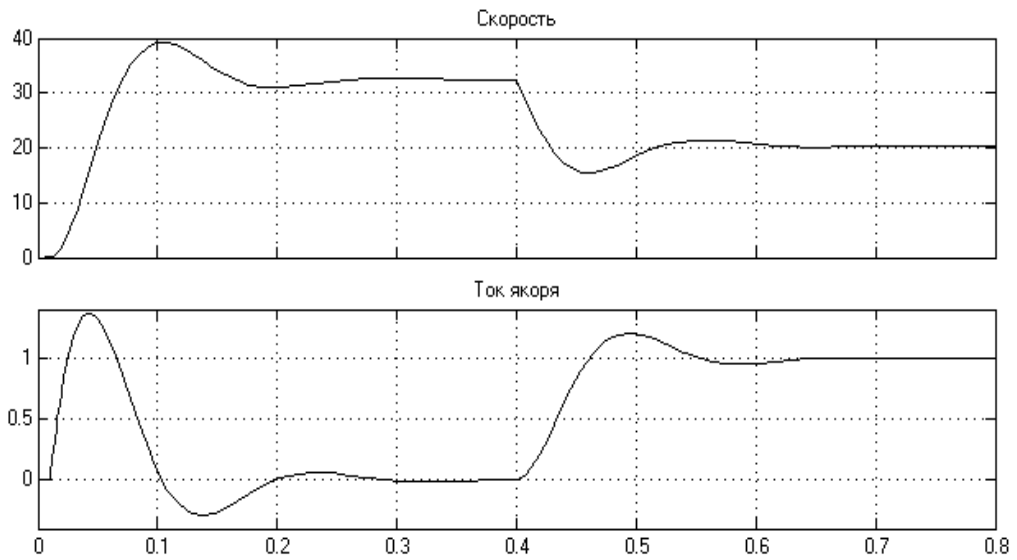


Рис.6.2. Процессы при пуске и набросе нагрузки

Проведём анализ влияния постоянной времени T_y на качество переходных процессов. Установим $T_y = T_m / 4 = 0,024 / 4 = 0,006c$. Этому случаю соответствуют процессы на рис.6.3.

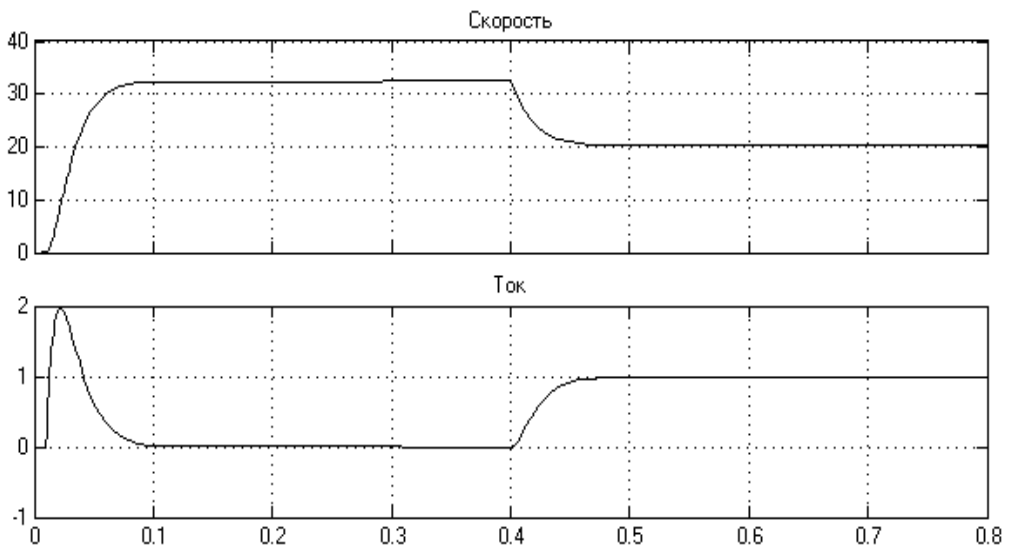


Рис.6.3. Переходные процессы при $T_y = 0,006c, T_m = 0,024c$

Из приведенных кривых видно, что процессы стали монотонными и более быстрыми, времена переходных процессов $t_{\text{шт}} \approx (3-4)T_{\text{м}} = (3-4) \cdot 0,024 = (0,072-0,096)c$. Установившаяся скорость при отсутствии нагрузки

$$\omega_{\text{уст.}} = \frac{K_{\text{п}} \cdot U_{\text{у}}}{c} = \frac{60 \cdot 1}{1,85} = 32,4 \text{ рад} / c$$

При приложении номинальной нагрузки скорость уменьшается

$$\omega_{\text{уст.}} = \frac{K_{\text{п}} \cdot U_{\text{у}}}{c} - \frac{I_{\text{н}} \cdot R_{\text{ящ}}}{c} = \frac{60 \cdot 1}{1,85} - \frac{89,7 \cdot 0,25}{1,85} = 20,3 \text{ рад} / c$$

Эти результаты хорошо согласуются с кривыми на рис.6.2 и рис.6.3.

Одна из задач при формировании переходных процессов сводится к тому, чтобы обеспечить плавность переходного процесса с одновременным ограничением тока якоря на допустимом уровне. Наиболее просто эта задача решается с помощью задатчика интенсивности, который устанавливают на входе преобразователя. Задатчик интенсивности – это устройство, которое на своём выходе формирует во времени линейно меняющийся сигнал

$$U_{\text{вых. зи}} = K_{\text{зи}} \cdot t,$$

где $K_{\text{зи}}$ - постоянный коэффициент.

По окончании переходного процесса выходной сигнал остаётся постоянным и равен сигналу на входе

$$U_{\text{вых. зн уст.}} = U_{\text{вх}}$$

Для расчёта переходных процессов в том случае следует установить на входе преобразователя (рис.6.1) задатчик интенсивности, его схема модели приводится на рис.6.4, а связь между входным и выходным напряжениями задатчика интенсивности характеризуется процессами на рис.6.5. Наклон характеристики $U_{\text{вых. зн}} = f(t)$ зависит от коэффициента “К” на входе интегратора, который в модели на рис.6.5 принят равным 30.

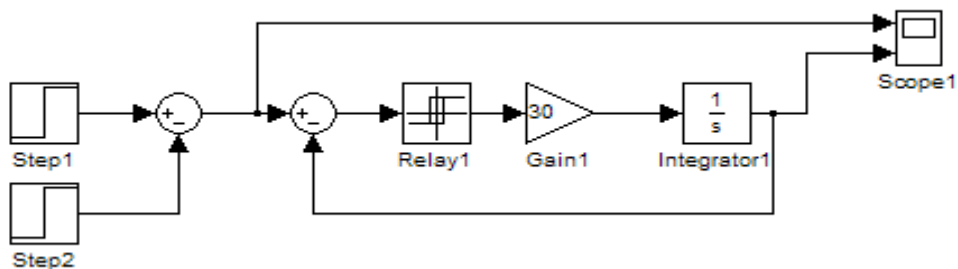


Рис.6.4. Модель задатчика интенсивности

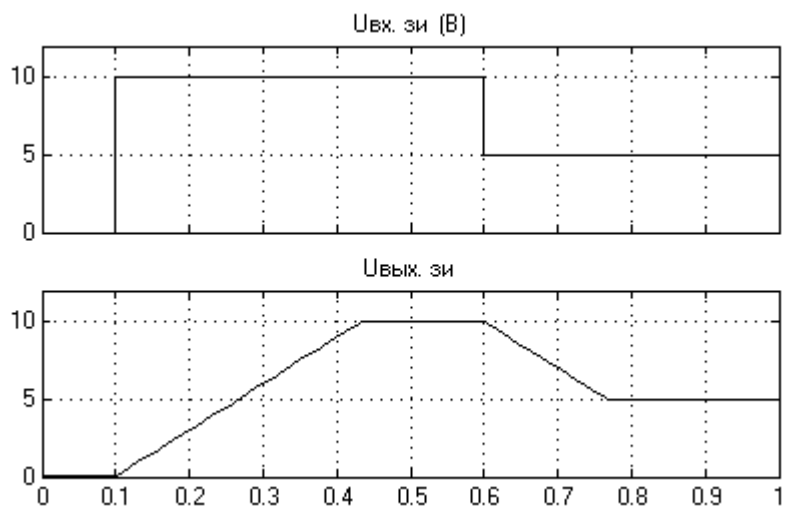


Рис.6.5. временные характеристики задатчика интенсивности

Кривые переходного процесса при пуске на номинальную скорость с управлением от ЗИ приводятся на рис.6.6.

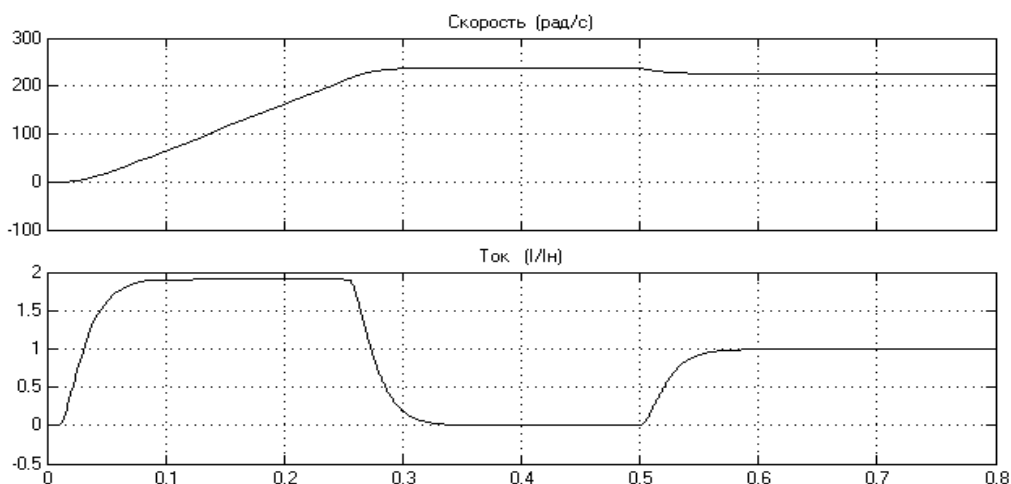


Рис.6.6. Переходный процесс при пуске с управлением от задатчика интенсивности

При выполнении расчётов постоянные времени $T_m = 0,024c$ и $T_я = 0,006c$ приняты те же, что и для кривых на рис.6.3. Это сделано для того, чтобы процессы были монотонными. В этом случае более наглядно проявляется особенность процессов с управлением от ЗИ. Если рассматривать процесс разгона на номинальную скорость (рис.6.6), то он состоит из 3-х участков. На начальном участке нарастает ток якоря, скорость начинает нарастать по параболе. Длительность времени этого участка примерно такое же, как и на рис.6.3. Оно зависит как от постоянной времени $T_я$, так и от коэффициента задатчика интенсивности $K_{зи}$. На втором участке разгона ток автоматически остаётся постоянным, а скорость меняется линейно во времени. Величина тока и ускорения зависят только от коэффициента $K_{зи}$. При повышении этого коэффициента ток и ускорение повышаются. Таким образом, с помощью задатчика интенсивности можно сформировать на основном участке разгона переходный процесс с заданным ускорением. Когда скорость приближается к заданному значению, выходное напряжение перестаёт меняться во времени, начинается 3-й участок переходного процесса. Так как разгон происходил без нагрузки, то на этом участке ток спадает по экспоненте до нуля. Процесс при

приложении статического момента протекает так же, как и на рис.6.3.