

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
ОТРАСЛИ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к расчетно-графическим работам для студентов
специальности 1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических
процессов и производств (легкая промышленность)»**

ВИТЕБСК
2016

УДК 621.3(07)

Автоматизированный электропривод отрасли : методические указания к расчетно-графическим работам для студентов специальности 1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств (легкая промышленность)».

Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2015.

Составители: доц. Попов Ю.В.,
доц. Ильющенко А.В.
ст. преп. Куксевич В.Ф.

Методические указания составлены в соответствии с учебной программой курса «Автоматизированный электропривод отрасли», изучаемого студентами специальности 1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств (легкая промышленность)».

Приведены требования к выполнению и оформлению расчетно-графических работ, варианты заданий, методические указания к выполнению работ и примеры расчета.

Одобрено кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» УО «ВГТУ» 24.09.2015, протокол № 2.

Рецензент: ст. преп. Клименкова С.А.
Редактор: доц. Надежная Н.Л.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ» 30.10.2015, протокол № 8.

Ответственный за выпуск: Букин Ю.А.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Подписано к печати 07.06.16. Формат 60x90 1/16. Уч.-изд. лист. 1.9.

Печать ризографическая. Тираж 60 экз. Заказ № 181.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 г.

210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

Содержание

Общие требования к выполнению и оформлению расчетно-графических работ	4
Расчетно-графическая работа № 1 <i>Расчет характеристик и определение параметров двигателя как элемента САУ</i>	5
Расчетно-графическая работа № 2 <i>Разработка схемы управления дискретного электропривода</i>	19
Литература	30

Общие требования к выполнению и оформлению расчетно-графических работ

При выполнении и оформлении расчетно-графических работ следует:

- на титульном листе указать название университета и кафедры, номер и название расчетно-графической работы, номер учебной группы, фамилию, имя и отчество студента;

- использовать стандартные листы бумаги формата А4;

- при расчетах пользоваться международной системой единиц СИ;

- решения сопровождать краткими пояснениями;

- формулы приводить сначала в общем виде, затем подставлять числовые значения;

- при наличии значительных однотипных вычислений привести расчет одного из них в качестве примера, результаты однотипных вычислений внести в таблицу;

- арифметическая правильность вычислений и указания размерности являются обязательными;

- схемы и графики выполнять, используя стандартные графические обозначения элементов схем и стандартные буквенные обозначения величин;

- графические объекты пронумеровать и снабдить подрисовочными подписями;

- графики и диаграммы выполнить в прямоугольной системе координат с указанием масштабов по осям координат;

- при использовании справочных материалов делать ссылку на перечень литературы, приведенный в конце работы.

Если преподавателем будет предложено переделать какой-либо раздел работы, то в этом случае исправления вносятся в текст при помощи корректирующих материалов, с тем расчетом, чтобы исправленная работа представляла единое целое.

Листы с большим числом исправлений следует переделать полностью. Все замененные листы обязательно приложить к исправленной работе. Замечания преподавателя не разрешается ни стирать, ни заклеивать.

Расчетно-графическая работа № 1

Расчет характеристик и определение параметров двигателя как элемента САУ

Данные варианта (тип двигателя, номинальные значения напряжения якорной цепи и обмотки возбуждения) определяются преподавателем в зависимости от порядкового номера фамилии студента в списке группы. Технические данные двигателя выбираются из таблиц 10.11, 10.13 – 10.15 [1] (обратить внимание на примечания к табл. 10.11 по выбору сопротивления обмотки возбуждения).

1. Используя уравнения, описывающие процессы в двигателе постоянного тока в установившемся режиме, получить выражения для статических (механической и электромеханической) характеристик электродвигателя.

2. Для заданного двигателя:

а) рассчитать и построить статические характеристики для следующих случаев:

- при номинальном магнитном потоке ($\Phi = \Phi_n$) и напряжениях $U_{я}$ на обмотке якоря, равных: $U_{ян}, 0,5U_{ян}, 0, -U_{ян}, -0,5U_{ян}$;

- при магнитном потоке $\Phi = \frac{3}{4}\Phi_n$ и напряжениях $U_{я}$ на обмотке якоря, равных: $U_{ян}, -U_{ян}$;

б) определить жесткость механических характеристик.

3. Используя выражения, описывающие процессы в двигателе постоянного тока в переходных режимах, получить выражения для передаточных функций электродвигателя при управлении напряжением на обмотке якоря и по возмущающему воздействию.

4. Для заданного двигателя, используя технические данные, определить значения коэффициентов и постоянных времени, входящих в выражения передаточных функций.

5. Используя выражения, описывающие процессы в двигателе постоянного тока в переходных режимах, составить эквивалентную структурную схему электродвигателя, содержащую ток обмотки якоря в качестве промежуточной величины. Изобразить эквивалентную структурную схему электродвигателя с учетом рассчитанных параметров.

6. Произвести моделирование переходного процесса пуска двигателя в программе VisSim, используя составленную эквивалентную структурную схему, и определить показатели качества переходного процесса.

Методика расчета

Пусть согласно варианту задан тип двигателя постоянного тока 2ПБ160ЛГУХЛ4. Технические данные двигателя сведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические данные двигателя 2ПБ160ЛГУХЛ4

Мощность, кВт	Напряжение, В		Частота вращения, об/мин		КПД, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн	Момент инерции, кг·м ²
	цепи якоря	обмотки возбуждения	номинальная	максимальная		якоря	добавочных полюсов	возбуждения		
7,5	220	110	2240	4000	88	0,096	0,073	49,4	3,6	0,1

1. К статическим характеристикам привода относятся механическая и электромеханическая характеристики. Первая представляет собой зависимость скорости вращения двигателя ω от момента M . Уравнение механической характеристики $\omega = f(M)$ имеет вид:

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{MR_{яц}}{(K\Phi)^2}. \quad (1)$$

Электромеханическая характеристика представляет собой зависимость скорости вращения двигателя от тока в обмотке якоря $\omega = f(I_{я})$. Уравнение электромеханической характеристики имеет вид:

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{R_{яц}}{K\Phi} I_{я}. \quad (2)$$

В режиме идеального холостого хода ток в цепи якоря $I_{я} = 0$, а следовательно, и момент $M = 0$, поэтому скорость вращения в режиме идеального холостого хода равна:

$$\omega_0 = \frac{U_{я}}{K\Phi}. \quad (3)$$

Таким образом, уравнения механической и электромеханической характеристик можно привести к виду:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (4)$$

где $\Delta\omega$ – изменение скорости вращения, вызванное нагрузкой двигателя. Зависимость $\Delta\omega$ от тока нагрузки определяется выражением

$$\Delta\omega = -\frac{R_{яц} I_{я}}{K\Phi}, \quad (5)$$

а зависимость $\Delta\omega$ от момента нагрузки имеет вид:

$$\Delta\omega = -\frac{M \cdot R_{яц}}{(K\Phi)^2}. \quad (6)$$

Таким образом, как это следует из (4), механическая и электромеханическая характеристики электродвигателя независимого возбуждения представляют собой прямые линии. Для получения их выражений рассчитывают следующие параметры.

Номинальная скорость вращения якоря двигателя:

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 2240}{60} = 234,45 \text{ рад/с},$$

где n_n – номинальная частота вращения.

Номинальный момент нагрузки двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{7500}{234,45} = 31,99 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальный ток обмотки возбуждения

$$I_{вн} = \frac{U_{вн}}{k_t R_g} = \frac{110}{1,28 \cdot 49,4} = 1,74 \text{ А},$$

где k_t – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления при нагреве, $k_t = 1,28$. R_g – сопротивление обмотки возбуждения при температуре 15°C .

Номинальный ток якоря рассчитывают, используя формулу для КПД:

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_{потр}} = \frac{P_n}{U_{ян} I_{ян} + I_{вн} U_{вн}},$$

откуда

$$I_{ян} = \frac{P_n - \eta_n \cdot I_{вн} \cdot U_{вн}}{\eta_n U_{ян}} = \frac{P_n - \eta_n \cdot I_{вн} \cdot U_{вн}}{\eta_n U_{ян}} = \frac{7500 - 0,88 \cdot 1,74 \cdot 110}{0,88 \cdot 220} = 37,87 \text{ А}.$$

где $I_{вн}$, $U_{вн}$ – номинальные значения напряжения и тока обмотки возбуждения.

Сопротивление щеток:

$$R_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_{ян}} = \frac{2}{37,87} = 0,053 \text{ Ом},$$

где $\Delta U_{щ}$ - падение напряжения в щетках, которое принимают равным $2 \div 2,7 \text{ В}$.

Сопротивление якорной цепи

$$R_{яц} = k_t (R_{я} + R_{дн}) + R_{щ} = 1,28(0,096 + 0,073) + 0,053 = 0,269 \text{ Ом},$$

где $R_{я}$, $R_{дн}$ – сопротивление обмоток якоря и дополнительных полюсов при температуре 15°C .

Из выражения (2) определяют значение произведения $K\Phi_n$, где K – конструктивный коэффициент двигателя, равный:

$$K = \frac{pN}{2\pi a},$$

где p – число пар полюсов машины; N – число активных проводников якоря; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

Учитывая, что коэффициент K определить по каталогу не представляется возможным, а в формулах статических характеристик используется произведение $K\Phi$, то выражение (2) для номинального режима примет вид:

$$\omega_n = \frac{U_{ян}}{K\Phi_n} - \frac{R_{яц}}{K\Phi_n} I_{ян},$$

откуда

$$K\Phi_n = \frac{U_{ян} - R_{яц} I_{ян}}{\omega_n} = \frac{220 - 0,269 \cdot 37,87}{234,45} = 0,895 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Таким образом, для случая номинального магнитного потока ($\Phi = \Phi_n$) выражения механической и электромеханической характеристик соответственно имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi_n} - \frac{MR_{яц}}{(K\Phi_n)^2} = \frac{U_{я}}{0,895} - \frac{M \cdot 0,269}{(0,895)^2} = \frac{U_{я}}{0,895} - 0,336M,$$

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi_n} - \frac{R_{яц} I_{я}}{K\Phi_n} = \frac{U_{я}}{0,895} - \frac{0,269 I_{я}}{0,895} = \frac{U_{я}}{0,895} - 0,3 I_{я}.$$

Для магнитного потока $\Phi = \frac{3}{4}\Phi_n$ выражения механической и электромеханической характеристик соответственно имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{я}}{\frac{3}{4}K\Phi_n} - \frac{MR_{яц}}{\left(\frac{3}{4}K\Phi_n\right)^2} = \frac{U_{я}}{\frac{3}{4}0,895} - \frac{M \cdot 0,269}{\left(\frac{3}{4}0,895\right)^2} = \frac{U_{я}}{0,671} - 0,597M,$$

$$\omega = \frac{U_{я}}{\frac{3}{4}K\Phi_n} - \frac{R_{яц}I_{я}}{\frac{3}{4}K\Phi_n} = \frac{U_{я}}{\frac{3}{4}0,895} - \frac{0,269I_{я}}{\frac{3}{4}0,895} = \frac{U_{я}}{0,671} - 0,4I_{я}.$$

2. Так как механическая и электромеханическая характеристики прямолинейны, построение любой из них осуществляется по двум точкам.

Одной из этих точек является точка идеального холостого хода с координатами $(\omega_0; M=0)$ для механической и $(\omega_0; I_{я}=0)$ для электромеханической характеристики, а другой – точка номинальной нагрузки в двигательном режиме с координатами $(\omega_n; M_n)$ для механической и $(\omega_n; I_{ян})$ для электромеханической характеристик.

Данные для построения механических характеристик двигателя при номинальном магнитном потоке $(\Phi = \Phi_n)$ и напряжениях $U_{я}$ на обмотке якоря, равных: $U_{ян}, 0,5U_{ян}, 0, -U_{ян}, -0,5U_{ян}$, приведены в таблице 2, а при магнитном потоке $\Phi = \frac{3}{4}\Phi_n$ и напряжениях $U_{я}$ на обмотке якоря, равных: $U_{ян}, -U_{ян}$, – в таблице 3.

Таблица 2 – Данные для построения механических характеристик двигателя при $\Phi = \Phi_n$

$U_{я}, B$	220	110	0	-110	-220
$\omega_0, рад/с$ (при $M = 0$)	245,8	122,9	0	-122,9	-245,8
$\omega_n, рад/с$ (при $M_n = 31,99 Н \cdot м$)	235,1	112,2	-10,8	-133,7	-256,6

Таблица 3 – Данные для построения механических характеристик двигателя при $\Phi = \frac{3}{4}\Phi_n$

$U_{я}, В$	220	-220
$\omega_0, рад/с$ (при $M = 0$)	327,9	-327,9
$\omega_n, рад/с$ (при $M_n = 31,99 Н \cdot м$)	308,8	-347

Данные для построения электромеханических характеристик двигателя при номинальном магнитном потоке ($\Phi = \Phi_n$) и напряжениях $U_{я}$ на обмотке якоря, равных: $U_{ян}, 0,5U_{ян}, 0, -U_{ян}, -0,5U_{ян}$, приведены в таблице 4, а при магнитном потоке $\Phi = \frac{3}{4}\Phi_n$ и напряжениях $U_{я}$ на обмотке якоря, равных: $U_{ян}, -U_{ян}, -$ в таблице 5.

Таблица 4 – Данные для построения электромеханических характеристик двигателя при $\Phi = \Phi_n$

$U_{я}, В$	220	110	0	-110	-220
$\omega_0, рад/с$ (при $I_{я} = 0$)	245,8	122,9	0	-122,9	-245,8
$\omega_n, рад/с$ (при $I_{ян} = 37,87 А$)	234,5	111,5	-11,4	-134,3	-257,2

Таблица 5 – Данные для построения электромеханических характеристик

двигателя при $\Phi = \frac{3}{4} \Phi_n$

$U_{я}, В$	220	-220
$\omega_0, рад/с$ (при $I_{я} = 0$)	327,9	-327,9
$\omega_n, рад/с$ (при $I_{ян} = 37,87 А$)	312,7	-343

Механические характеристики двигателя при номинальном магнитном потоке ($\Phi = \Phi_n$) изображены на рисунке 1.

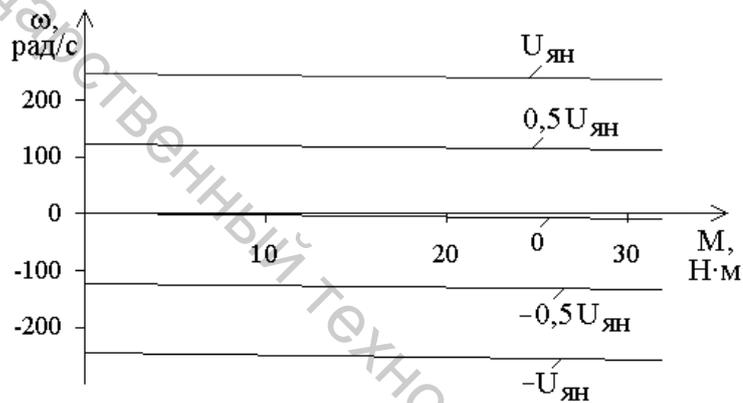


Рисунок 1 – Механические характеристики двигателя при $\Phi = \Phi_n$

Механические характеристики двигателя при магнитном потоке $\Phi = \frac{3}{4} \Phi_n$ изображены на рисунке 2.

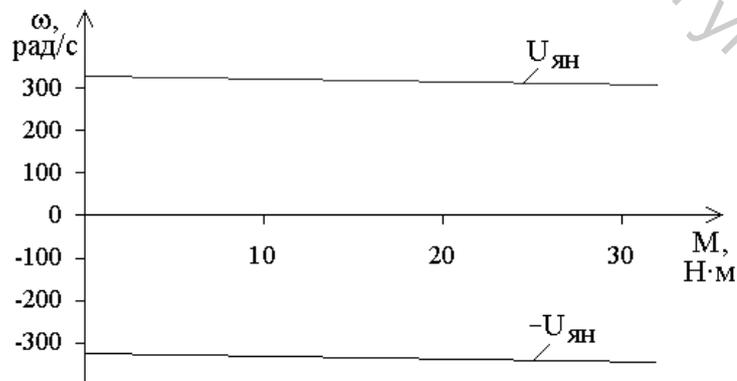


Рисунок 2 – Механические характеристики двигателя при $\Phi = \frac{3}{4} \Phi_n$

Электромеханические характеристики двигателя при номинальном магнитном потоке ($\Phi = \Phi_n$) изображены на рисунке 3.

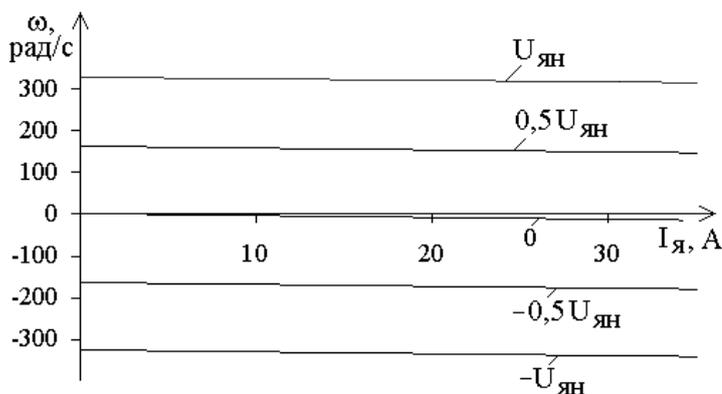


Рисунок 3 – Электромеханические характеристики двигателя при $\Phi = \Phi_n$

Электромеханические характеристики двигателя при магнитном потоке $\Phi = \frac{3}{4}\Phi_n$ изображены на рисунке 4.

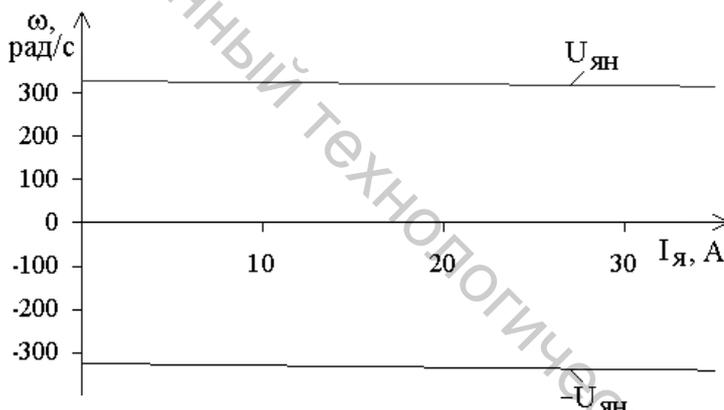


Рисунок 4 – Электромеханические характеристики двигателя при $\Phi = \frac{3}{4}\Phi_n$

Степень наклона статических характеристик оценивается жесткостью. Для механической характеристики двигателя постоянного тока согласно (6) жесткость определяется выражением

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = -\frac{(K\Phi)^2}{R_{яц}}$$

Тогда при $\Phi = \Phi_n$:

$$\beta = -\frac{(K\Phi_n)^2}{R_{яц}} = -\frac{(0,895)^2}{0,269} = -2,98$$

При $\Phi = \frac{3}{4} \Phi_n$:

$$\beta = -\frac{\left(\frac{3}{4} K\Phi_n\right)^2}{R_{яц}} = -\frac{(0,671)^2}{0,269} = -1,67.$$

3. Используя выражения, описывающие процессы в двигателе постоянного тока в переходных режимах, можно получить выражения для передаточных функций электродвигателя при управлении напряжением на обмотке якоря и по возмущающему воздействию.

Чаще всего в электрических приводах (ЭП) переходные режимы возникают при подаче (снятии) питающего двигателя напряжения, представляющего собой управляющее воздействие для ЭП, или при изменении момента нагрузки, являющегося для ЭП возмущающим воздействием.

Для расчета и анализа переходных процессов находят переходные функции – зависимости координат ЭП от времени. Эти функции описываются дифференциальными уравнениями.

При управлении ДПТ подаваемым на его якорь напряжением, переходные процессы в двигателе описываются следующими уравнениями:

$$U_{я} = R_{яц} \cdot i_{я} + e + L_{яц} \frac{di_{я}}{dt}, \quad (7)$$

$$e = K\Phi\omega, \quad (8)$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (9)$$

$$M = K\Phi i_{я}, \quad (10)$$

где $L_{яц}$ – индуктивность цепи якоря, J – момент инерции.

Принимая в качестве входной (управляющей) величины $U_{я}$, выходной – ω , возмущающего воздействия – M_c и подставляя (8), (9), (10) в (7), получают

$$T_{я} T_{м} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_{м} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2} \left(T_{я} \frac{dM_c}{dt} + M_c \right), \quad (11)$$

где $T_{я}$ – электромагнитная постоянная цепи якоря: $T_{я} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}}$,

T_m – электромеханическая постоянная двигателя: $T_m = J \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2}$.

В операторной форме записи уравнение (11) примет вид:

$$\begin{aligned} T_я T_m p^2 \omega(p) + T_m p \omega(p) + \omega(p) &= \\ = \frac{U_я(p)}{K\Phi} - \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2} (T_я p M_c(p) + M_c(p)). \end{aligned} \quad (12)$$

Принимая $M_c(p) = 0$, из уравнения (12) находят передаточную функцию двигателя по управляющему воздействию:

$$W_\omega(p) = \frac{\omega(p)}{U_я(p)} = \frac{K_\delta}{T_я T_m p^2 + T_m p + 1}, \quad (13)$$

где K_δ – коэффициент передачи двигателя по управляющему воздействию:

$$K_\delta = \frac{1}{K\Phi}.$$

Для определения передаточной функции ДПТ по возмущающему воздействию принимают в выражении (12) $U_я(p) = 0$. Тогда

$$W_{M_c}(p) = \frac{\Delta\omega(p)}{M_c(p)} = - \frac{K_m (T_я p + 1)}{T_я T_m p^2 + T_m p + 1}, \quad (14)$$

где K_m – коэффициент передачи двигателя по возмущающему воздействию:

$$K_m = \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2}.$$

4. Для заданного двигателя, используя технические данные, определяют значения коэффициентов и постоянных времени, входящих в выражения передаточных функций.

Электромагнитная постоянная цепи якоря

$$T_я = \frac{L_{яц}}{R_{яц}} = \frac{3,6 \cdot 10^{-3}}{0,269} = 0,013 \text{ с}.$$

Электромеханическая постоянная двигателя

$$T_m = J \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2} = 0,1 \cdot \frac{0,269}{(0,895)^2} = 0,034 \text{ с}.$$

Коэффициент передачи двигателя по управляющему воздействию

$$K_\delta = \frac{1}{K\Phi} = \frac{1}{0,895} = 1,117.$$

Коэффициент передачи двигателя по возмущающему воздействию

$$K_m = \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2} = \frac{0,269}{(0,895)^2} = 0,336.$$

5. Используя выражения, описывающие процессы в двигателе постоянного тока в переходных режимах, составляют эквивалентную структурную схему электродвигателя, содержащую ток обмотки якоря в качестве промежуточной величины.

Эквивалентная структурная схема ДПТ является графическим отображением выражения передаточной функции двигателя по управляющему воздействию.

Для получения схемы с изображением тока в обмотке якоря в качестве промежуточной величины, используют уравнение (7), записанное в операторной форме:

$$U_{я}(p) = R_{яц}I_{я}(p) + E(p) + L_{яц}pI_{я}(p),$$

$$U_{я}(p) = I_{я}(p)(R_{яц} + L_{яц}p) + E(p),$$

$$U_{я}(p) = I_{я}(p)R_{яц}(1 + T_{я}p) + E(p).$$

Тогда

$$I_{я}(p) = \frac{U_{я}(p) - E(p)}{R_{яц}(1 + T_{я}p)}. \quad (15)$$

Согласно уравнению (9) в операторной форме

$$M(p) - M_c(p) = Jp\omega(p).$$

Тогда

$$\omega(p) = \frac{M(p) - M_c(p)}{Jp}. \quad (16)$$

Согласно уравнению (10) в операторной форме

$$M(p) = K\Phi I_{я}(p) = \frac{I_{я}(p)}{K_{\delta}}, \quad (17)$$

$$M_c(p) = K\Phi I_c(p) = \frac{I_c(p)}{K_{\delta}}, \quad (18)$$

где $I_c(p)$ – изображение расчетного тока, соответствующего моменту M_c :

$$I_c(p) = M_c(p)K_{\delta} \quad (19)$$

Тогда выражение (16) может быть преобразовано к виду

$$\omega(p) = \left[U_{\text{я}}(p) - I_{\text{с}}(p) \right] \frac{R_{\text{яц}} K_{\text{д}}}{T_{\text{м}} p}, \quad (20)$$

Согласно уравнению (8) в операторной форме

$$E(p) = K_{\Phi} \omega(p) = \frac{\omega(p)}{K_{\text{д}}} \quad (21)$$

Таким образом, используя выражения (15), (19), (20) и (21), получают эквивалентную структурную схему (рис. 5), в которой представлены все основные переменные, а также изображение тока якоря.

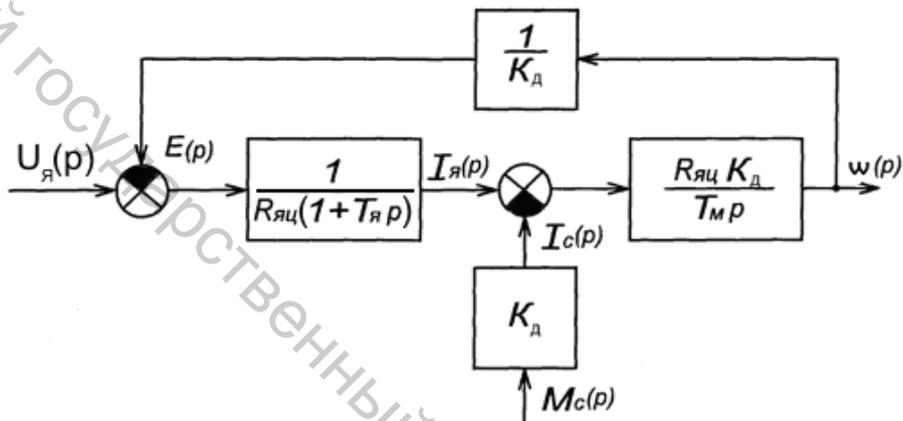


Рисунок 5 – Эквивалентная структурная схема ДПТ с изображением тока якоря в качестве промежуточной величины

Изображают эквивалентную структурную схему электродвигателя с учетом рассчитанных параметров (рис. 6).

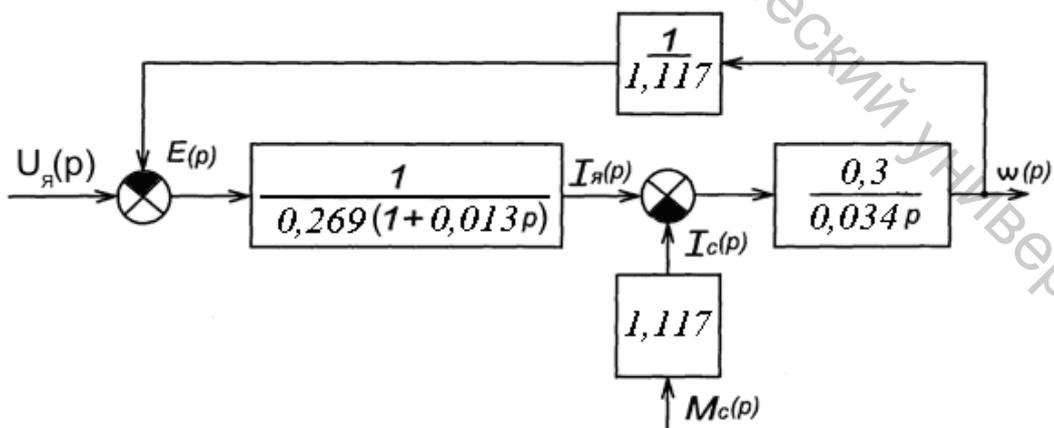


Рисунок 6 – Эквивалентная структурная схема ДПТ с учетом рассчитанных параметров

6. Производят моделирование переходного процесса пуска двигателя в программе VisSim, используя составленную эквивалентную структурную схему (рис. 7).

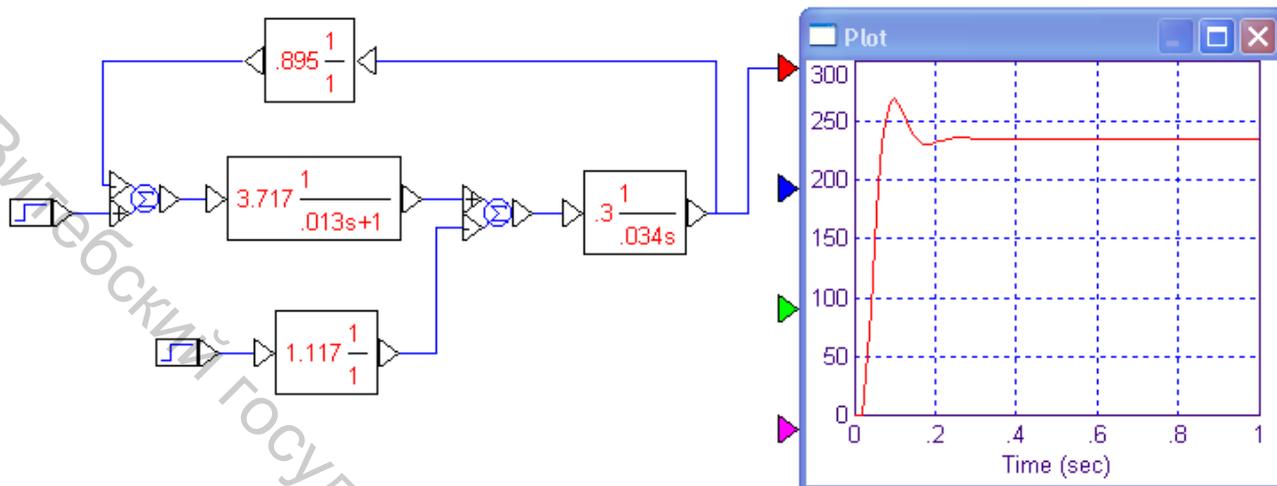


Рисунок 7 – Схема моделирования переходного процесса пуска двигателя в программе VisSim

Используя график полученного в результате моделирования переходного процесса, определяют показатели его качества, произведя соответствующие построения (рис. 8).

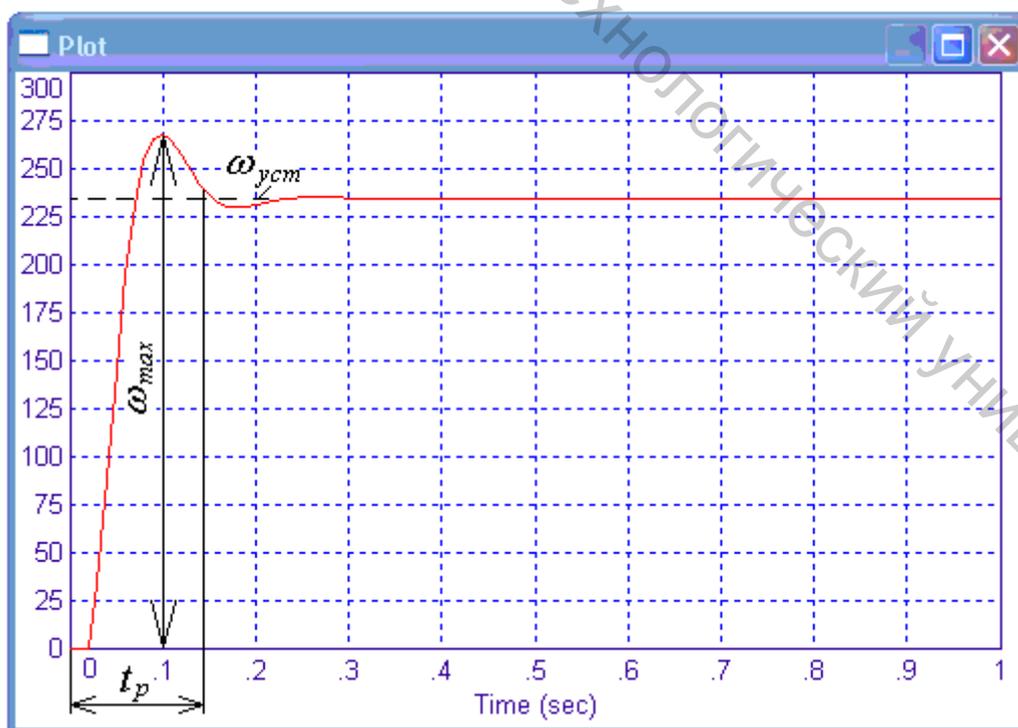


Рисунок 8 – График переходного процесса

Основными показателями качества являются перерегулирование, время регулирования, количество колебаний регулируемой величины за время регулирования и степень затухания.

Перерегулирование характеризует величину максимального динамического отклонения регулируемой величины от установившегося значения и определяется для данного переходного процесса по формуле

$$\sigma = \frac{\Delta\omega_{max}}{\omega_{уст}} = \frac{\omega_{max} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100\% = \frac{265 - 235}{235} = 12,77\%.$$

Время регулирования представляет собой время, отсчитываемое от начала переходного процесса, по истечении которого отклонение регулируемой величины от установившегося значения не будет превышать $1 \div 5\%$. Для данного переходного процесса (рис. 8), приняв отклонение регулируемой величины равным 1% , время регулирования $t_p = 0,14\text{ с}$.

Количество колебаний регулируемой величины за время регулирования (рис. 8) $n = 1$.

Степень затухания характеризует свойство колебаний переходного процесса и определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega_{max} - \Delta\omega}{\Delta\omega_{max}},$$

где $\Delta\omega$ – амплитуда колебания регулируемой величины, следующего за максимальным.

Так как количество колебаний регулируемой величины за время регулирования (рис. 8) равно 1 , то $\Delta\omega = 0$, а значит степень затухания данного переходного процесса $\varepsilon = 1$.

Допустимые значения величин показателей качества устанавливаются на основании опыта эксплуатации и проектирования конкретного объекта регулирования с учетом требований к его динамике.

Расчетно-графическая работа № 2

Разработка схемы управления дискретного электропривода

1. Разработать схему автоматического управления электропривода постоянного тока, обеспечивающую пуск двигателя и динамическое торможение при отключении в функции времени.

2. Дать подробное описание работы схемы.

3. Для заданного двигателя рассчитать значения сопротивлений секций пускового и тормозного реостатов.

4. Определить необходимые выдержки всех реле времени.

Примечание: при пуске и торможении момент сопротивления принять постоянным и равным номинальному, а момент инерции электропривода – равным удвоенному моменту инерции двигателя.

5. Объяснить, какие изменения произойдут в работе разработанной схемы, если значения момента сопротивления и момента инерции будут отличаться от значений, принятых при расчете.

Методика расчета

Для приведения в движение рабочих машин и механизмов, не требующих регулирования скорости, используют электроприводы с релейной системой управления. В таких системах электродвигатель получает питание непосредственно от сети. В число основных задач системы управления этими электроприводами входит пуск и останов двигателя, осуществление торможения и реверса, защита от перегрузок и коротких замыканий.

Следует обратить внимание на то, что для двигателей постоянного тока прямое подключение к сети недопустимо, так как при этом возникают большие пусковые токи, опасные для двигателя и питающей сети. Для уменьшения пускового тока при пуске в цепь якоря двигателя включают пусковой реостат. Для сохранения необходимого значения тока и момента по мере разгона двигателя сопротивление пускового реостата постепенно ступенями уменьшают до нуля. Автоматическое управление пуском осуществляют в функции времени, скорости двигателя или величины тока якоря, так как эти величины в моменты переключения пускового реостата принимают определенные, заранее рассчитанные значения и достаточно просто поддаются измерению.

При этом в первом случае ведется отсчет времени, для чего используются реле времени. Во втором случае контролируется величина скорости двигателя или ЭДС якоря, что может быть сделано при помощи датчиков скорости или реле напряжения, катушки которых подключаются к зажимам якоря двигателя. В третьем случае используются датчики, дающие командный импульс при

снижении тока якоря в процессе пуска до минимального значения. При этом датчиками тока служат реле тока, настраиваемые на минимальный ток.

Схема управления пуском ДПТ в две ступени в функции времени показана на рисунке 9.

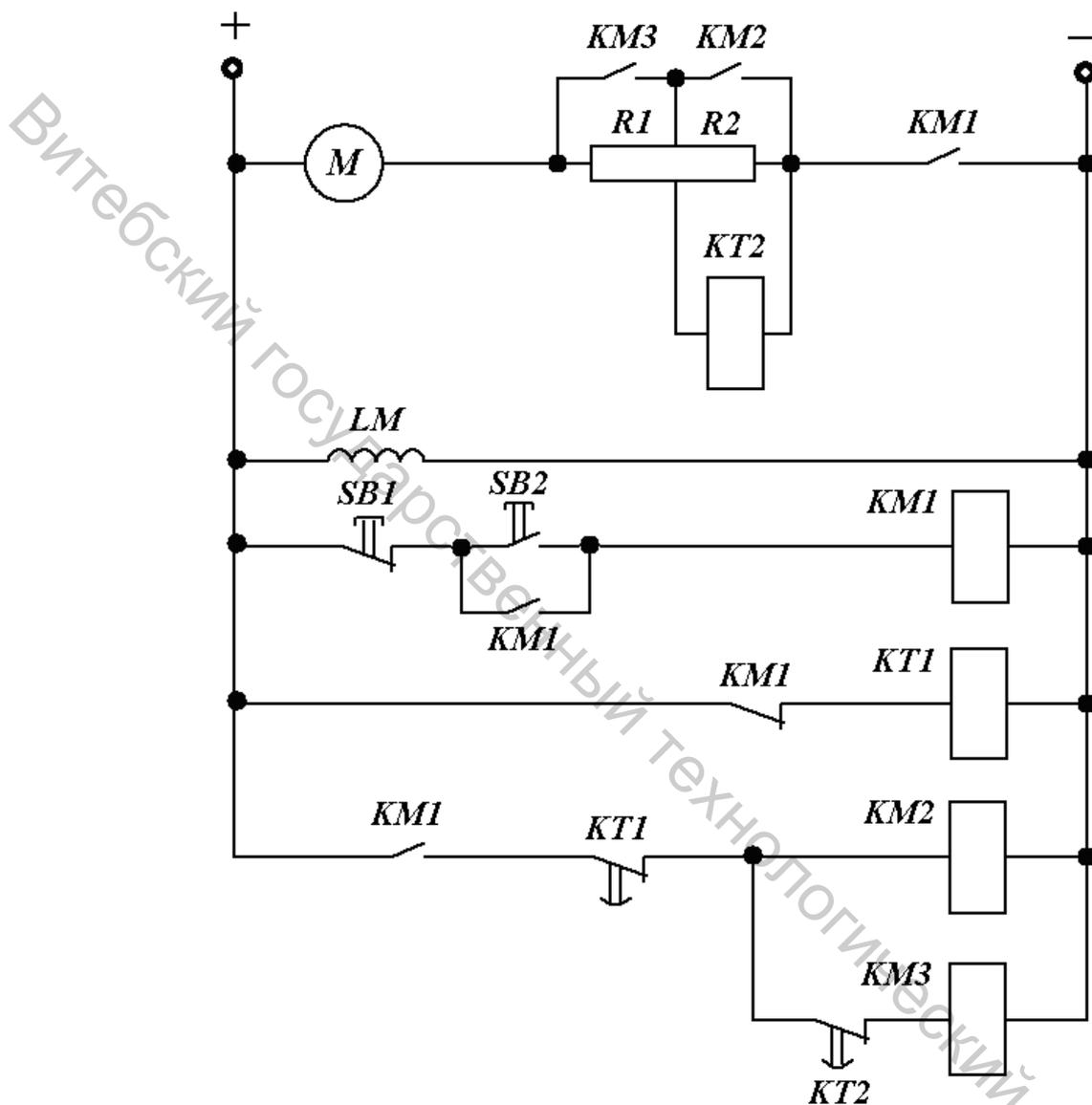


Рисунок 9 – Схема управления пуском ДПТ в две ступени в функции времени

На рисунке 9 изображены: M – обмотка цепи якоря ДПТ (ОЯ), LM – обмотка возбуждения ДПТ (ОВ), $R1, R2$ – ступени пускового реостата, $KM1$ – контактор, подключающий ОЯ к сети постоянного тока, $KM2, KM3$ – контакторы, шунтирующие пусковые ступени реостата, $KT1, KT2$ – электромагнитные реле времени, $SB1, SB2$ – кнопки управления ($SB1$ – кнопка «Стоп», $SB2$ – кнопка «Пуск»).

Пуск ДПТ в две ступени в функции времени осуществляется следующим образом. При подключении схемы к сети постоянного тока получают питание обмотки LM (ОВ должна получать питание раньше ОЯ) и $KT1$. При этом размыкается контакт $KT1$. После нажатия $SB2$ получит питание катушка $KM1$,

замкнется контакт $KM1$ в цепи якоря, а значит ОЯ подключится к сети через пусковые реостаты, получит питание катушка $KT2$ и разомкнется контакт $KT2$. Второй контакт $KM1$ зашунтирует кнопку «Пуск». Третий контакт $KM1$ отключит катушку $KT1$ и реле $KT1$ начнет отсчет времени. Также замкнется и четвертый контакт $KM1$ в цепи контакторов $KM2$ и $KM3$. Когда реле времени $KT1$ отсчитает заданное время, замкнется контакт $KT1$, получит питание $KM2$ и его контакт зашунтирует первую ступень реостата. Потеряет питание катушка $KT2$ и реле $KT2$ начнет отсчет времени. Через некоторое время замкнется контакт $KT2$ и получит питание катушка $KM3$. Контакт $KM3$ зашунтирует вторую ступень реостата, ДПТ выйдет на естественную характеристику и через некоторое время разгон завершится.

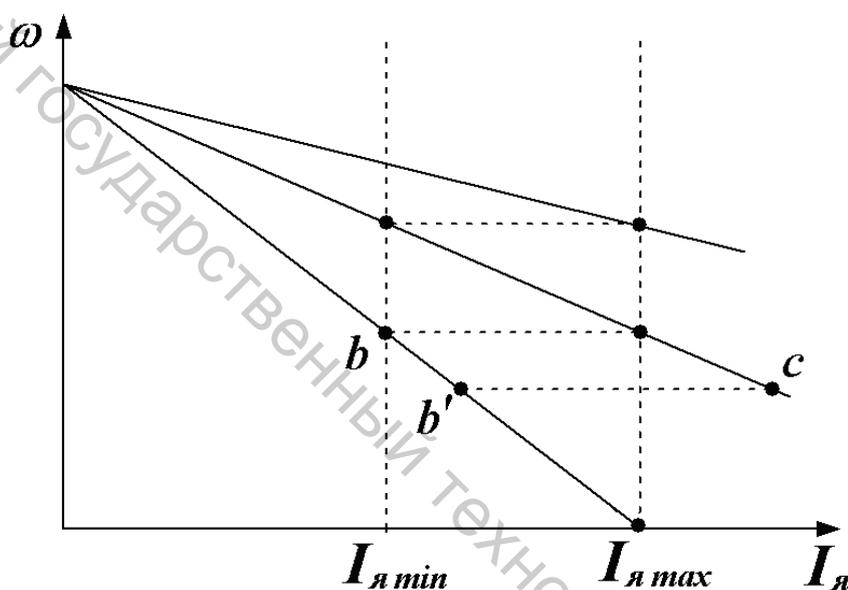


Рисунок 10 – Электромеханические характеристики ДПТ при пуске в функции времени

Недостатком схемы можно считать следующее. Если в процессе пуска ДПТ по каким-либо причинам возрастет M_c или J , то переключение реле произойдет раньше точки b (в точке b'), что приведет к значительному броску тока (точка c). В этом случае целесообразнее управление пуском не в функции времени, а в функции тока.

Управление торможением также может производиться в функции времени, скорости и тока с использованием тех же средств управления, что и при пуске. Окончание процесса торможения фиксируется соответственно:

- после выдержки времени, соответствующей времени останова;
- при снижении скорости до нуля;
- при снижении тока до значения, равного нулю.

В приводах постоянного тока используют два способа торможения: динамическое и противовключением.

Динамическое торможение. При динамическом торможении обмотка якоря отключается от сети постоянного тока и замыкается на реостат. Обмотка

возбуждения при этом должна остаться присоединенной к сети. Машина постоянного тока переходит в генераторный режим за счет запасенной кинетической энергии. Ток в обмотке якоря $I_{я} = \frac{-E}{R_{яц}}$ меняет направление, а значит, момент становится тормозным.

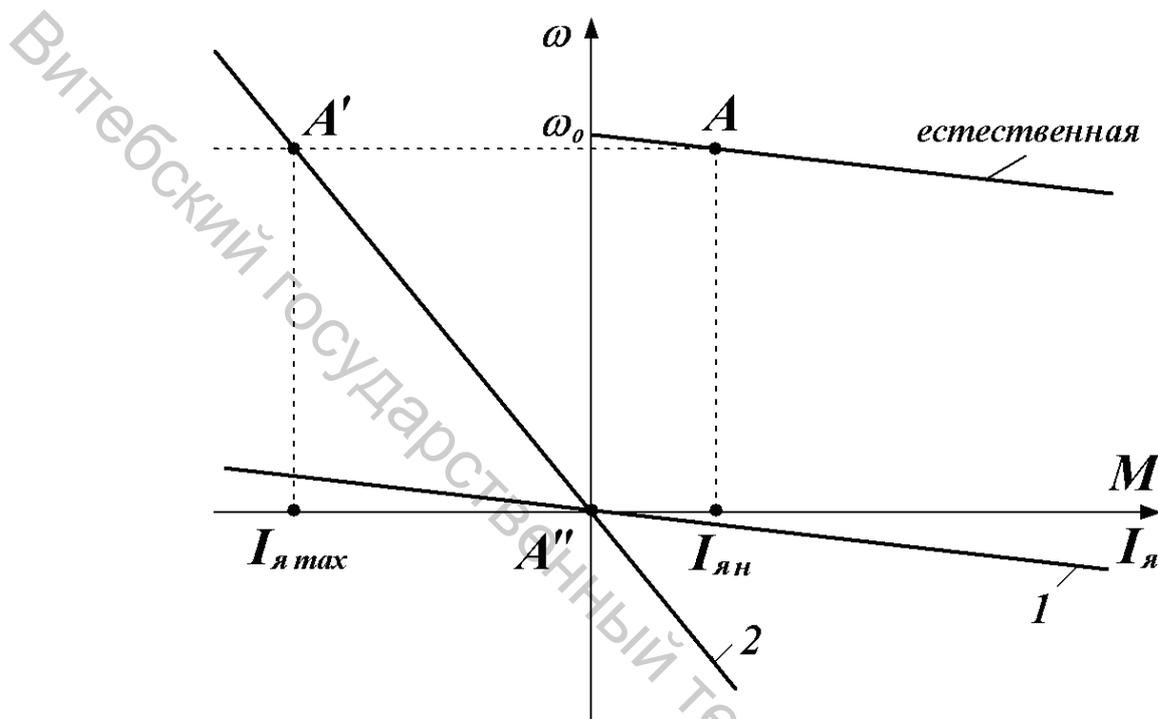


Рисунок 11 – Статические характеристики ДПТ при динамическом торможении

Характеристика 1 на рисунке 11 соответствует динамическому торможению при коротком замыкании обмотки якоря и имеет жесткость естественной характеристики. Ток при этом будет незначительно меньше, чем при прямом пуске и определяется точкой пересечения линии номинальной скорости ($A - A'$) и характеристики 1 во втором квадранте. Выбрав значение тока $I_{я \max}$, включают в цепь обмотки якоря тормозной реостат R_m с таким сопротивлением, чтобы характеристика динамического торможения 2 прошла через точку A' , соответствующую выбранному току. Сопротивление R_m определяют из выражения номинальной скорости в точке A' :

$$\omega_n = -\frac{R_{яц} + R_m}{K\Phi_n} I_{я \max} .$$

Уравнение электромеханической характеристики 2 на рисунке 11 имеет вид:

$$\omega = -\frac{R_{яц} + R_m}{K\Phi_n} I_{я} .$$

В точке A'' ($\omega=0$, $I_{я}=0$) тормозной реостат необходимо отключить. Отключение реостата можно осуществить в функции скорости, тока или времени.

Схема управления динамическим торможением ДПТ в функции времени показана на рисунке 12.

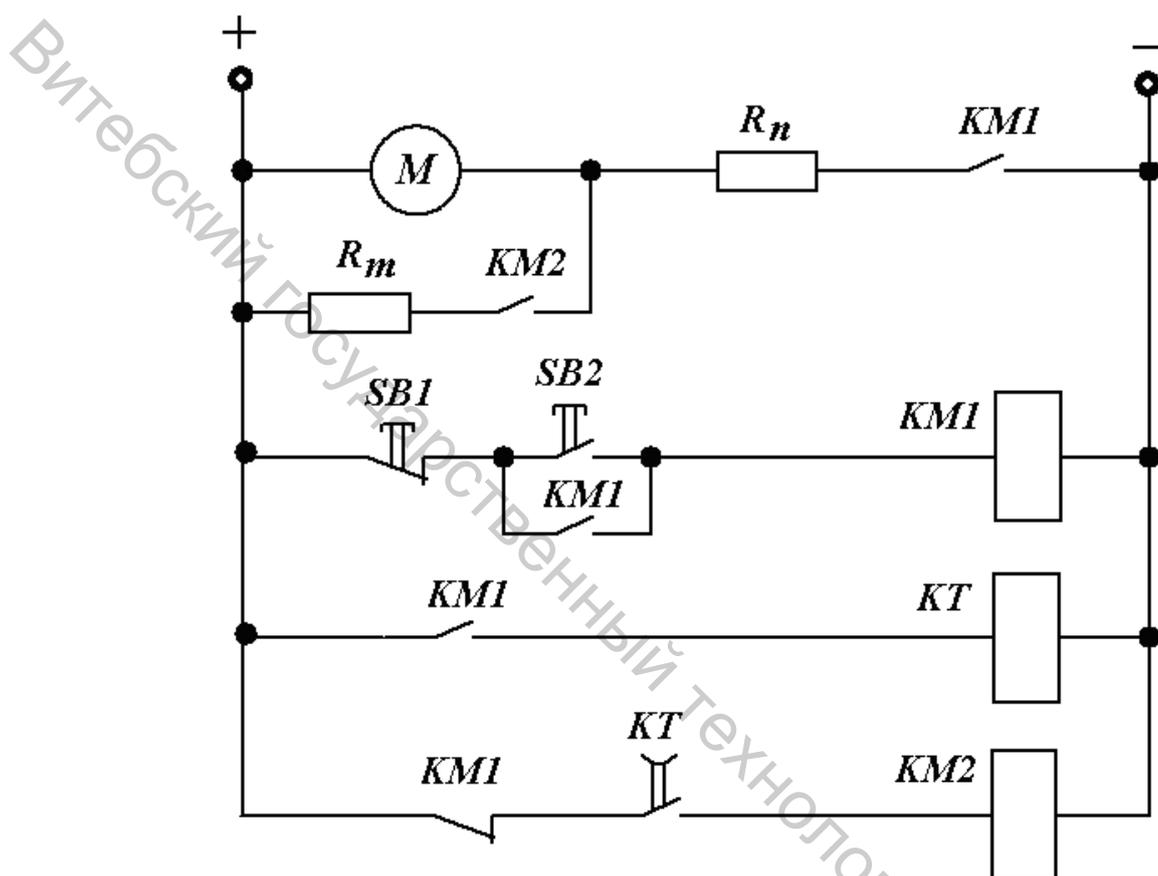


Рисунок 12 – Схема управления динамическим торможением ДПТ в функции времени

В исходном состоянии двигатель вращается, работает контактор $KM1$, получает питание катушка KT и контакт KT замкнут. Для динамического торможения ДПТ нажимаем кнопку $SB1$ («Стоп»). Обмотка якоря отключается от сети постоянного тока, срабатывает контактор $KM2$, контакт которого подключает к обмотке якоря реостат R_m . Так как одновременно с этим теряет питание катушка KT , реле начинает отсчет времени. Двигатель тормозится и останавливается. В это время контакт KT разомкнется, контакт $KM2$ отключит реостат. Схема готова к новому пуску.

Схема управления динамическим торможением ДПТ в функции скорости показана на рисунке 13.

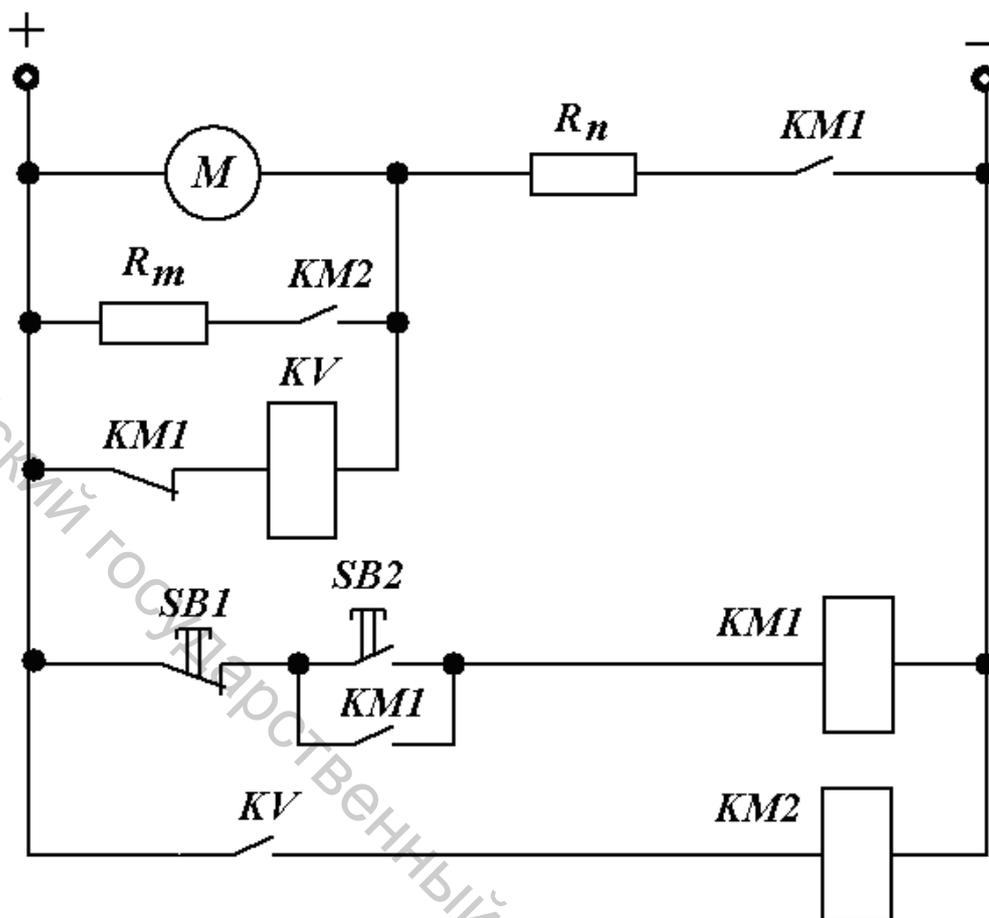


Рисунок 13 – Схема управления динамическим торможением ДПТ в функции скорости

В исходном состоянии двигатель вращается, работает контактор *KM1*. При нажатии на кнопку *SB1* катушка *KM1* теряет питание и обмотка якоря отключается от сети. Реле напряжения *KV* получает питание и подключает катушку контактора *KM2* к сети. Контактор *KM2* подключает к обмотке якоря реостат *R_m*. Напряжение на *KV* будет зависеть от скорости ДПТ:

$$U_{KV} = I_{я} R_m = \frac{E}{R_{яц} + R_m} R_m = \frac{K\Phi_n \omega}{R_{яц} + R_m} R_m = K' \omega$$

По мере уменьшения скорости напряжение будет уменьшаться и при некоторой небольшой скорости *KV* разомкнет свой контакт, и контактор *KM2* отключит тормозной реостат.

Торможение противовключением.

В этом случае обмотка якоря отключается от сети и сразу же подключается к сети, но с другой полярностью. При этом меняет направление ω , а значит и E , которая начинает действовать согласно с $U_{я}$. Ток $I_{я}$ определяется их суммарным действием и может сильно возрасти. Для его

ограничения в режиме противовключения необходимо в якорную цепь включить дополнительный резистор.

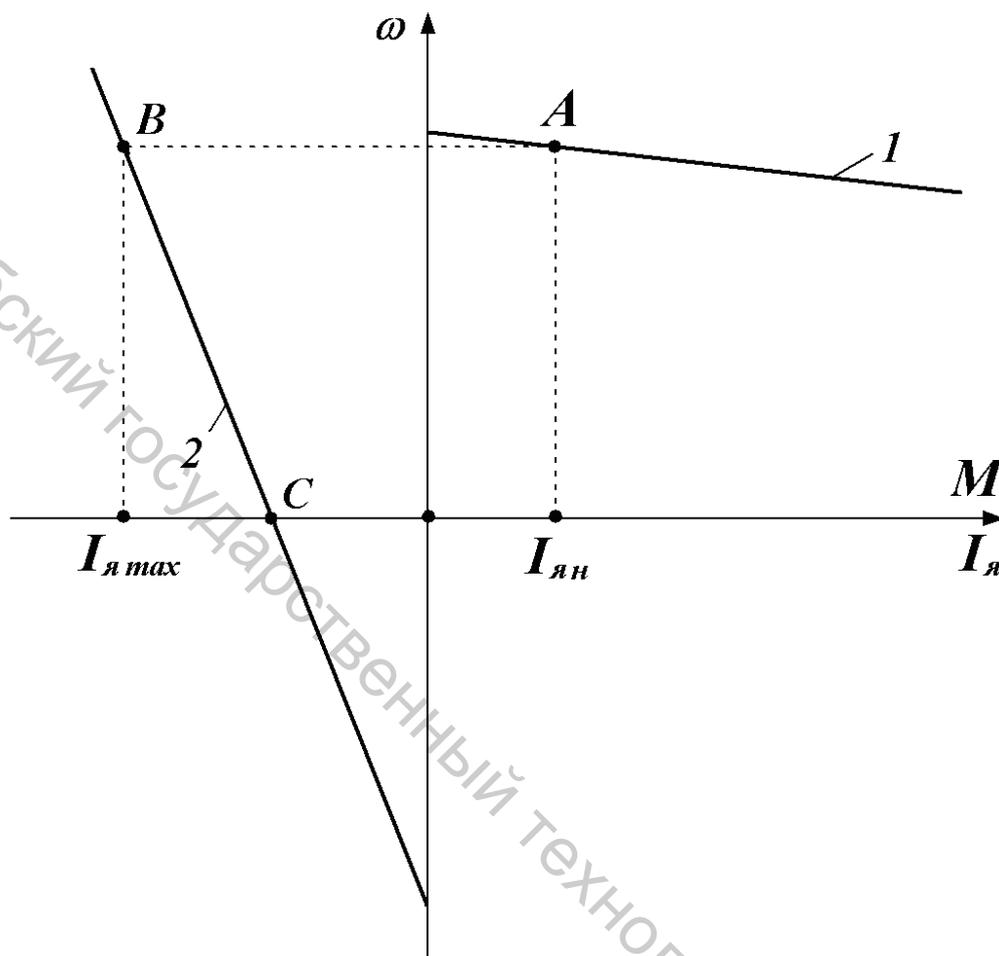


Рисунок 14 – Статические характеристики ДПТ при торможении противовключением

На рисунке 14 представлены статические характеристики ДПТ при торможении противовключением. Здесь при изменении полярности напряжения, подводимого к обмотке якоря, двигатель, работавший до этого со скоростью, соответствующей точке *A*, переходит на работу по характеристике *BC* в точку *B*. Под влиянием тормозного момента скорость двигателя уменьшается соответственно характеристике *BC* до нулевого значения. При скорости, равной нулю (точка *C*), двигатель должен быть отключен от сети. Если такого отключения не произойдет, скорость двигателя начнет увеличиваться в обратном направлении.

Торможение противовключением обычно применяют в реверсивных приводах для быстрого осуществления реверса.

Расчет сопротивлений пусковых и тормозных ступеней реостатов производят в предположении, что механические характеристики двигателя прямолинейны.

Расчет производится в следующем порядке:

1. Определяют относительное сопротивление якорной цепи двигателя

$$r_{яц} = \frac{R_{яц}}{R_{двн}},$$

где $R_{яц}$ – сопротивление якорной цепи двигателя, $R_{двн}$ – номинальное сопротивление двигателя, равное

$$R_{двн} = \frac{U_{ян}}{I_{ян}},$$

где $U_{ян}$, $I_{ян}$ – номинальные напряжение и ток якоря.

2. Кратность максимального пускового момента (тока) по отношению к номинальному моменту (току) двигателя определяется соотношением

$$m_1 = \frac{M_{max}}{M_n} = \frac{I_{ямax}}{I_{ян}}.$$

3. Определяют отношение максимального пускового момента (тока) к минимальному моменту (току):

$$m_2' = \frac{M_{max}}{M_{min}} = \frac{I_{ямax}}{I_{ямин}}.$$

4. Рассчитывают кратность начального тормозного момента (тока) по отношению к номинальному моменту (току) двигателя:

$$m_3 = \frac{M_m}{M_n} = \frac{I_{ям}}{I_{ян}}.$$

5. Задавшись числом пусковых ступеней K , величиной m_1 и зная $r_{яц}$, предварительно находят величину m_2 , равную отношению максимального пускового момента (тока) к максимальному моменту (току) двигателя при данном числе пусковых ступеней:

$$m_2 = \frac{1}{\sqrt[K]{r_{яц} \cdot m_1}}.$$

При этом должно выполняться условие $m_2 \leq m_2'$. В противном случае нужно увеличить число ступеней. Если m_2 значительно меньше m_2' , то число ступеней уменьшается.

6. Сопротивление i -ой пусковой ступени будет равно:

$$R_i = r_{яц} \cdot R_n (m_2 - 1) m_2^{(K-i)},$$

где $i = 1, 2, \dots, K$ – номер ступени.

Сопротивление реостата динамического торможения для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при торможении со скорости холостого хода

$$R_m = \frac{R_{двн}}{m_3} - R_{яц}.$$

Наладка схемы управления облегчается, если предварительно определить расчетные значения установок реле управления и настроить реле на эти установки. Знание величины выдержек времени необходимо, в частности, для выбора типа реле времени при составлении схемы управления и подборе аппаратуры.

Время разбега на i -ой ступени пуска в случае прямолинейных механических характеристик двигателя может быть определено по формуле

$$\Delta t_i = J \frac{\omega_0}{M_n m_1 m_2^{(i-1)}} \ln \frac{m_2 (m_1 - m_c)}{m_1 - m_2 m_c},$$

где $m_c = \frac{M_c}{M_n}$,

M_c – момент нагрузки, J – момент инерции привода, приведенный к валу двигателя.

Время динамического торможения при $\omega_{нач} \approx \omega_0$

$$t_{дм} = J \frac{\omega_0}{M_n m_3} \ln \frac{m_3 + m_c}{m_c}$$

Расчет сопротивлений пусковых и тормозных ступеней реостатов и выдержек реле времени более наглядно можно произвести, воспользовавшись предварительно построенными механическими и электромеханическими характеристиками при пуске и торможении двигателя (рисунок 15).

В этом случае сопротивление пусковых ступеней реостата определяется по формуле

$$R_i = \frac{\omega_{коні} - \omega_{начі}}{I_{max} - I_{min}} K \Phi_n - R_{яц},$$

где $\omega_{начі}$, $\omega_{коні}$ – начальные и конечные значения скорости на данной ступени.

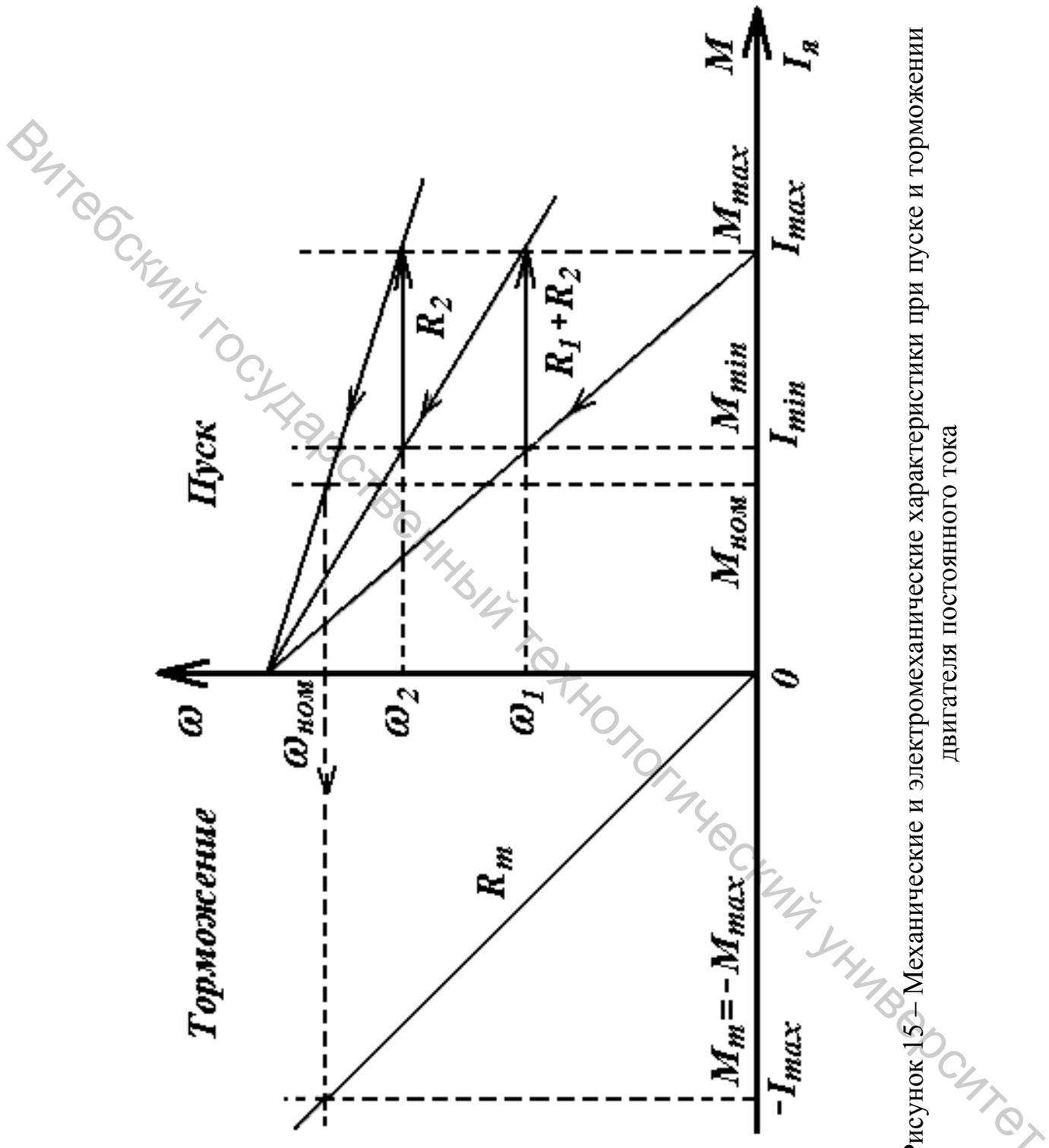


Рисунок 15— Механические и электромеханические характеристики при пуске и торможении двигателя постоянного тока

Таким образом, при пуске в две ступени

$$R_1 = \frac{\omega_1 - 0}{I_{max} - I_{min}} K\Phi_n - R_{яц},$$

$$R_2 = \frac{\omega_1 - \omega_2}{I_{max} - I_{min}} K\Phi_n - R_{яц}.$$

При торможении

$$R_m = \frac{\omega_n}{I_{max}} K\Phi_n - R_{яц}.$$

Выдержки реле времени при пуске двигателя могут быть рассчитаны по формуле, получаемой из уравнения движения привода:

$$\Delta t_i = J \frac{\omega_{кон i} - \omega_{нач i}}{M_{max} - M_{min}} \ln \frac{M_{max} - M_c}{M_{min} - M_c}.$$

При пуске в две ступени

$$\Delta t_1 = J \frac{\omega_1 - 0}{M_{max} - M_{min}} \ln \frac{M_{max} - M_c}{M_{min} - M_c},$$

$$\Delta t_2 = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{max} - M_{min}} \ln \frac{M_{max} - M_c}{M_{min} - M_c}.$$

Время динамического торможения двигателя

$$\Delta t_m = \frac{J}{|\beta_m|} \ln \frac{|\beta_m| U_{ян} + M_c}{M_c},$$

где $|\beta_m|$ – жесткость механической характеристики при торможении:

$$|\beta_m| = \frac{(K\Phi_n)^2}{R_{яц} + R_m}.$$

Литература

1. Справочник по электрическим машинам : в 2 т. Т. 1 / под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
2. Москаленко, В. В. Электрический привод : учебник для студентов высших учебных заведений / В. В. Москаленко. – Москва : Академия, 2007. – 368 с.
3. Онищенко, Г. Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. – Москва : РАСХН, 2003. – 320 с.
4. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода : учебник для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 576 с.
5. Ильинский, Н. Ф. Общий курс электропривода / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
6. Гульков, Г. И. Системы автоматизированного управления электроприводами / Г. И. Гульков. – Минск : Новое знание, 2007. – 394 с.
7. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов / В. М. Терехов, О. Н. Осипов. – Москва : Академия, 2006. – 304 с.
8. Сидоров, С. Н. Теория автоматического управления в задачах электропривода : учебное пособие / С. Н. Сидоров, Н. А. Лунина. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 122 с.
9. Башарин, А. В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ : учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, Ю. В. Постников. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. – 511 с.
10. Москаленко, В. В. Электрический привод : учебник / В. В. Москаленко. – Москва : Высшая школа, 1991. – 430 с.
11. Наумов, В. Н. Автоматика и автоматизация производственных процессов в легкой промышленности : учебник / В. Н. Наумов, Л. И. Пятов. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 256 с.
12. Ключев, В. И. Теория электропривода : учебник для вузов / В. И. Ключев. – Москва : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
13. Практикум по автоматизированному электроприводу : учебное пособие / В. Г. Макаров [и др.]. – Казань : Казанский государственный технологический университет, 2004. – 204 с.
14. Свириденко, П. А. Основы автоматизированного электропривода : учебное пособие для вузов по специальности «Автоматизация и комплексная механизация процессов легкой и текстильной промышленности» / П. А. Свириденко, А. Н. Шмелев. – Москва : Высшая школа, 1970. – 392 с.