

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Сведения о индивидуальных заданиях и требования к их выполнению

По учебному плану изучения дисциплины «Электрические машины» перед компьютерным *экзаменом* требуется выполнить *два* индивидуальных задания — ИЗ1, ИЗ2. Первое дает практические навыки расчета параметров и характеристик двигателя постоянного тока. Второе преследует ту же цель для трехфазных асинхронных двигателей.

По обоим заданиям составляется текстовый отчет. К экзамену студент допускается при зачтении результатов выполнения обоих заданий. Содержание ИЗ1 и ИЗ2 изложено в Приложениях 2, 3. Для всех исполнителей оно одинаково, отличается лишь параметрами исходных данных в зависимости от варианта.

Как выбираются необходимые параметры для вариантов заданий, указано в Приложениях 2, 3.

Требования к выполнению заданий

Оформление результатов выполнения заданий не регламентируется. Отчет можно представлять в написанном от руки или печатном вариантах по желанию исполнителя. Важно соблюдать основные показатели отчета: аккуратность, нумерация страниц, рисунков и таблиц, выполнение рисунков с масштабами, достаточными для их характеристик. Выполняемые действия должны сопровождаться анализом полученных результатов. В конце отчета приводится список использованной литературы. Примеры выполнения контрольных работ приведены в разделах 3, 5 настоящего учебника (подробнее) нужно выполнить в следующей форме:

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

Индивидуальное задание № ____

по дисциплине «Электрические машины»

Вариант № _____

ВЫПОЛНИЛ

студент группы _____

Иванов И. И.

« ____ » _____ 200 ____ г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Содержание и параметры индивидуального задания №2 (ИЗ2)

Индивидуальное задание №2 (ИЗ2) преследует цель получения практических навыков по расчету параметров и характеристик трехфазных асинхронных двигателей.

Содержание задания для всех исполнителей одинаково, отличаются лишь исходные параметры, значение которых зависит от варианта задания (см. таблицу ПЗ данного Приложения). В излагаемый ниже текст содержания задания на КР2 необходимые параметры выписываются исполнителями из таблицы ПЗ.

Содержание ИЗ2

1. Номинальные данные АД

напряжение статора $U_{1л}/U_{1ф}$, В	380/220
частота напряжения статора $f_{1н}$, Гц	50
мощность P_n , кВт	
номинальный ток фазы статора $I_{1н}$, А	
кратность пускового тока $I_{1н е}/I_{1н}$	
перегрузочная способность по моменту	
скорость вращения n_n , об/мин	
коэффициент мощности $\cos\varphi_n$	
момент инерции ротора J , кг·м ²	

2. Рассчитать

2.1. Параметры и величины естественной МХ; записать по ним формулу этой МХ

2.2. Сопротивления обмоток.

2.3. Параметры и формулу искусственной МХ при пуске АД с ограничением пускового тока в пределах $I_{1n}/I_{1н} = \dots$ за счет \dots

2.4. Параметры и формулы МХ динамического торможения.

2.5. Параметры и формулы искусственных МХ при частотах $f_{1мак}/f_{1н} = \dots$ и $f_{1мин}/f_{1н} = \dots$ для закона $U_1/f_1 = const$.

2.6. Время прямого пуска и динамического торможения при моменте нагрузки $M_c/M_n = \dots$

2.7. Время приема и сброса нагрузки на естественной МХ

2.8. Время торможения до останова свободным выбегом при заданном в пункте 2.6 моменте нагрузки на валу двигателя.

2.7. Входную мощность и КПД двигателя на естественной МХ при номинальном моменте нагрузки ($M_c = M_n$).

3. Построить

3.1. Механические характеристики АД в относительных единицах с параметрами, рассчитанными в пунктах 2.1÷2.5 задания.

3.2. Диаграммы для момента $M_*(t)$ и скорости $\omega_*(t)$ прямого пуска и динамического торможения при $M_c/M_n = \dots$

Выбор параметров из таблицы ПЗ

Для конкретного варианта И32 параметры в текст содержания задания выписываются из таблицы ПЗ следующим образом.

Из горизонтальной строки справа от номера варианта берутся номинальные данные АД.

Из вертикальной строки выше номера варианта выписываются параметры для условий расчета по разделу 2 содержания задания на КР2. Например, для варианта 12 (в табл. ПЗ выделен жирным шрифтом) из вертикальной строки выписываются: для пункта 2.3. — параметр ограничения пускового тока R_{∂} и кратность этого тока относительно номинальной величины $I_{1n}/I_{1н} = 1,8$; для пункта 2.5. — кратности изменения частоты $f_{1мак}/f_{1н} = 1,2$, $f_{1мин}/f_{1н} = 0,8$; для пунктов 2.6 и 3.2 относительное значение момента нагрузки $M_c/M_n = 0,6$.

Содержание задания И32 с проставленными параметрами для варианта 12 приведено в разделе 5 настоящего методического пособия.

Таблица ПЗ — Данных для вариантов И32

Номер варианта КР2 при значениях параметров					Номинальные данные							
Способ огранич. тока	$R_{1\partial}$	$R_{2\partial}$	$X_{1\partial}$	$U < U_{1H}$								
I_{1n}/I_{1H}	1,8	2	2,3	2,5								
$f_{\text{мак}}/f_H$	1,2	1,4	1,3	1,5								
$f_{\text{мин}}/f_H$	0,8	0,7	0,75	0,65								
M_c/M_H	0,6	0,7	0,8	1	P_H	n_H	$I_{1H \phi}$	λ_m	$\cos \varphi_H$	J	I_{ke}/I_{1H}	
					кВт	об/мин	А	—	—	кг·м ²	—	
	1	18	35	52	1	2700	2,4	2,2	0,87	0,1	5,5	
	2	19	36	53	1,9	2750	4,4	2,2	0,86	0,18	6,5	
	3	20	37	54	3,5	2780	7,7	2,2	0,86	0,35	6,5	
	4	21	38	55	6,3	2800	10,3	2,2	0,86	0,75	7,5	
	5	22	39	56	11	2840	24	2,4	0,89	1,25	7,5	
	6	23	40	57	16	940	26	2,1	0,85	0,2	6,5	
	7	24	41	58	22	910	43	2,1	0,92	0,4	6,5	
	8	25	42	59	28	920	55	2,1	0,91	0,45	6,5	
	9	26	43	60	1,2	600	4,4	2	0,64	0,1	4	
	10	27	44	61	6	690	16,9	2	0,7	0,6	6	
	11	28	45	62	0,6	660	2,5	2	0,63	0,04	4	
	12	29	46	63	2	2780	4,8	1,9	0,86	0,1	5	
	13	30	47	64	5	2900	11	1,8	0,89	0,18	7,5	
	14	31	48	65	7,5	720	14,3	2,2	0,78	0,15	5	
	15	32	49	66	0,75	1370	2,2	2,2	0,72	0,15	5	
	16	33	50	67	0,75	695	2,7	1,7	0,62	0,2	4	
	17	34	51	68	2,2	720	6,2	2,2	0,71	0,25	6	

Примечание: для всех вариантов $U_{1л}/U_{1ф} = 380 / 220$ В, $f_{1H} = 50$ Гц,

$$U_1/f_1 = const.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Пример машинного построения ПП ДПТ

Диаграммы переходных процессов

Постоянные времени

естественная характеристика $T_{ме} := J \cdot \frac{R_я}{c^2} \quad T_{ме} = 0.934$

реостатный пуск

$$T_{M1} := J \cdot \frac{R_{п1} + R_я}{c^2} \quad T_{M1} = 7.975$$

$$T_{M2} := J \cdot \frac{R_{п1} - R_5 + R_я}{c^2} \quad T_{M2} = 5.193$$

$$T_{M3} := J \cdot \frac{R_{п1} - R_4 - R_5 + R_я}{c^2} \quad T_{M3} = 3.382$$

$$T_{M4} := J \cdot \frac{R_{п1} - R_3 - R_4 - R_5 + R_я}{c^2} \quad T_{M4} = 2.202$$

$$T_{M5} := J \cdot \frac{R_{п1} - R_2 - R_3 - R_4 - R_5 + R_я}{c^2} \quad T_{M5} = 1.434$$

тормозные режимы

динамическое торможение $T_{мдт} := J \cdot \frac{R_{дт} + R_я}{c^2} \quad T_{мдт} = 7.975$

противовключение $T_{мпк} := J \cdot \frac{R_{пк}}{c^2} \quad T_{мпк} = 15.016$

время переходного процесса без нагрузки

$$t_{дтх} := T_{мдт} \cdot \ln \left(\frac{-\lambda_1 - M_{хх\%}}{-2 \cdot M_{хх\%}} \right) \quad t_{дтх} = 18.179 \text{ (ориентировочно, т.к. тормозной момент зависит от ск)}$$

$$t_{пкх} := T_{мпк} \cdot \ln \left[\frac{-\lambda_1 - M_{хх\%}}{(-0.5 \cdot \lambda_1 - M_{хх\%})} \right] \quad t_{пкх} = 9.659 \text{ конец торможения } -0.5\lambda_1$$

время переходного процесса под нагрузкой

$$t_{дтн} := T_{мдт} \cdot \ln \left(\frac{-\lambda_1 - 1}{-\lambda_1 - 0} \right) \quad t_{дтн} = 3.233$$

$$t_{пкн} := T_{мпк} \cdot \ln \left[\frac{-\lambda_1 - 1}{(-0.5 \cdot \lambda_1 - 1)} \right] \quad t_{пкн} = 6.088$$

**Циклограмма для реостатного пуска без нагрузки, приема и сброса нагрузки,
торможения противовключением без нагрузки**

моменты переключения ступеней

$$t_{п1} := T_{м1} \cdot \ln \left(\frac{\lambda_1 - M_{xx\%}}{\lambda - M_{xx\%}} \right) \quad t_{п1} = 2.245 \quad \text{время работы I ступени пуска}$$

$$t_{п2} := T_{м2} \cdot \ln \left(\frac{\lambda_1 - M_{xx\%}}{\lambda - M_{xx\%}} \right) \quad t_{п2} = 1.462 \quad \text{время работы II ступени пуска}$$

$$t_{п3} := T_{м3} \cdot \ln \left(\frac{\lambda_1 - M_{xx\%}}{\lambda - M_{xx\%}} \right) \quad t_{п3} = 0.952 \quad \text{время работы III ступени пуска}$$

$$t_{п4} := T_{м4} \cdot \ln \left(\frac{\lambda_1 - M_{xx\%}}{\lambda - M_{xx\%}} \right) \quad t_{п4} = 0.62 \quad \text{время работы IV ступени пуска}$$

$$t_{п5} := T_{м5} \cdot \ln \left(\frac{\lambda_1 - M_{xx\%}}{\lambda - M_{xx\%}} \right) \quad t_{п5} = 0.404 \quad \text{время работы V ступени пуска}$$

$$t_{пе} := T_{ме} \cdot \ln \left(\frac{1}{0.05} \right) \quad t_{пе} = 2.797 \quad \text{время выхода на режим с естественной М.Х. (5% зона успокоения)}$$

$$t_{п0} := t_{п1} + t_{п2} + t_{п3} + t_{п4} + t_{п5} + t_{пе} \quad t_{п0} = 8.481 \quad \text{общее время пуска (без нагрузки)}$$

промежуточные соотношения для графиков

переход от интервалов к единому времени

$$t_1 := t_{п1} \quad t_2 := t_{п1} + t_{п2} \quad t_3 := t_{п1} + t_{п2} + t_{п3} \quad t_4 := t_{п1} + t_{п2} + t_{п3} + t_{п4} \quad t_5 := t_{п1} + t_{п2} + t_{п3} + t_{п4} + t_{п5}$$

$$t_1 = 2.245 \quad t_2 = 3.708 \quad t_3 = 4.66 \quad t_4 = 5.28 \quad t_5 = 5.684$$

$$\omega(M) := \frac{U_H}{c} - M \cdot \frac{R_{я}}{c^2} \quad \omega_{xx} := \frac{\omega(M_{xx\%})}{\omega_H} \quad \omega_{xx} = 1.062$$

соотношения для кусочной аппроксимации

$$M_x(M_{max}, t, T, t_i) := (M_{max} - M_{xx\%}) \cdot e^{-\frac{t-t_i}{T}} + M_{xx\%} \quad \omega(t, T, t_i) := 1 - e^{-\frac{t-t_i}{T}}$$

$$M_x(t) := \begin{cases} M_x(\lambda_1, t, T_{м1}, 0) & \text{if } t < t_1 & \omega_0(t) := \omega_{xx} \omega(t, T_{м1}, 0) & \text{I ступень пуска} \\ M_x(\lambda_1, t, T_{м2}, t_1) & \text{if } t_1 \leq t < t_2 & \omega_1(t) := (\omega_{xx} - \omega_0(t_1)) \cdot \omega(t, T_{м2}, t_1) + \omega_0(t_1) & \text{II ступень пуска} \\ M_x(\lambda_1, t, T_{м3}, t_2) & \text{if } t_2 \leq t < t_3 & \omega_2(t) := (\omega_{xx} - \omega_1(t_2)) \cdot \omega(t, T_{м3}, t_2) + \omega_1(t_2) & \text{III ступень пуска} \\ M_x(\lambda_1, t, T_{м4}, t_3) & \text{if } t_3 \leq t < t_4 & \omega_3(t) := (\omega_{xx} - \omega_2(t_3)) \cdot \omega(t, T_{м4}, t_3) + \omega_2(t_3) & \text{IV ступень пуска} \\ M_x(\lambda_1, t, T_{м5}, t_4) & \text{if } t_4 \leq t < t_5 & \omega_4(t) := (\omega_{xx} - \omega_3(t_4)) \cdot \omega(t, T_{м5}, t_4) + \omega_3(t_4) & \text{V ступень пуска} \\ M_x(\lambda_1, t, T_{ме}, t_5) & \text{if } t_5 \leq t < 10 & \omega_5(t) := (\omega_{xx} - \omega_4(t_5)) \cdot \omega(t, T_{ме}, t_5) + \omega_4(t_5) & \text{выход на режим} \\ (1 - M_{xx\%}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-10}{T_{ме}}} \right) + M_{xx\%} & \text{if } 10 \leq t < 15 & \omega_6(M) := \omega_{xx} \left(1 - M \cdot R_{я} \cdot \frac{I_H}{U_H} \right) & \text{прием и сброс} \\ M_x(1, t, T_{ме}, 15) & \text{if } 15 \leq t < 20 & & \\ (-\lambda_1 + M_{xx\%}) \cdot e^{-\frac{t-20}{T_{мпк}}} - M_{xx\%} & \text{otherwise} & \omega_7(t) := 2 \cdot \omega_{xx} e^{-\frac{t-20}{T_{мпк}}} - \omega_{xx} & \text{противовключ} \end{cases}$$

$$\omega_x(t) := \begin{cases} \omega_0(t) & \text{if } t < t_1 \\ \omega_1(t) & \text{if } t_1 \leq t < t_2 \\ \omega_2(t) & \text{if } t_2 \leq t < t_3 \\ \omega_3(t) & \text{if } t_3 \leq t < t_4 \\ \omega_4(t) & \text{if } t_4 \leq t < t_5 \\ \omega_5(t) & \text{if } t_5 \leq t < 10 \\ \omega_6(M_x(t)) & \text{if } 10 \leq t < 20 \\ \omega_7(t) & \text{otherwise} \end{cases}$$

t := 0, 0.01.. 40

t := 24

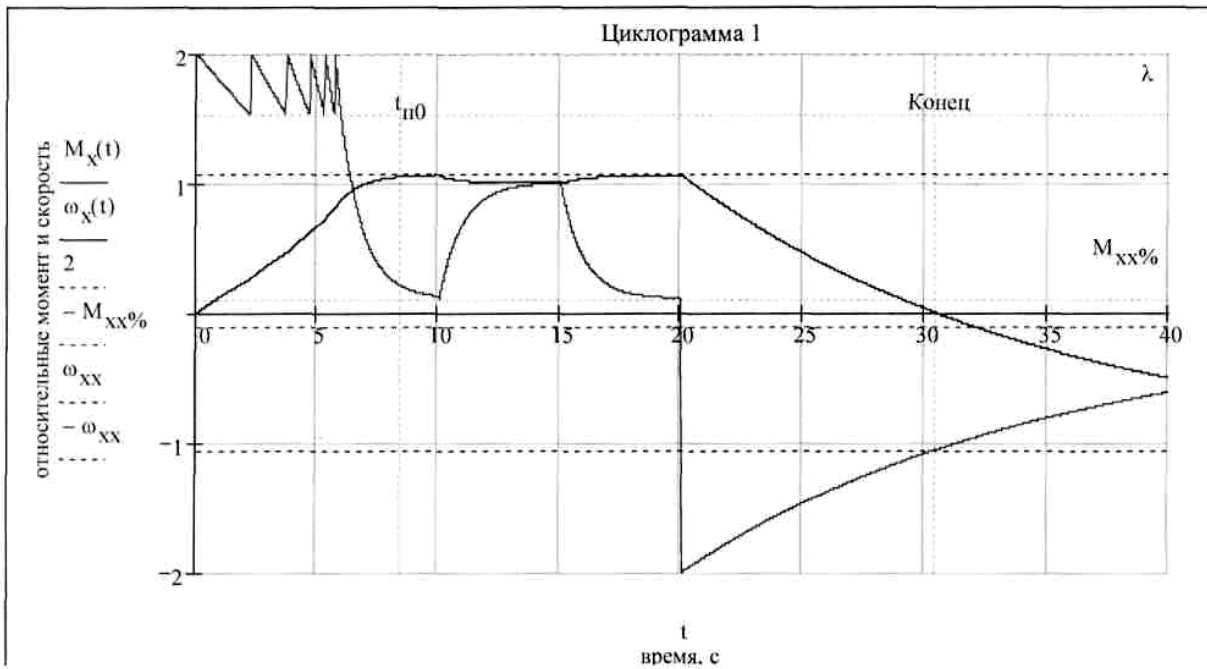
Given

$\omega_x(t) = 0$

Конец := Find(t)

Конец = 30.408

конец торможени



Циклограмма для реостатного пуска и динамического торможения под нагрузкой

моменты переключения ступеней

$$\begin{aligned}
 t_{п1} &:= T_{M1} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_1 - 1}{\lambda - 1}\right) & t_{п1} &= 4.978 & \text{время работы I ступени пуска} \\
 t_{п2} &:= T_{M2} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_1 - 1}{\lambda - 1}\right) & t_{п2} &= 3.242 & \text{время работы II ступени пуска} \\
 t_{п3} &:= T_{M3} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_1 - 1}{\lambda - 1}\right) & t_{п3} &= 2.111 & \text{время работы III ступени пуска} \\
 t_{п4} &:= T_{M4} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_1 - 1}{\lambda - 1}\right) & t_{п4} &= 1.375 & \text{время работы IV ступени пуска} \\
 t_{п5} &:= T_{M5} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_1 - 1}{\lambda - 1}\right) & t_{п5} &= 0.895 & \text{время работы V ступени пуска} \\
 t_{пе} &:= T_{ме} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_1 - 1}{0.05}\right) & t_{пе} &= 2.797 & \text{время выхода на режим с естественной М.Х.} \\
 & & & & \text{(5\% зона успокоения)}
 \end{aligned}$$

$$t_{п0} := t_{п1} + t_{п2} + t_{п3} + t_{п4} + t_{п5} + t_{пе} \quad t_{п0} = 15.398 \quad \text{общее время пуска (под нагрузкой)}$$

промежуточные соотношения для графиков

переход от интервалов к единому времени

$$\begin{aligned}
 t_1 &:= t_{п1} & t_2 &:= t_{п1} + t_{п2} & t_3 &:= t_{п1} + t_{п2} + t_{п3} & t_4 &:= t_{п1} + t_{п2} + t_{п3} + t_{п4} & t_5 &:= t_{п1} + t_{п2} + t_{п3} + t_{п4} + t_{п5} \\
 t_1 &= 4.978 & t_2 &= 8.22 & t_3 &= 10.331 & t_4 &= 11.706 & t_5 &= 12.601
 \end{aligned}$$

соотношения для кусочной аппроксимации

$$M_X(M_{\max}, t, T, t_i) := (M_{\max} - 1) \cdot e^{\frac{-t+t_i}{T}} + 1 \quad \omega(t, T, t_i) := 1 - e^{\frac{-t+t_i}{T}}$$

$$M_X(t) := \begin{cases} M_X(\lambda_1, t, T_{M1}, 0) & \text{if } t < t_1 & \omega_0(t) := \omega(t, T_{M1}, 0) & \text{I ступень пуска} \\ M_X(\lambda_1, t, T_{M2}, t_1) & \text{if } t_1 \leq t < t_2 & \omega_1(t) := (1 - \omega_0(t_1)) \cdot \omega(t, T_{M2}, t_1) + \omega_0(t_1) & \text{II ступень пуска} \\ M_X(\lambda_1, t, T_{M3}, t_2) & \text{if } t_2 \leq t < t_3 & \omega_2(t) := (1 - \omega_1(t_2)) \cdot \omega(t, T_{M3}, t_2) + \omega_1(t_2) & \text{III ступень пуска} \\ M_X(\lambda_1, t, T_{M4}, t_3) & \text{if } t_3 \leq t < t_4 & \omega_3(t) := (1 - \omega_2(t_3)) \cdot \omega(t, T_{M4}, t_3) + \omega_2(t_3) & \text{IV ступень пуска} \\ M_X(\lambda_1, t, T_{M5}, t_4) & \text{if } t_4 \leq t < t_5 & \omega_4(t) := (1 - \omega_3(t_4)) \cdot \omega(t, T_{M5}, t_4) + \omega_3(t_4) & \text{III ступень пуска} \\ M_X(\lambda_1, t, T_{ме}, t_5) & \text{if } t_5 \leq t < 20 & \omega_5(t) := (1 - \omega_4(t_5)) \cdot \omega(t, T_{ме}, t_5) + \omega_4(t_5) & \text{выход на режим} \\ (-\lambda_1 - 1) \cdot e^{\frac{-t+20}{T_{МДГ}}} + 1 & \text{otherwise} & & \text{динамическое торможение} \end{cases}$$

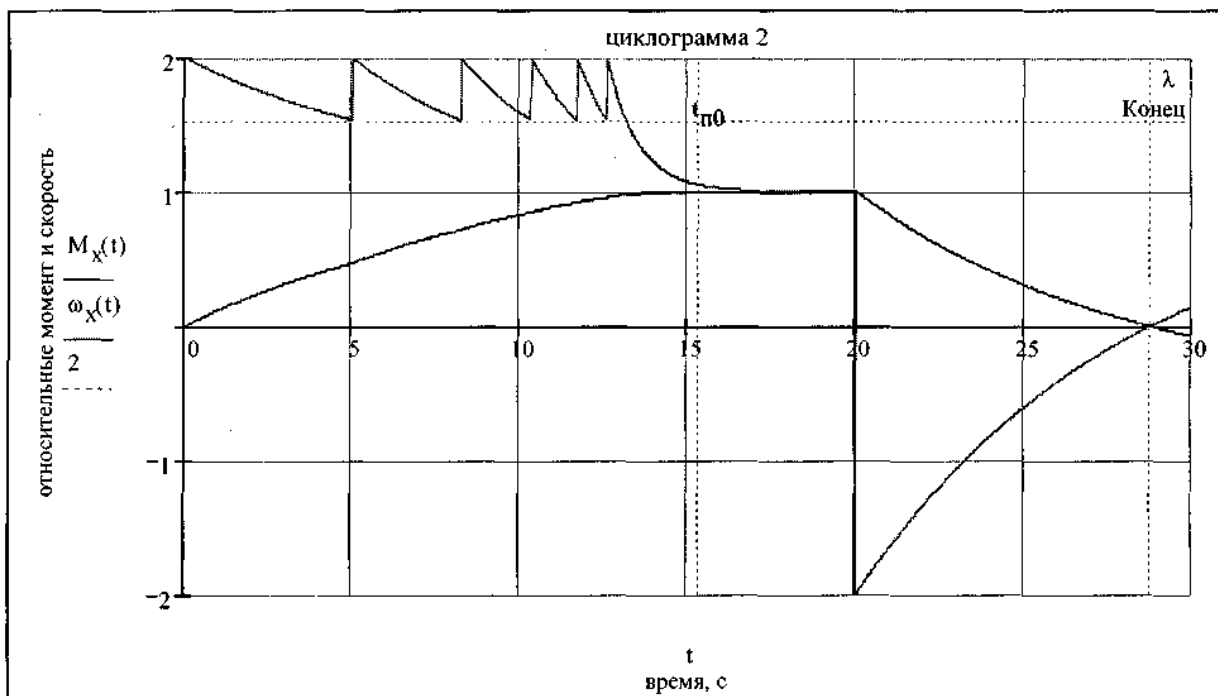
$$\omega_X(t) := \begin{cases} \omega_0(t) & \text{if } t < t_1 \\ \omega_1(t) & \text{if } t_1 \leq t < t_2 \\ \omega_2(t) & \text{if } t_2 \leq t < t_3 \\ \omega_3(t) & \text{if } t_3 \leq t < t_4 \\ \omega_4(t) & \text{if } t_4 \leq t < t_5 \\ \omega_5(t) & \text{if } t_5 \leq t < 20 \\ \omega_{дт}(M_X(t)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

t := 25

Given $\omega_X(t) = 0$ Конец := Find(t)

Конец = 28.761 конец торможения

t := 0, 0.01.. 30



Заключение

Расчет электропривода постоянного тока по методике данной контрольной работы показывает, что большинство соотношений и построений довольно просты. При известном навыке и понимании допущений и сути процессов, происходящих в двигателе постоянного тока, эта методика может использоваться в инженерной практике для оценочного, «в уме», анализа режимов и граничных условий работы электропривода, без сложных расчетов и выкладок, что составляет важную компоненту инженерного мышления. Конечно, это не отменяет умения при необходимости оперировать более строгими и полными моделями, с привлечением дифференциального исчисления и интегральных преобразований, но в практике эксплуатации такая необходимость возникает редко.

В данной работе нет таких развернутых объяснений и выводов, как в методическом пособии, поскольку она практически целиком (за исключением построения циклограмм) повторяет расчет, приведенный в пособии и что-либо новое сказать трудно. В программе Mathcad сначала был повторен расчет примера, а затем подставлены данные своего варианта с некоторой корректировкой расчета. Некоторое замешательство вызвал расчет потерь мощности и КПД, где для потерь мощности в примере выполнения КР используется $M_c = M_H$, а для КПД — $M_c = M_{HВ}$, до тех пор, пока я не понял, что в расчетах неявно присутствует условие $I_{я} = I_H$ для всех режимов. Кроме того, в примере для расчета длительности динамического торможения почему-то используется постоянная времени естественной характеристики двигателя (стр. 86), что на мой взгляд является ошибкой, на самом деле

$$t_{\text{дм}} = T_{\text{дм}} \ln \left(\frac{-M_{\text{дм нач}}^* - M_{c^*}}{M_{\text{дм кон}}^* - M_{c^*}} \right) = T_{\text{дм}} \ln \left(\frac{-\lambda_I - 1}{0 - 1} \right) \approx 0.37 \ln \left(\frac{-3.4}{-1} \right) \approx 0.44 \text{ с.}$$

Конечно качественная картина циклограммы не меняется, но можно сделать вывод, что для быстрой остановки двигателя на холостом ходу лучше использовать противовключение, а при наличии на валу момента нагрузки выгоднее применять динамическое торможение (время торможения близко). Во всех случаях лучше (но дороже) регулировать скорость двигателя напряжением на якоре с возможностью обеспечения динамического или рекуперативного торможения с постоянным током якоря, а при необходимости глубокорегулируемого привода дополнительно использовать МХ с ослаблением потока возбуждения.