

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева
Кафедра «Приборы управления»

Утверждено на заседании кафедры
«Приборы управления»
« 22 » января 20 24 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой


_____ В.В. Матвеев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению практических (семинарских) занятий
по дисциплине (модулю)
«Электрический привод оптико-электронных систем»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
12.03.03 Фотоника и оптоинформатика

с направленностью (профилем)
Интеллектуальные фотонные системы

Форма(ы) обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 120303-01-24

Тула 2024 год

Разработчик(и) методических указаний

Телухин С.В., доцент, к.т.н. _____
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



(подпись)

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)

(подпись)

Практическое занятие №1 «Расчет характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением»

1. Цель и задачи работы

Привитие практических умений и навыков по расчету параметров и характеристик двигателя постоянного тока.

2. Теоретические сведения

При якорном способе управления Уравнения движения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением имеют вид:

$$\begin{cases} U_{я} = i_{я}R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + C_e \Omega_{\partial\partial}; \\ J_{\partial\partial} \frac{d\Omega_{\partial\partial}}{dt} = C_m i_{я} - M_n; \\ \Phi_{\partial} = const. \end{cases} \quad (1)$$

где

$U_{я}$, $i_{я}$, $R_{я}$, $L_{я}$ – напряжение, подводимое к якорной обмотке, ток в цепи якоря, сопротивление и индуктивность цепи якоря;

$\Omega_{\partial\partial}$, $J_{\partial\partial}$ – угловая скорость вала двигателя и момент инерции ротора двигателя;

$M_{\partial\partial} = C_m i_{я}$, M_n – момент, создаваемый двигателем, и момент нагрузки на валу двигателя;

C_m , C_e – коэффициент момента и коэффициент противо-ЭДС.

Для установившегося режима работы из системы (1) получаем:

$$\begin{cases} U_{я} = i_{я}R_{я} + C_e \Omega_{\partial\partial}; \\ M_{\partial\partial} = C_m i_{я} = M_n. \end{cases} \quad (2)$$

Отсюда следуют выражения для механической и регулировочной характеристик. При пренебрежении падением напряжения на щетках выражение для механической характеристики принимает вид:

$$\Omega_{\partial\partial} = \Omega_{xx} - \frac{M_{\partial\partial}}{f_{\partial\partial}}, \quad (3)$$

где

$\Omega_{xx} = \frac{U_{я}}{C_e}$ – угловая скорость идеального холостого хода,

$f_{\partial\partial} = \frac{C_e C_m}{R_{я}}$ – жесткость механической характеристики.

Установившееся значение тока в якорной цепи равно

$$i_{я.уст} = \frac{1}{C_m} M_n.$$

Иногда механическую характеристику представляют в виде:

$$M_{\partial\partial} = M_n - f_{\partial\partial} \Omega_{\partial\partial},$$

где

$M_n = \frac{U_{я}}{R_{я}} C_m$ – пусковой момент двигателя.

Выражение для регулировочной характеристики имеет вид:

$$\Omega_{\partial\partial} = \frac{U_{\text{я}}}{C_e} - \frac{M_{\text{н}}}{f_{\partial\partial}}. \quad (4)$$

Механическая и электромагнитная постоянные времени двигателя соответственно равны:

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\partial\partial} R_{\text{я}}}{C_e C_{\text{м}}}, \quad T_{\text{эм}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я}}.$$

3. Задание на работу

Задание 1

Дано: напряжение, подведенное к цепи якоря двигателя, $U_{\text{дв}}$, активное сопротивление якорной цепи $R_{\text{я}}$, угловая скорость холостого хода $\Omega_{\text{хх}}$, момент инерции якоря двигателя, момент нагрузки $M_{\text{н}}$.

Рассчитать: коэффициент противоЭДС C_e , коэффициент по моменту $C_{\text{м}}$, пусковой момент $M_{\text{п}}$, установившийся ток в якорной цепи $i_{\text{яуст}}$.

Зарисовать механическую характеристику двигателя.

Таблица 1. Параметры электродвигателя

	Удв, В	Ря, Ом	$\Omega_{\text{хх}}$, об/мин	Јдв, кг·м ²	Мн, Нм
а)	10	20	10000	$1 \cdot 10^{-7}$	0,001
б)	15	15	12000	$1,2 \cdot 10^{-7}$	0,0005

Задание 2

Дано: напряжение, подведенное к цепи якоря, $U_{\text{дв}}$, активное сопротивление якорной цепи $R_{\text{я}}$, индуктивность якорной цепи $L_{\text{я}}$, угловая скорость холостого хода $\Omega_{\text{хх}}$, момент инерции якоря двигателя $J_{\text{дв}}$.

Определить параметры передаточных функций двигателя постоянного тока: механическую и электромагнитную постоянные времени двигателя, коэффициент передачи по напряжению, коэффициент передачи по моменту.

Зарисовать график переходного процесса.

Таблица 2. Параметры электродвигателя

	Удв, В	Ря, Ом	$\Omega_{\text{хх}}$, об/мин	Ля, Гн	Јдв, кг·м ²
а)	10	20	10000	0,001	$0,5 \cdot 10^{-7}$
б)	15	15	12000	0,0006	$0,8 \cdot 10^{-7}$

Задание 3

Дано: активное сопротивление якорной цепи $R_{\text{я}}$, коэффициент противоЭДС C_e , механическая постоянная времени двигателя $T_{\text{м}}$, электромагнитная постоянная времени двигателя $T_{\text{эм}}$.

Рассчитать: индуктивность якорной цепи $L_{\text{я}}$, момент инерции якоря двигателя $J_{\text{дв}}$.

Зарисовать график переходного процесса.

Таблица 3. Параметры электродвигателя

	Ря, Ом	C_e , Вс/рад	$T_{\text{м}}$, с	$T_{\text{эм}}$, с
а)	10	0,008	0,002	0,000025
б)	20	0,005	0,003	0,00005

Задание 4

Дано: момент нагрузки M_n , установившийся ток в якорной цепи $i_{яуст}$, момент инерции якоря двигателя $J_{дв}$, индуктивность якорной цепи $L_{я}$, механическая постоянная времени T_m .

Рассчитать: активное сопротивление якорной цепи $R_{я}$, электромагнитную постоянную времени $T_{эм}$.

Зарисовать график переходного процесса.

Таблица 4. Параметры электродвигателя

	M_n , Нм	$i_{яуст}$, А	$J_{дв}$, кг·м ²	$L_{я}$, Гн	T_m , с
а)	0,001	0,1	$0,8 \cdot 10^{-7}$	0,002	0,008
б)	0,0012	0,15	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,0015	0,01

Задание 5

Дано: напряжение, подведенное к якорной цепи, $U_{дв}$, коэффициент противоЭДС C_e , пусковой момент $M_{п}$, момент нагрузки M_n .

Рассчитать: жесткость механической характеристики $f_{дв}$, установившееся значение угловой скорости $\Omega_{дв}$.

Зарисовать механическую характеристику.

Таблица 5. Параметры электродвигателя

	$U_{дв}$, В	C_e , Вс/рад	$M_{п}$, Нм	M_n , Нм
а)	12	0,005	0,002	0,0015
б)	20	0,01	0,0025	0,0005

Задание 6

Дано: угловая скорость холостого хода $\Omega_{хх}$, установившееся значение угловой скорости $\Omega_{дв}$, пусковой момент $M_{п}$.

Рассчитать: момент нагрузки, приложенный к валу двигателя, M_n .

Зарисовать механическую характеристику.

Таблица 6. Параметры электродвигателя

	$\Omega_{хх}$, об/мин	$\Omega_{дв}$, об/мин	$M_{п}$, Нм
а)	12000	8000	0,0012
б)	8000	6400	0,0015

Задание 7

Дано: момент инерции якоря двигателя $J_{дв}$, скорость холостого хода $\Omega_{хх}$, пусковой момент $M_{п}$, коэффициент по моменту C_m .

Определить время переходного процесса по разгону до скорости холостого хода, если ток в якорной цепи ограничен величиной $I_{мах}$. Принять длительность участка переходного процесса, соответствующего движению в линейной зоне, равной $5 \cdot T_m$.

Зарисовать график переходного процесса.

Таблица 7. Параметры электродвигателя

	$J_{дв}$,	$\Omega_{хх}$, об/мин	$M_{п}$, Нм	C_m , Нм/А	$I_{мах}$, А
а)	12	15000	0,002	0,008	0,125
б)	20	12000	0,004	0,01	0,3

Практическое занятие №2

«Расчет параметров широтно-импульсно модулированного сигнала»

1. Цель и задачи работы

Привитие практических умений и навыков по расчету параметров широтно-импульсно модулированного сигнала.

2. Теоретические сведения

Сущность импульсного управления состоит в том, что изменение частоты вращения достигается не за счет изменения величины напряжения, а путем изменения времени, в течение которого к двигателю подводится номинальное напряжение. То есть при импульсном управлении на двигатель подается последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой $U_{ном}$, а изменение скорости вращения достигается путем изменения скважности импульсов.

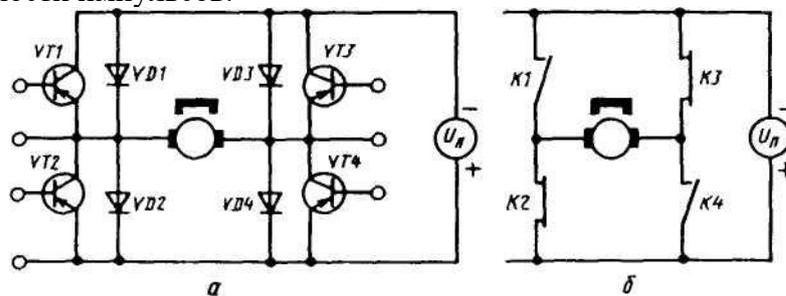


Рис. 1 – Мостовая схема включения

Наибольшее применение получили два вида коммутации:

– симметричная; включение и выключение ключей происходит по диагонали моста, т.е. ключи К1, К4 и К2, К3 работают в противофазе; на двигатель подаются двуполярные импульсы;

– несимметричная; в этом случае ключи переключаются по стойкам, при этом один из ключей другой стойки замкнут, а другой разомкнут; на двигатель подаются однополярные импульсы.

При симметричном методе коммутации среднее за период напряжение равно:

$$U_{\text{дв.ср}} = \frac{U_n t_u - (T - t_u) U_n}{T} = (2\gamma - 1) U_n;$$

при несимметричном:

$$U_{\text{дв.ср}} = \frac{U_n t_u - (T - t_u) \cdot 0}{T} = \gamma U_n,$$

где $\gamma = t_u / T$ – скважность импульса.

3. Задание на работу

Задание 1

Дано: напряжение питания модулятора U_n , скважность γ , способ коммутации.

Определить: среднее напряжение на обмотке якоря двигателя постоянного тока $U_{\text{ср}}$.

Зарисовать график напряжения.

Таблица 1. Параметры напряжения

	Uп, В	γ	способ коммутации
а)	12	0,75	симметричный
б)	10	0,4	несимметричный

Задание 2

Дано: напряжение питания модулятора Uп, среднее напряжение на обмотке якоря Uср, способ коммутации.

Определить: скважность широтно-импульсно модулированного сигнала γ .

Зарисовать график напряжения.

Таблица 2. Параметры напряжения

	Uп, В	Uср, В	способ коммутации
а)	24	6	симметричный
б)	5	1,25	несимметричный

Задание 3

Дано: напряжение питания модулятора Uп, среднее напряжение на обмотке якоря Uср, скважность.

Определить: способ коммутации.

Зарисовать график напряжения.

Таблица 2. Параметры напряжения

	Uп, В	Uср, В	γ
а)	30	12	0,7
б)	10	2	0,6

Практическое занятие №3 «Расчет характеристик асинхронного трехфазного двигателя»

1. Цель и задачи работы

Привитие практических умений и навыков по расчету параметров и характеристик асинхронного трехфазного двигателя.

2. Теоретические сведения

Уравнение электрических цепей асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором:

$$\begin{cases} \vec{u}_1 = R_1 \vec{i}_1 + \frac{d\vec{\Psi}_1}{dt} + j\omega_0 \vec{\Psi}_1; \\ 0 = R_2' \vec{i}_2' + \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} + js\omega_0 \vec{\Psi}_2, \end{cases} \quad (1)$$

где $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ – скольжение, $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_n}$ – синхронная частота поля статора, ω – угловая скорость ротора двигателя, p_n – число полюсов.

Потокосцепления связаны с токами через индуктивности:

$$\begin{cases} \vec{\Psi}_1 = \vec{i}_1 L_1 + \vec{i}_2' L_m; \\ \vec{\Psi}_2 = \vec{i}_1 L_m + \vec{i}_2' L_2', \end{cases} \quad (2)$$

где L_1 , L_2' – индуктивности статора и ротора, $L_m = \frac{3}{2} L_{1,2}$ – взаимоиנדуктивность обмоток статора и ротора.

Индуктивности статора им ротора определяются соотношениями:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m; \quad L_2' = L_{2\sigma}' + L_m,$$

где $L_{1\sigma}$, $L_{2\sigma}'$ – индуктивности рассеяния.

Электромагнитный момент двигателя определяется из выражения:

$$M_{\text{дв}} = \frac{3p_n}{2} (\vec{\Psi}_1 \times \vec{i}_1) = \frac{3p_n}{2} L_m (\vec{i}_2' \times \vec{i}_1). \quad (3)$$

Уравнения (3.4) и (3.6) дополняются уравнением моментов:

$$M_{\text{дв}} = J_{\text{дв}} \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} + M_n. \quad (4)$$

Таким образом, уравнения (3.4)–(3.7) представляют систему уравнений движения асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Для получения механической характеристики используют схему замещения (рис. 1).

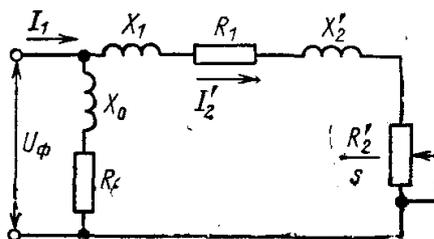


Рис. 1 – Схема замещения асинхронного двигателя

Из схемы замещения имеем:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}}.$$

Тогда выражение для момента получает вид:

$$M_{\partial s} = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_0 s [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2]}.$$

Максимальный момент достигается в точке, где $dM/ds = 0$:

$$M_{кр} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]},$$

которому соответствует критическое скольжение:

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}.$$

Выражение для момента, развиваемого двигателем, преобразуется к виду:

$$M = \frac{2M_{кр}(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k},$$

где $a = R_1/R_2'$.

Если пренебречь активным сопротивлением статора, то формула для момента упрощается, она носит название формулы Клосса:

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (5)$$

3. Задание на работу

Задание 1

Дано: частота питающего напряжения f_1 , число пар полюсов p , угловая скорость вращения вала двигателя $\Omega_{дв}$.

Рассчитать: величину скольжения асинхронного трехфазного двигателя s .

Таблица 1. Параметры двигателя

	f_1 , Гц	p	$\Omega_{дв}$, рад/с
а)	50	2	100
б)	400	1	1600

Задание 2

Дано: частота питающего напряжения, число пар полюсов p , текущий момент $M_{дв}$, критическое скольжение $s_{кр}$, угловая скорость вала двигателя $\Omega_{дв}$.

Определить: критический момент асинхронного трехфазного двигателя $M_{кр}$.

Зарисовать механическую характеристику двигателя.

Таблица 2. Параметры двигателя

	f_1 , Гц	p	$M_{дв}$	$s_{кр}$	$\Omega_{дв}$, рад/с
а)	50	1	10	0,3	250
б)	400	2	5	0,5	750

Задание 3

Дано: частота питающего напряжения f_1 , число пар полюсов p , пусковой момент M_p , угловая скорость вращения вала $\Omega_{дв}$, соответствующая максимальному развиваемому моменту.

Определить величину критического момента асинхронного трехфазного двигателя $M_{кр}$.

Зарисовать механическую характеристику двигателя.

Таблица 3. Параметры двигателя

	f_1 , Гц	p	M_p , Нм	$\Omega_{дв}$, рад/с
а)	50	1	2	200
б)	400	1	1	800

Практическое занятие №4 «Приведение моментов и моментов инерции»

1. Цель и задачи работы

Привитие практических умений и навыков по расчету параметров исполнительного механизма, механической передачи, приведению характеристик электропривода от одного вала электропривода к другому.

2. Теоретические сведения

Приведение моментов сопротивления от одной оси вращения к другой может быть произведено на основании энергетического баланса системы. При этом потери мощности в промежуточных передачах учитываются введением в расчеты соответствующего КПД η . На основании равенства мощностей получим:

$$M_c \omega_c = M_c^{np} \omega_{\partial\partial} \eta, \quad (1)$$

где M_c – момент нагрузки на выходном валу привода, ω_c – угловая скорость выходного вала, M_c^{np} – момент сопротивления нагрузки, приведенный к валу двигателя, $\omega_{\partial\partial}$ – угловая скорость вала двигателя, η – КПД.

Откуда получаем момент, приведенный к валу двигателя:

$$M_c^{np} = M_c \frac{\omega_c}{\omega_{\partial\partial}} \frac{1}{\eta} = \frac{M_c}{i_p \eta}. \quad (2)$$

где $i_p = i_{p1} i_{p2} \dots i_{pn}$ – передаточное число редуктора, n – количество ступеней.

Если нагрузки движется поступательно, то уравнение мощностей принимает вид:

$$F_c v_c = M_c^{np} \omega_{\partial\partial} \eta,$$

отсюда

$$M_c^{np} = \frac{F_c v_c}{\omega_{\partial\partial} \eta}, \quad (3)$$

где F_c – сила, приложенная к нагрузке, v_c – линейная скорость нагрузки.

Приведение моментов инерции к одной оси вращения основано на том, что суммарный запас кинетической энергии движущихся частей привода остается неизменным. При наличии вращающихся частей, обладающих моментами инерции $J_{\partial\partial}$, J_1 , J_2 , ..., J_n и движущихся с угловыми скоростями $\omega_{\partial\partial}$, ω_1 , ω_2 , ..., ω_n их динамическое действие можно заменить действием одного момента инерции, приведенного к валу двигателя. Уравнение для кинетической энергии имеет вид:

$$J \frac{\omega_{\partial\partial}^2}{2} = J_{\partial\partial} \frac{\omega_{\partial\partial}^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2}. \quad (4)$$

Откуда получаем суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя:

$$\begin{aligned} J &= J_{\partial\partial} + J_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega_{\partial\partial}} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_{\partial\partial}} \right)^2 + \dots + J_n \left(\frac{\omega_n}{\omega_{\partial\partial}} \right)^2 = \\ &= J_{\partial\partial} + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_2^2} + \dots + \frac{J_n}{i_n^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $i_i = \frac{\omega_{\partial\partial}}{\omega_i}$ – отношение угловых скоростей вращения вала двигателя и i -го тела.

Например, приведенный к валу двигателя момент инерции редуктора будет равен:

$$J_p^{np} = \frac{J_{p1}}{i_{p1}^2} + \frac{J_{p2}}{i_{p1}^2 i_{p2}^2} + \dots + \frac{J_{pn}}{i_{p1}^2 i_{p2}^2 \dots i_{pn}^2}, \quad (6)$$

где J_{pi} – момент инерции первой ступени, i_{pi} – передаточное отношение i -й ступени.

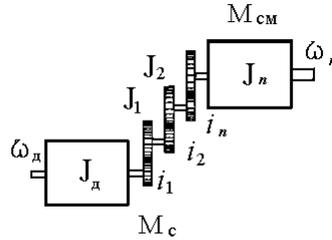


Рис. 1 – К выводу приведенного момента редуктора

Для случая одного тела, вращающегося на выходном валу привода, приведенный к валу двигателя момент инерции будет определяться выражением:

$$J^{np} = J_{\partial в} + \frac{J_n}{i_p^2}, \quad (7)$$

где J_n – момент инерции нагрузки, расположенной на выходном валу.

Моменты и моменты инерции можно привести к выходному валу привода. Момент двигателя, приведенный к выходному валу равен:

$$M_{\partial в}^{np.вых} = M_{\partial в} i_p \eta, \quad (8)$$

суммарный момент инерции, приведенный к выходному валу:

$$J^{np.вых} = J_{\partial в} i_p^2 + J_n. \quad (9)$$

3. Задание на работу

Задание 1

Дано: момент на выходном валу электропривода M_c , передаточное число редуктора i_p , коэффициент полезного действия редуктора η .

Определить момент, развиваемый двигателем, $M_{дв}$.

Таблица 1. Параметры двигателя и нагрузки

	M_c , Нм	i_p	η
а)	1	5	90%
б)	2	20	80%

Задание 2

Даны момент инерции ротора двигателя $J_{дв}$, момент инерции, приведенный к валу двигателя $J_{пр}$, момент инерции нагрузки J_n .

Определить передаточное число редуктора i_p .

Таблица 2. Параметры двигателя и нагрузки

	$J_{дв}$, кгм ²	$J_{пр}$, кгм ²	J_n , кгм ²
а)	0,001	0,0012	0,005
б)	0,002	0,003	0,016

Задание 3

Дано: момент инерции ротора двигателя $J_{дв}$, момент инерции, приведенный к валу двигателя $J_{пр}$, передаточное число редуктора i_p .

Определить момент инерции нагрузки J_n .

Таблица 3. Параметры двигателя и нагрузки

	$J_{дв}, \text{кгм}^2$	$J_{пр}, \text{кгм}^2$	i_p
а)	0,01	0,014	20
б)	0,004	0,005	10

Задание 4

Дано: момент инерции, приведенный к валу двигателя $J_{пр}$, момент инерции нагрузки J_n , передаточное число редуктора i_p .

Определить момент инерции ротора двигателя $J_{дв}$.

Таблица 4. Параметры двигателя и нагрузки

№	$J_{пр}, \text{кгм}^2$	$J_n, \text{кгм}^2$	i_p
а)	0,0015	0,12	20
б)	0,0025	0,05	10