

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕ-  
РАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Кафедра автоматике и  
вычислительной техники**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ**

Мурманск

2007

УДК 681.51 (076.1)

ББК 32.965

M54

Составители: Маслов Алексей Алексеевич, к.т.н., профессор кафедры автоматике и вычислительной техники Мурманского государственного технического университета;  
Яценко Виктория Владимировна, старший преподаватель той же кафедры

Издаются в авторском исполнении без редакторской правки

Методические указания рассмотрены и одобрены кафедрой  
«25» апреля 2007г., протокол № 4

Рецензент – Висков Андрей Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры автоматике и вычислительной техники Мурманского государственного технического университета

## ВВЕДЕНИЕ

"Теория автоматического управления" (ТАУ) изучает принципы построения, методы анализа и синтеза систем автоматического управления. При этом рассматриваются не физические и конструктивные особенности систем, а информационные процессы, протекающие в них, поэтому основным методом исследования служит математическое моделирование. Информационный подход дает возможность применять единые принципы для построения и исследования систем управления объектами различной физической природы и разнообразного технического исполнения, синтезировать знания и вырабатывать у будущих специалистов системное видение природы, социальной среды и техники. Создание и эксплуатация сложных современных систем управления невозможно без знания основ теории автоматического управления. Изучая курс ТАУ, студенты знакомятся с общими принципами построения систем автоматического управления, их свойствами, современными методами расчета этих систем. Курс ТАУ включает в себя чтение лекций, проведение практических занятий, на которых студенты осваивают методы описания и расчета систем управления, и лабораторных работ, в процессе выполнения которых экспериментально проверяются основные выводы теории и вырабатываются практические навыки исследования и настройки систем управления. По курсу ТАУ студенты выполняют расчетно-графическое задание, закрепляющее материал, изученный на лекциях и практических занятиях. Изучение курса только по конспекту лекций и литературе дает лишь поверхностное знание предмета. Следует подчеркнуть особую важность самостоятельного выполнения расчетно-графических заданий.

## РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

1. Изобразить принципиальную схему САР для заданного варианта. Составить функциональную схему САР.

2. По заданным в варианте статическим характеристикам и значению рабочей точки определить передаточные коэффициенты всех элементов системы в абсолютных значениях. Выполнить статический расчёт САР, определив величину статической ошибки системы по задающему воздействию.

3. Составить дифференциальные уравнения и определить передаточные функции всех элементов системы, используя заданные параметры. Изобразить структурную схему САР.

4. По найденным в п.3 передаточным функциям построить частотные характеристики (АФЧХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ, ЛФЧХ) всех элементов системы

5. По найденным передаточным функциям элементов системы определить передаточные функции разомкнутой и замкнутой САР по задающему воздействию.

6. Построить эквивалентные частотные характеристики (АФЧХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ, ЛФЧХ) разомкнутой системы.

7. Проверить устойчивость замкнутой системы по критериям Гурвица, Михайлова и Найквиста.

8. Построить график переходного процесса системы. Определить показатели качества переходного процесса.

### Варианты заданий

1. Система автоматической стабилизации частоты вращения двигателя постоянного тока (рис. 1). Объект регулирования – двигатель постоянного тока с регулированием частоты вращения изменением напряжения на якоре (ЭДН).

Таблица 1

№ вар.	Рабочая точка	Статическая ошибка, %	ЭМУ		ЭДН		ТГ
			Характеристика	Параметры по таб. №3	Характеристика	Параметры по таб. №5	Характеристика
1.	n=1000об/мин	1	№1 на рис.3	1-1	рис. 5	1	№1 на рис. 6
2.		1,5		2-1		2	
3.		2		3-1		3	
4.		2,5		4-1		4	
5.		3		5-1		5	
6.		3,5		6-1		6	
7.	n=850 об/мин	4	№1 на рис.3	1-1	рис. 5	1	
8.		4,5		2-1		2	
9.		5		3-1		3	
10.		5,5		4-1		4	
11.		6		5-1		5	
12.		6,5		6-1		6	
13.	n=650 об/мин	7	№1 на рис.3	1-1	рис. 5	1	
14.		7,5		2-1		2	
15.		8		3-1		3	
16.		8,5		4-1		4	
17.		9		5-1		5	
18.		9,5		6-1		6	

2. Система автоматической стабилизации частоты вращения двигателя постоянного тока (рис.2). Объект регулирования – двигатель постоянного тока с регулированием по потоку (ЭДВ).

Таблица 2

№ вар.	Рабочая точка	Статическая ошибка, %	ЭМУ		ЭДВ		ТГ
			Характеристика	Параметры по таб. №3	Характеристика	Параметры по таб. №4	Характеристика
19.	n=200об/мин	1	№2 на рис.3	1-П	№ 1 на рис.4	1-1	№ 2 на рис. 6
20.		1,5		2-П		2-1	
21.		2		3-П		3-1	
22.		2,5		4-П		4-1	
23.		3		5-П		5-1	
24.		3,5		6-П		6-1	
25.	n=400 об/мин	4	№2 на рис.3	1-П	№ 1 на рис.4	1-1	
26.		4,5		2-П		2-1	
27.		5		3-П		3-1	
28.		5,5		4-П		4-1	
29.		6		5-П		5-1	
30.		6,5		6-П		6-1	
31.	n=600 об/мин	7	№2 на рис.3	1-П	№ 1 на рис.4	1-1	
32.		7,5		2-П		2-1	
33.		8		3-П		3-1	
34.		9,5		4-П		4-1	
35.		10		5-П		5-1	
36.		10,5		6-П		6-1	

## Принципиальные схемы САР

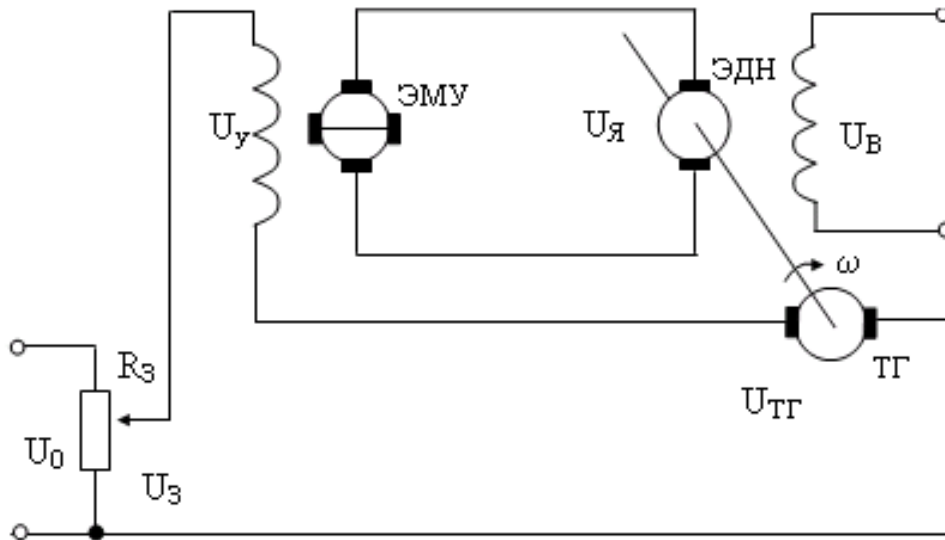


Рис. 1 Принципиальная схема САР стабилизации частоты вращения двигателя постоянного тока. Объект регулирования – ЭДН.

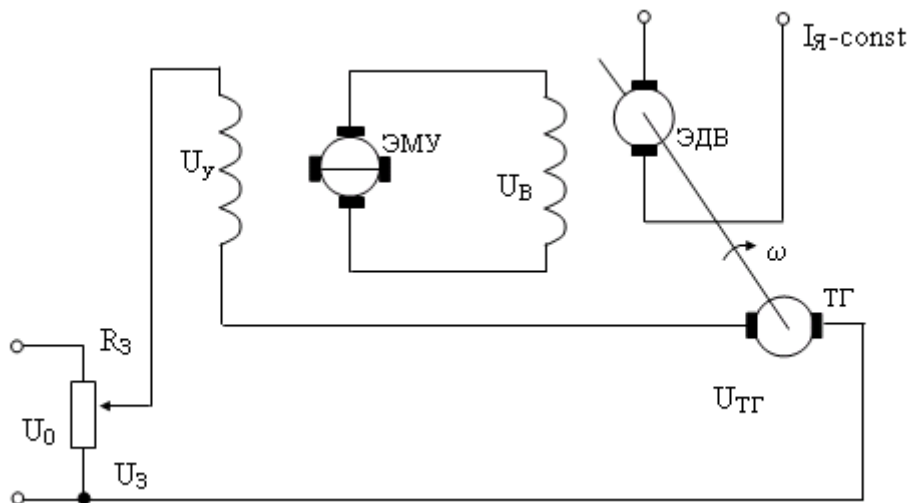


Рис. 2 Принципиальная схема САР стабилизации частоты вращения двигателя постоянного тока. Объект регулирования – ЭДВ.

## Статические характеристики и параметры элементов САР

### 1. ЭМУ с продольно-поперечным возбуждением

Таблица 3

Вариант параметров	I				II				III			
	$L_q$	$R_q$	$L_y$	$R_y$	$L_q$	$R_q$	$L_y$	$R_y$	$L_q$	$R_q$	$L_y$	$R_y$
1	0,3	2	1,0	5	1	1	4,0	20	10	100	5	50
2	0,4	3	1,5	8	2	1,5	3,5	18	15	200	6	40
3	0,5	4	2,0	10	3	2	3,0	16	20	300	4	30
4	0,6	5	2,5	12	1	2,5	2,5	14	35	350	3	25
5	0,7	6	3,0	14	2	3	2,0	12	30	400	3,5	35
6	0,8	7	3,5	16	3	2,5	1,5	10	35	450	4,5	30
7	0,9	8	4,0	18	2	3,0	1,0	8	40	500	5,5	40

$L_y$  - индуктивность цепи управления, Гн;

$R_y$  - сопротивление цепи управления, Ом;

$L_q$  - индуктивность поперечной цепи, Гн;

$R_q$  - сопротивление поперечной цепи, Ом.

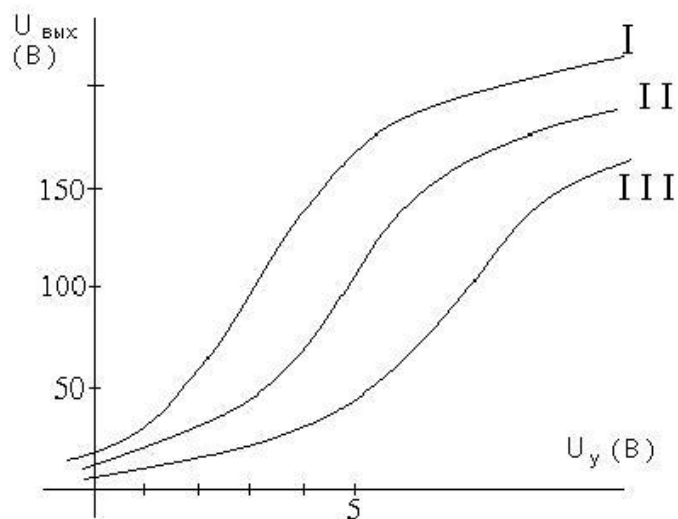


Рис. 3. Статические характеристики ЭМУ



2. Электродвигатель постоянного тока с регулированием по потоку  
( $I_a = \text{const}$ ) - ЭДВ

Таблица 4

Вариант параметров	I				II			
	$L_B$	$R_B$	J	$\rho$	$L_B$	$R_B$	J	$\rho$
1	12	50	100	50	5	30	200	100
2	16	40	150	50	6	40	240	80
3	18	45	140	60	7	40	300	100
4	20	50	130	70	8	85	360	120
5	22	45	120	80	12	45	400	160
6	24	40	110	100	14	30	400	180
7	26	50	100	70	10	50	300	185

$L$  - индуктивность обмотки возбуждения, Гн;

$R$  - сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

$J$  - момент инерции всех вращающихся масс,  $H \cdot m \cdot c^2$ ;

$\rho$  - коэффициент вязкого трения,  $H \cdot m \cdot c^2$ .

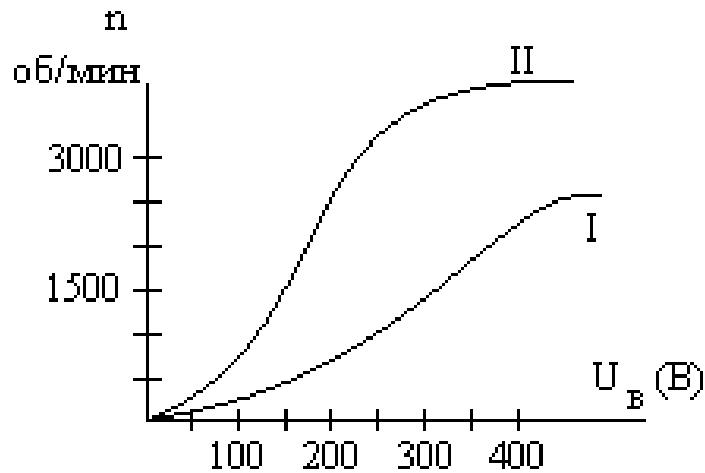


Рис. 4. Статические характеристики ЭДВ

3. Электродвигатель постоянного тока с регулированием частоты вращения изменением напряжения на якоре (ЭДН)

Таблица 5

Вариант параметров	J	$\rho$	$f\delta$
1	200	50	30
2	300	60	40
3	250	70	20
4	350	80	50
5	400	90	30
6	450	100	40
7	300	110	50

$f\delta$  - коэффициент внутреннего демпфирования.

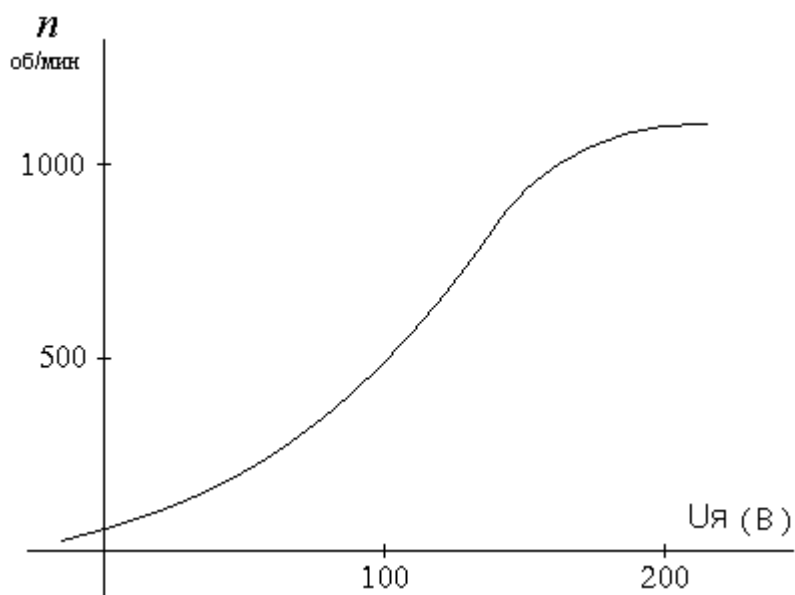


Рис. 5. Статическая характеристика ЭДН

## 4. Тахогенератор постоянного тока (ТГ)

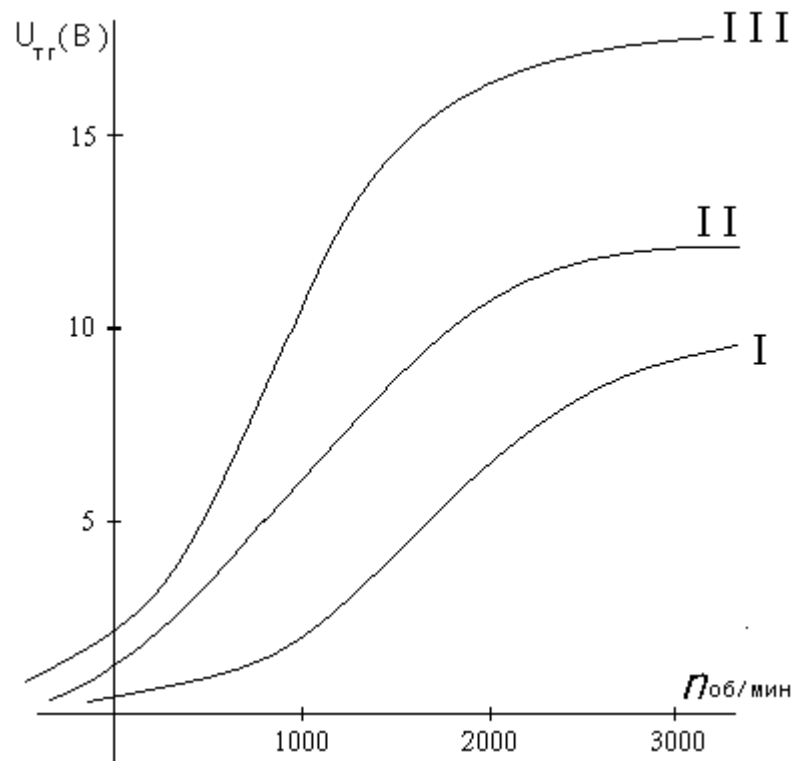


Рис. 6. Статические характеристики ТГ

### Методические указания к выполнению задания

1. Расчетно–графическое задание выполняется в последовательности, указанной в задании.

2. Для определения передаточных коэффициентов элементов системы заданные статические характеристики необходимо вычертить в крупном масштабе на миллиметровой бумаге. Определить рабочие точки на характеристиках последовательно, начиная с характеристики объекта. Провести графическую линеаризацию участков статических характеристик в уже найденных рабочих точках. На линеаризованном участке характеристики следует построить прямоугольный треугольник, гипотенузой которого является сам линеаризованный участок. Коэффициент передачи элемента системы находится как отношение катета, выражающего приращение выходной величины элемента, к катету, выражающего приращение входной величины.

Относительная статическая ошибка системы по задающему воздействию определяется по формуле

$$S_e = \frac{1}{1 + K_{pc}},$$

где  $K_{pc}$  - коэффициент передачи разомкнутой системы (определяется на основе заданных и найденных коэффициентов передачи элементов).

Статический расчет считается законченным, если полученная относительная ошибка равна или меньше заданной. В противном случае необходимо ввести в систему дополнительный усилительный элемент (например, УПТ, если его нет в заданной схеме) с необходимым коэффициентом усиления или увеличить коэффициент передачи усилительного элемента системы (например, УПТ, ЭМУ) до необходимого. Рассчитанные необходимые коэффициенты передачи должны обеспечивать заданную в варианте статическую ошибку системы.

3. Составить дифференциальные уравнения и определить передаточные функции всех элементов системы можно, пользуясь учебниками (1-14) или приложением к данным методическим указаниям.

После нахождения передаточных функций всех элементов системы необходимо построить структурную схему с обозначением всех связей между блоками, представляющими элементы системы. В каждый блок должна быть вписана передаточная функция элемента, который он представляет.

4. Частотные характеристики должны быть представлены амплитудно-фазочастотной характеристикой (АФЧХ), амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), фазочастотной характеристикой (ФЧХ), логарифмической амплитудно-частотной характеристикой (ЛАЧХ) и логарифмической фазочастотной характеристикой (ЛФЧХ). АФЧХ, АЧХ, ФЧХ строятся с помощью программы Autocont[6]. ЛАЧХ строится асимптотически.

5. Эквивалентная передаточная функция разомкнутой системы при последовательном соединении элементов находится по формуле

$$W_{pc}(p) = \prod_{i=1}^k W_i(p),$$

где  $W_i(p)$  - передаточная функция  $i$ -го элемента системы;

$k$  – количество элементов в системе.

Передаточная функция замкнутой системы находится по формуле

$$W_{zc}(p) = \frac{W_{pc}(p)}{1 + W_{pc}(p)},$$

где  $W_{pc}(p)$  - передаточная функция разомкнутой системы.

6. Для построения АФЧХ, АЧХ, ФЧХ разомкнутой системы используется программа Autocont [6]. ЛАЧХ разомкнутой системы строится асимп-

тотически. Для ее построения передаточную функцию необходимо представить в виде

$$W_{pc}(p) = \frac{K}{\prod_{i=1}^n (T_i p + 1)},$$

где  $K$  - передаточный коэффициент разомкнутой системы;

$T$  - постоянного времени  $i$ -го инерционного звена;

$n$  - порядок системы.

Низкочастотный участок ЛАЧХ будет представлять прямую, параллельную оси частот с ординатой

$$L(\omega) = 20 \lg K$$

При достижении ЛАЧХ частот сопряжения  $\omega_i = \frac{1}{T_i}$  наклон характеристики будет изменяться на  $-20$  дБ/дек.

Например, ЛАЧХ системы с передаточной функцией

$$W_{pc}(P) = \frac{10}{(10p + 1)(p + 1)},$$

выглядит так

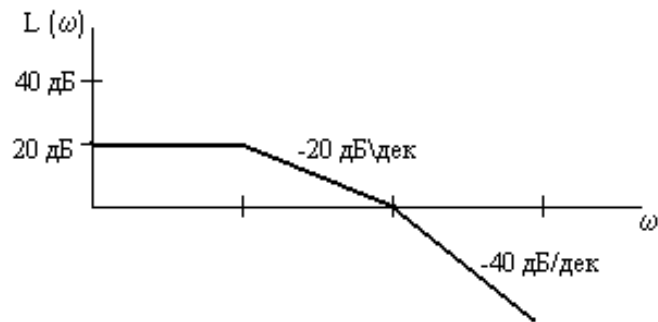


Рис. 7 Эквивалентная ЛАЧХ разомкнутой системы.

При построении логарифмических характеристик необходимо помнить, что ось абсцисс градуируется в частоте, но частоты по оси отклады-

ваются в логарифмическом масштабе. Это значит, что по оси частот равномерно распределяются логарифмы частот.

7. Для проверки устойчивости системы по алгебраическому критерию Гурвица необходимо воспользоваться характеристическим уравнением системы.

Характеристическое уравнение системы имеет вид:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + a_{n-2} p^{n-2} + \dots + a_1 p + a_0 = 0$$

Условия устойчивости сводятся к тому, чтобы все коэффициенты и определители, составленные по схеме, приводимой ниже, были положительными.

Определители  $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$  образуются из следующей таблицы коэффициентов характеристического уравнения системы:

$a_{n-1}$	$a_{n-3}$	$a_{n-5}$	·	·	·	·	·	·	0
$a_n$	$a_{n-2}$	$a_{n-4}$	·	·	·	·	·	·	0
0	$a_{n-1}$	$a_{n-3}$	·	·	·	·	·	·	0
0	$a_n$	$a_{n-2}$	·	·	·	·	·	·	0
0	0	$a_{n-1}$	·	·	·	·	·	·	0
·	·	·	·	·	·	·	·	·	0
·	·	·	·	·	·	·	·	$a_1$	0
0	0	·	·	·	·	·	·	$a_2$	$a_0$

Из этой таблицы для определителя 1,2,..., n-го порядка берутся 1,2,..., n столбцов и строк.

Сама таблица составляется следующим образом. По главной диагонали вписывают последовательно коэффициенты характеристического уравнения, начиная с  $a_{n-1}$ . Столбцы таблиц, начиная с главной диагонали, заполняют вверх по убывающим индексам, вниз – по возрастающим. Все коэффициенты с индексами ниже нуля и выше степени уравнения заменяют нулями.

Одним из наглядных критериев устойчивости является критерий Михайлова.

Для рассмотрения системы по данному критерию необходимо воспользоваться характеристическим уравнением системы

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0$$

Заменяя в уравнении  $p$  на  $j\omega$ , получим:

$$a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 (j\omega) + a_0 = 0$$

Выделяя в уравнении вещественную часть (сумма слагаемых, содержащих  $\omega$  в четных степенях), получим четную функцию  $\omega$ , равную

$$\operatorname{Re}(\omega)$$

Выделяя мнимую часть уравнения (сумма слагаемых, содержащая  $\omega$  в нечетных степенях), получим нечетную функцию  $\omega$ , равную

$$\operatorname{Im}(\omega)$$

Выражение  $D(j\omega) = \operatorname{Re}(\omega) + j\operatorname{Im}(\omega)$  есть аналитическое представление вектора Михайлова.

Вычисляя значение  $D(j\omega)$  при изменении частоты от 0 до  $+\infty$  и отмечая изменение положения конца вектора на комплексной плоскости, можно судить об устойчивости рассматриваемой системы.

Если кривая, описывающая изменение положения этого вектора (годограф Михайлова), при изменении частоты от 0 до  $+\infty$  описывает в положительном направлении (против часовой стрелки)  $n$  квадрантов ( $n$  - порядок характеристического уравнения), то система устойчива.

Для проверки устойчивости системы по критерию Найквиста можно воспользоваться уже построенной АФЧХ разомкнутой системы. Как известно, оценка устойчивости производится по относительному положению АФЧХ и точки с координатами  $(-1; j0)$ . Дополнительных вычислений не требуется.

8. График переходного процесса строится с помощью программы Autocont [6]. Схема моделируемой системы представлена на рисунке 8.



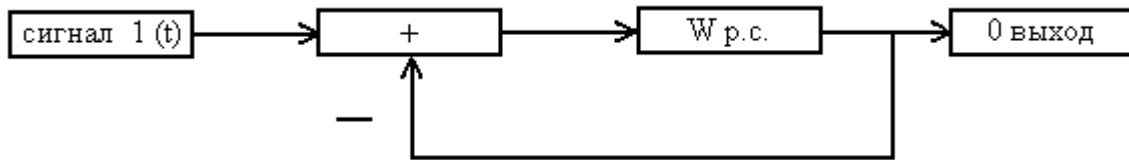


Рис. 8 Структурная схема моделируемой системы

Для данной схемы производится расчет и построение графика переходного процесса (рис. 9).

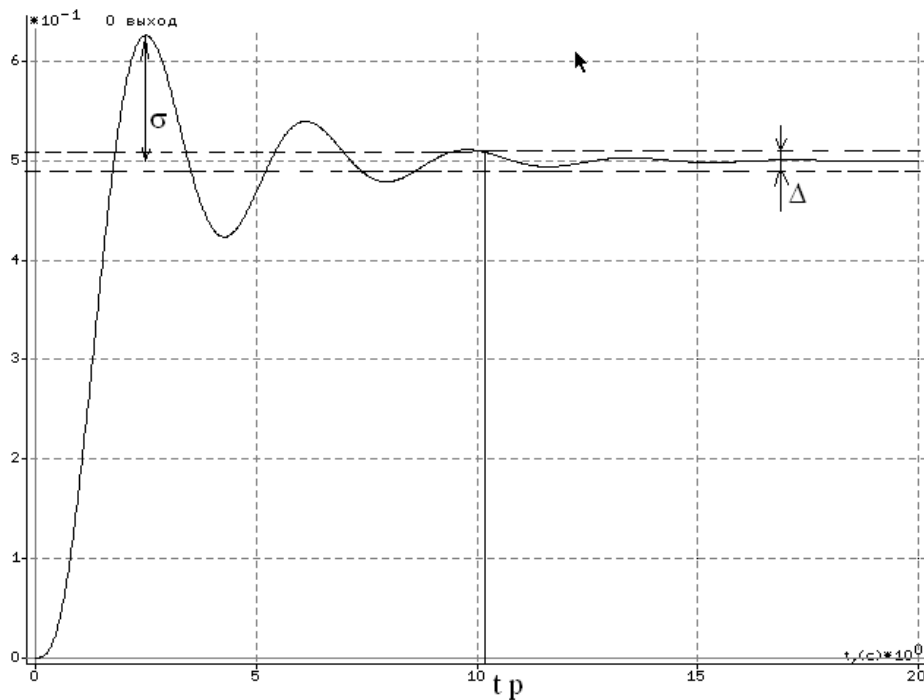


Рис. 9 График переходного процесса в замкнутой АСР.

По графику переходного процесса необходимо определить следующие показатели качества:

1. время переходного процесса  $t_p$  – интервал времени от начала приложения воздействия до момента, после которого отклонение регулируемой величины от установившегося значения не будет выходить за заданные пределы. Применительно к АСР частоты вращения двигателя по окончании переходного процесса будет иметь место соотношение:

$$|n(t) - n(\infty)| \leq \Delta,$$

где  $\Delta$  - допустимое отклонение скорости вращения от заданного значения (5%).

2. перерегулирование  $\sigma$  - максимальное превышение регулируемой величиной установившегося значения, выраженное в процентах к этому значению:

$$\sigma = \frac{n_{\max} - n_{\infty}}{n_{\infty}} \cdot 100\% ,$$

где  $n_{\max}$  – максимальное значение регулируемой величины в процессе управления,  $n_{\infty}$  - установившееся значение регулируемой величины.

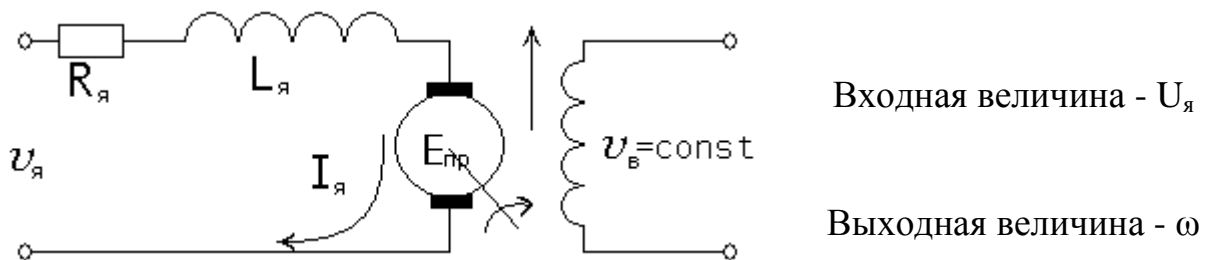
3. колебательность характеризуется числом переходов регулируемой величины через установившееся значение (числом колебаний) в течение времени переходного процесса.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

## Вывод дифференциальных уравнений элементов систем автоматического регулирования

1. Дифференциальное уравнение двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при регулировании частоты вращения изменением напряжения на якоре (ЭДН).

### Принципиальная схема



Исходными физическими уравнениями являются уравнения электрического и механического равновесия.

Схема цепи якоря двигателя позволяет составить уравнение электрического равновесия:

$$U_я = I_я \cdot R_я + L_я \frac{dI_я}{dt} + E_{пр}, \quad (1)$$

где  $L_я$  - индуктивность цепи якоря;

$R_я$  - активное сопротивление цепи якоря;

$E_{пр} = 30C_e \Phi \frac{\omega}{\pi}$  - противоЭДС якоря.

Для двигателей малой и средней мощности индуктивностью якоря можно пренебречь.

Полагая, что вращающий момент двигателя расходуется на преодоление динамического момента, обусловленного моментом инерции вращающихся масс и момента вязкого трения, получим уравнение моментов

$$M_{\text{вр}} = C_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = J \frac{d\omega}{dt} + \rho \cdot \omega, \quad (2)$$

где  $C_m$ - электромеханическая постоянная;

$\Phi$  - поток обмотки возбуждения;

$J$  - момент инерции всех вращающихся масс;

$\rho$  - коэффициент вязкого трения.

#### *Вывод дифференциального уравнения*

Выразим из уравнения (2) ток якоря  $I_{\text{я}}$  и подставим его в уравнение (1), после преобразования получим уравнение:

$$\frac{J}{\rho + f_{\delta}} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{K_{\delta} \cdot f_{\delta}}{\rho + f_{\delta}} \cdot U_{\text{я}}, \quad (3)$$

где  $f_{\delta} = \frac{C_c \cdot C_n \Phi^2 \cdot 30}{\pi \cdot R_{\text{я}}}$  - коэффициент внутреннего демпфирования;

$K_{\delta} = \frac{\pi}{C_c \cdot \Phi \cdot 30}$  - коэффициент пропорциональности между частотой вращения и напряжением.

Окончательно дифференциальное уравнение можно представить в виде

$$T_{\delta} \frac{d\omega}{dt} + \omega = K \cdot U_{\text{я}}, \quad (4)$$

где  $T_{\delta} = \frac{J}{\rho + f_{\delta}}$  - электромеханическая постоянная времени ;

$K = \frac{K_{\delta} \cdot f_{\delta}}{\rho + f_{\delta}}$  - передаточный коэффициент двигателя.

Передаточный коэффициент находится по статической характеристике двигателя  $\omega=f(U_{\text{я}})$  для заданной рабочей точки.

### *Передаточная функция элемента*

Если к уравнению (4) применим преобразование Лапласа (начальные условия нулевые), то уравнение (4) примет вид

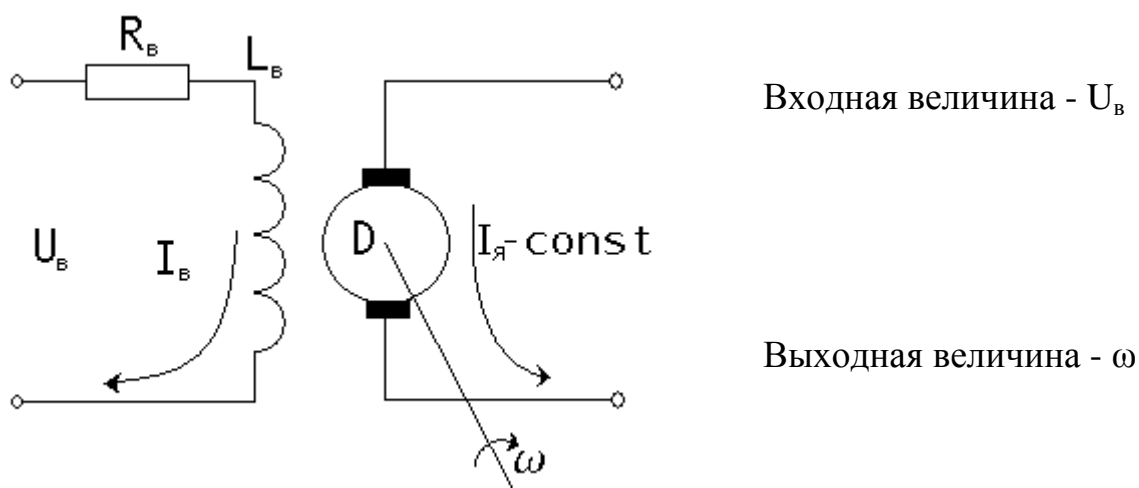
$$T_{\partial} \cdot p \cdot \omega(p) = k \cdot U_{\text{я}}(p), \quad (5)$$

Определив отношение лапласова изображения выходной величины к лапласову изображению входной, получим выражение передаточной функции элемента

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U_{\text{я}}(p)} = \frac{k}{T_{\partial} p + 1}. \quad (6)$$

2. Дифференциальное уравнение двигателя постоянного тока в случае регулирования частоты вращения путём изменения потока возбуждения при постоянном токе в обмотке якоря (ЭДВ).

### Принципиальная схема



Исходными физическими уравнениями являются уравнения электрического и механического равновесия.

Схема цепи возбуждения позволяет составить уравнение электрического равновесия

$$U_B = I_B R_B + L_B \frac{dI_B}{dt} \quad (9)$$

где  $R_B$  - активное сопротивление цепи возбуждения;

$L_B$  - индуктивность цепи возбуждения.

Так как при данном способе регулирования ток  $I_{я}$ , протекающий через обмотку якоря, поддерживается практически постоянным, а ток  $I_B$  в обмотке возбуждения изменяется, то уравнение моментов может быть записано в виде:

$$M_{BP} = K I_B = J \frac{d\omega}{dt} + \rho \omega \quad (10)$$

*Вывод дифференциального уравнения*

Определим ток  $I_B$  и его производную  $\frac{dI_B}{dt}$  из уравнения (9) и введём полученные результаты в уравнение (10).

После преобразований получим дифференциальное уравнение:

$$T_B \cdot T_D \frac{d^2 \omega}{dt^2} + (T_B + T_D) \frac{d\omega}{dt} + \omega = \kappa \cdot U_B, \quad (11)$$

где  $T_B = \frac{L_B}{R_B}$  - постоянная времени обмотки возбуждения;

$T_D = \frac{J}{\rho}$  - электромеханическая постоянная времени двигателя;

$\kappa$  - передаточный коэффициент двигателя.

Передаточный коэффициент находится по статической характеристике двигателя  $\omega = f(I_B)$  для заданной рабочей точки.

*Передаточная функция элемента*

Если к уравнению (11) применим преобразование Лапласа (начальные условия нулевые), то уравнение примет вид

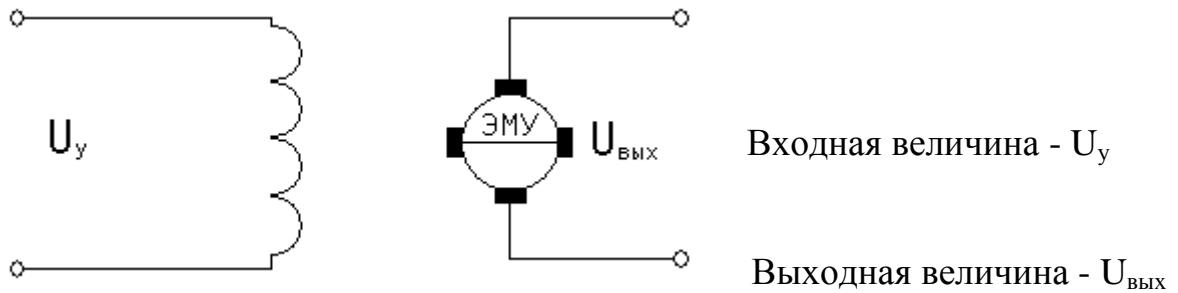
$$T_B \cdot T_D p^2 \omega(p) + (T_B + T_D) \cdot p \cdot \omega(p) + \omega(p) = \kappa U_B(p) \quad (12)$$

Определив отношение лапласова изображения выходной величины к лапласову изображению входной, получим выражение передаточной функции элемента

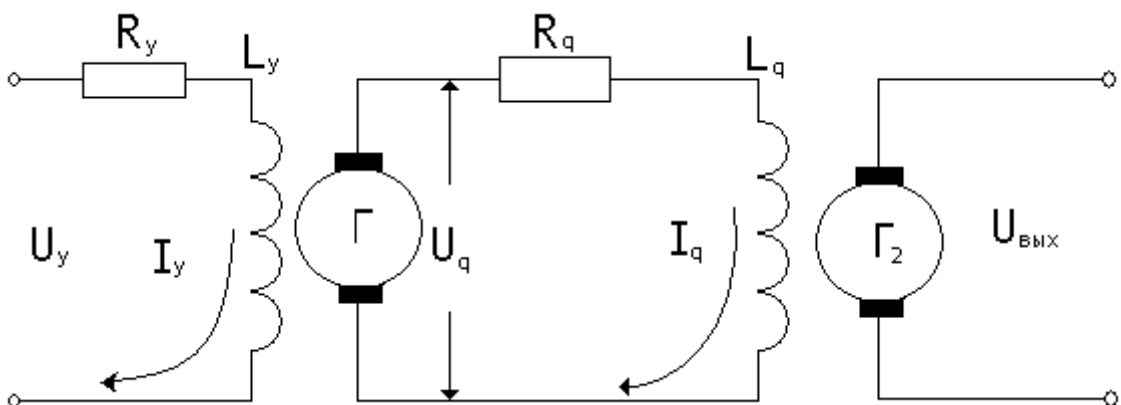
$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{k}{T_{\text{э}}T_{\text{д}}p^2 + (T_{\text{э}} + T_{\text{д}})p + 1} \quad (13)$$

3. Дифференциальное уравнение электромашинного усилителя с продольно-поперечным возбуждением (ЭМУ).

#### Принципиальная схема



#### Эквивалентная схема



*Исходные физические уравнения*



ЭМУ с продольно-поперечным возбуждением эквивалентен последовательному соединению двух звеньев: первичного и вторичного генераторов. Входной величиной первичного генератора является напряжение возбуждения  $U_y$ , приложенное к обмотке управления ЭМУ, его выходной величиной является напряжение поперечной цепи  $U_\partial$ . Это напряжение, в свою очередь, является источником возбуждения вторичного генератора. На выходе этого генератора вырабатывается выходное напряжение ЭМУ -  $U_{\text{вых}}$ . Приведённая эквивалентная схема справедлива, если пренебречь ЭДС взаимной индукции, которая наводится токами управляющей обмотки в продольной обмотке якоря и считать, что ЭМУ полностью скомпенсирован потоком компенсационной обмотки.

Данная схема позволяет составить уравнения электрического равновесия:

- для цепи обмотки управления -

$$U_y = I_y R_y + L_y \frac{dI_y}{dt} \quad (21)$$

- для поперечной цепи якоря -

$$U_\partial = I_\partial R_\partial + L_\partial \frac{dI_\partial}{dt} \quad (22)$$

где  $R_y$ ,  $R_\partial$ ,  $L_y$ ,  $L_\partial$  - активные сопротивления и индуктивности соответственно цепи управления и поперечной цепи.

Если ЭМУ работает в ненасыщенном режиме, то напряжение поперечной цепи  $U_\partial$  и напряжение на выходе  $U_{\text{вых}}$  можно определить так:

$$U_\partial = k_1 I_y \quad (23)$$

$$U_{\text{вых}} = k_2 I_\partial \quad (23)$$

*Вывод дифференциального уравнения*

Решая совместно (20), (21), (22), и (23), получим следующее дифференциальное уравнение:

$$T_y T_\partial \frac{d^2 U_{\text{вых}}}{dt^2} + (T_y + T_\partial) \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = \kappa U_y \quad (24)$$

где  $T_y = \frac{L_y}{R_y}$  - постоянная времени цепи управления ЭМУ,

$T_\partial = \frac{L_\partial}{R_\partial}$  - постоянная времени поперечной цепи ЭМУ,

$\kappa$  - передаточный коэффициент ЭМУ.

Передаточный коэффициент находится по статической характеристике ЭМУ  $U_{\text{вых}} = f(U_y)$  для заданной рабочей точки.

### *Передаточная функция элемента*

Если к уравнению (24) применим преобразование Лапласа (начальные условия нулевые), то уравнение примет вид

$$T_y T_\partial p^2 U_{\text{вых}}(p) + (T_y + T_\partial) p U_{\text{вых}}(p) + U_{\text{вых}}(p) = \kappa U_y(p) \quad (25)$$

Определив отношение лапласова преобразования выходной величины к лапласову преобразованию входной, получим выражение передаточной функции элемента

$$W(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_y(p)} = \frac{\kappa}{T_y T_\partial p^2 + (T_y + T_\partial) p + 1} \quad (26)$$

Элементы системы тахогенератор и УПТ являются безинерционными звеньями с передаточными функциями

$$\begin{aligned} W_{ТГ} &= \kappa_{ТГ} \\ W_{УПТ} &= \kappa_{УПТ} \end{aligned} \quad (27)$$

где  $\kappa_{ТГ}$  и  $\kappa_{УПТ}$  - коэффициенты передачи, найденные при статическом расчете.

**Литература:**

1. Власенко, А.А. Судовая электроавтоматика. / А.А.Власенко, В.А.Стражмейстер - М.: Транспорт, 1983. – С.12-31, 78-90.
2. Кринецкий, И.И. Судовая автоматика. / И.И.Кринецкий – М.: Изд-во: Пищ. пр-сть, 1978. – С.24-35, 112-114.
3. Прохоренков, А.М. Судовая автоматика: учебное пособие для ВУЗов. / А.М.Прохоренков, В.С.Солодов, Ю.Г.Татьянченко – М.: Колос, 1992: - С.69-73.
4. Ключев, А.С. Автоматическое регулирование: учебник для ср.-спец. учебн. заведений. / А.С. Ключев –М: Энергия, 1986. – С.5-16.
5. Ключев, А.С. Автоматическое управление линейными системами / А.С.Ключев, Е.А.Кочетков; под ред. А.С. Ключева. -М.: "Испо-Сервис", 1999. - 192 с.: ил.
6. Маслов, А.А. Введение в AUTOCONT с примерами моделирования систем автоматического управления: учебное пособие по дисциплине "Теория автоматического управления" для специальностей: 210200 "Автоматизация технологических процессов и производств", 240600 "Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики. / А.А. Маслов, С.И. Ушаков, А.Ю. Висков. Изд. 2-е, переработанное и дополненное - Мурманск, МГТУ, 2005. - 158 с.

