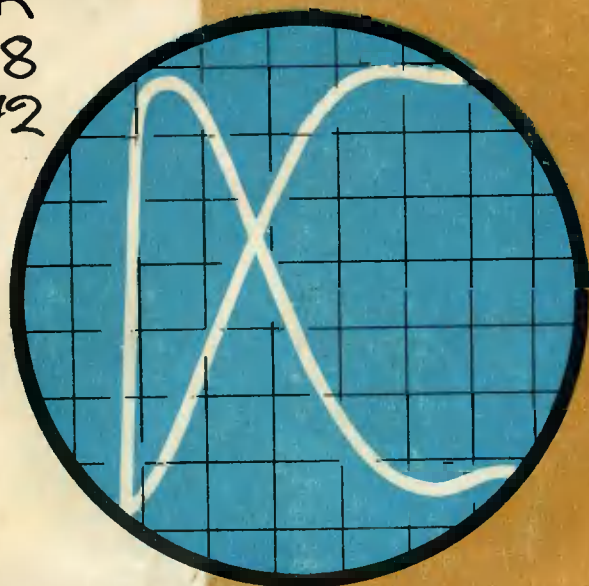


**Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА**

УДК
62-8
Я572



**Д. С. ЯМПОЛЬСКИЙ
Т. А. ОРЛОВА
Б. И. РЕШМИН**

**определение
динамических
параметров
электропривода
постоянного
тока**



Выпуск 345

Д. С. ЯМПОЛЬСКИЙ,
Т. А. ОРЛОВА,
Б. И. РЕШМИН

УДК

62-8

9 572

ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ДИНАМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПОСТОЯННОГО ТОКА

К. У. / 1

Центральная научно-
техническая
БИБЛИОТЕКА
Западно-Уральского ЦНТИ



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1971

6П2.1.081

Я 57

УДК 62-83:621.913.13.024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Большам Я. М., Каминский Е. А., Мандрыкин С. А.,
Розанов С. П., Синьчугов Ф. И., Смирнов А. Д., Соколов Б. А.,
Устинов П. И.

Ямпольский Д. С. и др.

Я 57 **Определение динамических параметров электропривода постоянного тока. М., «Энергия», 1972.**

56 с. с илл. (Б-ка электромонтера. Вып. 345).

Перед загл. авт.: Д. С. Ямпольский, Т. А. Орлова,
Б. И. Решмин.

В брошюре рассматривается ряд методов опытного определения динамических параметров якорной цепи и обмотки возбуждения привода постоянного тока по осциллограммам тока скорости и на основании частотной характеристики. Выбор метода зависит от конкретных возможностей в проведении эксперимента. Даются рекомендации по проведению опыта. Книга рассчитана на квалифицированных электромонтеров и наладчиков, обслуживающих электроустановки.

3-3-10

138-71

6П2.1.081

ПРЕДИСЛОВИЕ

При проектировании и наладке систем автоматического регулирования для правильного расчета и оценки качества переходных процессов необходимо знать динамические параметры этих систем.

Под динамическими параметрами понимаются параметры, присущие каждому элементу системы и оказывающие влияние на характер переходных процессов в системе регулирования (постоянные времени, коэффициенты усиления и т. д.). Определение указанных параметров по расчетным формулам следует рассматривать как предварительное в силу неточностей расчетных формул, возникающих из-за трудностей учета внутренних обратных связей, отклонения реальных данных от паспортных и т. д. Поэтому при наладке систем автоматического регулирования приходится экспериментально уточнять динамические параметры.

Существует ряд методов экспериментального определения этих параметров, основанных на анализе переходных, частотных и импульсных характеристик, отличающихся между собой характером входного возмущающегося сигнала.

В рассматриваемой работе приводятся некоторые аналитические и экспериментальные способы определения динамических параметров машин постоянного тока с независимым возбуждением по их переходным и частотным характеристикам.

Изложение материала выполнено в практической системе единиц. В конце § 1 приведена сопоставительная таблица 1, позволяющая перейти к международной системе единиц СИ.

Автор

1. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ ДВИГАТЕЛЯ

При неизменном токе возбуждения характер переходных процессов в двигателе постоянного тока зависит от двух динамических параметров якорной цепи: электромагнитной постоянной времени $T_э$ и электромеханической постоянной времени $T_{эм}$.

Электромагнитная постоянная времени $T_э$ при ступенчатом приложении напряжения к якорной цепи невозбужденного двигателя определяет время нарастания тока якоря до практически установившегося значения и численно равна:

$$T_э = \frac{L_я}{R_я}, \text{ сек,} \quad (1)$$

где $L_я$ — индуктивность якорной цепи, *гн*; $R_я$ — активное сопротивление якорной цепи, *ом*.

В общем случае суммарная индуктивность якорной цепи состоит из индуктивности источника питания $L_п$, индуктивности соединительных кабелей или шин $L_{ш}$ и индуктивности двигателя $L_д$. То же самое относится и к суммарному сопротивлению якорной цепи.

Таким образом, электромагнитная постоянная времени якорной цепи равна:

$$T_э = \frac{L_я}{R_я} = \frac{L_п + L_{ш} + L_д}{R_п + R_{ш} + R_д}. \quad (2)$$

Электромеханическая постоянная времени $T_{эм}$ при ступенчатом приложении напряжения к якорной цепи определяет время нарастания скорости вращения двигателя до практически установившегося значения и определяется по формуле

$$T_{эм} = \frac{GD^2 R_я}{375 c_e c_m \Phi^2}, \text{ сек,} \quad (3)$$

где GD^2 — маховой момент привода, приведенный к валу двигателя, $кгс \cdot м^2$; c_e , c_m — конструктивные постоянные машины.

Обычно в заводских формулярах на двигатели и документации на механизмы дается не момент инерции J , а маховой момент GD^2 , равный:

$$GD^2 = 4Jg, \text{ кгс} \cdot м^2, \quad (4)$$

где $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ — ускорение свободного падения.

Величины $c_e\Phi$, $c_m\Phi$ можно определить из формул

$$\left. \begin{aligned} c_e\Phi &= \frac{10^{-8}}{60} \frac{pN}{a} \Phi = \frac{E}{n}; \\ c_m\Phi &= \frac{10^{-8}}{9,81 \cdot 2\pi} \frac{pN}{a} \Phi = \frac{M}{I}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где E — номинальная э. д. с. машины, v ; I — номинальный ток машины, a ; n — номинальная скорость машины, $об/мин$; M — номинальный момент машины, $кгс \cdot м$; p — число пар главных полюсов; N — число проводников на якоре; a — число пар параллельных ветвей якоря.

Переходный процесс скорости вращения при ступенчатом приложении напряжения к якорной цепи и при отсутствии момента сопротивления описывается уравнением

$$T_{эм}T_{э} \frac{d^2n}{dt^2} + T_{эм} \frac{dn}{dt} + n = \frac{U}{c_e\Phi}. \quad (6)$$

Введем в рассмотрение новые динамические параметры ω_n и ξ , однозначно определяемые величинами $T_{эм}$ и $T_{э}$ в соответствии с формулами:

угловая частота недемпфированных колебаний, определяющая масштаб времени процесса,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{T_{э}T_{эм}}}; \quad (7)$$

относительный коэффициент затухания колебаний, определяющий колебательность процесса,

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{эм}}{T_{э}}}. \quad (8)$$

При $\xi < 1$ переходный процесс носит колебательный характер, при $\xi \geq 1$ — аperiодический. В первом случае $T_{эм} < 4T_{э}$, во втором $T_{эм} \geq 4T_{э}$.

В табл. 1 сопоставлены формулы в единицах измерения практической и международной системы единиц.

В практической системе единиц		В международной системе единиц СИ	
Формулы	Единицы измерения	Формулы	Единицы измерения
$E = \frac{10^{-8}}{60} \frac{pN}{a} \Phi n = c_e \Phi n$	n — об/мин ($n = 9,55\omega$)	$E = \frac{1}{2\pi} \frac{pN}{a} \Phi \omega = c \Phi \omega$	ω — рад/сек ($\omega = 0,105n$)
$M = \frac{10^{-8}}{9,81 \cdot 2\pi} \frac{pN}{a} \Phi I = c_M \Phi I$	Φ — мкс (1 мкс = 10^{-6} с) M — кгс·м (1 кгс·м = 9,81 н·м)	$M = \frac{1}{2\pi} \frac{pN}{a} \Phi I = c \Phi I$	Φ — вб (1 вб = 10^8 мкс) M — н·м (1 н·м = $\frac{1}{9,81}$ кгс·м)
$\frac{c_e}{c_M} = 1,027$		$\frac{c_e}{c_M} = 1$	
$T_{эм} = \frac{GD^2 R_{г}}{375 c_e c_M \Phi^2}$	GD^2 — кгс·м ² ($GD^2 = 4Jg$)	$T_{эм} = \frac{J R_{г}}{c^2 \Phi^2}$	J — кгс·м ² ($J = \frac{GD^2}{4g}$)

2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ

В системе генератор — двигатель индуктивность якорной цепи складывается из индуктивности генератора и двигателя:

$$L_{\text{я}} = L_{\text{г}} + L_{\text{д}}, \quad (9)$$

где $L_{\text{г}}$, $L_{\text{д}}$ — индуктивности генератора и двигателя.

Индуктивность якорной цепи несколько увеличивается за счет индуктивности соединительных кабелей или шин.

Существуют формулы для определения индуктивности якоря через множество конструктивных параметров машины. Однако практически в заводских формулярах и каталогах на машины дается ограниченное количество основных параметров, поэтому на практике применяются эмпирические формулы, из которых наибольшее распространение получила формула Уманского — Линвилла, имеющая вид:

$$L = \gamma \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} \frac{30}{p n_{\text{н}}}, \quad \text{гН}, \quad (10)$$

где $\gamma = 0,15 \div 0,25$ — для компенсированных машин; $\gamma = 0,6$ — для некомпенсированных машин; $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$ — номинальное напряжение и ток двигателя; p — число пар главных полюсов; $n_{\text{н}}$ — номинальная скорость вращения.

Сопротивление якорной цепи с учетом нагрева определяется по формуле

$$R_{\text{я}} = 1,24 (R_{\text{а.г}} + R_{\text{к.г}} + R_{\text{п.г}} + R_{\text{а.д}} + R_{\text{к.д}} + R_{\text{п.д}})_{20^{\circ}\text{C}} + R_{\text{ш}}, \quad (11)$$

где $R_{\text{а.г}}$, $R_{\text{к.г}}$, $R_{\text{п.г}}$, $R_{\text{а.д}}$, $R_{\text{к.д}}$, $R_{\text{п.д}}$ — сопротивления обмоток якоря, компенсационной и дополнительных полюсов генератора и двигателя при 20°C (данные заводских формуляров); $R_{\text{ш}}$ — сопротивление соединительных кабелей или шин, эти сопротивления зависят от длины, сечения, материала и рабочей температуры.

Зная $L_{\text{я}}$ и $R_{\text{я}}$, можно определить электромагнитную постоянную якорной цепи по формуле (1).

В системе вентильный преобразователь — двигатель постоянного тока выпрямленное напряжение равно:

$$U_d = aU_2 - I_d R_a - \Delta E, \quad (12)$$

где a — коэффициент, пропорциональный выпрямленному напряжению; U_2 — фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора; I_d — выпрямленный ток; R_a — эквивалентное активное сопротивление преобразователя; ΔE — падение напряжения на вентиле.

Сопротивление R_a обусловлено наличием активного и индуктивного сопротивлений трансформатора, что приводит в результате коммутации вентилей к уменьшению среднего значения выпрямленного напряжения и воспринимается внешней цепью как падение напряжения на некотором эквивалентном активном сопротивлении внутри преобразователя.

В табл. 2 приведены формулы для выпрямленного напряжения при различных схемах выпрямления.

Коэффициент при токе I_d определяет эквивалентное сопротивление преобразователя.

Зная мощность и напряжение короткого замыкания по паспортным данным трансформатора, можно определить приведенные к вторичной обмотке активное R_{T2} и индуктивное X_{T2} сопротивления трансформатора:

$$R_{T2} = \frac{P_K}{3I_{1\phi}^2 k^2}; \quad (13)$$

$$X_{T2} = \sqrt{\left(\frac{U_{к.ф}}{I_{1\phi} k^2}\right)^2 - R_{T2}^2} \quad (14)$$

где k — коэффициент трансформации; P_K — мощность короткого замыкания, $вт$; $I_{1\phi}$ — фазный номинальный ток первичной обмотки, $а$; $U_{к.ф}$ — фазное напряжение короткого замыкания, $в*$.

Индуктивность преобразователя можно определить по формуле

$$L_{T2} = \frac{X_{T2}}{\omega_0}, \quad (15)$$

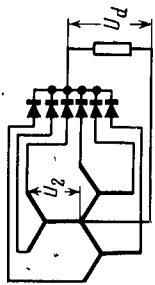
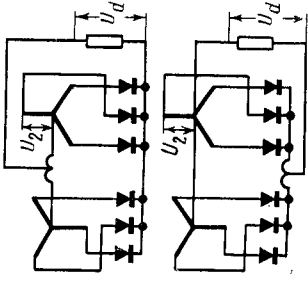
где $\omega_0 = 2\pi f$ — угловая частота питающего напряжения.

Эквивалентное активное сопротивление преобразова-

* Напряжение короткого замыкания U_K , данное в паспорте трансформатора, замеряется на зажимах первичной обмотки трансформатора и дается в процентах от первичного номинального напряжения.

Таблица 2

Название схемы выпрямления	Схема выпрямления	Выпрямленное напряжение
Трехфазная с нулевым выводом		$U_d = 1,17U_2 - I_d \left(\frac{3X_{\Sigma 2}}{2\pi} + R_{\Sigma 2} \right) - \Delta E$ $a = 1,17 \quad R_b = \frac{3X_{\Sigma 2}}{2\pi} + R_{\Sigma 2}$
Трехфазная мостовая (Ларионова)		$U_d = 2,34U_2 - I_d \left(\frac{6X_{\Sigma 2}}{2\pi} + 2R_{\Sigma 2} \right) - 2\Delta E$

Название схемы выпрямления	Схема выпрямления	Выпрямленное напряжение
Шестифазная со сдвоенным зигзагом и с нулевым выводом		$U_d = 1,35U_2 - I_d \left(\frac{6X_{r2}}{2\pi} + R_{r2} \right) - \Delta E$
Трехфазная с уравнительным реактором (Кюблера)		$U_d = 1,17U_2 - I_d \frac{1}{2} \left(\frac{3X_{r2}}{2\pi} + R_{r2} \right) - \Delta E$

теля можно еще определить по формуле

$$R_3 \approx \frac{0,5U_{кa}U_2}{100I_{н}} + R_{т2}.$$

Индуктивность якорной цепи складывается из индуктивности рассеивания трансформатора $L_{т2}$, двигателя $L_{д}$ и сглаживающего реактора $L_{с.р}$:

$$L_{я} = L_{т2} + L_{д} + L_{с.р} *.$$
 (16)

Сопротивление якорной цепи определяется как сумма сопротивлений якоря двигателя, преобразователя, сглаживающего реактора и шин:

$$R_{я} = 1,24_{\text{I}}(R_{а.д} + R_{к.д} + R_{п.д})_{20} \cdot c + R_3 + R_{с.р} + R_{ш}. \quad (17)$$

В табл. 3 приведены технические данные для некоторых типов реакторов, выпускаемых заводом «Урал-электротяжмаш».

Электромеханическая постоянная времени привода зависит от момента инерции двигателя и моментов инерции отдельных движущихся частей механизма, приведенных к валу двигателя. Наиболее часто встречается случай, когда части механизма вращаются со скоростью, определяемой скоростью двигателя и коэффициентом передачи (передаточным числом), а их маховые моменты не зависят от угла поворота.

В этом случае

$$\begin{aligned} GD^2 &= GD_{\text{д}}^2 + GD_1^2 \frac{n_1^2}{n_{\text{д}}^2} + GD_2^2 \frac{n_2^2}{n_{\text{д}}^2} + \dots + GD_{\text{м}}^2 \frac{n_{\text{м}}^2}{n_{\text{д}}^2} = \\ &= GD_{\text{д}}^2 + GD_1^2 \frac{1}{i_1^2} + GD_2^2 \frac{1}{i_2^2} + \dots + GD_{\text{м}}^2 \frac{1}{i_{\text{м}}^2}, \end{aligned} \quad (18)$$

где GD^2 — маховой момент привода, приведенный к валу двигателя; $GD_{\text{д}}^2$ — маховой момент двигателя; $GD_1^2, GD_2^2, \dots, GD_{\text{м}}^2$ — маховые моменты частей механизма; $n_{\text{д}}$ — скорость двигателя; $n_1, n_2, \dots, n_{\text{м}}$ — скорости частей механизма; $i_1, i_2, \dots, i_{\text{м}}$ — передаточные числа между осью вращения двигателя и осями вращения частей механизма.

Очевидно, что для приведенного момента инерции привода существует соотношение, аналогичное соотношению для маховых моментов:

$$J = J_{\text{д}} + J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_2 \frac{1}{i_2^2} + \dots + J_{\text{м}} \frac{1}{i_{\text{м}}^2}. \quad (19)$$

* Для схемы Кюблера $L_{\text{я}} = \frac{L_{т2}}{2} + L_{\text{д}} + L_{с.р}$.

Таблица 3

Тип реактора	Номинальный ток, а	Ток, при котором нормируется индуктивность, а	Индуктивность, мГн	Ток, до которого индуктивность не меняется, а	Индуктивность при номинальном токе, мГн	Активное сопротивление, Ом	Соединение секций обмоток
ФРОС-500	500	200	5	250	3	0,0044	1 секция
ФРОС-1000	1 000	200	2,5	500	1,25	0,0017	
ФРОС-1500	1 500	70	2	600	0,8	0,000935	
ФРОС-2500	2 500	110	1,2	1 000	0,48	0,000596	
ФРОС-4000	4 000	175	0,8	2 000	0,4	0,000256	
ФРОС-6000	6 000	275	0,4	3 900	0,25	0,000153	
АРОС-500	500	200	5	250	3,4	0,0044	
АРОС-1000	1 000	200	2,5	500	1,3	0,0017	
АРОС-1500	1 500	70	2	600	0,85	0,000935	
АРОС-2500	2 500	110	1,2	1 000	0,5	0,00056	
АРОС-4000	4 000	175	0,8	2 000	0,425	0,00025	
АРОС-6000	6 000	275	0,4	3 900	0,28	0,000155	
ФРОС-5600-1	6 000	6 000	0,625	6 000	0,625	0,000225	4 секции параллельно
	3 000	3 000	2,5	3 000	2,5	0,0009	4 секции параллельно последовательно
	1 500	1 500	10	1 500	10	0,0036	4 секции последовательно

Тип реактора	Номинальный ток, а	Ток, при котором нормируется индуктивность, а	Индуктивность, мГн	Ток, до которого индуктивность не меняется, а	Индуктивность при номинальном токе, мГн	Активное сопротивление, Ом	Соединение секций обмоток
ФРОС-5600-2	3 000	3 000	2,5	3 000	2,5	0,00085	4 секции параллельно
	1 500	1 500	10	1 500	10	0,0034	4 секции параллельно-последовательно
	750	750	40	750	40	0,0136	4 секции последовательно
ФРОС-5600-3	6 000	6 000	0,4	9 000	0,4	0,000225	4 секции параллельно
	3 000	3 000	1,6	4 500	1,6	0,0009	4 секции параллельно-последовательно
	1 500	1 500	6,4	2 250	6,4	0,0036	4 секции последовательно
ФРОС-5600-4	4 800	4 800	0,4	12 960	0,4	0,00034	4 секции параллельно
	2 400	2 400	1,6	6 430	1,6	0,00136	4 секции параллельно-последовательно
	1 200	1 200	6,4	3 240	6,4	0,00544	4 секции последовательно

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ ПО ОСЦИЛЛОГРАММЕ ЯКОРНОГО ТОКА

В данном параграфе излагаются способы определения электромагнитной постоянной времени якорной цепи и электромеханической постоянной времени

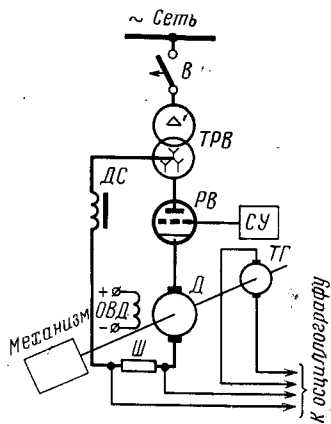


Рис. 1. Схема для определения постоянных времени в системе управляемый выпрямитель—двигатель.

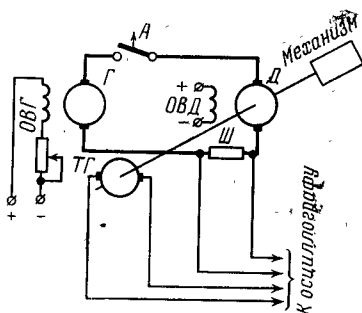


Рис. 2. Схема для определения постоянных времени в системе генератор—двигатель.

электропривода, работающего по системе управляемый выпрямитель—двигатель постоянного тока (рис. 1) или системе генератор постоянного тока—двигатель постоянного тока (рис. 2). Рассматриваемые способы базируются на анализе осциллограммы якорного тока, снятой при разгоге привода после замыкания якорной цепи, и справедливы для линейных систем.

На рис. 3 приведена осциллограмма якорного тока двигателя, снятая при ступенчатом приложении якорного напряжения. Горизонтальная ось, или ось абсцисс, системы координат совмещена с линией, соответствующей статическому току, а начало координат совмещено с точкой начала движения. В полученной таким образом системе координат вертикальное отклонение, или ордината осциллограммы, будет соответствовать значению динамического тока.

1-й способ. Разобьем ось времени на равные интервалы длиной Δt , обозначим через I_1, I_2, I_3 любые три рядом стоящие ординаты осциллограммы, сдвинутые на время Δt . Можно показать (см. приложение 1), что име-

ет место следующая зависимость:

$$\frac{I_3}{I_1} = b \frac{I_2}{I_1} - C, \quad (20)$$

где b и C — постоянные величины, зависящие от параметров схемы и способа разбиения оси абсцисс, при этом:

$$C = e^{-\frac{\Delta t}{2T_3}}; \quad (21)$$

T_3 — электромагнитная постоянная времени якорной цепи привода.

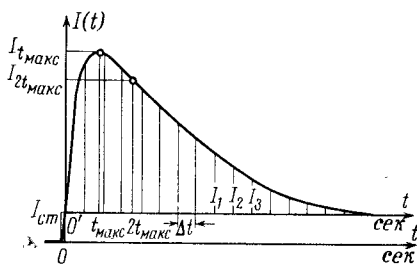


Рис. 3. Осциллограмма якорного тока.

Таким образом, отношение I_3/I_1 связано линейной зависимостью с отношением I_2/I_1 (рис. 4).

Из уравнения (21) следует, что

$$T_3 = -\frac{\Delta t}{2 \ln C}. \quad (22)$$

Рассмотрим соотношение, связывающее электромагнитную постоянную времени $T_{эм}$ с площадью S , ограниченной кривой якорного тока и осью абсцисс:

$$S = \frac{E - R_я I_{ст}}{R_я} T_{эм} = I_к T_{эм}, \quad (23)$$

где E — э. д. с. преобразователя; $I_{ст}$ — статический ток; $R_я$ — сопротивление якорной цепи; $I_к$ — ток короткого замыкания при рассматриваемой э. д. с. преобразователя (см. приложение 2).

Отсюда

$$T_{эм} = \frac{S}{I_к}. \quad (24)$$

Из-за влияния индуктивности якорной цепи и электродвижущей силы двигателя ток якорной цепи во вре-

мя разгона двигателя не успевает достигнуть тока короткого замыкания, поэтому последний должен определяться косвенным путем. Для его определения воспользуемся формулой (25) (см. приложение 3), позволяющей определить ток короткого замыкания по осциллограмме якорного тока:

$$I_K = \frac{I_{t_{\max}}^2}{I_{2t_{\max}}}, \quad (25)$$

где $I_{t_{\max}}$ — максимальное значение тока в момент времени t_{\max} ; $I_{2t_{\max}}$ — значение тока в момент $2t_{\max}$; t_{\max} — время достижения максимального значения тока.

Из изложенного вытекает следующая методика определения постоянных времени. На осциллограмме якорного тока (рис. 3) измеряются ординаты через интервал Δt , затем для каждой тройки соседних ординат подсчитываются отношения I_2/I_1

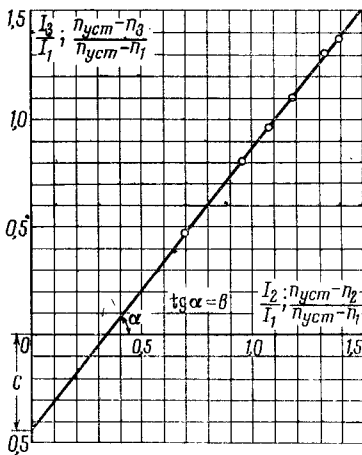


Рис. 4. Зависимости $\frac{I_3}{I_1} = b \frac{I_2}{I_1} - C$

$$- C \text{ и } \frac{n_{уст} - n_3}{n_{уст} - n_1} = b \frac{n_{уст} - n_2}{n_{уст} - n_1} - C.$$

и I_3/I_1 . Точки с координатами I_2/I_1 и I_3/I_1 наносятся на плоскость I_3/I_1 и I_2/I_1 (рис. 4). Через несколько полученных таким образом точек проводится прямая, отсекающая на оси ординат отрезок, равный C . Зная величины C и Δt , по формуле (22) вычисляется величина электромагнитной постоянной времени $T_{\text{э}}$. На основании ранее сделанного разбиения определяется площадь S путем суммирования элементарных площадей, каждую из которых можно представить как трапецию.

По формуле (25) вычисляется величина I_K , и, наконец, из соотношения (24) находится значение электромеханической постоянной времени $T_{\text{эм}}$. Заметим, что формула (24) остается справедливой и в том случае,

когда индуктивность якорной цепи зависит от тока. При этом, однако, применение формулы (25) для определения I_K может привести к существенной ошибке. В этом случае величина тока короткого замыкания I_K для точности расчета должна определяться каким-либо другим методом, например опытом короткого замыкания.

Следует также иметь в виду, что в силу погрешности измерения, а также возможных отклонений анализируемой осциллограммы от идеальной кривой второго порядка расчетные точки I_3/I_1 , I_2/I_1 могут оказаться «разбросанными» вблизи прямой, причем эти отклонения от прямой носят случайный характер, связанный с многообразием причин, приводящих к погрешностям в измерениях.

Последнее обстоятельство заставляет отказаться от попыток найти точные значения b и C , однозначно определяющие прямую линию. Поэтому в этих случаях значения коэффициента b и C следует подбирать так, чтобы точки I_3/I_1 и I_2/I_1 располагались по возможности ближе к прямой так, чтобы среднеквадратичная ошибка была наименьшей. При этом величины коэффициентов b и C могут быть найдены после решения системы двух уравнений с двумя неизвестными:

$$b \sum_{k=1}^m \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 + C \sum_{k=1}^m \frac{I_2}{I_1} = \sum_{k=1}^m \frac{I_2}{I_1} \frac{I_3}{I_1};$$

$$b \sum_{k=1}^m \frac{I_2}{I_1} + Cm = \sum_{k=1}^m \frac{I_3}{I_1},$$

где m — число расчетных точек; I_3/I_1 , I_2/I_1 — расчетные точки; Σ — знак суммирования.

2-й способ. Перейдем к рассмотрению способа определения постоянных времени по осциллограмме якорного тока, основанного на следующих соображениях:

в процессе разгона привода динамическая составляющая якорного тока меняется по закону

$$I_d = \frac{(U - R_K I_{CT}) T_1 T_2}{L_K (T_1 - T_2)} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \quad (26)$$

$$\text{где } \frac{1}{T_1} = \frac{1}{2T_0} - \sqrt{\frac{1}{4T_0^2} - \frac{1}{T_0 T_{\text{эм}}}};$$

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{2T_0} + \sqrt{\frac{1}{4T_0^2} - \frac{1}{T_0 T_{\text{эм}}}}.$$

Из формулы (26) следует, что при T_1 , большем T_2 , и достаточно больших временах составляющая $e^{-\frac{t}{T_1}}$ практически затухает и процесс будет определяться составляющей $e^{-\frac{t}{T_2}}$.

Перестроим осциллограмму динамической составляющей в полулогарифмическом масштабе (рис. 5), где ток откладывается в логарифмическом масштабе по оси ординат, а ось времени остается в линейном масштабе.

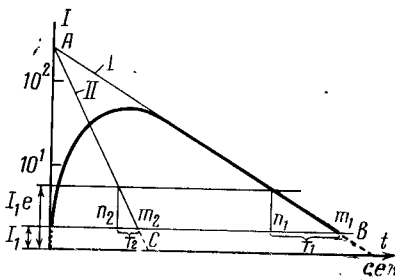


Рис. 5. Осциллограмма якорного тока в полулогарифмическом масштабе.

Тогда при достаточно больших временах график процесса будет изображаться прямой линией, тангенс наклона которой будет определяться величиной T_1 и равен $\lg e/T_1$. Продолжим прямолинейную часть осциллограммы до пересечения с осью ординат. Результатом вычитания соответствующих ординат прямой I и осциллограммы будет прямая линия, тангенс наклона которой будет определяться постоянной T_2 и равен $\lg e/T_2$.

Для нахождения величин T_1 и T_2 проведем две вспомогательные горизонтали через точки I_1 и I_1e . Выбор точки I_1 произволен. Тогда отрезки m_1n_1 и m_2n_2 равны соответственно T_1 и T_2 .

По величинам T_1 и T_2 определяются величины T_3 и $T_{эм}$ по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} &= T_3; \\ T_1 + T_2 &= T_{эм}. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Рассмотренный способ дает хороший результат, если $T_{эм}$ превышает $4T_3$; если же $T_{эм}$ меньше $4T_3$, то процесс носит колебательный характер и перестроенная осциллограмма не имеет прямолинейного участка.

3-й способ. Рассмотрим 3-й способ, также основанный на анализе осциллограммы якорного тока. Для характерных точек осциллограммы якорного тока (рис. 3), а именно моментов времени t_{\max} , $2t_{\max}$ и значений орди-

нат $I_{t_{\max}}$ и $I_{2t_{\max}}$ справедливы следующие соотношения:

$$\frac{t_{\max}}{T_{\text{э}}} = \frac{1}{p_1 - p_2} \ln \frac{p_2}{p_1}; \quad (28)$$

$$\frac{I_{2t_{\max}}}{I_{t_{\max}}} = \frac{1}{p_1 - p_2} \left(e^{\frac{p_1}{p_1 - p_2} \ln \frac{p_2}{p_1}} - e^{\frac{p_2}{p_1 - p_2} \ln \frac{p_2}{p_1}} \right), \quad (29)$$

где $p_{1,2} = -\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k}}$; $k = \frac{T_{\text{эм}}}{T_{\text{э}}}$.

По аналитическим формулам (28) и (29) построены график зависимости $I_{t_{\max}}/I_K$ в функции отношения $T_{\text{эм}}/T_{\text{э}}$ (рис. 6) и график $t_{\max}/T_{\text{э}}$ также в функции отно-

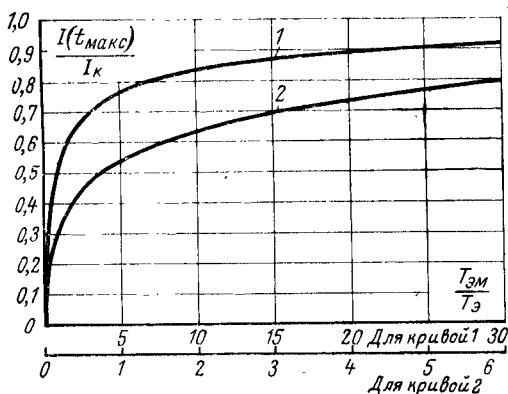


Рис. 6. График зависимости $I_{t_{\max}}/I_K$ от $T_{\text{эм}}/T_{\text{э}}$.

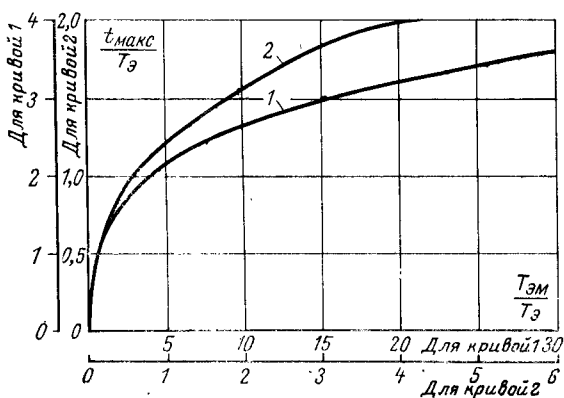


Рис. 7. График зависимости $t_{\max}/T_{\text{э}}$ от $T_{\text{эм}}/T_{\text{э}}$.

шения $T_{эм}/T_{э}$ (рис. 7). Для удобства пользования графиками начальные участки кривых даны в укрупненном масштабе.

Из изложенного вытекает методика определения постоянных времени. Определяется величина I_K по формуле (25). На графике рис. 6 по величине отношения $I_{t_{макс}}/I_K$ определяется величина $T_{эм}/T_{э}$. Затем по графику рис. 7 определяется величина $t_{макс}/T_{э}$. И, наконец, по найденным отношениям $T_{эм}/T_{э}$ и $t_{макс}/T_{э}$ и величине $t_{макс}$ находятся значения $T_{эм}$ и $T_{э}$.

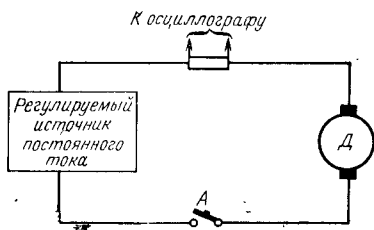


Рис. 8. Схема опыта при закорачивании якорной цепи двигателя.

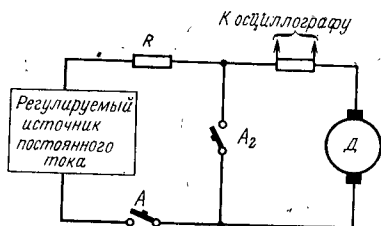


Рис. 9. Схема опыта при подключении двигателя к источнику напряжения.

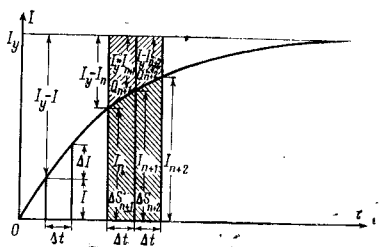


Рис. 10. Осциллограмма якорного тока при отсутствии возбуждения.

Вся осциллограмма (рис. 10) разбивается на элементарные трапеции, и для каждой трапеции определяются величины I , Δt , ΔI .

4-й способ. Остановимся еще на одном способе определения электромагнитной постоянной времени. Для этого необходимо иметь осциллограмму якорного тока, снятую на неподвижной машине при подключении цепи якоря к источнику напряжения или при замыкании накоротко обмотки якоря, по которой до замыкания проходил постоянный ток (рис. 8). Обычно используется способ подключения к источнику напряжения, поскольку в расчетах систем регулирования учитывается электромагнитная постоянная всей якорной цепи, а не только якоря двигателя (рис. 9). Цепь возбуждения разомкнута.

По формуле (30) определяются величины T_0 при разных значениях якорного тока:

$$T_0 \approx \frac{(I_y - I) \Delta t}{\Delta I}. \quad (30)$$

Этот способ приемлем для системы генератор — двигатель, где кривая якорного тока достаточно гладкая. Для систем управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока определить T_0 более точно можно на основании следующих формул:

$$T_0 \approx \frac{(\Delta S_{n+2} - \Delta S_{n+1})}{2I_{n+1} - (I_{n+2} + I_n)}; \quad (31)$$

$$T_0 \approx \frac{\Delta Q_{n+1}}{(I_y - I_n) - (I_y - I_{n+1})} = \frac{\Delta Q_{n+1}}{I_{n+1} - I_n}, \quad (32)$$

где I_n, I_{n+1}, I_{n+2} — соседние ординаты; $\Delta S_{n+1}, \Delta S_{n+2}, \Delta Q_{n+1}$ — элементарные площади (см. рис. 10).

Найденные значения T_0 на разных участках осциллограммы позволяют определить зависимость электромагнитной постоянной времени от якорного тока. В том случае, если индуктивность якорной цепи меняется, формула (32) может быть упрощена:

$$T_0 = \frac{\Sigma \Delta Q_n}{I_y}, \quad (33)$$

где $\Sigma \Delta Q_n$ — сумма элементарных площадей.

Как и ранее, элементарные площади могут быть определены по правилу трапеции или прямоугольника, причем чем меньше интервал разбиения, тем выше точность.

Обычно разбиение осциллограммы в пределах от 0 до $0,98 I_{уст}$ ($I_{уст}$ — установившееся значение тока) на 15 участков оказывается достаточным для практических целей.

В установках управляемый преобразователь — двигатель постоянного тока индуктивность часто существенно зависит от якорного тока. В этом случае осциллографирование целесообразно проводить при небольших последовательных ступенчатых приращениях управляющего сигнала. На каждом участке можно считать величину индуктивности постоянной; для определения электромагнитной постоянной времени можно воспользоваться соотношениями характерных точек: времени $t = T_0$ соответствует ток $I = 0,63 I_{уст}$, времени $t = 2T_0$ — ток $0,86 I_{уст}$, $t = 3 T_0$ — ток $0,95 I_{уст}$.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ ПО ОСЦИЛЛОГРАММЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

Излагаемые в данном параграфе способы определения динамических параметров якорной цепи базируются на анализе осциллограммы скорости вращения, снятой при скачкообразном приложении якорного напряжения к цепи двигателя постоянного тока.

1-й способ. Электромеханическая постоянная якорной цепи $T_{эм}$ определяется по площади S , ограниченной кривой скорости и линией $n_{уст}$ (рис. 11, приложение 4):

$$T_{эм} = \frac{S}{n_{уст}} = \frac{\sum_{j=1}^k \Delta S_j}{n_{уст}}. \quad (34)$$

Соотношение (34) остается справедливым и в том случае, когда индуктивность якорной цепи зависит от якорного тока или тока возбуждения. Для системы управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока холостого хода двигателя должен быть непрерывным. При использовании формулы (34) достаточно располагать только масштабом времени.

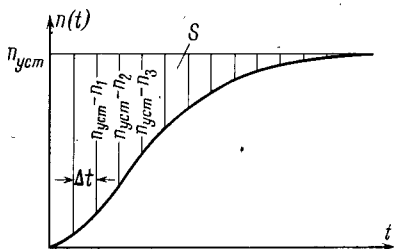


Рис. 11. Осциллограмма скорости вращения двигателя.

Для определения электромагнитной постоянной времени $T_э$ ось времени разбивается на равные интервалы длиной Δt , для каждой тройки соседних ординат n_1, n_2, n_3 определяются величины

$$\frac{n_{уст} - n_3}{n_{уст} - n_1}; \quad \frac{n_{уст} - n_2}{n_{уст} - n_1}.$$

Точки с координатами $\frac{n_{уст} - n_3}{n_{уст} - n_1}$ и $\frac{n_{уст} - n_2}{n_{уст} - n_1}$ наносятся на плоскость. Через несколько полученных таким образом то-

чек проводится прямая (рис. 4), уравнение которой будет

$$\frac{n_{уст} - n_3}{n_{уст} - n_1} = b \frac{n_{уст} - n_2}{n_{уст} - n_1} - C. \quad (35)$$

Из графика определяется величина C , и далее по формуле находится T_3 :

$$T_3 = - \frac{\Delta t}{\ln C}. \quad (36)$$

При монотонном характере переходного процесса прямую приходится строить по точкам, которые располагаются в относительно узкой области, поэтому точность определения T_3 может быть в этом случае недостаточной.

2-й способ. Ранее было показано, что в качестве динамических параметров якорной цепи могут рассматриваться величины ω_n — угловая частота недемпфированных колебаний скорости двигателя — и ξ — относительный коэффициент затухания колебаний, однозначно связанные с величинами $T_{эм}$ и T_3 по формулам (7), (8).

Вся область изменения ξ может быть разбита на три интервала: $0 < \xi < 0,5$; $0,5 < \xi < 2$; $\xi > 2$. В первом интервале изменения ξ ($\xi < 0,5$) осциллограмма скорости является резко колебательной; по величине перерегулирования может быть определена величина ξ на основании графика, приведенного на рис. 12. Угловая частота колебаний ω_n определяется по формуле (см. приложение 5):

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T \sqrt{1 - \xi^2}}, \quad (37)$$

где T — период колебаний.

Теоретически такое определение динамических параметров ω_n , ξ возможно для интервала $0 < \xi < 1$, однако

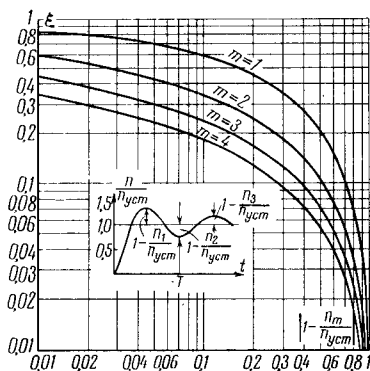


Рис. 12. Семейство кривых $\xi = \varphi \left(1 - \frac{n_m}{n_{уст}} \right)$.

его рекомендуется применять при $\xi < 0,5$, так как при $\xi > 0,5$ отношение $1 - \frac{n_{\text{макс}}}{n_{\text{уст}}}$ не может быть измерено с достаточной точностью.

Если коэффициент затухания ξ изменяется в пределах от 0,5 до 2 (рис. 13), то для определения величин ω_n и ξ можно воспользоваться семейством графиков, представленных на рис. 14.

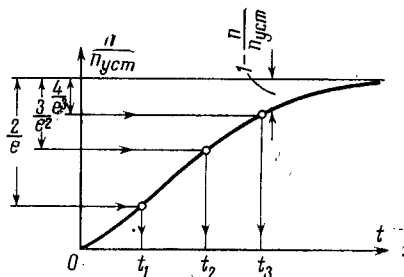


Рис. 13. Осциллограмма скорости вращения двигателя при $0,5 < \xi < 2$.

Для этой осциллограммы скорости (рис. 13) находятся величины t_1 , t_2 , t_3 , соответствующие точкам, для которых отношение $1 - \frac{n}{n_{\text{уст}}}$ равно $2/e$, $3/e^2$, $4/e^3$ ($e = 2,72$). Зная t_1 , t_2 , t_3 , по кривым t_3/t_1 , t_2/t_1 , $\frac{t_3 - t_2}{t_2 - t_1}$ (рис. 14) находятся

значения ξ . Определив ξ и зная t_1 , t_2 , t_3 , по кривым $\omega_n t_1$, $\omega_n t_2$, $\omega_n t_3$ того же рис. 14 находятся значения ω_n . Для определения величин ω_n и ξ достаточно двух кривых, например $t_2/t_1 = \varphi_1(\xi)$ и $\omega_n t_1 = \varphi_4(\xi)$. Использование же для этой цели шести кривых дает возможность контролировать определяемые величины ω_n и ξ .

Теоретически приведенное определение параметров ω_n и ξ возможно во всей области изменения ξ от нуля до бесконечности, однако в области $\xi < 0,5$ более точен способ, изложенный выше, а при $\xi > 2$ кривые, построенные на рис. 14, обладают малым наклоном и определение вышеуказанных параметров практически невозможно.

В тех случаях, когда $\xi > 2$, электромеханическая постоянная времени по меньшей мере в 16 раз больше электромагнитной и определение T_3 из осциллограммы

скорости связано с большой погрешностью. По этой причине интервал $\xi > 2$ не рассматривается.

Применяя второй способ, следует иметь в виду, что он дает приемлемую для практики точность, если индуктивность якорной цепи не насыщается при изменении якорного тока. В тех случаях, когда индуктивность насыщается, скачки якорного напряжения должны быть так малы, чтобы бросок якорного тока не менял суще-

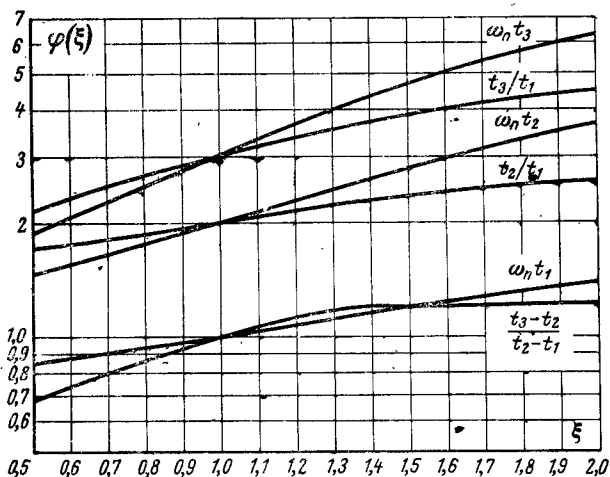


Рис. 14. Семейство кривых для определения ω_n и ξ .

ственно величину индуктивности цепи. Для системы управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока ток холостого хода должен быть непрерывным.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ ПО ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

Динамические параметры якорной цепи могут быть определены, если известны частотные характеристики якорной цепи электродвигателя при неизменном потоке возбуждения. Под частотными характеристиками якорной цепи понимаются амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики.

Амплитудно-частотная характеристика M показывает изменение амплитуды колебаний скорости вращения при изменении заданной частоты колебаний.

Фазо-частотная характеристика φ показывает фазовый сдвиг скорости вращения относительно управляющего сигнала. Величины M и φ связаны с величинами ω_n и ξ следующими соотношениями:

$$\omega_n = \frac{\omega}{\sqrt{1 - \frac{\cos \varphi}{M}}}; \quad (38)$$

$$\xi = \frac{-\sin \varphi}{2 \sqrt{M^2 - M \cos \varphi}}. \quad (39)$$

При $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ из формул (38) и (39) следует, что

$$\xi = \frac{1}{2M} \text{ и } \omega = \omega_n. \quad (40)$$

Теоретически значения ω_n и ξ могут быть определены на основании величины M и φ , соответствующих

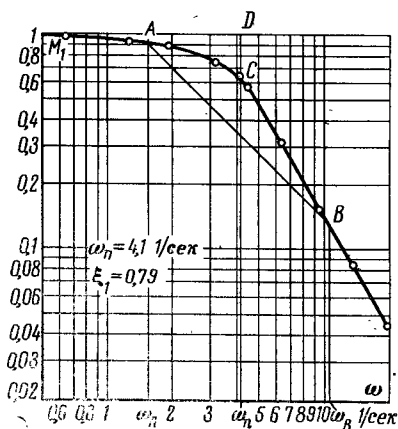


Рис. 15. Амплитудно-частотная характеристика скорости двигателя в логарифмическом масштабе.

одной частоте; однако для большей достоверности ω_n и ξ следует определять на основании измерений при нескольких частотах. В практике вызывает затруднение снятие фазовой характеристики $\varphi(\omega)$, поэтому в силу однозначной зависимости между фазовой и амплитудной характеристиками определение величин ω_n и ξ может быть выполнено только по амплитудно-частотной характеристике M .

Представим амплитудно-частотную характеристику в логарифмическом

фирующая частота ω_n находится делением пополам отрезка $AB = \log \omega_2 - \log \omega_1$.

Выбор различных точек A и B должен привести к одному и тому же результату, в противном случае рассматриваемую систему нельзя считать линейной системой второго порядка.

Коэффициент демпфирования определяется по вертикальному расстоянию CD . Отрезок считается положительным, если точка C располагается ниже точки D :

$$CD = \log 2\xi. \quad (41)$$

Отсюда находится величина ξ .

Рассмотрим пример.

На рис. 16 приведена схема для снятия амплитудно-частотной характеристики двигателя. На вход полуволновой системы сетевого управления $СУ$ ртутного выпрямителя $РВ$ подается синусоидальный сигнал от генератора частоты $ГЧ$. Известно, что полуволновая система сетевого управления в рассматриваемой области частот может быть представлена в виде звена чистого запаздывания. Следовательно, при неизменной амплитуде входного сигнала амплитуда колебаний анодного напряжения не будет меняться в исследуемом диапазоне частот. Это создает удобство для снятия частотной характеристики двигателя, так как необходимо измерять только амплитуду колебаний скорости двигателя; амплитуда колебаний напряжения соответствует амплитуде колебаний задающего сигнала.

Испытуемая схема неререверсивна, с малым статическим моментом, поэтому в схему добавлено сопротивление $R_{ш}$, необходимое для исключения режима прерывистого тока ртутного выпрямителя. Величина $R_{ш}$ может быть подобрана достаточно большой так, чтобы величины ω и ξ изменялись незначительно.

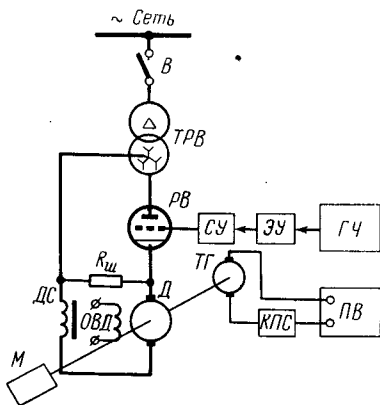


Рис. 16. Схема для снятия амплитудно-частотной характеристики.

$Д$ — двигатель ПН-205; $РВ$ — ртутный выпрямитель РВМ-250×6; $М$ — механизм; $ТГ$ — тахогенератор ПН-10; $ДС$ — дроссель сглаживающий; $СУ$ — полуволновая система сетевого управления; $ЭУ$ — электронный усилитель ЭУ-1; $ГЧ$ — генератор частоты НГПК-1; $КПС$ — компенсатор постоянной составляющей КВ-3; $ПВ$ — пиковый вольтметр ДПВ-3М.

На рис. 15 представлена амплитудно-частотная характеристика двигателя, питающегося по схеме рис. 16. Описанным выше методом определены параметры $\omega_n = 4,1$ 1/сек и $\xi = 0,79$. Величина ξ для схемы без шунтирующего сопротивления будет равна 0,81. Заметим, что параметры ω_n и ξ определены с учетом схемы питания двигателя и маховых масс механизма.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ПРИВОДА, ИНДУКТИВНОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ

Следуя традиционным курсам электропривода в качестве динамических параметров в данном параграфе рассматриваются следующие величины: сопротивление двигателя R_d , сопротивление генератора R_g , индуктивность якоря двигателя L_d , индуктивность якоря генератора L_g , маховой момент привода GD^2 . Эти параметры в свою очередь определяют электромагнитную и электромеханическую постоянные времени, способы определения которых были рассмотрены в предыдущих параграфах.

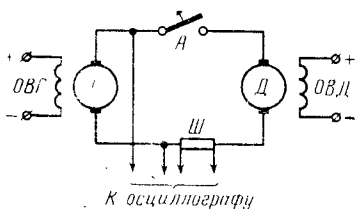
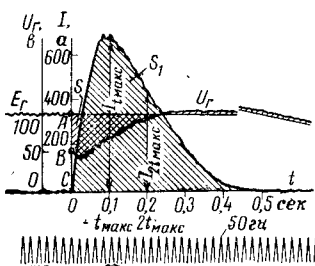


Рис. 17. Осциллограмма якорного тока и напряжения генератора при замыкании автомата А.

Изложение будет проводиться применительно к системе генератор — двигатель. Дополнительные особенности определения динамических параметров в системе управляемый выпрямитель — двигатель будут рассмотрены ниже.

Предполагается, что электромагнитная и электромеханическая постоянные времени привода известны. Для определения вышеуказанных параметров необходимо иметь осциллограммы якорного тока и напряжения на

генераторе после замыкания якорной цепи системы генератор — двигатель (рис. 17).

Суммарное сопротивление якорной цепи может быть определено на основании соотношения

$$R_{\text{я}} = R_{\text{г}} + R_{\text{д}} = \frac{E_{\text{г}}}{I_{\text{к}}}, \quad (42)$$

где $E_{\text{г}}$ — э. д. с. генератора, установленная до замыкания якорной цепи привода; $I_{\text{к}}$ — ток короткого замыкания, определяемый по формуле (25); $R_{\text{я}}$ — суммарное сопротивление якорной цепи; $R_{\text{г}}$ — сопротивление генератора; $R_{\text{д}}$ — сопротивление двигателя.

По формулам (42) и (25) может быть вычислено суммарное сопротивление якорной цепи $R_{\text{я}}$.

Из выражения для электромагнитной постоянной времени определяется суммарное значение индуктивности якорной цепи:

$$L_{\text{я}} = L_{\text{г}} + L_{\text{д}} = T_{\text{э}} (R_{\text{г}} + R_{\text{д}}), \quad (43)$$

где $L_{\text{я}}$ — суммарная индуктивность якорной цепи; $L_{\text{г}}$ — индуктивность генератора; $L_{\text{д}}$ — индуктивность двигателя.

Для отдельного определения индуктивности генератора и двигателя обратимся к осциллограмме напряжения на зажимах генератора.

В момент замыкания коммутационного аппарата (рис. 17) по якорной цепи ток не проходит, и, следовательно, в этот момент времени электродвижущая сила генератора уравновешивается электродвижущей силой самоиндукции, наводимой в индуктивностях двигателя и генератора. Так как эти электродвижущие силы вызваны изменением одного и того же якорного тока, то величины этих электродвижущих сил будут пропорциональны соответствующим величинам индуктивностей.

Поэтому в момент замыкания якорной цепи справедливы равенства:

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{г}} &= U_{\text{г}} + L_{\text{г}} \frac{dI}{dt} (0); \\ U_{\text{г}} &= L_{\text{д}} \frac{dI}{dt} (0), \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

где $U_{\text{г}}$ — напряжение на зажимах генератора после замыкания коммутационного аппарата.

Обращаясь к осциллограмме якорного напряжения (рис. 17), можно заметить, что отношение отрезков AB и BC пропорционально отношению индуктивностей генератора и двигателя, т. е.

$$\frac{AB}{BC} = \frac{L_r}{L_d} = k. \quad (45)$$

Из формул (43), (44), (45) следует, что

$$\left. \begin{aligned} L_d &= T_a \frac{R_r + R_d}{k + 1}; \\ L_r &= kL_d. \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

Для разделения сопротивлений якорной цепи воспользуемся следующей закономерностью: так как начальное и конечное значения якорного тока при проведении опыта равны нулю, то отношение площади S между прямой E_r и кривой $U_r(t)$ к площади якорного тока S_1 с учетом фактических масштабов измеряемых величин будет равно сопротивлению якорной цепи генератора (см. приложение 6). Отсюда

$$R_r = \frac{S}{S_1}. \quad (47)$$

Для приближенного определения величин S и S_1 рассматриваемые площади разбиваются на прямоугольники или трапеции, площади которых определяются по известным из геометрии формулам. Затем эти элементарные площади с учетом фактических масштабов измеряемых величин суммируются.

Зная суммарное сопротивление якорной цепи и сопротивление якоря генератора, вычисленные по формулам (42) и (47), можно по формуле (48) вычислить сопротивление якоря двигателя:

$$R_d = R_a - R_r. \quad (48)$$

Для контроля полученных величин R_d и R_r можно воспользоваться соотношениями, имеющими место в момент, когда якорный ток достигает максимального значения. Так как в этот момент электродвижущая сила самоиндукции равна нулю, то напряжение на генераторе будет отличаться от ее электродвижущей силы на величину падения напряжения в якорной обмотке ге-

нератора. Отсюда следует, что

$$R_r = \frac{E_r - U_r(t_{\text{макс}})}{I(t_{\text{макс}})}. \quad (49)$$

Изложенная методика позволяет оценить изменение индуктивности якорной цепи при работе на разных участках кривой намагничивания генератора и двигателя. Для оценки ее изменения опыт замыкания якорной цепи проводится при разных токах возбуждения. По изменению величины k [см. формулу (45)] можно судить о величине изменения индуктивности.

Принцип разделения индуктивности по формуле (45) может быть использован также для определения индуктивности компенсационной обмотки $КО$ и обмотки добавочных полюсов $ДП$, когда известна суммарная индуктивность якорной цепи. В этом случае осциллографируется напряжение на обмотках $ДП$ и $КО$ и по величине скачка напряжения в первый момент времени определяется индуктивность обмоток.

Изложенный в данном параграфе способ остается в силе и в том случае, когда привод нагружен статическим моментом холостого хода. При этом следует учитывать только динамическую составляющую якорного тока, а начало отсчета времени следует отнести к моменту трогания привода, т. е. к тому моменту времени, когда ток двигателя станет равным статическому току.

Если целью эксперимента является определение только величин сопротивлений R_d и R_r , то последние могут быть определены способом амперметра и вольтметра при снятом возбуждении двигателя:

$$R_d = \frac{U_d - \Delta U_{щ}}{I_d}; \quad (50)$$

$$R_r = \frac{E_r - U_d - \Delta U_{щ}}{I_d}, \quad (51)$$

где E_r — напряжение генератора до замыкания якорной цепи; U_d — напряжение на якоре двигателя; I_d — ток двигателя; $\Delta U_{щ}$ — падение напряжения на щетках одного якоря.

Обычно $\Delta U_{щ} = 2$ в.

При экспериментальном определении параметров в системе управляемый выпрямитель — двигатель необходимо следить, чтобы ток холостого хода на устано-

вившейся скорости при данном угле регулирования был непрерывный.

Только в этом случае суммарное сопротивление якорной цепи может быть определено по формуле (42), причем величина E_r в данном опыте будет равна показанию вольтметра в конце разгона привода. Падением напряжения в преобразователе, вызванным током холостого хода, можно пренебречь без существенной ошибки в определении E_r .

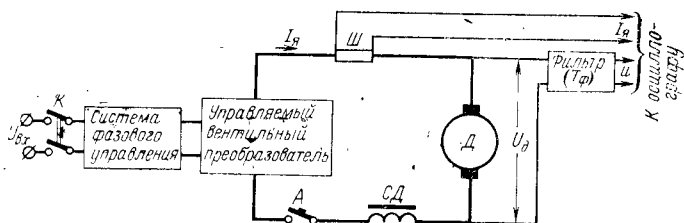


Рис. 18. Схема для определения электромагнитной постоянной времени якоря двигателя.

В том случае, если ток холостого хода является прерывистым, установившееся показание вольтметра будет превышать то фактическое значение средней величины напряжения преобразователя, при котором происходил процесс разгона.

Остановимся на вопросе отдельного определения индуктивности якоря двигателя, индуктивности сглаживающего дросселя и преобразователя в системе управляемый преобразователь — двигатель постоянного тока. Суммарная индуктивность якорной цепи может быть определена по способу, изложенному в данном параграфе для системы генератор — двигатель, но так как кривая напряжения содержит переменную составляющую, то по результатам непосредственного осциллографирования на участке, содержащем индуктивность, нельзя судить о ее величине, как это делалось в системе генератор — двигатель постоянного тока при разделении индуктивностей. В этом случае можно рекомендовать следующий способ. На неподвижный двигатель, с которого снято возбуждение, подается скачком напряжение. Осциллографируются ток и напряжение на якоре двигателя через фильтр с постоянной времени T_ϕ (рис. 18). Величина постоянной времени фильтра T_ϕ подбирается

такой величины, при которой пульсирующая составляющая напряжения практически отсутствует. Масштабы при осциллографировании подбираются (или кривые потом перестраиваются) так, чтобы установившиеся значения напряжения и тока совпадали (рис. 19). Определяется величина омического сопротивления якоря двигателя по формуле

$$R_d = \frac{U_{д.уст} - \Delta U_{щ}}{I_{я.уст}}, \quad (52)$$

где R_d — сопротивление якоря двигателя; $\Delta U_{щ}$ — падение напряжения в щетках, равное 2 в; $U_{д.уст}$, $I_{я.уст}$ — установившиеся значения якорного напряжения и тока якоря.

Справедливо следующее соотношение, позволяющее определить постоянную времени якоря двигателя:

$$T_d = \frac{L_d}{R_d} = \frac{kT_\Phi}{k_1 R_d}, \quad (53)$$

где L_d , R_d — индуктивность и омическое сопротивление собственно якоря; T_Φ — постоянная времени фильтра в цепи шлейфа напряжения при осциллографировании; k — тангенс угла наклона кривой напряжения при $t=0$; k_1 — тангенс угла наклона кривой якорного тока при $t=0$.

Для контроля правильности определения величины T_d по формуле (53) можно воспользоваться следующей интегральной оценкой (см. приложение 7):

$$T_d = T_\Phi + \frac{S}{U_{д.уст}}, \quad (54)$$

где S — площадь, заключенная между кривой напряжения и тока, в · сек;

$U_{д.уст}$ — установившееся значение якорного напряжения.

После определения величины T_d не представляет труда определить величину L_d :

$$L_d = T_d R_d. \quad (55)$$

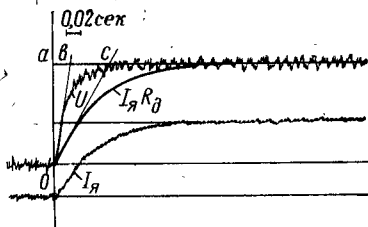


Рис. 19. Осциллограмма якорного напряжения и тока в схеме управляемый преобразователь — двигатель.

Двигатель типа 2МП-8 500-250. $U_d = 6$ в;

$I_{я} = 1.5$ ка; $R_d = \frac{6 - 2}{1500} = 0,0026$ ом;

$\frac{k}{k_1 R_d} = \frac{ac}{ab} = 4.4$; $T_d = 4.4$; $T_\Phi = 4.4 \cdot 0.01 = 0,044$ сек; $L_d = T_d R_d = 0,044 \cdot 0,0026 \cdot 10^3 = 0.115$ мГн.

Аналогично определяются параметры дросселя. При необходимости могут быть определены также параметры компенсационной обмотки и собственно якоря двигателя.

Перейдем к определению махового момента привода. Из формулы определения электромеханической постоянной времени следует, что

$$GD^2 = \frac{T_{эм} 375 (c_e \Phi)^2}{1,03 (R_r + R_d)}, \quad (56)$$

где c_e — конструктивная постоянная двигателя; Φ — магнитный поток.

Величина $c_e \Phi$ может быть определена также опытным путем. При выходе на установившуюся скорость измеряется тахометром скорость вращения двигателя; если известно напряжение на генераторе, можно определить постоянную двигателя $c_e \Phi$:

$$c_e \Phi = \frac{E_r}{n_{x,x}}, \quad (57)$$

где $n_{x,x}$ — установившееся значение скорости привода при холостом ходе.

В формулу (56) подставляется значение $T_{эм}$, определенное опытным путем при том же значении магнитного потока, при котором определяется постоянная времени $c_e \Phi$.

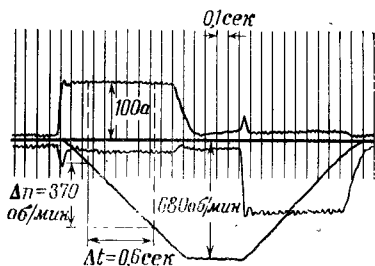


Рис. 20. Осциллограмма тока и скорости при разгоне двигателя в системе подчиненного регулирования.

Рассмотрим еще один способ определения махового момента GD^2 . В последнее время получают распространение системы подчиненного регулирования, позволяющие легко формировать динамический ток постоянной величины. Из осциллограммы скорости (рис. 20), снятой при разгоне привода может быть определ-

лен маховой момент. Действительно, на осциллограмме скорости может быть указан такой участок, где скорость

изменяется по линейному закону. Тогда

$$\frac{GD^2}{375c_m\Phi} \frac{n_2 - n_1}{t_2 - t_1} = I_{\text{дин}}. \quad (58)$$

Отсюда

$$GD^2 = \frac{I_{\text{дин}} \Delta t 375c_m\Phi}{1,03 \Delta n}, \quad (59)$$

где $\Delta n = n_2 - n_1$; $I_{\text{дин}}$ — динамический ток, определяемый по осциллограмме; $c_m\Phi$ — постоянная двигателя.

Индуктивность участка якорной цепи может быть также определена путем измерения активного и полного сопротивлений на переменном токе промышленной частоты 50 гц [Л. 2]. При этом участок якорной цепи подключается к источнику переменного напряжения 50 гц достаточной мощности и проводится измерение потребляемой активной мощности, напряжения и тока. По результатам измерения определяется индуктивность обмотки по формуле

$$L = \frac{\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2}}{2\pi f}, \quad (60)$$

где U , I — действующее значение напряжения и тока; f — частота; P — активная мощность.

Обычно активная составляющая падения напряжения намного меньше индуктивной составляющей.

В силу этого величиной активной составляющей можно пренебречь и тогда формула (60) упрощается:

$$L = \frac{U}{I2\pi f}.$$

Желательно опыт выполнять при разных величинах тока возбуждения машины постоянного тока, изменяя его величины от нуля до номинального значения. При этом можно

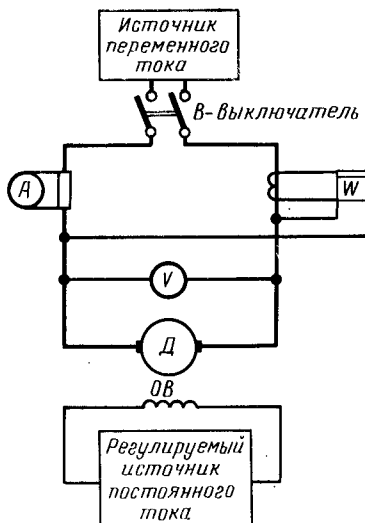


Рис. 21. Схема для определения индуктивности на переменном токе.

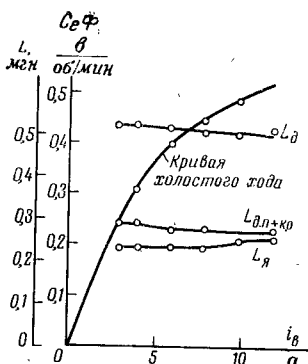


Рис. 22. Изменение индуктивности якорной цепи от насыщения (генератор П141-6К).

ми полюсами и компенсационной обмоткой собственно машины и коэффициент пропорциональности в формуле Уманского — Линвилла (10).

Экспериментально определенная величина коэффициента γ формулы Уманского — Линвилла варьируется в пределах от 0,15 до 0,265.

На рис. 22 и 23 приведены графики изменения величины индуктивности двух машин П141-6К и П142-4К в функции тока возбуждения. Из графиков видна малая

определить зависимость индуктивности якорной цепи от насыщения магнитной системы. Обычно индуктивность собственно якоря меняется на 20—30%, уменьшаясь с ростом возбуждения. Схема опыта показана на рис. 21. В табл. 4 приводятся результаты эксперимента по опытному определению индуктивности якорной цепи некоторых компенсированных машин постоянного тока средней мощности; определялись распределение индуктивности между якорем, дополнительными

Тип машины	Паспортные данные				
	P , квт	n , об/мин	$U_{н}$, в	$I_{н}$, а	$2p$
П131-8К генератор	200	1 000	230	870	4
П141-6К генератор	300	1 000	460	652	4
П142-4К двигатель	195	300/1 500	440	318/322	4
П142-6К двигатель	160	400/1 500	220	815/821	4
П152-8К генератор	750	1 000	660	1 138	6
П151-8К генератор	600	1 000	460	1 300	6

зависимость индуктивности якорной цепи машин от насыщения магнитной системы. Вместе с тем на величину индуктивности и распределение этой индуктивности между якорем и соответственно дополнительными полюсами и компенсационной обмоткой существенное влияние оказывает степень компенсации поперечной реакции якоря.

При значительной перекompенсации индуктивность якорной обмотки может достигать нулевого значения и даже быть отрицательной. В этом случае вся индуктивность практически сосредоточена в компенсационной обмотке. Физическая сторона процесса при этом состоит в том, что коэффициент взаимной индукции между компенсационной и якорной обмотками больше, чем собственная индуктивность якорной обмотки. Это явление иллюстрировано на графиках изменения индуктивности якоря двух генераторов П151-8К и П152-8К (рис. 24). Хотя общая индуктивность якорной цепи этих машин не меняется с изменением насыщения, тем не менее

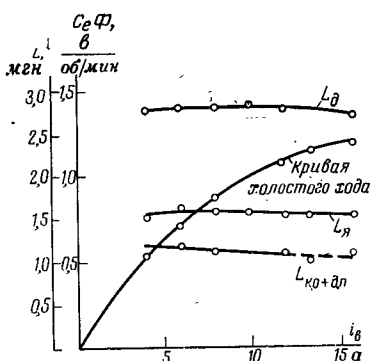


Рис. 23. Изменение индуктивности якорной цепи от насыщения (двигатель П142-4К).

Таблица 4

Степень компенсации θ_k , %	Мера индуктивности $B = \frac{U_n \cdot 30 \cdot 10^3}{I_n r_n \cdot \pi}$, мгн	Усредненные опытные данные индуктивностей			Коэффициент пропорциональности в формуле Уманского—Линвилла $\gamma = \frac{L}{B}$
		якорной цепи $L_{я}$, мгн	якоря $L_{я}$, мгн	дополнительного полюса и компенсационной обмотки $L_{д.п.} + L_{к.о.}$, мгн	
101	1,265	0,311	0,101	0,21	0,245
95,7	3,38	0,51	0,237	0,272	0,15
97,5	22	2,76	1,56	1,203	0,126
102,2	3,2	0,53	0,096	0,435	0,165
106	1,86	0,3	0,045	0,26	0,162
106	1,13	0,3	0	0,3	0,265

индуктивность собственно якоря меняется значительно, оставаясь на порядок меньше индуктивности компенсационной обмотки и дополнительных полюсов. Заметим, что характер распределения индуктивности между яко-

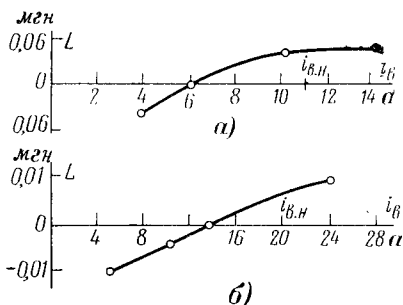


Рис. 24. Зависимость индуктивности якоря от насыщения.

a — генератор П151-8К; *б* — генератор П152-8К.

рем, компенсационной обмоткой и дополнительными полюсами приходится учитывать при проектировании и наладке систем регулирования.

7. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЦЕПИ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

При рассмотрении переходных процессов в цепи возбуждения машин постоянного тока обычно ис-

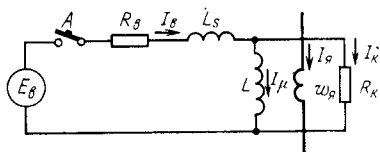


Рис. 25. Схема замещения цепи возбуждения машины постоянного тока.

ходят из схемы замещения этой цепи, представленной на рис. 25.

Эквивалентное «активное» сопротивление цепи R_B является суммой омического сопротивления собственной обмотки возбуждения, сопротивления проводов, сопротивления

источника питания. Если питание обмотки возбуждения осуществляется от выпрямительного устройства, то в сумме составляющих R_B должна быть учтена составляющая, учитывающая анодное перекрытие преобразователя.

Индуктивность основного потокосцепления L учитывает составляющую общего потока обмотки возбуждения, который сцеплен с якорем машины постоянного тока. Ее величина существенно зависит от характера насыщения магнитного потока. Для системы полюсов, соединенных последовательно, индуктивность L может быть определена по следующей формуле:

$$L = 2p\omega_b \frac{\Delta\Phi}{\Delta I_b} \cdot 10^{-8}, \text{ гн}, \quad (61)$$

где ω_b — число витков одного полюса; $2p$ — число полюсов; $\Delta\Phi$ и ΔI_b — приращения величины потока, мкс, и тока возбуждения; a , на рассматриваемом участке кривой намагничивания.

В том случае, если кривая намагничивания задана в виде зависимости $E=f(I_b)$ при постоянной скорости вращения n_ϕ , определение индуктивности обмотки возбуждения выполняется по формуле

$$L = \frac{120a}{n_\phi} \frac{\omega_b}{N} \frac{\Delta E}{\Delta I_b}, \text{ гн}, \quad (62)$$

где ω_b — число витков одного полюса; a — число пар параллельных ветвей якоря; N — число проводников на якоре; n_ϕ — фиксированная скорость вращения, при которой дана зависимость $E=f(I_b)$; E — э. д. с. машины постоянного тока.

Индуктивность рассеяния L_s характеризует ту часть общего потока обмотки возбуждения, которая не сцеплена с якорем двигателя. Кроме того, она содержит составляющую, равную индуктивности источника питания обмотки возбуждения $L_{\text{п}}$.

Точное определение величины L_s связано со значительными вычислительными трудностями и поэтому ее величина при расчетах учитывается ориентировочно. По данным электромашиностроительных заводов, поток рассеяния собственно обмотки возбуждения принимается равным примерно 18% номинальной величины основного потокосцепления. По этим данным может быть определена величина индуктивности рассеяния:

$$L_s = 2p\omega_b \frac{0,18\Phi_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} + L_{\text{п}}. \quad (63)$$

Индуктивность рассеяния от насыщения практически не зависит.

Соппротивление R_k характеризует демпфирующее действие вихревых токов, которые наводятся в магнитопроводе машины. Строгий учет этой величины нужен, хотя и связан с математическими трудностями, так как влияние вихревых токов весьма существенно. Схему за-

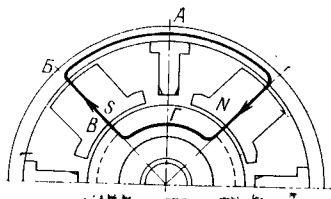


Рис. 26. Магнитная система машины постоянного тока.

мещения цепи возбуждения (рис. 25), из-за трудностей учета влияния вихревых токов следует рассматривать как первое приближение. Она достаточно полно характеризует процессы только для машин с шихтованным ярмом. Трудность математического описания влияния вихревых токов в нешихтованных машинах состоит

в том, что вихревые токи проходят не в каких-либо определенных контурах, а распределяются с неодинаковой плотностью по различным направлениям во всем объеме массивного стального сердечника, т. е. для контуров вихревых токов нельзя указать определенные значения активного сопротивления.

Для машин с нешихтованным ярмом величина эквивалентного сопротивления вихревых токов может быть приближенно определена по формуле

$$R_k = \frac{\pi \rho}{4\Delta} \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right) \omega^2, \quad (64)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление стали, равное $2 \cdot 10^5$ ом·см, или $2 \cdot 10^4$ см²/сек; a , b — размеры поперечного сечения ярма станины, см; Δ — эквивалентная половинная длина части силовой линии, проходящая по нешихтованной части магнитопровода, см (длина AB на рис. 26).

Постоянная времени контура вихревых токов для нешихтованного ярма [Л. 1].

$$T_k = \frac{4\Delta ab}{\pi \rho \delta \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)}, \quad (65)$$

где

$$\delta = \delta_0 + \frac{\Delta_1}{\mu};$$

μ — магнитная проницаемость стали; Δ_1 — половинная

длина части силовой линии, проходящей по железу (АВВГ на рис. 26); δ_0 — воздушный зазор.

Для машин с шихтованным ярмом постоянная времени T_k может быть достаточно точно определена по формуле

$$T_{к.ш} \approx \frac{4\Delta}{\pi r \delta} a_1^2 m, \quad (66)$$

где a_1 — толщина одной пластины, см; m — количество пластин ярма.

Из сравнения формул (65) и (66) следует, что $T_{к.ш}$ существенно меньше величины T_k при прочих равных условиях.

Из схемы замещения (рис. 25) следует, что динамика процессов в цепи возбуждения определяется следующими динамическими параметрами: $T_v = L_v/R_v$ — постоянная времени основного потокосцепления; $T_k = L_v/R_k$ — постоянная времени контура вихревых токов; $T_s = L_s/R_s$ — постоянная времени потока рассеивания.

При определенных условиях на динамику в цепи возбуждения большое влияние оказывает реакция якоря, включающая следующие составляющие:

- 1) поперечную реакцию якоря;
- 2) продольную реакцию якоря, обусловленную сдвигом щеток;
- 3) последовательную обмотку;
- 4) реакцию коммутационных токов;
- 5) реакцию дополнительных полюсов.

Из этих пяти составляющих последние четыре пропорциональны якорному току. Поперечная реакция тока пропорциональна току возбуждения и квадрату якорного тока. Влияние реакции якоря сказывается в том, что при всяких изменениях якорного тока в цепи обмотки возбуждения наводится электродвижущая сила, вызывающая изменение тока возбуждения. Результирующий эффект действия реакции якоря может быть приближенно оценен результирующей намагничивающей силой $\omega_p I_{я}$, участвующей в создании потока двигателя.

8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Принимая во внимание, что в общем случае динамика процессов в обмотке возбуждения описывается сложными математическими зависимостями, эксперименталь-

ные методы определения динамических параметров, вытекающие из рассмотрения схем рис. 25, носят приближенный характер даже при самом тщательном выполнении вычислений, требующихся при том или другом методе.

1-й способ. Способ пригоден для двигателей и генераторов постоянного тока. В цепи обмотки возбуждения неподвижной машины (для генератора и в условиях вращения на установившейся скорости) осциллографируется

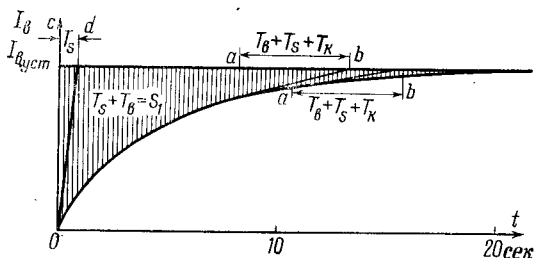


Рис. 27. Осциллограмма нарастания тока возбуждения на двигателе типа 2МП-8500-250.

$$I_{уст} = 38,5 \text{ а}; T_b + T_s = 4,84 \text{ сек} = S_1; T_b + T_s + T_k = 5,1 \text{ сек} = ab; T_k = 0,26 \text{ сек}; T_s = 0,74 \text{ сек}; T_b = 4,1 \text{ сек}.$$

ся ток возбуждения при мгновенном подключении источника напряжения к цепи возбуждения (рис. 25). В качестве источника напряжения должен использоваться генератор, мощность которого значительно больше мощности обмотки возбуждения для исключения влияния параметров генераторов.

По осциллограмме тока возбуждения (рис. 27) определяются параметры цепи в следующей последовательности. Площадь осциллограммы, заключенная между линией установившегося значения и кривой тока равняется $T_s + T_b$ (установившееся значение тока принимается за единицу). Проводится касательная в начальной точке кривой нарастания тока возбуждения. Отрезок, отсекаемый касательной на линии установившегося значения, равен T_s .

На достаточном удалении от начала координат проводится касательная к кривой тока возбуждения. Отрезок, отсекаемый этой касательной на линии установившегося значения, приблизительно равен $T_b + T_s + T_k$. Точка считается достаточно удаленной, если отрезки, от-

секаемые касательными в точках, расположенных за рассматриваемой точкой, равны между собой.

По этим данным могут быть определены величины T_B , T_s , T_K . Величина тока возбуждения при проведении опыта должна укладываться на линейном участке кривой намагничивания. В дальнейшем величины T_B , T_K должны быть скорректированы для фактического тока возбуждения в соответствии с реальной схемой питания цепи возбуждения.

- При определении T_s построением касательных возможны значительные погрешности, поэтому для контроля полученного значения T_s можно руководствоваться следующими соображениями.

Из многочисленных экспериментальных данных, полученных на заводах электропромышленности, из теоретических исследований известно, что поток рассеивания при номинальном токе возбуждения составляет примерно 18% номинального потока, сцепленного с обмоткой якоря. Отклонения от этой цифры практически лежат в пределах допустимых погрешностей для цепей расчета системы регулирования. Зная величину $S_1 = T_B + T_s$, определяемую по осциллограмме довольно точно, можно выполнить разделение постоянных времени, т. е. определить T_B и T_s :

$$T_B = \frac{S_1}{1+k};$$

$$T_s = kT_B;$$

$$k = 0,18 \frac{\Phi_H}{\Phi_1} \frac{I_1}{I_H} = 0,18 \frac{E_H}{E_1} \frac{I_1}{I_H}.$$

Здесь величины E_H и Φ_H — номинальные значения э. д. с. и потока двигателя; E_1 и Φ_1 — установившиеся значения э. д. с. и потока двигателя при осциллографировании переходного процесса.

2-й способ. Излагается способ определения постоянной вихревых токов T_K для генератора. Задается ток возбуждения на линейном участке кривой намагничивания. Осциллографируется электродвижущая сила генератора при резком отключении цепи возбуждения от источника питания. Определению подлежит постоянная времени первой гармоники кривой спада э. д. с. В кривой спада э. д. с. (рис. 28) находится такой участок, для которого тангенс угла наклона касательной практически не меняется для разных точек. Отрезок, от-

секаемый этой касательной на оси ординат, и принимается за значение T_K .

Этот опыт можно проводить и для двигателя при его работе на выбеге, если момент трения настолько мал, что за время эксперимента снижение скорости вращения можно не учитывать.

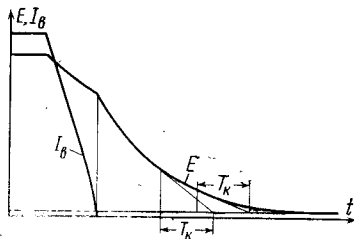


Рис. 28. Оциллограмма э. д. с. и тока возбуждения генератора при разрыве цепи возбуждения.

3-й способ. Рассмотрим способ определения результирующих витков реакции якоря. Способ пригоден для двигателя и генератора постоянного тока. Особенностью метода является возможность его использования для машин любой мощности при работе на любом участке

кривой намагничивания. Для определения эквивалентных витков реакции якоря двигателя выполняется опыт замыкания якорной цепи возбужденного двигателя на фиксированное напряжение источника питания якорной цепи (рис. 29).

При появлении якорного тока происходит изменение магнитного потока машины. При изменении же магнитного потока машины в обмотке возбуждения наводится э. д. с., которая вызывает изменение тока возбуждения. Последний в свою очередь оказывает обратное влияние на величину магнитного потока.

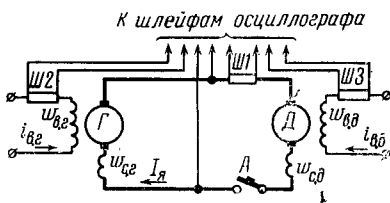


Рис. 29. Схема для определения витков реакции якоря.

Таким образом, пуск двигателя происходит при изменяющемся магнитном потоке. Очевидно, что в установившемся режиме приращения тока возбуждения и потока будут равны нулю, так как якорный ток равен нулю и отсутствует причина, вызывающая изменение потока и тока возбуждения.

Это обстоятельство позволяет, пользуясь известными соотношениями для цепи возбуждения и якорной цепи [Л. 5], по оциллограмме якорного тока и приращения

тока возбуждения (см. рис. 30) определить эквивалентные витки реакции якоря в следующей последовательности.

1. Путем графического суммирования определяется площадь, ограниченная кривой якорного тока, т. е. определяется величина

$$\sum_{i=0}^{m \rightarrow \infty} I_{я_i} \Delta t.$$

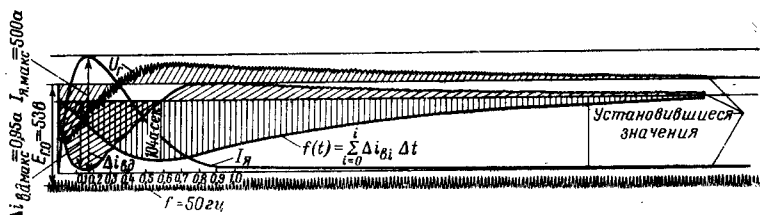


Рис. 30. Осциллограмма переходного процесса при замыкании якорной цепи. $\Delta i_{в, д}$, U , $I_{я}$ при $E_{г.о} = 53$ в; $i_{в, д, уст} = 1,5$ а.

2. Путем графического суммирования строится кривая

$$f(t) = \sum_{i=0}^i \Delta i_{в_i} \Delta t.$$

3. Путем графического суммирования определяется площадь, ограниченная кривой $f(t)$, т. е. определяется величина

$$\sum_{j=0}^{n \rightarrow \infty} f(t)_j \Delta t.$$

4. По данным пунктов 1 и 3 определяются эквивалентные витки реакции якоря по формуле

$$\omega_p = \frac{R_b \sum_{j=0}^{n \rightarrow \infty} f(t)_j \Delta t}{2p\omega_b C \sum_{i=0}^{m \rightarrow \infty} I_{я_i} \Delta t}, \quad (67)$$

где R_b — сопротивление цепи возбуждения, ом; Δt — интервал разбиения, сек; $\Delta i_{в}$ — приращение тока возбуждения; p — число пар полюсов; ω_b — число витков одного полюса; C — наклон кривой намагничивания в испытуемой точке, вб/а (см. приложение 8).

Величина ω_p зависит от положения рабочей точки на кривой намагничивания. Поэтому опыт замыкания желательно проводить несколько раз при разных токах возбуждения двигателя.

Все приведенные выкладки остаются справедливыми при определении витков реакции якоря генератора.

4-й способ. Рассмотрим еще один способ определения реакции якоря, применимый только к генератору при работе его на линейном участке кривой намагничивания. Для этого необходимо располагать осциллограммами напряжения на зажимах генератора и тока якоря, снятых при замыкании якорной цепи (рис. 30).

Путем графического суммирования элементарных площадей определяются площади кривой якорного тока и площади, заключенной между кривой э. д. с. генератора $E_{г.о}$ и кривой напряжения на зажимах двигателя U_r .

При этом

$$\omega_{p.r} = \frac{-\sum_0^n (E_{г.о} - U_r) \Delta t}{k_1 \sum_0^n I_a \Delta t} + \frac{R_r}{k_1}, \quad (68)$$

где R_r — активное сопротивление цепи возбуждения; k_1 — наклон кривой холостого хода на линейном участке.

Изложенная методика (способы 3-й и 4-й) была с успехом применена в системе генератор — двигатель, где использовались машины типа ПН-1000, 80 квт, 230 в, 348 а, 970 об/мин, возбуждение компаундное $\omega_c = 3$, $\omega_b = 1250$, $i_{вн} = 2,88$ а, $GD^2 = 29,2$ кгс·м², $L_{я} = 0,00222$ гн, $R_{я} = 0,026$ ом.

При неизменной э. д. с. генератора, равной 53 в, производилось включение двигателя при разных уровнях

Таблица 5

$i_{в.д.}^a$	1,5	2	2,5	2,85	3,75
$\Sigma I_a \Delta t, \text{ а} \cdot \text{сек}$	234	155,4	106	94,6	65,5
$\Sigma f(t) \Delta t, \text{ а} \cdot \text{сек}^2$	0,552	0,34	0,18	0,113	0,0456
$\omega_{p.r}$	2,92	2,8	2,45	2,18	2,12

возбуждения. На рис. 30 приведены осциллограммы при токе возбуждения двигателя $i_{в.д} = 1,5$ а.

В табл. 5 даны результаты определения $\omega_{р.д}$ двигателя. Существенная зависимость $\omega_{р.д}$ от уровня возбуждения определяется влиянием поперечной реакции якоря.

Реакция якоря генератора определялась по формуле (68). В табл. 6 приведены результаты определения $\omega_{р.г}$ генератора при разных величинах суммы $\Sigma I_{я} \Delta t$.

На осциллограмме рис. 31 можно оценить существенное влияние реакции якоря на характер переходного процесса.

Заметим, что при моделировании переходных процессов реакция якоря учитывается как обратная связь по

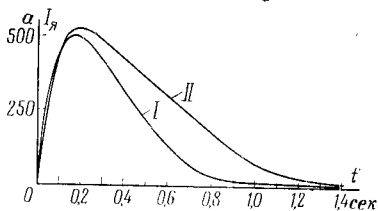


Рис. 31. Осциллограмма тока якоря.

$i_{в.д.уст} = 1,5$ а, $E_{г} = 53$ в; $I - \omega_{р.д} = 2,92$,
 $\omega_{р.г} = 0,92$; $II - \omega_{р.д} = 0$, $\omega_{р.г} = 0,92$.

Таблица 6

$i_{в.д. а}$	1,5	2	2,5	2,85	3,75
$\Sigma I_{я} \Delta t, а \cdot сек$	234	155,4	106	94,6	65,5
$\Sigma (E_{г.о} - U_{г}) \Delta t, в \cdot сек$	498	222	205	204	102
$\omega_{р.г}$	0,92	0,85	0,86	0,92	—

Примечание. $k_1 = 0,066$ в/а.

току, вводимая в цепь возбуждения генератора и двигателя. В общем случае связь эта нелинейная и определяется величиной возбуждения машин.

Вывод соотношений (20), (21)

При замыкании якорной цепи для тока справедливо соотношение

$$I = \frac{(E_r - R_{\kappa} I_{\text{ст}})}{L_{\kappa}(T_1 - T_2)} T_1 T_2 \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (69)$$

Разобьем ось времени на равные интервалы длиной Δt ; обозначим через I_1, I_2, I_3 любые три рядом стоящие ординаты осциллограммы, сдвинутые на время Δt (см. рис. 3).

Для этих значений тока справедливы следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{(E_r - R_{\kappa} I_{\text{ст}})}{L_{\kappa}(T_1 - T_2)} T_1 T_2 \left(e^{-\frac{t_1}{T_1}} - e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right); \\ I_2 &= \frac{(E_r - R_{\kappa} I_{\text{ст}})}{L_{\kappa}(T_1 - T_2)} T_1 T_2 \left(e^{-\frac{t_1 + \Delta t}{T_1}} - e^{-\frac{t_1 + \Delta t}{T_2}} \right); \\ I_3 &= \frac{(E_r - R_{\kappa} I_{\text{ст}})}{L_{\kappa}(T_1 - T_2)} T_1 T_2 \left(e^{-\frac{t_1 + 2\Delta t}{T_1}} - e^{-\frac{t_1 + 2\Delta t}{T_2}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (70)$$

Решая систему (70), получаем:

$$\frac{I_3}{I_1} = \left(e^{-\frac{\Delta t}{T_1}} + e^{-\frac{\Delta t}{T_2}} \right) \frac{I_2}{I_1} - e^{\left(-\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \Delta t},$$

или

$$\frac{I_3}{I_1} = b \frac{I_2}{I_1} - C, \quad (20)$$

где

$$C = e^{\left(-\frac{\Delta t}{T_1} - \frac{\Delta t}{T_2} \right)} = e^{-\frac{\Delta t}{T_0}}. \quad (21)$$

Вывод соотношения (24)

При ступенчатом приложении напряжения якорной цепи якорный ток изменяется в соответствии с дифференциальным уравнением:

$$T_{\text{в}} T_{\text{эм}} \frac{d^2 I}{dt^2} + T_{\text{эм}} \frac{dI}{dt} + I = I_{\text{ст}};$$

$$\frac{dI}{dt} (0) = \frac{E - I_{\text{ст}} R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} = \frac{E - I_{\text{ст}} R_{\text{я}}}{T_{\text{в}} R_{\text{я}}} = \frac{I_{\text{я}}}{T_{\text{в}}};$$

$$I(0) = I(\infty) = I_{\text{ст}}.$$

Интегрируя уравнение, получаем:

$$T_{\text{эм}} T_{\text{в}} \frac{dI}{dt} \Big|_0^{\infty} + T_{\text{эм}} I \Big|_0^{\infty} = \int_0^{\infty} (I_{\text{ст}} - I) dt.$$

Отсюда

$$T_{\text{эм}} = \frac{\int_0^{\infty} (I - I_{\text{ст}}) dt}{I_{\text{я}}} = \frac{S}{I_{\text{я}}}. \quad (24)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Вывод соотношений (25)

При замыкании якорной цепи для тока справедливо соотношение

$$I = \frac{E_{\text{г}} - R_{\text{я}} I_{\text{ст}}}{L_{\text{я}} (r_1 - r_2)} (e^{r_1 t} - e^{r_2 t}), \quad (71)$$

где

$$r_1 = -\frac{1}{2T_{\text{в}}} + \sqrt{\frac{1}{4T_{\text{в}}^2} - \frac{1}{T_{\text{в}} T_{\text{эм}}}};$$

$$r_2 = -\frac{1}{2T_{\text{в}}} - \sqrt{\frac{1}{4T_{\text{в}}^2} - \frac{1}{T_{\text{в}} T_{\text{эм}}}};$$

$I_{\text{ст}}$ — статический ток.

В точке $t_{\text{макс}}$ (точка экстремума)

$$I(t_{\text{макс}}) = -\frac{E_{\text{г}} - R_{\text{я}} I_{\text{ст}}}{L_{\text{я}} r_2} e^{r_1 t_{\text{макс}}}$$

В точке $2t_{\text{макс}}$ (точка перегиба)

$$I(2t_{\text{макс}}) = -\frac{E_{\text{г}} - I_{\text{ст}} R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} \frac{r_1 + r_2}{r_2^2} e^{r_1 2t_{\text{макс}}}. \quad (72)$$

Из отношения (71) и (72) следует:

$$\frac{I(2t_{\text{макс}})}{I(t_{\text{макс}})} = \frac{I(t_{\text{макс}})}{I_{\text{к.з}}}, \quad (25)$$

где

$$I_{\text{к.з}} = \frac{E_{\text{г}} - R_{\text{я}} I_{\text{ст}}}{R_{\text{я}}}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Вывод соотношения (34)

При ступенчатом приложении напряжения якорной цепи скорость вращения привода изменяется в соответствии с дифференциальным уравнением

$$T_{\text{э}} T_{\text{эм}} \frac{d^2 n}{dt^2} + T_{\text{эм}} \frac{dn}{dt} + n = n_{\text{уст}};$$

$$n(0) = \frac{dn}{dt}(0) = 0;$$

$$n_{\text{уст}} = \frac{E - I_{\text{ст}} R_{\text{э}}}{c_{\text{э}} \Phi}.$$

Интегрируя уравнение в пределах от 0 до ∞ , получаем:

$$T_{\text{э}} T_{\text{эм}} \left. \frac{dn}{dt} \right|_0^{\infty} + T_{\text{эм}} n \Big|_0^{\infty} = \int_0^{\infty} (n_{\text{уст}} - n) dt.$$

Отсюда

$$T_{\text{эм}} = \frac{\int_0^{\infty} (n_{\text{уст}} - n) dt}{n_{\text{уст}}}. \quad (34)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Вывод соотношения (37)

Переходный процесс для скорости вращения при замыкании якорной цепи описывается уравнением

$$n = n_{\text{уст}} \left[1 - \frac{e^{-\xi \omega_n t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t + \gamma) \right].$$

В экстремальных точках

$$1 - \frac{n_m}{n_{\text{уст}}} \Big|_{t=m \frac{T}{2}} = \frac{e^{-\xi \omega_n m \frac{T}{2}}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin\left(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n m \frac{T}{2} + \gamma\right),$$

где m — порядковый номер экстремума графика скорости;
 T — период колебания графика скорости;

$\frac{n_m}{n_{уст}}$ — ордината графика скорости в точках экстремума.

При нечетных m

$$\frac{\sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\omega_n m \frac{T}{2} + \gamma\right)}{\sqrt{1-\xi^2}} = -1.$$

При четных m

$$\frac{\sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\omega_n m \frac{T}{2} + \gamma\right)}{\sqrt{1-\xi^2}} = 1.$$

Поэтому $\left|1 - \frac{n}{n_{уст}}\right| = e^{-\xi\omega_n m \frac{T}{2}}$. Из условия $\sqrt{1-\xi^2}\omega_n T = 2\pi$ получаем:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T\sqrt{1-\xi^2}}. \quad (37)$$

Следовательно,

$$\left|1 - \frac{n_m}{n_{уст}}\right| = e^{-\frac{\xi\pi m}{\sqrt{1-\xi^2}}},$$

откуда $\xi = -\frac{\ln\left|1 - \frac{n_m}{n_{уст}}\right|}{m^2\pi^2 + \ln^2\left|1 - \frac{n_m}{n_{уст}}\right|}$.

Формула для ξ использована при построении графиков рис. 12.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Вывод соотношения (47)

Для якорной цепи системы генератор — двигатель справедливо следующее уравнение электрического равновесия:

$$E_r = U_r + L_r \frac{dI}{dt} + R_r I.$$

Интегрируя это уравнение, получаем:

$$\int_0^{\infty} (E_r - U_r) dt = L_r I \Big|_0^{\infty} + R_r \int_0^{\infty} I dt.$$

При пуске ненагруженного привода $I(\infty) = I(0) = 0$.
Отсюда

$$R_r = \frac{\int_0^{\infty} (E_r - U_r) dt}{\int_0^{\infty} I dt} = \frac{S}{S_1}. \quad (47)$$

В момент времени $t_{\text{макс}}$, когда якорный ток достигает максимального значения,

$$L_r \frac{dI}{dt} = 0,$$

поэтому

$$R_r = \frac{E_r - U_r(t_{\text{макс}})}{I(t_{\text{макс}})}.$$

Так как

$$U_r = c_e \Phi n + R_d I + L_d \frac{dI}{dt},$$

то в момент $t_{\text{макс}}$

$$R_d + R_r = \frac{E_r - c_e \Phi n(t_{\text{макс}})}{I(t_{\text{макс}})}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Вывод соотношения (53) и (54)

а) Отклонение шлейфа напряжения, записанное в дифференциальной форме, имеет вид:

$$U_m + T_{\Phi} \frac{dU_m}{dt} = C \left(R_d I + T_d \frac{dI}{dt} \right); \quad (73)$$

отклонение шлейфа тока

$$I_m = C_1 I \quad (74)$$

(C и C_1 — масштабы).

Отсюда

$$U_m + T_{\Phi} \frac{dU_m}{dt} = \frac{C}{C_1} R_d I_m + \frac{C}{C_1} T_d R_d \frac{dI_m}{dt}.$$

При $t = 0$ $U_m = 0$ и $I_m = 0$, тогда

$$T_{\Phi} \frac{dU_m}{dt}(0) = \frac{C}{C_1} T_d R_d \frac{dI_m}{dt}(0),$$

отсюда

$$T_x = \frac{T_\Phi \frac{dU_x}{dt}(0)}{R_x \frac{C}{C_1} \frac{dI_m}{dt}(0)} = \frac{T_\Phi k}{R_x k_1}. \quad (53)$$

б) Решая (73) и (74) совместно, получаем:

$$U_m + T_\Phi \frac{dU_m}{dt} = CR_x \frac{I_m}{C_1} + T_x R_x \frac{C}{C_1} \frac{dI_m}{dt}.$$

Если C_1 выбрано так, что $CR_x = C_1$, т. е. установившиеся значения шлейфов тока и напряжения совпадают, то

$$U_m + T_\Phi \frac{dU_m}{dt} = I_m + T_x \frac{dI_m}{dt}.$$

Проинтегрировав от 0 до ∞ обе части уравнения, получаем:

$$\frac{\int_0^\infty (U_m - I_m) dt}{U_{m.уст}} + T_\Phi = T_x$$

или

$$\frac{S}{U_{m.уст}} + T_\Phi = T_x. \quad (54)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Вывод соотношения (67)

Для цепи возбуждения двигателя рис. 25 (для генератора аналогично) справедливы следующие соотношения:

$$U_x = i_x R_x + L_x \frac{di_x}{dt} + 2p\omega_a \frac{d\Phi}{dt};$$

$$i_\mu = i_x - i_x;$$

$$i_x = \frac{d\Phi}{dt} \frac{2p\omega_a}{R_x};$$

$$a\omega = i_\mu \omega + I_x \omega_p = \varphi(\Phi).$$

При запуске двигателя

$$I_x(0) = I_x(\infty) = 0.$$

В окрестности рабочей точки

$$\Phi = \Phi_0 + C(\Delta i_\mu \omega_x + I_x \omega_p),$$

где

$$C = \frac{d\Phi}{da\omega}.$$

Переходя к приращениям, получаем:

$$R_n \Delta i_n + L_s \frac{d\Delta i_n}{dt} + 2p\omega_n \frac{d\Delta\Phi}{dt} = 0; \quad (75)$$

$$\Delta\Phi = C(\Delta i_n w_n + I_n w_p). \quad (76)$$

Интегрируя (76) в пределах от $t=0$ до $t=\infty$, получим:

$$\int_0^{\infty} \Delta\Phi dt = w_p C \int_0^{\infty} I_n dt. \quad (77)$$

Проинтегрируем (75) в пределах от 0 до t , тогда

$$f(t) = R_n \int_0^t \Delta i_n dt = -L_s \Delta i_n - 2p\omega_n \Delta\Phi. \quad (78)$$

Проинтегрируем выражение (78) от 0 до ∞ еще раз, тогда

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = -2p\omega_n \int_0^{\infty} \Delta\Phi dt. \quad (79)$$

Решая (77) и (79) совместно и пользуясь графическим суммированием, получаем:

$$\omega_p = \frac{R_n \sum_{j=0}^n f(t)_j \Delta t}{2p\omega_n C \sum_{i=0}^m I_{нi} \Delta t}. \quad (67)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Изд-во иностр. лит., 1955.
2. Левин Г. М. и Рудаков В. В. Определение индуктивности якоря машин постоянного тока. — «Электричество», 1940, № 7.
3. Ямпольский Д. С., Орлова Т. А., Спивак Л. М., Ващенко А. П. Экспериментальное определение постоянных времени двигателя постоянного тока независимого возбуждения. — «Электричество», 1964, № 9.
4. Ямпольский Д. С., Спивак Л. М. Динамические параметры системы генератор—двигатель. — «Электротехника», 1966, № 2.
5. Ямпольский Д. С., Орлова Т. А. Учет реакции якоря машин постоянного тока. — «Электротехника», 1967, № 12.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Динамические параметры якорной цепи двигателя	4
2. Аналитические способы определения электромагнитной и электромеханической постоянных времени якорной цепи	7
3. Определение динамических параметров якорной цепи по осциллограмме якорного тока	14
4. Определение динамических параметров якорной цепи по осциллограмме скорости вращения	22
5. Определение динамических параметров якорной цепи по частотной характеристике	25
6. Определение момента инерции привода, индуктивности и сопротивления якорной цепи	28
7. Динамические параметры цепи возбуждения машин постоянного тока	38
8. Определение динамических параметров цепи возбуждения	41
Приложения	48
Литература	54

*Ямпольский Дмитрий Срулевич,
Орлова Тамара Александровна,
Решмин Борис Иванович*

**Определение динамических параметров
электропривода постоянного тока**

Редактор *И. П. Березина*
Обложка художника *А. А. Иванова*
Технический редактор *О. Д. Кузнецова*
Корректор *Н. В. Лобанова*

Сдано в набор 26/V 1971 г.		
Подписано к печати 30/XII 1971 г.		Т-19766
Формат 84×108 ^{1/32}	Бумага типографская № 3	
Усл. печ. л. 2,94	Уч.-изд. л. 2,66	
Тираж 10 000 экз.	Цена 10 коп.	Зак. 279

Издательство „Энергия“. Москва, М-114,
Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполнграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

Цена 10 коп.