

ТОРМОЖЕНИЕ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НОРМАЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

КУЛЕЕВ И. Г.

Доцент, кандидат технических наук

Если двигатель отключить от сети, то при наличии значительного момента инерции вращающихся масс выбег двигателя может продолжаться достаточно долго.

Время, необходимое для его остановки путем самоторможения, может быть определено следующим образом.

Кинетическая энергия ротора, соединенного с вращаемым механизмом, при угловой скорости ω_2 равна

$$A_k = J \frac{\omega_2^2}{2}.$$

В процессе выбега (самоторможения) кинетическая энергия расходуется на полезную работу, производимую механизмом, и работу сил трения.

При $M_c = \text{const}$ можем написать

$$-\frac{dA_k}{dt} = -J \omega_2 \frac{d\omega_2}{dt} (M_c + M'_m) \omega_2,$$

где M'_m — момент сил трения.

Полагая в первом приближении $M'_m = \text{const}$, разделяя переменные и интегрируя, получим продолжительность самоторможения

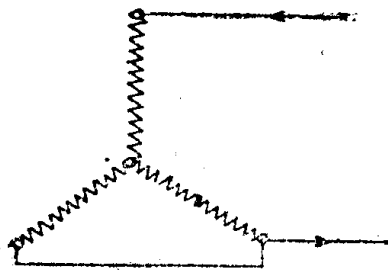


Рис. 1

$$t = -\frac{J}{M_c + M'_m} \int_{\omega_2}^0 d\omega_2 = \frac{J \omega_2'}{M_c + M'_m}. \quad (1)$$

При $M_c = k\omega_2^2$ будем иметь

$$-\frac{J \omega_2 d\omega_2}{dt} = M'_m \omega_2 + k\omega_2^3,$$

откуда

$$t = -\frac{J}{k} \int_{\omega_2'}^0 \frac{d\omega_2}{\frac{M'_m}{k} + \omega_2^2}$$

Интегрируя, получим

$$t = \frac{J}{\sqrt{M'_m k}} \operatorname{arctg} \frac{\omega_2'}{\sqrt{\frac{M'_m}{k}}} \quad (2)$$

В целом ряде случаев требуется быстрая и плавная остановка двигателя; чтобы достигнуть такого эффекта, применяют следующие чисто электрические способы торможения:

1. Торможение по методу противовключения, при котором переключают две фазы статора и заставляют двигатель вращаться против вращения поля. Двигатель при этом работает в режиме электромагнитного тормоза.

2. Динамическое торможение, которое осуществляется при условии возбуждения обмотки статора постоянным током. При этом в случае соединения обмоток статора звездой чаще всего применяется схема рис. 1, при соединении треугольником—рис 2.

Если обозначить активное сопротивление обмотки статора через r , силу постоянного тока через I , напряжение постоянного тока через u , то будем иметь: при соединении обмоток Y

$$I_Y = \frac{2}{3} \frac{u}{r_1},$$

при соединении обмоток Δ

$$I_{\Delta} = \frac{3}{2} \frac{u}{r_1}$$

Ток, обтекая обмотку статора, создает магнитодвижущую силу, под действием которой возникает неподвижное магнитное поле.

При вращении ротора в этом поле в обмотках ротора индуцируется э.д.с, создаваемый ею ток будет нагревать как обмотку, так и секции включенного в нее реостата.

Таким образом, в процессе торможения кинетическая энергия движущихся частей привода переходит в энергию тепловую. Асинхронный мотор работает при этом в качестве синхронного генератора понижающейся частоты.

3. Торможение с рекуперацией электроэнергии. Этот способ в нормальных схемах возможен только на скоростях, превышающих синхронную.

Ниже будут рассмотрены переходные режимы асинхронных двигателей при торможении по первому и второму способу.

Торможение двигателя по методу противовключения

1. Зависимость скорости от времени при торможении ненагруженного двигателя

Момент, развиваемый асинхронной машиной в тормозном режиме, определяется из формулы Клосса

$$M = M_{\max} \frac{2 + \beta S_m}{\frac{S}{S_m} + \frac{S_m}{S} + \beta S_m}$$

Кроме того, для этого режима мы имеем

$$S = \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1} \text{ и } \omega_2 = \omega_1 (S-1).$$

Будем считать, что вращаемый двигателем механизм во время выбега никакой полезной работы не производит и что создаваемый им момент

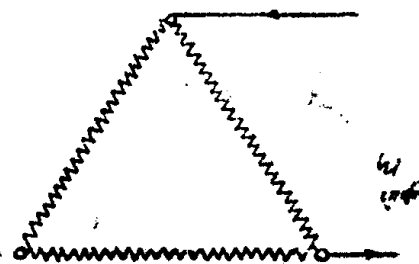


Рис. 2

сопротивления от силы трения близок к нулю. Тогда уравнение движения для процесса выбега может быть написано в следующем виде:

$$M_{\max} \frac{2 + \beta S_m}{\frac{S}{S_m} + \frac{S_m}{S} + \beta S_m} + J\omega_1 \frac{dS}{dt} = 0.$$

Полагая в начале процесса торможения $S=2$, получим

$$t = - \frac{J\omega_1}{M_{\max}(2 + \beta S_m)} \int \left(\frac{S}{S_m} + \frac{S_m}{S} + \beta S_m \right) dS$$

или, после интегрирования, получим

$$t = \frac{J\omega_1}{M_{\max}(2 + \beta S_m)} \left(\frac{3}{2S_m} + \beta S_m + 0,695 S_m \right).$$

Выражая время и скольжение через текущие координаты t и S , будем иметь

$$t = \frac{J\omega_1}{M_{\max}(2 + \beta S_m)} \left[\frac{4 - S^2}{2S_m} + \beta S_m(2 - S) + S_m \ln \frac{2}{S} \right]. \quad (3)$$

2. Зависимость скорости от времени при торможении нагруженного двигателя $M_c = \text{const}$

В этом случае уравнение движения для процесса выбега имеет вид

$$-M_{\max} \frac{2 + \beta S_m}{\frac{S}{S_m} + \frac{S_m}{S} + \beta S_m} - M_c = J\omega_1 \frac{dS}{dt},$$

откуда продолжительность торможения

$$t = -J\omega_1 \int_2^1 \frac{(S_m^2 + S^2 + \beta S_m^2 S) dS}{M_{\max}(2 + \beta S_m)S_m S + M_c(S_m^2 + S^2 + \beta S_m^2 S)}.$$

После приведения подынтегрального выражения к правильной дроби, будем иметь

$$t = - \frac{J\omega_1}{M_c} \int_2^1 dS + \frac{J\omega_1 M_{\max} S_m}{M_c^2} \int_2^1 \frac{S dS}{S^2 + S_m^2 + S \left[\beta S_m^2 \left(\frac{M_{\max}}{M_c} + 1 \right) + \frac{2M_{\max} S_m}{M_c} \right]}$$

Обозначив

$$\beta S_m^2 \left(\frac{M_{\max}}{M_c} + 1 \right) + \frac{2M_{\max} S_m}{M_c}$$

через b' , получим

$$t = - \frac{J\omega_1}{M_c} \int_2^1 dS + \frac{J\omega_1}{M_c^2} M_{\max} S_m \left(\beta S_m + 2 \right) \int_2^1 \frac{S dS}{S^2 + S_m^2 + b'S}.$$

Интегрирование дает

$$t = \frac{J\omega_1}{M_c} (2 - S) + \frac{a}{2} \ln \frac{S + b'S + S_m^2}{4 + 2b' + S_m^2} + \frac{ab'}{\sqrt{4S_m^2 - b'^2}} \arctg \frac{(4 - S)\sqrt{4S_m^2 - b'^2}}{4(S_m^2 + S) + b'(4 + S)}. \quad (4)$$

3. Зависимость скорости от времени при торможении нагруженного двигателя $M_c = k'\omega_2^2$

В этом случае уравнение движения для процесса выбега имеет вид

$$-\frac{M_{\max}(2 + \beta S_m)}{\frac{S_1}{S_m} + \frac{S_m}{S} + \beta S_m} - k(S-1)^2 = J\omega_1 \frac{dS}{dt},$$

откуда продолжительность торможения

$$t = -J\omega_1 \int_2^1 \frac{(S^2 + S_m^2 + \beta S_m^2 S) dS}{S^4 + S^3(\beta S_m^2 - 2) + S^2(1 + S_m^2 - 2\beta S_m^2) + S[\beta S_m^2 - 2S_m^2 + \frac{(2 + \beta S_m)M_{\max}S_m}{k}] + S_m^2}$$

обозначив

$\beta S_m^2 - 2$ через a_1 , $1 + S_m^2 - 2\beta S_m^2$ через b_1

и

$\beta S_m^2 - 2S_m^2 + \frac{(2 + \beta S_m^2)M_m S_m}{k}$ через c' ,

получим

$$t = -\frac{J\omega_1}{k} \int_2^1 \frac{(S^2 + S_m^2 + \beta S_m^2 S) dS}{S^4 + S^3 a_1 + S^2 b_1 + c' S + S_m^2}. \quad (6)$$

Интегрирование дает

$$t = -\frac{J\omega_1}{k} \left[A \ln \frac{S - f/2 - d}{2 - f/2 - d} + B \ln \frac{S - f/2 + d}{2 - f/2 + d} + \frac{c}{2} \ln \frac{S^2 + fS + f^2/4 + e^2}{2 + 2f + f^2/4 + e^2} - \frac{2D - cf}{2e} \operatorname{arctg} \frac{4e}{4e^2 + 2S(2 + f) + 2f + f^2} \right] \quad (7)$$

Относительно коэффициентов A, B, C, D, d, f , и e , см. работу автора: „Пуск короткозамкнутых двигателей нормального исполнения“. Известия ТПИ (этот же том).

На рис. 3 приведена осциллограмма скорости при торможении по методу противовключения $M_c = 0$.



Рис. 3

На рис. 4 осциллограмма скорости при торможении по методу противовключения $M_c = \text{const}$

На рис. 5 осциллограмма скорости при торможении по методу противовключения $M_c = k'\omega_2^2$

Для удобства сравнений в нижеследующей таблице приводятся значения t , полученные по формулам и взятые из осциллограмм (рис. 3, 4, 5).

Таблица значений t .

$M_c = 0$		$M_c = \text{const}$		$M_c = k'\omega_s^2$	
По форм.	Из осциллогр.	По форм.	Из осциллогр.	По форм.	Из осциллогр.
0,65	0,66	0,86	0,88	1,11	1,12

Подсчеты и осциллографические записи произведены для двигателя, имеющего следующие данные: тип Т-750, $U_1 = 220\text{В}$, $E_2 = 145\text{В}$, $I_1 = 38\text{А}$,



Рис. 4

$I_2 = 45,5\text{А}$, $n = 715\text{ об/мин}$, $\cos\varphi = 0,8$, $r_1 = 0,4\text{ ома}$, $r_2 = 0,08\text{ ома}$
 $r_k = 1,1\text{ ома}$, $x_1 = 1,35\text{ ома}$, $x_2 = x_1$, $Z_k = 2,92\text{ ома}$, $S_m = 0,213$, $J = 0,05\text{ кгмсек}^2$
 $M_n = 11\text{ кгм}$, $M_{\text{max}} = 30\text{ кгм}$, $M_c = 6,6\text{ кгм}$.



Рис. 5

Динамическое торможение

4. Зависимость скорости от времени при торможении ненагруженного двигателя

Торможение по методу противовключения, как известно, имеет крупные недостатки, главнейшими из которых являются: значительные потери энергии в обмотках двигателя при торможении, необходимость изоляции обмоток ротора на двойное напряжение (при роторе с кольцами) и необходимость точного выключения двигателя в конце торможения, так как запаздывание вызывает разгон двигателя в обратном направлении. Всех этих недостатков лишено динамическое торможение. При этом способе торможения статор двигателя после отключения от питающей сети подключают к специальной сети постоянного тока, и вследствие этого в двигателе образуется неподвижное в пространстве магнитное поле.

Это поле индуцирует переменный ток в проводниках вращающегося по инерции ротора. Таким образом, двигатель превращается в синхрон-

ный генератор, создающий тормозной момент. Работа торможения за вычетом потерь на трение превращается в тепло в цепи ротора.

На рис. 6 даны основные схемы приключения обмоток статора к сети постоянного тока и указаны токи, протекающие через отдельные фазы.

Как и при переменном токе, магнитодвижущие силы отдельных фаз сдвинуты между собой в пространстве на 120 электрических градусов, поэтому равнодействующую м.д.с. можно определить геометрическим сложением м.д.с. отдельных фаз. При условии создания одинаковых ампер-

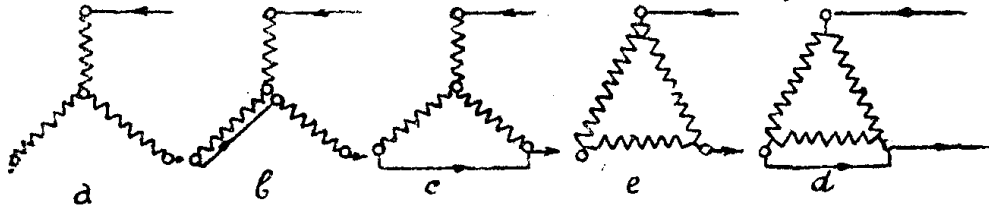


Рис. 6

витков статора и одинакового вращающегося поля можно постоянный ток заменить эквивалентным переменным током. Величину этого эквивалентного тока I_1 , протекающего в фазе статора, можно найти из равенства

$$AW_n = \frac{3}{2} \sqrt{2} I_1 W_1, \quad (9)$$

где AW_n — полные статорные ампервитки, создаваемые постоянным током, $\frac{3}{2} \sqrt{2} I_1 W_1$ — амплитуда полных ампервитков статора при питании его переменным током.

Зная AW_n , можно по формуле (9) найти эквивалентный ток I_1 , например, для схемы а:

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{3 W_1} AW_n = I_n \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}},$$

откуда

$$I_n = I_1 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}.$$

Аналогично для схемы б:

$$I_1 = I_n \frac{2\sqrt{2}}{3}.$$

Для схемы в:

$$I_1 = \frac{I_n \sqrt{2}}{2}.$$

Для схемы г:

$$I_1 = I_n \frac{\sqrt{2}}{3}.$$

Для схемы д:

$$I_1 = \frac{I_n}{\sqrt{2} \sqrt{3}}.$$

(10 а—д)

Суммарные омические сопротивления для разных схем равняются соответственно

$$R_a = 2R_1, \quad R_b = 3R_1, \quad R_c = \frac{3R_1}{2}, \quad R_d = \frac{2}{3} R_1, \quad R_e = \frac{1}{2} R_1,$$

где R_1 — активное сопротивление одной фазы обмотки статора.

Умножая это сопротивление на I_n , найденные из равенств (10 а—е), найдем напряжения U_n постоянного тока, приложенные к зажимам статора. Например, для схемы а:

$$U_n = \sqrt{3} \sqrt{2} I_1 R_1 = 2,44 I_1 R_1.$$

Легко найти также мощность постоянного тока

$$P_n = I_n U_n.$$

Ток ротора создает соответственные ампервитки, которые будут неподвижны в пространстве, хотя токи в отдельных проводниках меняют свое направление и величину, но к данной точке пространства подходят различные проводники, имея всегда в этот момент один и тот же ток. Поэтому ампервитки ротора складываются с ампервитками статора и дают равнодействующие намагничивающие ампервитки.

Обозначив через I_2' ток ротора, приведенный к статору, через I_0 — намагничивающий ток, будем иметь $I_0 = I_1 + I_2'$.

В отличие от нормальной работы асинхронного двигателя, когда остаются приблизительно неизменными намагничивающий ток и поток, а ток I_1 меняется при изменении скольжения, при динамическом торможении ток I_1 остается неизменным, а I_0 и поток изменяются при изменении s .

Если бы ротор вращался в неподвижном поле с синхронной скоростью n_0 , то число периодов его тока было бы

$$f = p \frac{n_0}{60}.$$

При вращении же во время торможения с числом оборотов n частота тока в роторе

$$f_2 = \frac{pn}{60} = f_1 \frac{n}{n_0}.$$

Поэтому по аналогии с нормальной работой обозначим через $s = \frac{n_0 - n}{n_0}$ скольжение при динамическом торможении.

Аналогично нормальной работе можно написать:

$$I_2' = \frac{E'_{20}s}{\sqrt{(R_2')^2 + (x_2's)^2}},$$

где E'_{20} — приведенная э. д. с. ротора при синхронной скорости n_0 , равная э. д. с. неподвижного ротора при питании статора трехфазным током R_2' и x_2' — приведенные активное и реактивное сопротивления цепи ротора, причем x_2' — соответствует частоте f_1 .

Если пренебречь насыщением, то можно считать

$$E'_{20} = b I_0,$$

где коэффициент пропорциональности b можно найти из выражения

$$b = \frac{E_{20}'}{I_0} = \frac{E_1}{I_0}, \quad (11)$$

если E_1 — э. д. с. обмотки статора при намагничивающем токе. Приблизительно

$$b = \frac{U_n}{I_0}.$$

Поэтому

$$I_2' = \frac{b I_0 s}{\sqrt{(R_2')^2 + (x_2's)^2}}. \quad (12)$$

Из векторной диаграммы токов, учитывая равенство (12), находим

$$I_0 = I_1 \sqrt{\frac{(R_2')^2 + (x_2' S)^2}{(R_2')^2 + (x_2' + b)^2 S^2}}. \quad (13)$$

Подставляя значение I_0 в равенство (12), получим

$$I_2' = \frac{b I_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{S}\right)^2 + (x_2' + b)^2}}. \quad (14)$$

Мощность, обращаемая в тепло в цепи ротора при торможении,

$$\frac{M_m n \cdot 1000}{975} = 3 I_2'^2 R_2,$$

где M_m — тормозной момент, развиваемый двигателем,
 I_2 и R_2 — ток и активное сопротивление цепи ротора.
 Введя сюда значение S , получим

$$\frac{M_m S n_0}{0,975} = 3 I_0 R_2.$$

Так как

$$I_2' R_2' = I_2 R_2,$$

то

$$M_m = \frac{3 I_2'^2 R_2' \cdot 0,975}{S n_0}. \quad (15)$$

Подставляя вместо I_2' его значение по формуле (14) получим (16)

$$M_m = \frac{2,92 b^2 I_1^2 R_2' S}{n_0 [(R_2')^2 + (x_2' + b)^2 S^2]}. \quad (17)$$

Дифференцируя M_m по S и приравнявая производную нулю, получим значение скольжения, при котором момент достигает максимума

$$S_{m1} = \frac{R_2'}{x_2' + b}. \quad (18)$$

Подставляя значение S_{m1} в уравнение (17), получим выражение максимального момента

$$M_{m_{\max}} = \frac{1,46 b^2 I_1^2}{n_0 (x_2' + b)}. \quad (19)$$

В соответствии с этим, уравнение (19) может быть представлено в форме

$$M_m = \frac{2 M_{m_{\max}}}{\frac{S_{m1}}{S} + \frac{S}{S_{m1}}}. \quad (20)$$

Отсюда следует, что уравнение момента при динамическом торможении аналогично формуле Клосса; следовательно, уравнение движения при динамическом торможении ненагруженного двигателя может быть представлено в виде

$$-\frac{2 M_{m_{\max}}}{\frac{S_{m1}}{S} + \frac{S}{S_{m1}}} = J \frac{d\omega_2}{dt}. \quad (21)$$

Так как $\omega_2 = \omega_1 S$, следовательно, $\frac{d\omega_2}{dt} = \omega_1 \frac{dS}{dt}$, уравнение (21) может быть преобразовано в такой вид:

$$-\frac{2M_{m\max}}{\frac{S_{m1}}{S} + \frac{S}{S_{m1}}} = J\omega_1 \frac{dS}{dt},$$

откуда продолжительность торможения

$$t = -\frac{J\omega_1}{2M_{m\max}} \int_{1-S_1}^{0.05} \left(\frac{S_{m1}}{S} + \frac{S}{S_{m1}} \right) dS \quad (22)$$

Здесь S_1 —скольжение, при котором произошло отклонение статора от сети переменного тока. Интегрирование дает

$$t = \frac{J\omega_1}{2M_{m\max}} \left[\frac{(1-S_1)^2 + 0,0025}{2S_{m1}} + S_{m1} \ln \frac{1-S_1}{0,05_1} \right], \quad (23)$$

5. Зависимость скорости от времени при торможении нагруженного двигателя $M_c = \text{const}$

В этом случае уравнение движения может быть написано в следующем виде:

$$\frac{2M_{m\max}}{\frac{S_{m1}}{S} + \frac{S}{S_{m1}}} - M_c = J\omega_1 \frac{ds}{dt},$$

откуда время торможения

$$t = -\frac{J\omega_1}{M_c} \int_{1-S_1}^0 \frac{(S^2 + S_{m1}^2) ds}{S^2 + S_{m1} + \frac{2M_{m\max}}{M_c} S_{m1} S}$$

После приведения подынтегрального выражения к правильной дроби, получим

$$t = -\frac{J\omega_1}{M_c} \int_{1-S_1}^0 ds - \frac{2M_{m\max} S_{m1}}{M_c} \int_{1-S_1}^0 \frac{S ds}{S^2 + S_{m1} + \frac{2M_{m\max}}{M_c} S_{m1} S}. \quad (24)$$

Интегрирование дает

$$t = \frac{J\omega_1}{M_c} (1 - S_1 - S) + \frac{a}{2} \ln \frac{S^2 + bS + S_{m1}^2}{1 + S_1(b-2) + S_1^2 + b + S_{m1}^2} - \frac{ab}{\sqrt{4S_{m1}^2 - b^2}} \arctg \frac{2(S-1-S_1)\sqrt{4S_{m1}^2 - b^2}}{S(4+2b-4S_1) + 2b(1-S_1) + 4S_{m1}^2}, \quad (25)$$

Продолжительность динамического торможения, полученная по форму-



Рис. 7

ле (23) и взятая из осциллограммы рис. 7, при $M_c = 0$ и $I = 50$ амп. для упомянутого выше двигателя, следующая.

По формуле $t = 1,6$ сек. Из осциллограммы $t = 1,7$ сек.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
89	Рис. 3	(Рисунок перевернут)	
92	7 снизу	i_{02}	$-i_{02}$
95	19 снизу	Z	Z_T
97			В уравнении (27) α является показателем степени
98	19 снизу	$Z_m \Delta$	$Z_m V$
101	15 снизу	окружающей	окружностей
178	17 снизу	$s = \frac{n}{n}$	$s = \frac{n}{n_0}$
193	4 сверху	$I_2^2 = \frac{E}{1 + Z^2}$	$I_2^2 = \frac{\varepsilon}{1 + Z^2}$
203	12 сверху	$I = I_m \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_m}{L_m} t} \right) = \dots$	$I = I_m \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_m}{L_m} t} \right) = \dots$
203	17 снизу	закрывающихся	закрывающийся
214	8 снизу	(28)	(26)
221	4 сверху	$\dots \frac{i_0^2 - i''_a}{i_{01} - i''_a}$	$\dots \frac{i_{02} - i''_a}{i_{01} - i''_a}$
318	Подпись к рис. 5	Потери тепла неполноты горения.	Потери тепла от неполноты горения.
318	14 снизу	(рис. 3)	(рис. 4)
323	1 сверху	аттуру	пературу
323	1 сверху	$r = 58$	$r = 587$
325	На рис. 6	$q'_{\text{вод}}$ и $q''_{\text{вод}}$	$q'_{\text{вод}}$ и $q''_{\text{вод}}$
326	33 сверху	$/2 \cdot 3 + 25 = 293 \text{ K},$	$/273 + 25 = 293 \text{ K},$