

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ С РОТОРОМ СПЕЦИАЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

КУЛЕЕВ И. Г.

Переходные режимы короткозамкнутых двигателей нормального исполнения в той или иной степени изучены. Переходными режимами двигателей с ротором Бушера никто не занимался. Автор поставил своей задачей исследовать их.

В результате исследований получены пригодные для практических целей формулы, позволяющие подсчитать продолжительность пуска и торможения ненагруженного двигателя.

Случай разбега и торможения нагруженного двигателя подвергался рассмотрению, однако оно не привело к положительному результату. Уравнения, составленные для этого случая, оказались неразрешимыми.

А. Переходные режимы двигателя с глубоким пазом

Ротор электродвигателя с глубоким пазом имеет одну короткозамкнутую обмотку, состоящую из медных стержней, заложенных в глубокие узкие пазы. В начале пуска электродвигателя в ход, когда частота тока обмотки ротора равна частоте питающей сети, ток, протекающий по стержню, стремится сконцентрироваться в верхней его части, так как верхняя часть сцеплена с меньшим числом магнитных силовых линий потока рассеяния, чем нижняя. Увеличение плотности тока в верхней части стержня эквивалентно, с одной стороны, увеличению активного сопротивления стержня, а с другой стороны, уменьшению его реактивного сопротивления. Увеличение активного сопротивления стержня ротора приводит к увеличению начального момента двигателя, а повышение реактивного сопротивления обмотки ротора ограничивает величину пускового тока двигателя.

По мере повышения скорости вращения ротора частота вторичной цепи уменьшается, уменьшается и разница в величине реактивных сопротивлений верхней и нижней частей стержня, ток распределяется по сечению стержня все более и более равномерно и при нормальной скорости вращения двигатель обращается в обычный короткозамкнутый с той лишь разницей, что двигатель имеет повышенное реактивное сопротивление обмотки ротора, а следовательно, несколько ухудшенный $\cos \varphi$ и уменьшенный M_{max} по сравнению с короткозамкнутым двигателем нормального исполнения. Активное сопротивление ротора можно представить как сумму

$$r_2 = r_0 + K_r r_n, \quad (1)$$

где r_0 —активное сопротивление части обмотки ротора, расположенной вне железа паза, r_n —сопротивление части провода, лежащей в пазу, K_r —коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления. Аналогично можно написать для реактивного сопротивления ротора

$$x_2 = x_0 + K_x x_n, \quad (2)$$

где x_n —реактивное сопротивление части обмотки, лежащей в пазу, x_o —реактивное сопротивление паза части обмотки, расположенной вне паза, K_x —коэффициент, учитывающий уменьшение реактивного сопротивления.

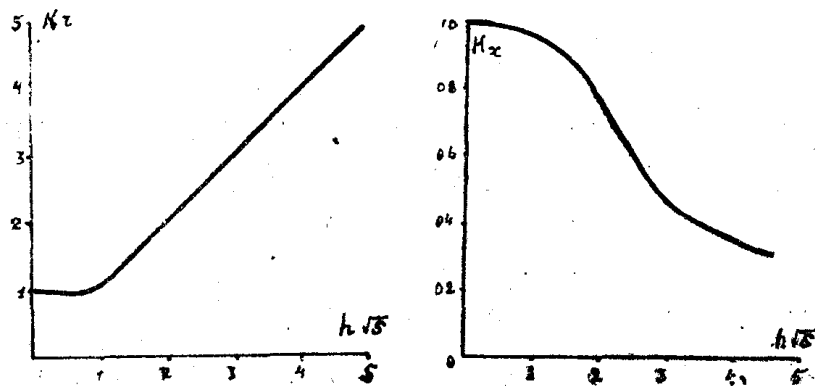


Рис. 1

Значения K_r и K_x могут быть определены по следующим приближенным формулам:

$$K_r = h \sqrt{S}. \quad (3)$$

Здесь h —высота стержня ротора в см

$$K_x = \frac{3}{2h\sqrt{S}}. \quad (4)$$

Как следует из рисунка 1, при малых значениях S — K_r и K_x остаются практически постоянными. При $h\sqrt{S} < 1$ следует брать K_r и K_x равными 1. Следовательно, момент вращения двигателя, когда K_r и K_x больше 1, может быть выражен

$$M = \frac{\mu u_1^2 (hr'_n \sqrt{S} + r_a)}{\omega_1 S \left[\left(r_1 + \frac{hr'_n}{\sqrt{S}} + \frac{r'_o}{S} \right)^2 + \left(x_1 + x'_o + \frac{x'_n \cdot 3}{2h\sqrt{S}} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

и когда K_r и K_x равны 1,

$$M = \frac{\mu u_1^2 r'_2}{\omega_1 S \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{S} \right)^2 + x_k^2 \right]} \quad (6)$$

Здесь r'_2 —приведенное активное сопротивление обмотки ротора, x_k —реактивное сопротивление двигателя при коротком замыкании. При разбеге двигателя вхолостую, когда K_r и K_x больше 1, уравнение моментов, действующих на вал двигателя

$$\frac{\mu u_1^2 (hr'_n \sqrt{S} + r_a)}{\omega_1 S \left[\left(r_1 + \frac{hr'_n}{\sqrt{S}} + \frac{r'_o}{S} \right)^2 + \left(x_1 + x'_o + \frac{3x'_n}{2h\sqrt{S}} \right)^2 \right]} = -J\omega_1 \frac{dS}{dt}$$

и когда K_r и K_x равны 1,

$$\frac{\mu u_1^2 r'_2}{\omega_1 S \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{S} \right)^2 + x_k^2 \right]} = -J\omega_1 \frac{dS}{dt}$$

Следовательно, продолжительность разбега

$$t = -\frac{J\omega^2_1}{mu^2_1} \left\{ \int_{S_1}^{S_2} \frac{\left[\left(r_1 + \frac{hr'_n}{\sqrt{S}} + \frac{r'_e}{S} \right)^2 + \left(x_1 + x'_e + \frac{3x'_n}{2h\sqrt{S}} \right)^2 \right] S dS}{hr'_n \sqrt{S} + r'_e} + \int_{S_1}^{S_2} \frac{\left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{S} \right)^2 + x'^2_{\kappa} \right] S dS}{r'^2_2} \right\}. \quad (7)$$

Здесь S_1 — скольжение, при котором $h\sqrt{S} = 1$, S_2 — скольжение, до которого разбегаются двигатель.

Решение интеграла (7) имеет следующий вид:

$$t = \frac{2J\omega^2_1}{mu^2_1} \left[A(S_1^{3/2} - 1) + B(S_1 - 1) + C(\sqrt{S} - 1) + D \ln \frac{\sqrt{S_1} + \frac{r'_e}{hr'_n}}{1 + \frac{r'_e}{hr'_n}} + r'_e \ln(VS_1 - 1) + \frac{r'^2_1 + x'^2_{\kappa}}{4r'^2_2} (S_2 - S_2) + r_1(S_2 - S_1) + \frac{r'_2}{2} \ln \frac{S_1}{S_2} \right] \quad (8)$$

$$\text{Здесь } A = \frac{r'^2_1 + x'^2_1}{3hr'_n}; \quad B = r_1 + \frac{x_1 + x'_n}{h^2r'_n} - r'_e \frac{r'^2_1 + x'^2_1}{2h^2r'^2_2};$$

$$C = \frac{r'^2_e (r'^2_1 + x'^2_1)}{h^3r'^3_n} - r'_n \left(\frac{2r_1}{hr'_n} + \frac{3x_1x'_n}{h^3r'^2_n} \right) + \frac{2r'_e r_1}{hr'_n} + hr'_n + \frac{9x'^2_n}{4h^3r'^3_n};$$

$$D = r'^2_e \left(\frac{2r_1}{h^2r'^2_n} + \frac{3x'^2_n}{h^4r'^3_n} \right) - \frac{r'^3_e (r'^2_1 + x'^2_1)}{h^4r'^4_n} - r'_e \left(\frac{2r'_e r_1}{h^2r'^2_e} + 1 \right) - \frac{9x'^2_n}{4h^4r'^2_n}.$$

Торможение двигателя по методу противовключения

Аналитическое выражение зависимости скорости от времени при торможении по методу противовключения отличается от равенства (7) пределами интегрирования. Следовательно, продолжительность реверсирования может быть выражена—

$$t_n = -\frac{J\omega^2_1}{mu^2_1} \left\{ \int_2^{S_1} \frac{\left[\left(r_1 + \frac{hr'_n}{\sqrt{S}} + \frac{r'_e}{S} \right)^2 + \left(x_1 + x'_e + \frac{3x'_n}{2h\sqrt{S}} \right)^2 \right] S dS}{hr'_n \sqrt{S} + r'_e} + \int_{S_1}^{S_2} \frac{\left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{S} \right)^2 + x'^2_{\kappa} \right] S dS}{r'^2_2} \right\}. \quad (9)$$

Интегрирование дает

$$t_n = \frac{2J\omega_1^2}{m u^2} \left[B(S_1 - 2) + C(\sqrt{S} - \sqrt{2}) + D l_n \frac{\sqrt{S_1} + \frac{r'_e}{hr'_n}}{\sqrt{2} + \frac{r'_e}{nr'_n}} + \right. \\ \left. + r'_e l_n (\sqrt{S} - \sqrt{2}) + \frac{r_1^2 + x_n^2}{4r'_e} (S_2^2 - S_1^2) + r_1 (S_2 - S_1) + \frac{r_1^2}{2} l_n \frac{S_1}{S_2} \right] \quad (10)$$

Динамическое торможение

Потери в роторе при динамическом торможении могут быть выражены

$$m l^2 \left(r_e + r_n h \sqrt{S} \right) = \frac{m \beta^2 I_1^2 (r_e + r_n h \sqrt{S})}{S \left[\left(\frac{r_e + r_n h \sqrt{S}}{S} \right)^2 + \left(x_e + \beta + \frac{3x_n}{2h\sqrt{S}} \right)^2 \right]} \quad (11)$$

Здесь $\beta = \frac{U}{I_0}$, I_0 — ток холостого хода, I_1 — ток статора. Момент, развиваемый двигателем, —

$$M = \frac{m \beta^2 I_1^2 (r_e + r_n h \sqrt{S})}{\omega_1 S \left[\left(\frac{r_e + r_n h \sqrt{S}}{S} \right)^2 + \left(x_e + \beta + \frac{3x_0}{2h\sqrt{S}} \right)^2 \right]} \quad (12)$$

Уравнение моментов, действующих на вал двигателя при торможении, вхолостую, —

$$\frac{m \beta^2 I_1^2 (r_e + r_n h \sqrt{S})}{\omega_1 S \left[\left(\frac{r_e + r_n h \sqrt{S}}{S} \right)^2 + \left(x_e + \beta + \frac{3x_0}{2h\sqrt{S}} \right)^2 \right]} = J j \omega_1 \frac{dS}{dt}$$

Откуда продолжительность торможения —

$$t_0 = \frac{2J\omega_1^2}{m \beta^2 I_1^2} \left[A(2S_1 - 1) + B(\sqrt{S_1} - \sqrt{1 - S_1}) + C l_n \frac{\sqrt{S_1} - \frac{r_e}{hr_n}}{\sqrt{1 - S_1} + \frac{r_e}{hr_n}} + \right. \\ \left. + r_e l_n (\sqrt{S_1} - \sqrt{1 - S_1}) + \frac{x_2}{4r_2} (S_2^2 - S_1^2) + \frac{r_2}{2} l_n \frac{S_1}{S_2} \right] \quad (13)$$

$$\text{Здесь } A = \frac{x_n}{h^2 r_n} - r_e; \quad B = r_n \left(hr_n + \frac{9x_n^2}{4h^3 r_n^2} \right);$$

$$D = r_e^2 \left(\frac{3x_n^2}{h^4 r_n^3} \right) + \left(1 - \frac{9x_n^2}{4h^4 r_n^2} \right) r_e.$$

На рис. 2 и 3 приведены осциллограммы тока статора для разбега и торможения по методу противовключения. По осциллограмме (рис. 2) продолжительность пуска 0.9 сек, по формуле (8) 0.96 сек. По осциллограм-

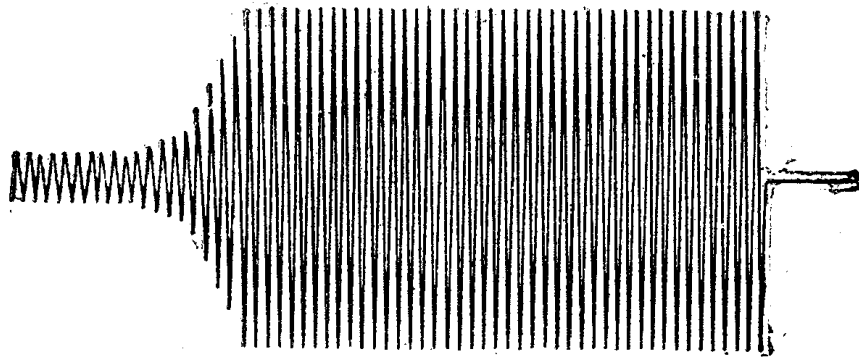


Рис. 2

ме (рис. 3) продолжительность реверсирования 1.65 сек, по формуле (10) — 1.72 сек. Осциллограммы тока сняты для двигателя 5 квт, 1440 об/мин,

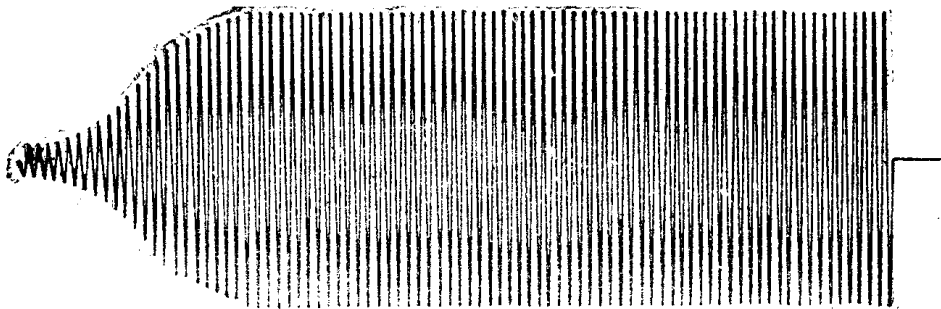


Рис. 3

380 в, 10.5 а, соединение обмоток Δ/Δ , $Z_k = 3.5_{ом}$; $X_k = 2.8_{ом}$; $r_k = 2.11_{ом}$; $h = 3.5_{см_{ом}}$; $r'_в = 0.16_{ом}$; $X'_в = 0.72_{ом}$.

В. Переходные режимы двигателя с ротором Бушера

Для разного рода специальных случаев, где при трогании с места момент сопротивления достаточно высок и остается почти постоянным за весь период пуска, применяют электродвигатель с ротором Бушера. Сюда относятся механизмы с большим статическим и динамическим моментом сопротивления (дробилки, конвейеры, поршневые компрессоры, шаровые мельницы, центрофуги и другие). При рассмотрении переходных режимов предполагалось, что число стержней пусковой A и рабочей B клеток одинаково, что стержни находятся в пазах один над другим (рис. 4) и соединены со своими кольцами.

По аналогии с выражением для момента вращения машины нормального исполнения для двигателя с ротором Бушера можем написать

$$M = \frac{m u_1^2 r_{2f}}{\omega_1 S \left[\left(r_1 + \frac{r_{2f}}{S} \right)^2 + \left(x_1 + x_{2f} \right)^2 \right]} \quad (14)$$

Здесь U_1 —первичное напряжение, ω_1 —угловая частота статора, r_1 —активное сопротивление первичной обмотки, x_1 —реактивное сопротивление пер-

вичной обмотки, S —скольжение, r_2 —активное сопротивление обмотки ротора, x_{2f} —реактивное сопротивление ее.

$$r_{2f} = \frac{r_B(r_A + r_B) + S^2 x_B^2}{(r_A + r_B)^2 + S^2 x_B^2} \cdot r_A \quad (15)$$

$$x_{2f} = \frac{r_A^2 x_B}{(r_A + r_B)^2 + S^2 x_B^2} \quad (16)$$

Заменяя в равенстве (14) (r_{2f} и x_{2f}) их значениями по равенствам (15 и 16), будем иметь

$$M = \frac{m u_1^2}{\omega_1 S} \left[\frac{x_1^2 + r_1^2}{r_A} S + 2r_1 + \frac{(Ar_B + S^2 x_B^2) r_A (A^2 + S^2 x_B^2) S}{B_1 S^4 + C_1 S^2 + D_1} \right]$$

Здесь $A = r_A + r_B$; B_1, C_1, D_1 —коэффициенты.

Из рис. 4 видно, что ток, текущий во внутреннем стержне A , создает поток рассеяния Φ_B , сцепленный со стержнем B .

На этом чертеже показан еще поток рассеяния Φ_{AB} , охватывающий оба стержня A и B . Поток Φ_{AB} создается геометрической суммой токов, текущих в стержнях верхней и нижней клеток.

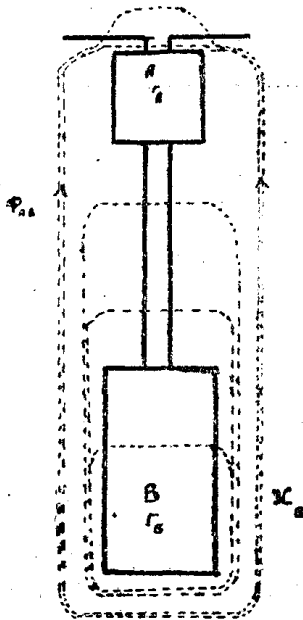


Рис. 4

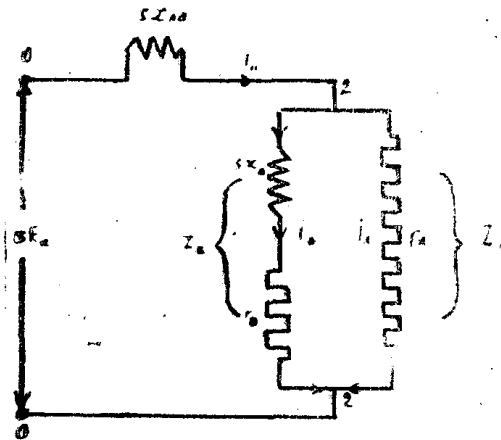


Рис. 5

Если сопротивление X_{AB} , которое соответствует потоку Φ_{AB} , а также реактивное сопротивление клетки A , как весьма малые величины, не учитывать, то схема замещения для ротора Бушера может быть представлена следующим образом (рис. 5), где r_A —сопротивление клетки A постоянному току; r_B —сопротивление клетки B постоянному току; X_B —реактивное сопротивление клетки B при частоте 50 Hz . Подставляя выражение для M в уравнение моментов, действующих на вал двигателя при разбеге вхолостую, будем иметь следующее выражение для продолжительности пуска

$$t = \frac{J \omega_1^2}{m u_1^2} \left[\int_0^{S_1} \frac{r_A}{(x_1^2 + r_1^2) S} dS + \int_0^{S_1} \frac{dS}{2r_1} + \int_0^{S_1} \frac{(B_1 S^4 + C_1 S^2 + D) dS}{(Ar_B + S^2 x_B^2) r_A (A^2 + S^2 x_B^2) S} \right] \quad (17)$$

Интегрирование дает:

$$t = \frac{J\omega_1^2}{mu_1^2} \left[\frac{1-S}{2r_1} + \frac{r_A}{x_1^2+r_1^2} \ln \frac{1}{S_1} + Bl_n \frac{1}{S_1} + \right. \\ \left. + \frac{C}{2x_B^2 r_A} \ln \frac{1 + \frac{Ar_B}{x_B^2}}{S_1^2 + \frac{Ar_B}{x_B^2}} + \frac{E}{2x_B^2} \ln \frac{1 + \frac{Ar_B}{x_B^2}}{S_1 + \frac{Ar_B}{x_B^2}} \right] \quad (18)$$

$$\text{Здесь } B = \frac{r_B \cdot r_A}{A}; \quad E = -\frac{x_1^2+r_1^2}{r_A} 2A^2 - \frac{x_B^2 r_A}{A+r_B} \left(3r_B + \frac{A^3}{r_A^2} + A \right) + \\ + x_1^2 r_A \left(\frac{r_B}{A} + \frac{2A}{A+r_B} \right) + \frac{2A}{A+r_B} \left(\frac{r_1 A^3}{r_A} - x_1 r_A x_B + x r_A^2 r_B \right). \\ C = (x_1^2+r_1^2) \left(3Ar_B + A^2 \right) + \frac{x_B^2 r_A \cdot r_B}{A} \left(1 - \frac{2r_B}{A} + \frac{3r_B r_A^2 + A^3 - Ar_A}{r_A^2 (A+r_B)} \right) - \\ - \frac{r_A r_B 2A}{A(A+r_B)} \left(\frac{r_1^2 A^2}{r_B} - x_1 r_A x_B + x r_A^2 r_B \right) + Ax_B^2 + 2x r_A^2 x_B.$$

Если интегрирование в равенстве (17) провести от S_1 и до 1, то получим продолжительность торможения по методу противовключения.

Динамическое торможение

При динамическом торможении статор двигателя после отключения от питающей сети подключается к сети постоянного тока, а 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 синхронный генератор переменной частоты, создающий тормозной момент. На рис. 6

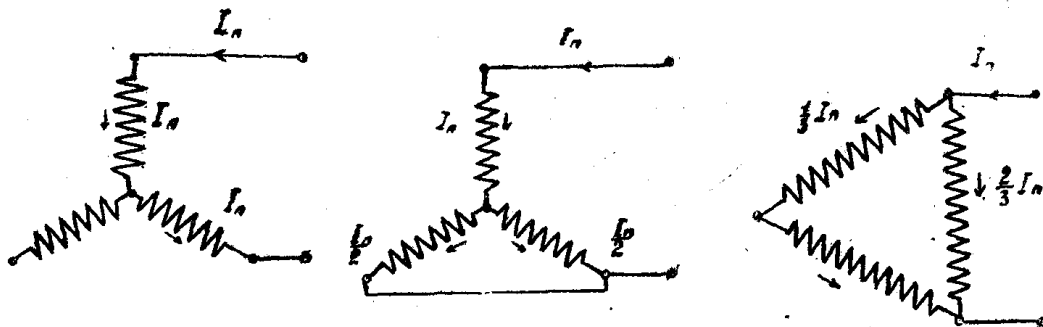


Рис. 6

даны основные схемы подключения 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 МДС можно определить геометрическим сложением МДС отдельных фаз.

Аналогично нормальной работе для тока ротора можем написать —

$$I'_2 = \frac{E'_2 S}{\sqrt{(r'_2)^2 + (x'_2 S)^2}} \quad (19)$$

Если пренебречь насыщением, то можно считать

$$E_2 = \vartheta I_0$$

Здесь I_0 — намагничивающий ток, ϑ — коэффициент пропорциональности

$$\vartheta = \frac{E_2}{I_0} = \frac{E_1}{I_0}$$

Здесь E_1 — ЭДС статора. Заменяя E_2 в формуле (19), будем иметь

$$I_2 = \frac{\vartheta I_0 S}{\sqrt{(r'_{2f})^2 + (x'_{2f} S)^2}} \quad (20)$$

Подставляя значение I_2 в равенство моментов, действующих на вал двигателя при динамическом торможении, будем иметь

$$M_m = \frac{m \vartheta^2 I_0^2 r'_{2f}}{\omega_1 S \left[\left(\frac{r'_{2f}}{S} \right)^2 + x_{2f}^2 \right]} \quad (21)$$

Заменяя I_0 его значением из векторной диаграммы токов, будем иметь

$$M_m = \frac{m \vartheta^2 I_1^2 r'_{2f}}{\omega_1 S \left(\frac{r'_{2f}}{S} \right)^2 + \left(x'_{2f} + \vartheta \right)^2} \quad (22)$$

Заменяя r'_{2f} и x'_{2f} их значениями по равенствам 14 и 15, будем иметь —

$$M_m = \frac{m \vartheta^2 I_1^2 [(r_B A + S x_B^2) r_A (A^2 + S^2 x_B^2)] S}{\omega_1 \{ [r_B A + S^2 x_B^2] r_A + [r_A^2 x_B + \vartheta (A^2 + S^2 x_B^2)]^2 S^2 \}} \quad (23)$$

Из уравнения моментов, действующих на вал двигателя, при торможении ненагруженного двигателя, найдем продолжительность торможения —

$$t_m = - \frac{J \omega_1^2}{m \vartheta I_1^2} \left[\int_1^{S_1} S \frac{\vartheta^2}{r_A} dS + \int \frac{(B_1 S^4 + C_1 S^2 + D_1) ds}{(r_B A + S^2 x_B^2) r_A (A^2 + S^2 x_B^2) S} \right]$$

Здесь B_1 , C_1 , и D_1 — коэффициенты. Интегрирование дает

$$t_m = - \frac{J \omega_1^2}{m \vartheta I_1^2} \left[\frac{\vartheta^2}{2 r_A} \left(1 - S_1^2 \right) + B l_n \frac{1}{S_1} + \frac{C}{2 x_B^2} l_n \frac{1}{S_1} \right] \quad (24)$$

$$\text{Здесь } B = \frac{r_A r_B}{A}; \quad C = x_B^2 r_A^2 \left(2 \vartheta + \frac{x_B}{A} \right) + \vartheta^2 (r_A^2 + r_A r_B)$$