

Название работы: Математическое моделирование асинхронного электродвигателя.

Цель работы: исследовать статические и динамические режимы АД.

Асинхронной машиной называется машина переменного тока, у которой только первичная обмотка получает питание от электрической сети с постоянной частотой, а вторая обмотка замыкается накоротко или на электрическое сопротивление. Токи во вторичной обмотке появляются в результате действия ЭДС электромагнитной индукции. Их частота ω_2 зависит от угловой скорости вращения ротора ω .

Основы принципа работы асинхронного двигателя

Асинхронные машины используются в основном как двигатели. Наибольшее распространение получили трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, имеющие трехфазную обмотку на статоре и питающиеся от трехфазной сети. Трехфазный асинхронный двигатель является наиболее распространенным двигателем переменного тока.

В асинхронных двигателях трехфазная обмотка статора, питающаяся переменным током частоты:

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2 \cdot \pi}, \quad (1)$$

создает магнитное поле, вращающееся с частотой $\omega_0 = \omega_1 / p$, где p – число пар полюсов на статоре.

Вращающееся магнитное поле статора наводит в витках обмотки короткозамкнутого ротора ЭДС. Под действием ЭДС по обмоткам ротора протекают токи. При взаимодействии этих токов с вращающимся магнитным полем возникает электромагнитный момент M , который приводит во вращение ротор с частотой ω_r . Скорость вращения ротора не может быть равной скорости вращения поля, так как при этом не будет индуцироваться вторичная ЭДС, что приведет к отсутствию вращающегося момента. Поэтому ротор при своем движении должен отставать от магнитного поля – проскальзывать. По этой причине наименование двигателя – асинхронный, а один из основных параметров – скольжение:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0}. \quad (2)$$

Скольжение является относительной величиной и в двигательном режиме изменяется в пределах $0 < s \leq 1$, причем $s = 0$ соответствует синхронной работе, а $s = 1$ пуску двигателя. При этом частота ЭДС и токов в обмотке ротора в соответствии с соотношением $f_2 = s \cdot f_1$ изменяется от $f_2 = 50$ Гц до $f_2 = s_n \cdot f_1$. Номинальные значения $s_n = 0,02 - 0,06$ для серии асинхронных двигателей.

Расчетные схемы асинхронного двигателя

Математическая модель асинхронного двигателя (АД), расчетная схема которого приведена в осях $(u, v, 0)$ на рис. 1., представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений. Эти уравнения трансформируются в зависимости от системы координат, отличающихся угловой скоростью ω_k . Основное преимущество использования различных координатных осей – это возможность выделения интересующей исследователя переменной и получения постоянных коэффициентов.

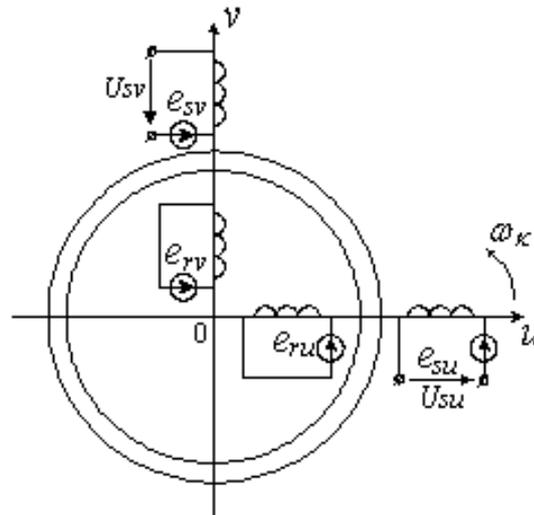


Рис. 1. Расчетная схема асинхронного двигателя

Уравнения, описывающие переходные процессы в асинхронном двигателе (АД), в системе координат, вращающейся с произвольной скоростью ω_k , имеют вид [1]:

$$\begin{aligned}
 \vec{U}_s &= R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_s + j\omega_k \vec{\Psi}_s; \\
 0 &= R_r \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_r + j(\omega_k - \omega) \vec{\Psi}_r; \\
 M &= \frac{3}{2} p J_m (\vec{\Psi}_s \times \vec{i}_s); \\
 J_\Sigma \frac{d}{dt} \omega &= M - M_c,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где $\vec{i}_s, \vec{i}_r, \vec{\Psi}_s, \vec{\Psi}_r, \vec{U}_s$ – мгновенные значения обобщенных пространственных векторов токов, потокосцеплений и напряжений обмоток статора и ротора; R_s, R_r – активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора, ω, ω_k – угловые скорости ротора и координатных осей соответственно; M, M_c – электромагнитный момент двигателя и момент его сопротивления на его валу; J_Σ – суммарный момент инерции; p – число пар полюсов.

Для расчета характеристик асинхронного двигателя в установившемся режиме, как правило, пользуются его математической моделью, которая в

общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения, рис. 2.

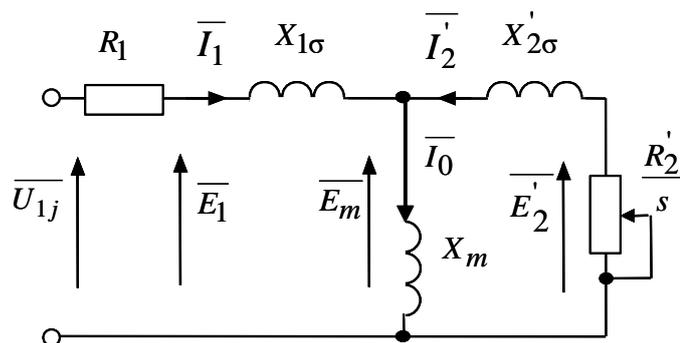


Рис. 2. Схема замещения асинхронного двигателя

На рис. 2. приняты следующие обозначения:

U_{1j} – фазное напряжение обмотки статора;

R_1 – активное сопротивление обмотки статора;

$X_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

I_1 – ток обмотки статора;

E_1 – ЭДС обмотки статора;

R_2' – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$X_{2\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ – скольжение;

$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / z_p$ – синхронная угловая скорость;

ω – угловая скорость асинхронного двигателя;

p – число пар полюсов;

f_1 – значение частоты напряжения переменного тока, подводимого к обмотке статора;

E_m – ЭДС от главного магнитного потока машины;

E_2' – ЭДС обмотки ротора, приведенная к обмотке статора.

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1j} - \bar{E}_m - j \cdot X_{1\sigma} \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 &= 0; \\ \bar{E}_m + j \cdot X_{2\sigma} \cdot \bar{I}_2 + R_2' \cdot \bar{I}_2 / s &= 0; \\ \bar{I}_1 + \bar{I}_2 - \bar{I}_0 &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Ток ротора I_2' , приведенный к обмотке статора асинхронного двигателя, определяется зависимостью, получаемой непосредственно из схемы замещения асинхронного двигателя:

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}}, \quad (5)$$

где $X_{\text{éí}} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Уравнение $I_2' = f(s)$ называется электромеханической характеристикой асинхронного двигателя.

Для короткозамкнутого асинхронного двигателя представляет интерес другая электромеханическая характеристика $I_1 = f(s)$, отражающая зависимость тока статора I_1 от скольжения s . Ток статора I_1 определяется путем сложения вектора тока намагничивания \bar{I}_0 и вектора тока ротора \bar{I}_2' :

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_2'. \quad (6)$$

Полагая ток намагничивания асинхронного двигателя I_0 реактивным, ток статора I_1 через приведенный ток ротора I_2' можно найти по формуле [8]

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2}, \quad (7)$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2}}. \quad (8)$$

Основной выходной координатой силового привода является электромагнитный момент, значение которого для асинхронного двигателя определяется по выражению

$$M_j = \frac{m_1 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + R_2' \cdot s^{-1} \right)^2 + \left(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \right)^2 \right]}, \quad (9)$$

где m_1 – число фаз статора.

Анализ (9) показывает, что механическая характеристика асинхронного двигателя имеет критический момент и критическое скольжение, которые находятся при условии $dM/ds = 0$.

Тогда критический момент

$$M_{\text{é}} = \frac{m_1 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{éí}}^2} \right)}, \quad (10)$$

критическое скольжение

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}}. \quad (11)$$

Знак «+» означает, что критический момент и скольжение относятся к двигательному режиму, знак «-» – к генераторному режиму рекуперативного торможения.

В качестве примера рассмотрим расчет асинхронного электродвигателя типа АИР112М2 со следующими паспортными данными:

$P_n = 7,5$ кВт – номинальная мощность двигателя;

$U_{лн} = 380$ В – номинальное линейное напряжение;

$U_{1ф} = 220$ В – фазное напряжение;

$n_0 = 3000$ об/мин – синхронная частота вращения;

$s_n = 3,5$ % – номинальное скольжение;

$\eta_n = 0,875$ – КПД в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка);

$\cos \varphi_n = 0,88$ – коэффициент мощности;

$k_i = \frac{I_n}{I_n} = 7,5$ о.е. – кратность пускового тока;

$k_n = \frac{M_n}{M_n} = 2$ о.е. – кратность пускового момента;

$k_{max} = \frac{M_k}{M_n} = 2,2$ о.е. – кратность максимального момента;

$J_{дв} = 0,01$ кг·м² – момент инерции.

Задаем параметры в MathCAD:

$P := 7500$	$KPD := 0.875$	$zр := 1$
$U := 220$	$\cos := 0.88$	$J := 0.01$
$n0 := 3000$	$Ki := 7.5$	$f := 50$
	$Kр := 2$	
$Sn := 0.035$	$Kmax := 2.2$	

Синхронная угловая частота вращения:

$$w0 := \frac{\pi \cdot n0}{30} \quad w0 = 314.159$$

Номинальная угловая частота вращения:

$$Wn := w0 \cdot (1 - Sn) \quad Wn = 303.164$$

Номинальный момент двигателя:

$$Mn := \frac{P}{Wn} \quad Mn = 24.739$$

Номинальный ток статора:

$$In := \frac{P}{3 \cdot U \cdot \cos \cdot KPD} \quad In = 14.758$$

Коэффициент мощности при частичной нагрузке:

$$\cos\phi := 0.98 \cdot \cos \quad \cos\phi = 0.862$$

Ток статора двигателя при частичной нагрузке:

$$I_{11} := \frac{0.75 \cdot P}{3 \cdot U \cdot \cos\phi \cdot \text{KPD}} \quad I_{11} = 11.294$$

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 := \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left[\frac{0.75 \cdot \ln(1 - S_n)}{1 - 0.75 \cdot S_n} \right]^2}{1 - \left[\frac{0.75 \cdot (1 - S_n)}{1 - 0.75 \cdot S_n} \right]^2}} \quad I_0 = 4.023$$

Соотношение для расчета критического скольжения (в первом приближении принимаем коэффициент $\beta=1$):

$$\beta := 1$$

$$S_k := S_n \cdot \frac{K_{\max} + \sqrt{K_{\max}^2 - [1 - 2 \cdot S_n \cdot \beta \cdot (K_{\max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot S_n \cdot \beta \cdot (K_{\max} - 1)} \quad S_k = 0.16$$

Ряд промежуточных коэффициентов для определения внутренних параметров двигателя:

$$C_1 := 1 + \frac{I_0}{2 \cdot K_i \cdot \ln} \quad C_1 = 1.018$$

$$A_1 := \frac{3 \cdot U^2 \cdot (1 - S_n)}{2 \cdot C_1 \cdot K_{\max} \cdot P} \quad A_1 = 4.17$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R_2 := \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{S_k} \right) \cdot C_1} \quad R_2 = 0.564$$

Активное сопротивление статорной обмотки:

$$R_1 := C_1 \cdot R_2 \cdot \beta \quad R_1 = 0.574$$

Параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$\gamma := \sqrt{\frac{1}{S_k^2} - \beta^2} \quad \gamma = 6.179$$

Сопротивление короткого замыкания:

$$X_{kn} := \gamma \cdot C_1 \cdot R_2 \quad X_{kn} = 3.55$$

Индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$X_2 := \frac{0.58 \cdot X_{kn}}{C_1} \quad X_2 = 2.022$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статорной обмотки:

$$X_1 := 0.42 \cdot X_{kn} \quad X_1 = 1.491$$

ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_m := \sqrt{(U \cdot \cos - R_1 \cdot I_n)^2 + \left(U \cdot \sqrt{1 - \cos^2} - X_1 \cdot I_n \right)^2} \quad E_m = 202.671$$

Индуктивное сопротивление намагничивания определится как:

$$X_m := \frac{E_m}{I_0} \quad X_m = 50.379$$

Естественная механическая характеристика $M(s)$ асинхронного двигателя рассчитывается по выражению:

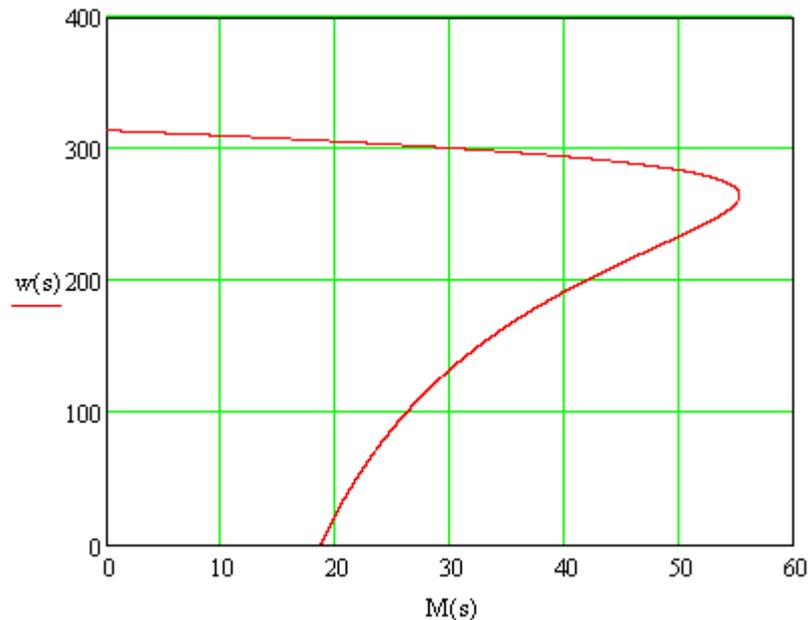
$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}$$

По результатам расчета строится механическая характеристика $\omega(M)$, где $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$.

$$s := 0, 0.0001 \dots 1$$

$$M(s) := \frac{3 \cdot U^2 \cdot R_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m} \right)^2 \right]}$$

$$\omega(s) := \omega_0 \cdot (1 - s)$$



Электро-механическая характеристика $I_1(s)$ рассчитывается по выражению:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)},$$

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\text{фн}}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\text{кн}})^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu} \right)^2}};$$

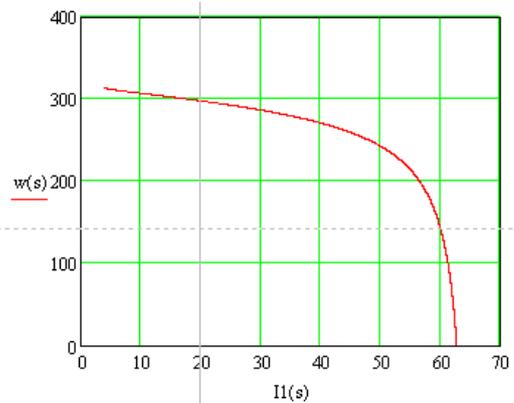
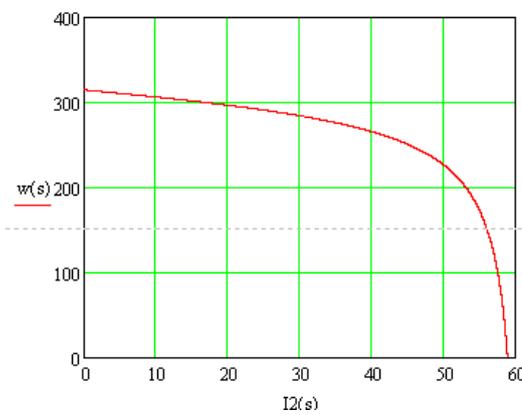
$$I_0 = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2}}; \quad \sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{KH})^2}}$$

В MathCAD:

$$I_2(s) := \frac{U}{\sqrt{X_{kn}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m}\right)^2}}$$

$$\sin(s) := \frac{X_{kn}}{\sqrt{X_{kn}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2}}$$

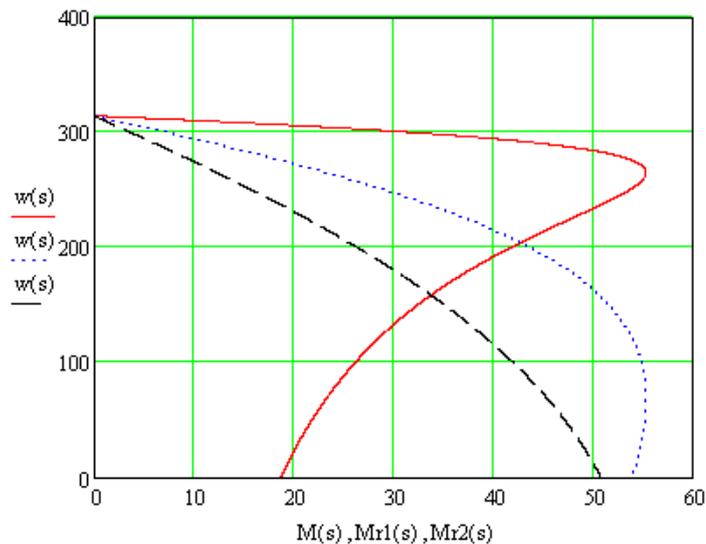
$$I_1(s) := \sqrt{I_0^2 + I_2(s)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2(s) \cdot \sin(s)}$$



Построим статические механические характеристики при изменении активных сопротивлений ротора.

$$Mr1(s) := \frac{3 \cdot U^2 \cdot R_2 \cdot 5}{w_0 \cdot s \cdot \left[X_{kn}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2 \cdot 5}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot 5}{s \cdot X_m}\right)^2 \right]}$$

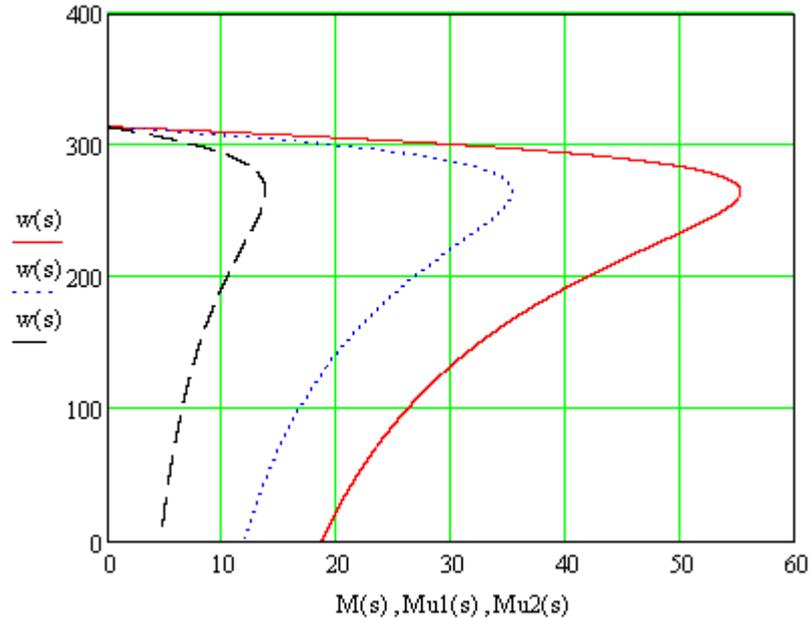
$$Mr2(s) := \frac{3 \cdot U^2 \cdot R_2 \cdot 10}{w_0 \cdot s \cdot \left[X_{kn}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2 \cdot 10}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot 10}{s \cdot X_m}\right)^2 \right]}$$



Построим статические механические характеристики при понижении амплитуды питающего напряжения.

$$\text{Mu1}(s) := \frac{3 \cdot (0.8 \cdot U)^2 \cdot R2}{w0 \cdot s \cdot \left[Xkn^2 + \left(R1 + \frac{R2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R1 \cdot R2}{s \cdot Xm} \right)^2 \right]}$$

$$\text{Mu2}(s) := \frac{3 \cdot (0.5 \cdot U)^2 \cdot R2}{w0 \cdot s \cdot \left[Xkn^2 + \left(R1 + \frac{R2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R1 \cdot R2}{s \cdot Xm} \right)^2 \right]}$$



Анализ динамических режимов работы АД

Математическое описание АД в неподвижной системе координат α - β в нормальной форме Коши выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot \left[U_{s\alpha}(t) - R_e \cdot i_{s\alpha}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) + K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t) \right] \\ \frac{di_{s\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot \left[U_{s\beta}(t) - R_e \cdot i_{s\beta}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) - K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t) \right] \\ \frac{d\psi_{r\alpha}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\alpha}(t) - A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) - z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t) \\ \frac{d\psi_{r\beta}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\beta}(t) - A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) + z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot \left\{ K_m \cdot \left[\psi_{r\alpha}(t) \cdot i_{s\beta}(t) - \psi_{r\beta}(t) \cdot i_{s\alpha}(t) \right] - M_c \right\} \end{cases}$$

Здесь $i_{s\alpha}(t)$, $i_{s\beta}(t)$, $U_{s\alpha}(t)$, $U_{s\beta}(t)$ – компоненты пространственных векторов тока и напряжения статора; $\psi_{r\alpha}(t)$, $\psi_{r\beta}(t)$ – компоненты пространственного

вектора потокосцепления ротора; $R_e = R_s + R_r \cdot K_r^2$, $L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$, $K_r = \frac{L_m}{L_r}$,

$A_r = \frac{R_r}{L_r}$, $K_m = 1,5 \cdot K_r \cdot z_p$ – коэффициенты, учитывающие параметры АД;

$L_s = L_{s\sigma} + L_m$, $L_r = L_{r\sigma} + L_m$ – полные индуктивности обмоток статора и ротора; $L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора.

Определим параметры, необходимые для расчета динамики двигателя **(желательно создать новый файл MathCAD!)**.

Индуктивность рассеяния статорной обмотки:

$$L_{\sigma 1} := \frac{X1}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad L_{\sigma 1} = 4.745 \times 10^{-3}$$

Индуктивность рассеяния роторной обмотки, приведенная к статорной:

$$L_{\sigma 2} := \frac{X2}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad L_{\sigma 2} = 6.436 \times 10^{-3}$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_m := \frac{Xm}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad L_m = 0.16$$

Полная индуктивность цепи статора:

$$L1 := L_{\sigma 1} + L_m \quad L1 = 0.165$$

Полная индуктивность цепи ротора:

$$L2 := L_{\sigma 2} + L_m \quad L2 = 0.167$$

Коэффициенты для расчета динамики двигателя:

$$K_r := \frac{L_m}{L2} \quad K_r = 0.961$$

$$L_e := L1 - \frac{L_m^2}{L2} \quad L_e = 0.011$$

$$R_e := R1 + R2 \cdot K_r^2 \quad R_e = 1.096$$

$$A_r := \frac{R2}{L2} \quad A_r = 3.382$$

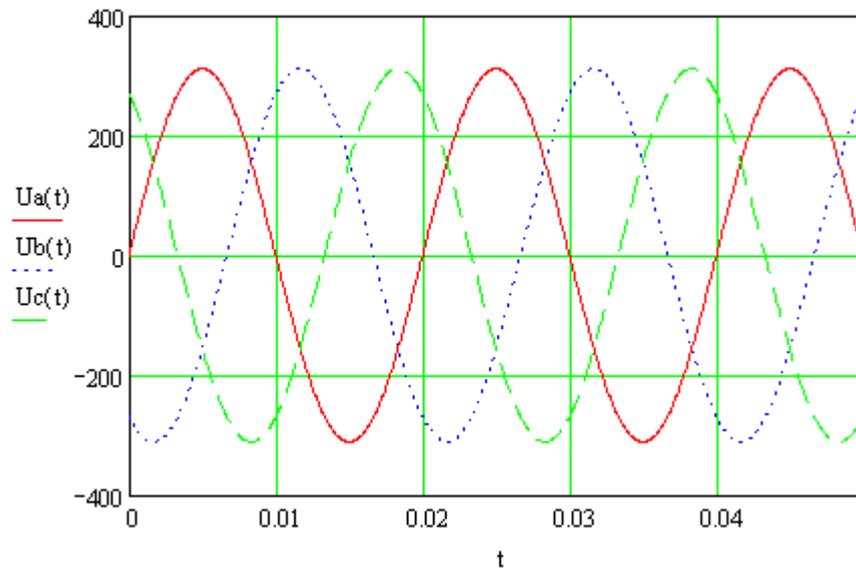
$$K_m := \frac{3}{2} \cdot K_r \cdot z_p \quad K_m = 1.442$$

Задаем трехфазную систему статорных напряжений:

$$U_a(t) := \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

$$U_b(t) := \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$$

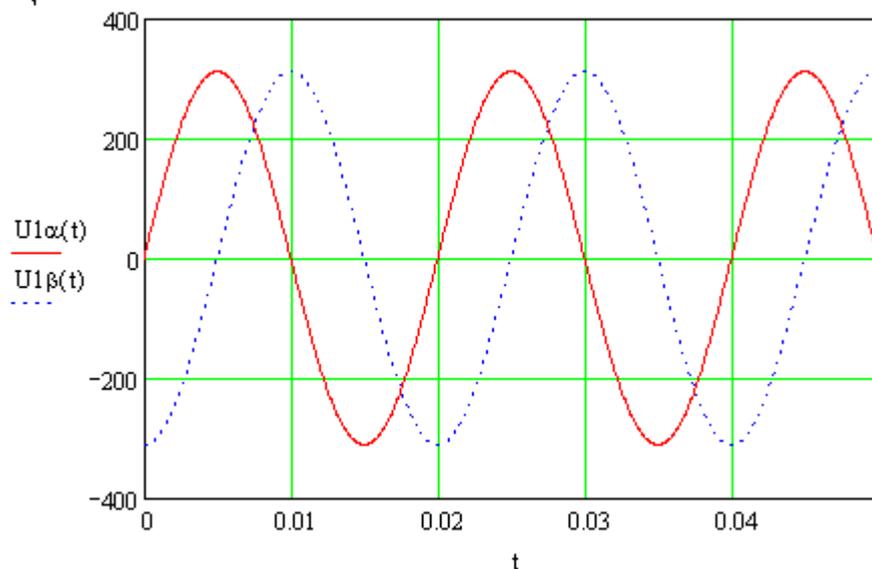
$$U_c(t) := \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$$



Переходим с помощью преобразования Кларка к двухфазной неподвижной системе координат:

$$U_{1\alpha}(t) := U_a(t)$$

$$U_{1\beta}(t) := \frac{U_a(t) + 2 \cdot U_b(t)}{\sqrt{3}}$$



Задаем момент сопротивления АД:

$$M_c(t) := \begin{cases} M_n & \text{if } t \geq 0.4 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Шаг и количество точек расчета переходных процессов численным методом Эйлера:

$$h := 0.0001 \quad k := 0..8000$$

Нулевые начальные условия:

$$\begin{pmatrix} t_0 \\ I_{sa_0} \\ I_{sb_0} \\ \psi_{ra_0} \\ \psi_{rb_0} \\ w_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

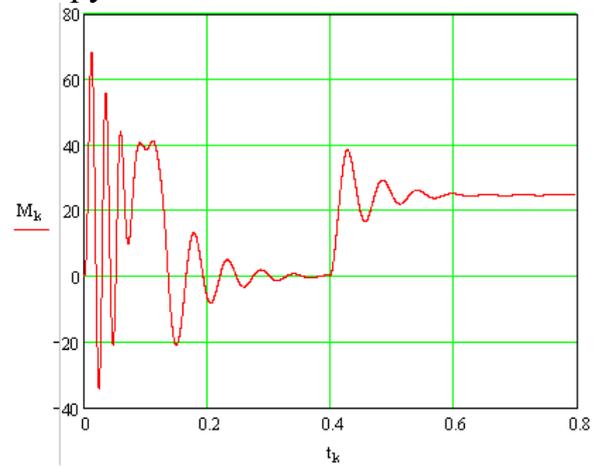
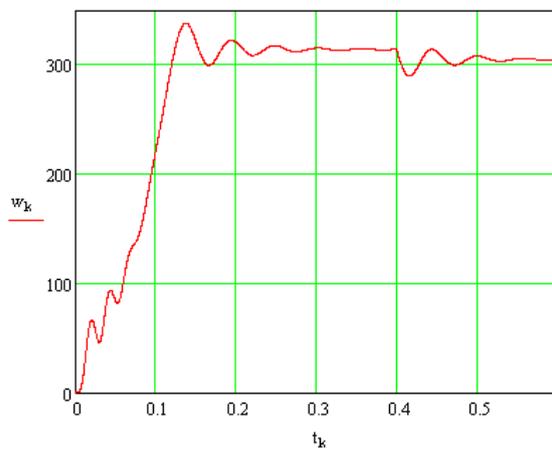
Алгоритм метода Эйлера:

$$\begin{pmatrix} t_{k+1} \\ I_{sa_{k+1}} \\ I_{sb_{k+1}} \\ \psi_{ra_{k+1}} \\ \psi_{rb_{k+1}} \\ w_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_k + h \\ I_{sa_k} + \frac{h}{Le} \cdot (U1\alpha(t_k) - Re \cdot I_{sa_k} + Kr \cdot Ar \cdot \psi_{ra_k} + Kr \cdot zp \cdot w_k \cdot \psi_{rb_k}) \\ I_{sb_k} + \frac{h}{Le} \cdot (U1\beta(t_k) - Re \cdot I_{sb_k} + Kr \cdot Ar \cdot \psi_{rb_k} - Kr \cdot zp \cdot w_k \cdot \psi_{ra_k}) \\ \psi_{ra_k} + h \cdot (R2 \cdot Kr \cdot I_{sa_k} - Ar \cdot \psi_{ra_k} - zp \cdot w_k \cdot \psi_{rb_k}) \\ \psi_{rb_k} + h \cdot (R2 \cdot Kr \cdot I_{sb_k} - Ar \cdot \psi_{rb_k} + zp \cdot w_k \cdot \psi_{ra_k}) \\ w_k + \frac{h}{J} \cdot [Km \cdot (\psi_{ra_k} \cdot I_{sb_k} - \psi_{rb_k} \cdot I_{sa_k}) - Mc(t_k)] \end{pmatrix}$$

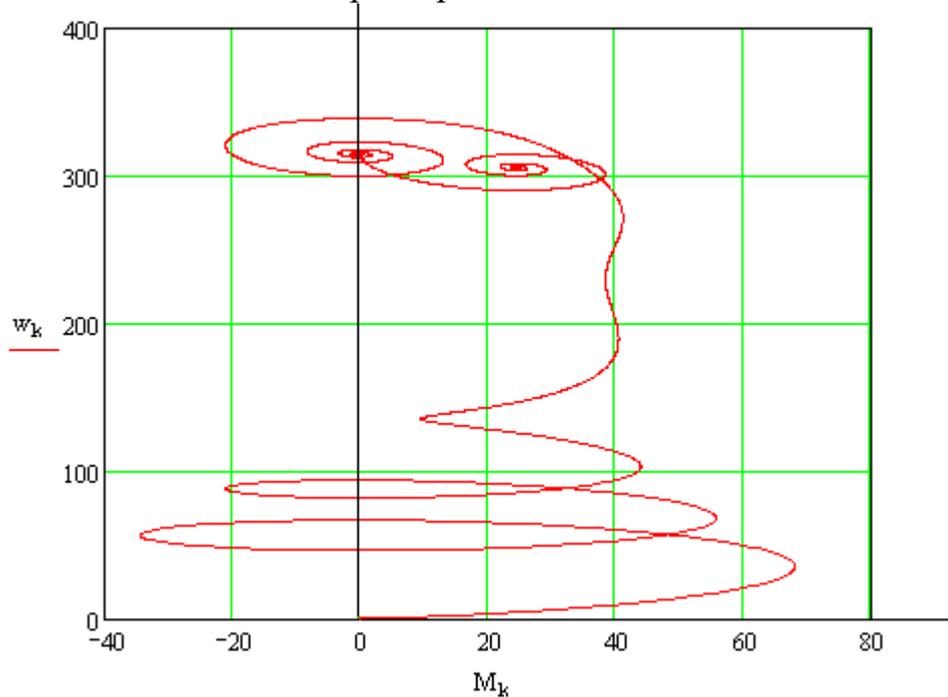
Расчетное выражение для электромагнитного момента АД:

$$M_k := Km \cdot (\psi_{ra_k} \cdot I_{sb_k} - \psi_{rb_k} \cdot I_{sa_k})$$

Графики переходных процессов угловой частоты вращения и момента двигателя при пуске вхолостую и набросе нагрузки:



Динамическая механическая характеристика:



Произведем моделирование также таких режимов работы двигателя, как реверс при активном характере нагрузки и останова. Для этого введем следующие изменения в листинг MathCAD:

$$\begin{aligned}
 U_a(t) &:= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) & h &:= 0.0001 & k &:= 0..20000 \\
 U_b(t) &:= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\
 U_c(t) &:= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\
 U1\alpha(t) &:= U_a(t) \\
 U1\beta(t) &:= \frac{U_a(t) + 2 \cdot U_b(t)}{\sqrt{3}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} t_0 \\ I_{sa_0} \\ I_{sb_0} \\ \psi_{ra_0} \\ \psi_{rb_0} \\ w_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$U1\alpha(t) := \begin{cases} U1\alpha(t) & \text{if } 0 \leq t < 0.8 \\ U1\beta(t) & \text{if } 0.8 \leq t < 1.5 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Изменение чередования фаз для осуществления реверса в момент времени $t=0,8$ с

$$U1\beta(t) := \begin{cases} U1\beta(t) & \text{if } 0 \leq t < 0.8 \\ U1\alpha(t) & \text{if } 0.8 \leq t < 1.5 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Отключение статорных напряжений для останова в момент времени $t=1,5$ с

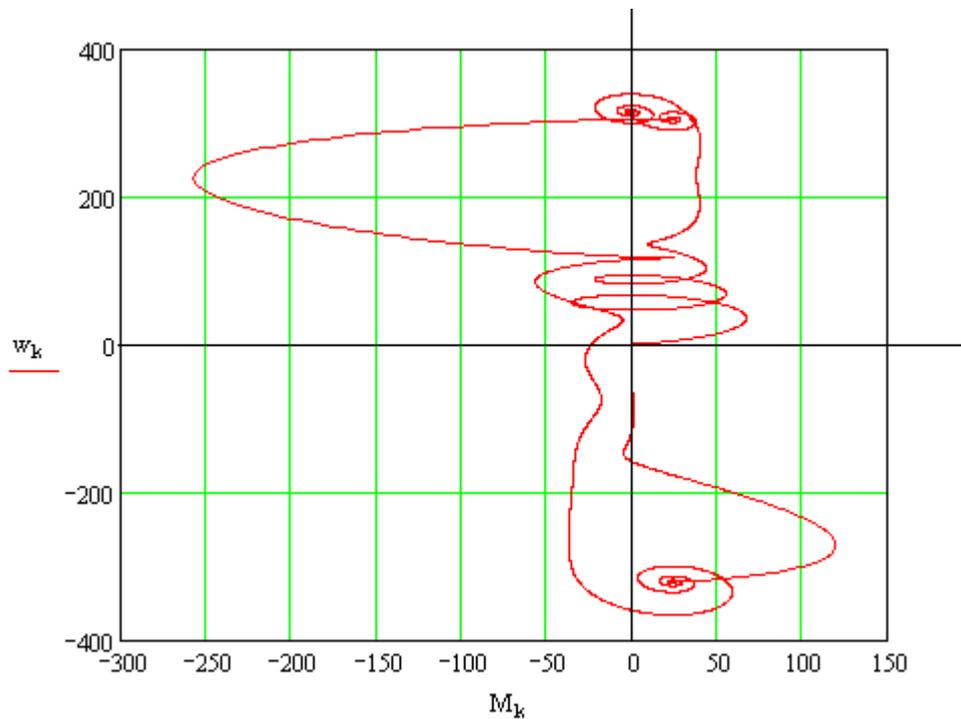
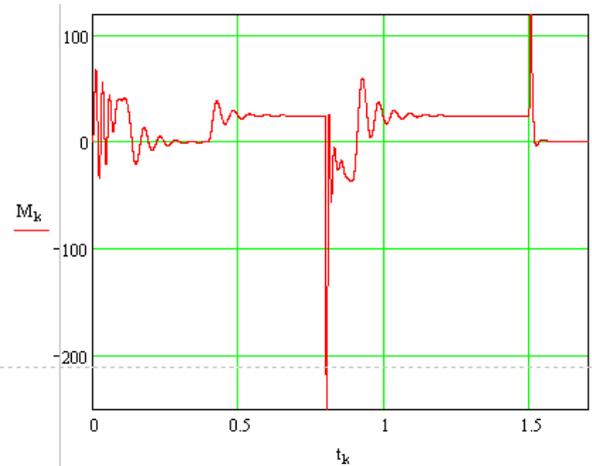
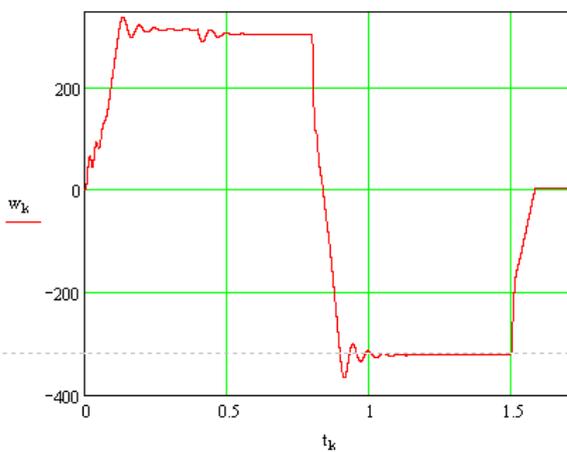
$$M_c(t) := \begin{cases} M_n & \text{if } 0.4 \leq t < 1.5 \\ (-M_n) & \text{if } 1.5 \leq t < 1.585 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

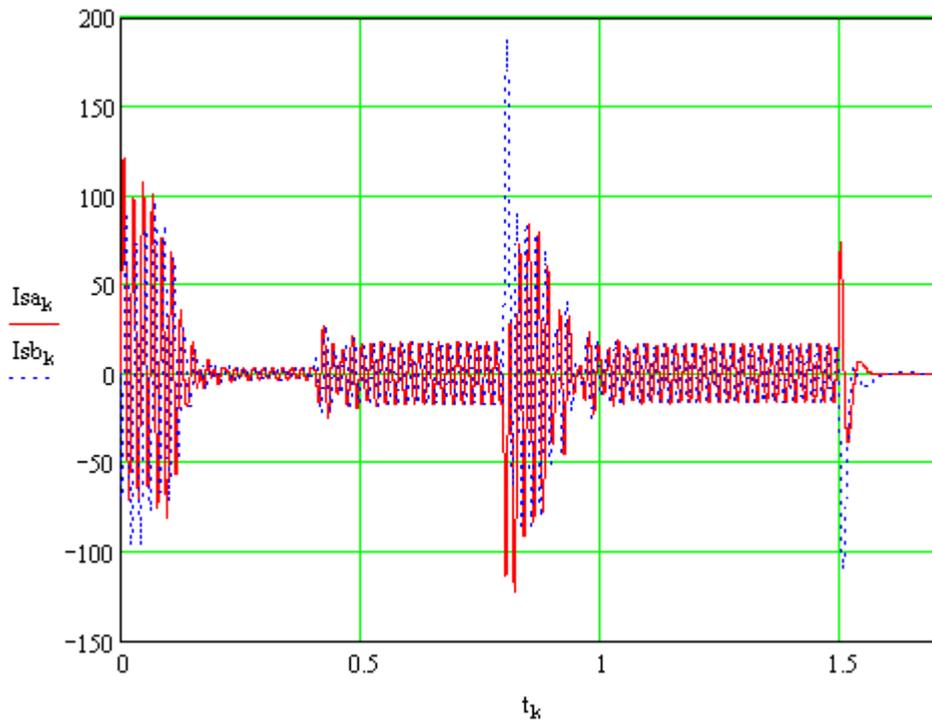
Наброс нагрузки

Торможение из генераторного режима путем изменения знака нагрузки и снятие нагрузки в момент достижения скоростью нулевого значения в момент $t=1,585$ с

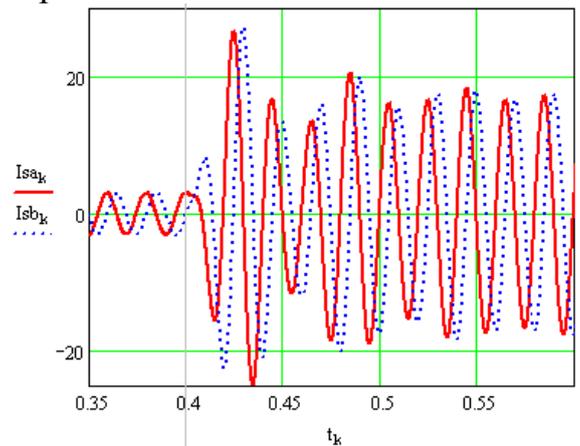
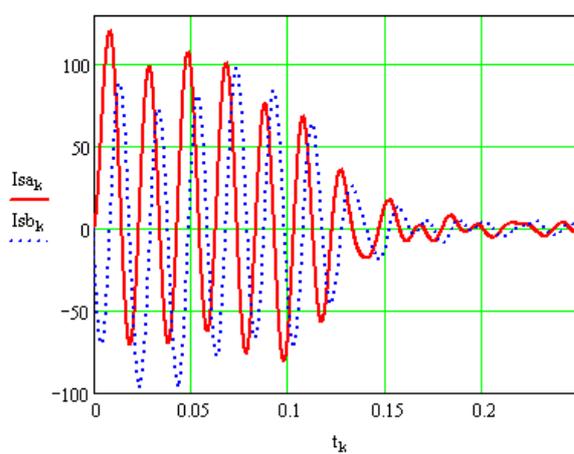
$$\begin{pmatrix} t_{k+1} \\ I_{sa_{k+1}} \\ I_{sb_{k+1}} \\ \psi_{ra_{k+1}} \\ \psi_{rb_{k+1}} \\ w_{k+1} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} t_k + h \\ I_{sa_k} + \frac{h}{L_e} \cdot \left(\underline{U1a}(t_k) - R_e \cdot I_{sa_k} + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{ra_k} + K_r \cdot z_p \cdot w_k \cdot \psi_{rb_k} \right) \\ I_{sb_k} + \frac{h}{L_e} \cdot \left(\underline{U1b}(t_k) - R_e \cdot I_{sb_k} + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{rb_k} - K_r \cdot z_p \cdot w_k \cdot \psi_{ra_k} \right) \\ \psi_{ra_k} + h \cdot \left(R2 \cdot K_r \cdot I_{sa_k} - A_r \cdot \psi_{ra_k} - z_p \cdot w_k \cdot \psi_{rb_k} \right) \\ \psi_{rb_k} + h \cdot \left(R2 \cdot K_r \cdot I_{sb_k} - A_r \cdot \psi_{rb_k} + z_p \cdot w_k \cdot \psi_{ra_k} \right) \\ w_k + \frac{h}{J} \cdot \left[K_m \cdot \left(\psi_{ra_k} \cdot I_{sb_k} - \psi_{rb_k} \cdot I_{sa_k} \right) - \underline{Mc}(t_k) \right] \end{pmatrix}$$

$$M_k := K_m \cdot \left(\psi_{ra_k} \cdot I_{sb_k} - \psi_{rb_k} \cdot I_{sa_k} \right)$$

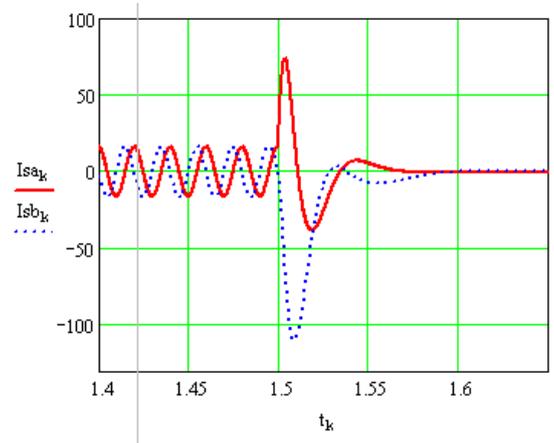
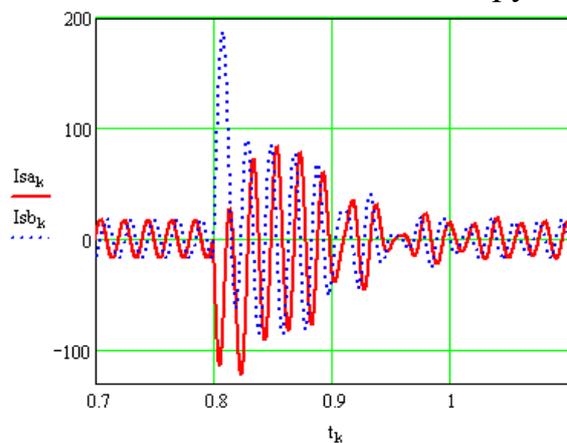




Статорные токи двигателя в двухфазной системе координат за полный цикл работы



Переходные процессы изменения статорных токов АД при пуске и набросе нагрузки в увеличении



Переходные процессы изменения статорных токов АД при реверсе и останове в увеличении