

Лабораторная работа №4
Моделирование скалярной системы управления
асинхронным электродвигателем

Часть 1. Статические и динамические характеристики при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$

Способы частотного регулирования скорости электроприводов переменного тока с короткозамкнутыми асинхронными двигателями находят все большее применение в различных отраслях техники. Преобразование переменного напряжения питающей сети в переменное напряжение с регулируемой частотой, напряжением и током осуществляют **преобразователи частоты**.

В настоящее время преобразователи частоты выполняются на базе силовых полупроводниковых ключей. Быстрый рост преобразователей частоты стал возможен с появлением биполярных транзисторов с изолированным затвором, рассчитанных на токи до нескольких тысяч ампер, напряжения до нескольких киловольт и частоту коммутации 20 кГц и выше.

При изменении частоты питающего напряжения f_1 пропорционально будут уменьшаться синхронная скорость (скорость вращающегося магнитного поля статора)

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{z_p},$$

а также индуктивные сопротивления обмоток $X = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L$.

Здесь Z_p – число пар полюсов, L – индуктивность обмоток.

Механические характеристики АД при уменьшении частоты питающего напряжения рассчитываются по формуле

$$M(f_1) = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot s \cdot \left[\left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2 \right]}$$

и будут выглядеть следующим образом (рисунок 1).

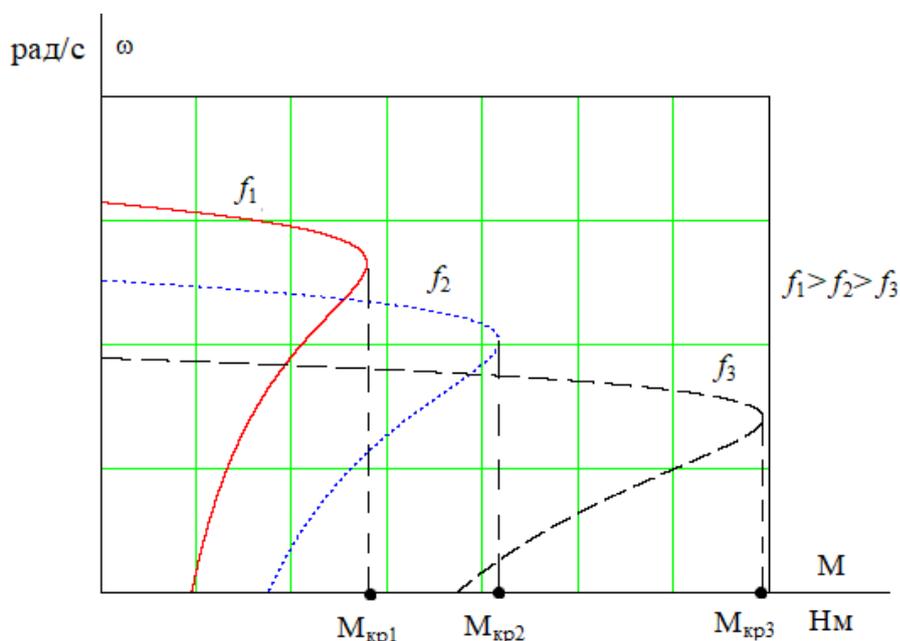


Рисунок 1 – Семейство механических характеристик АД при уменьшении частоты питающего напряжения

Из графика видно, что при уменьшении частоты возрастает критический момент, а значит и перегрузочная способность двигателя

$$\lambda = \frac{M_{кр}}{M_c}$$

Также уменьшение частоты при неизменном напряжении

$$U_1 \approx 4,44 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot f_1 \cdot \Phi$$

приведёт к увеличению магнитного потока Φ , что вызовет насыщение стали, и, как следствие, резкое увеличение тока.

Здесь w_1 – число витков фазы обмотки статора; k_1 – обмоточный коэффициент.

Для поддержания неизменной перегрузочной способности АД необходимо помимо частоты одновременно регулировать и величину питающего напряжения. Основным законом частотного регулирования при неизменной перегрузочной способности двигателя является **закон Костенко** (чтобы обеспечить оптимальный режим работы АД при всех значениях частоты и нагрузки, необходимо относительное напряжение двигателя изменять пропорционально произведению относительной частоты на корень квадратный из относительного момента):

$$\frac{U_{1j}}{U_{1н}} = \frac{f_{1j}}{f_{1н}} \cdot \sqrt{\frac{M_c}{M_n}}$$

В относительных единицах:

$$\gamma = \alpha \cdot \sqrt{\mu}$$

- В электроприводах различают три основных вида нагрузки (рисунок 2):
- 1 – постоянная, не зависящая от скорости (подъемные механизмы) $M_c = \text{const}$;
 - 2 – нелинейно возрастающая (насосы, вентиляторы) $M_c = C \cdot \omega^2$;
 - 3 – нелинейно спадающая (механизмы станков резания) $M_c = C \cdot \omega^{-1}$.

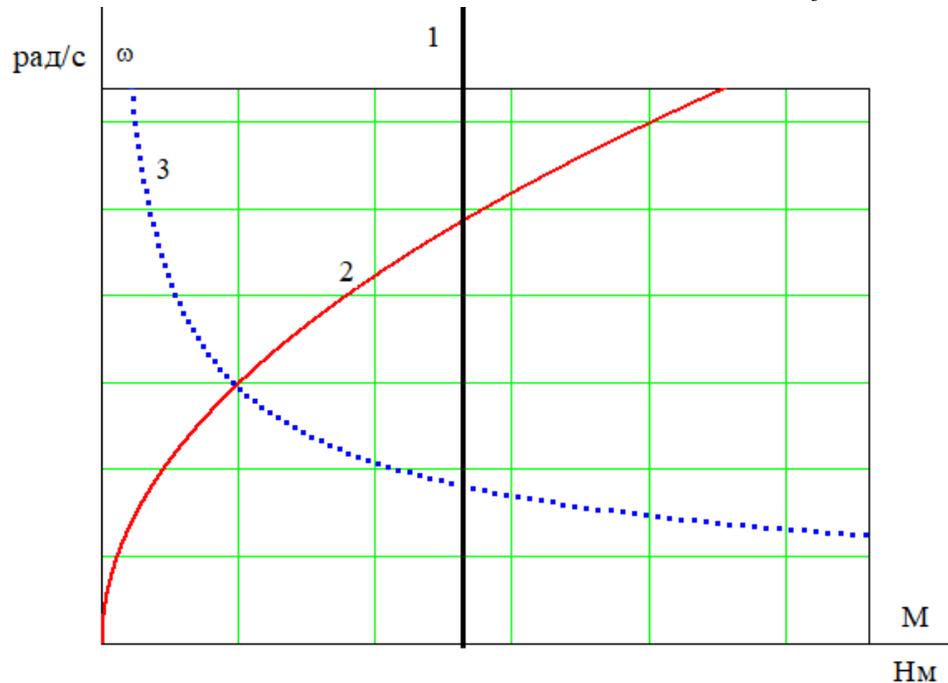


Рисунок 2 – Основные виды нагрузки электроприводов

Представляя в общем виде уравнение механической характеристики нагрузки степенной функцией $M_c = C \cdot \omega^k$ или в относительных единицах как $\mu = \alpha^k$, подставим его в закон Костенко (условие оптимальной работы двигателя):

$$\gamma = \alpha \cdot \sqrt{\mu} = \alpha \cdot \sqrt{\alpha^k} = \alpha^{1+k/2}.$$

Для случая постоянной нагрузки $M_c = \text{const} = C \cdot \omega^0$ условие оптимальности:

$$\gamma = \alpha^{1+0/2} = \alpha$$

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{U_1}{f_1} = \text{const}$$

При нелинейно возрастающей нагрузке $M_c = C \cdot \omega^2$:

$$\gamma = \alpha^{1+2/2} = \alpha^2$$

$$\frac{\gamma}{\alpha^2} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}$$

Для случая нелинейно спадающей нагрузки $M_c = C \cdot \omega^{-1}$:

$$\gamma = \alpha^{1-1/2} = \alpha^{1/2}$$

$$\frac{\gamma}{\alpha^{1/2}} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{U_1}{f_1^{1/2}} = \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$$

Эти законы управления для трёх типовых видов нагрузки электропривода являются фактическим стандартом, заложенным во все современные преобразователи частоты широкого применения.

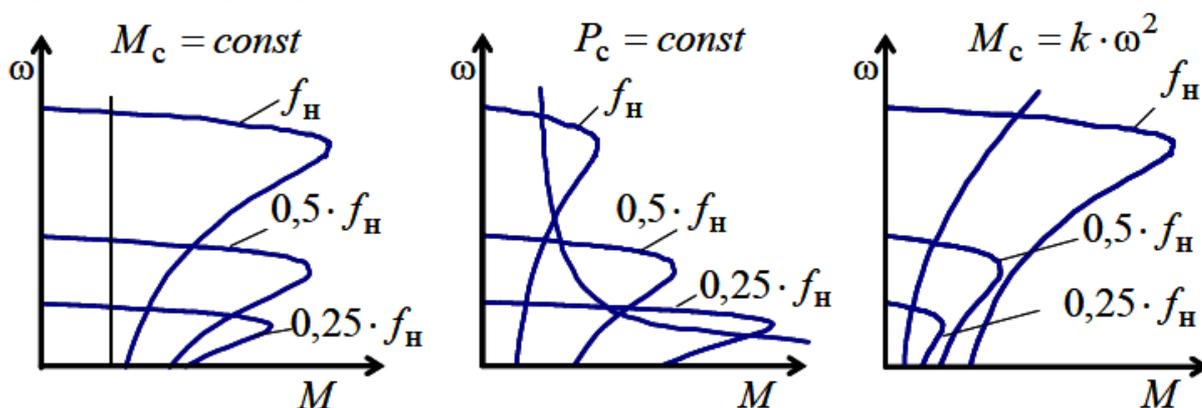


Рисунок 3 – Механические характеристики при трёх различных законах скалярного управления асинхронного двигателя в зависимости от нагрузки

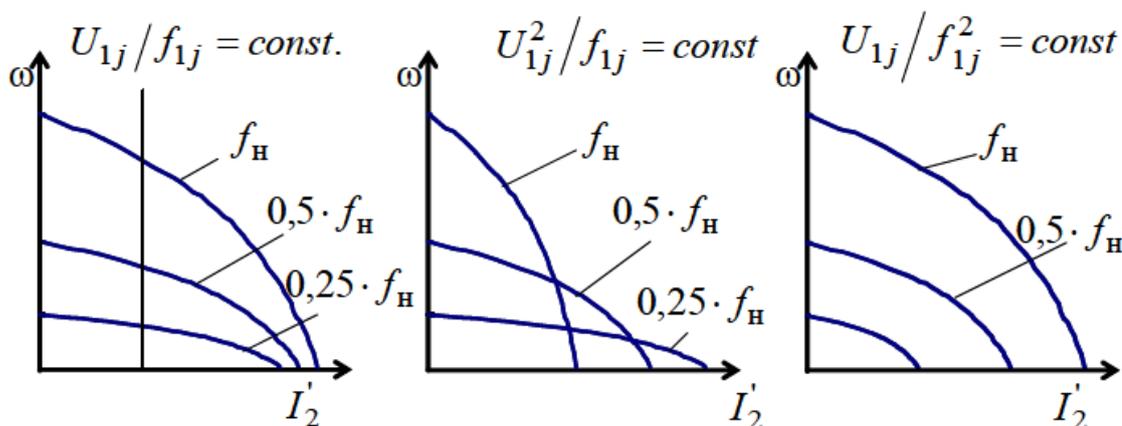


Рисунок 3 – Электромеханические характеристики при трёх различных законах скалярного управления асинхронного двигателя

Регулирование угловой скорости двигателей, выполненных на частоту $f_1=50$ Гц, выше номинальной допустимо в 1.5–2 раза. Указанное ограничение обусловлено прежде всего прочностью крепления обмотки ротора, а так же повышенными потерями мощности в стали статора. Регулирование скорости ниже номинальной частоты ограничивается неравномерностью вращения двигателя, в связи с чем диапазон регулирования при скалярном управлении равен примерно $D=1:10-1:15$.

Следует отметить, что закон Костенко сформулирован в условии пренебрежения активным сопротивлением статора двигателя. В действительности же при значительном снижении частоты (ниже $0,5f_{1H}$) закона $U_1/f_1 = \text{const}$ уменьшается критический момент, следовательно, перегрузочная способность двигателя. Объясняется это падением напряжения на активном сопротивлении статора, в результате чего к намагничивающей цепи двигателя подводится тем меньшее напряжение, чем меньше частота, что, в свою очередь уменьшает магнитный поток, от величины которого зависит $M_{кр}$.

Закон пропорционального регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$ целесообразен только для крупных двигателей, у которых r_1 мало, а для маломощных двигателей он малоэффективен, т.к. уже при $\phi_1 < 0,5$ перегрузочная способность их заметно снижается (у них большое r_1). Для устранения этого недостатка применяется так называемая IR-компенсация – введение положительной обратной связи по статорному току.

Искусственные статические характеристики системы преобразователь-двигатель при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$

Механические характеристики $\omega(M)$ разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$ для ряда выбранных значений выходной частоты инвертора в интервале от 50 до 5 Гц (соответствует диапазону регулирования скорости двигателя $D=1:10$) рассчитываются по выражениям:

$$\omega(s, f_1) = \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1-s)$$

$$M(s, f_1) = \frac{3 \cdot U_1^2(f_1) \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot s \cdot \left[\left(X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2 \right]}$$

где $U_1(f_1) = U_{1фн} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right) = 220 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)$.

Пример для Маткада:

f11 := 50

f12 := 40

f13 := 30

f14 := 20

f15 := 10

f16 := 5

$$M_{11}(s) := \frac{3 \cdot \left(U \cdot \frac{f_{11}}{f} \right)^2 \cdot R_2}{w_0 \cdot \frac{f_{11}}{f} \cdot s \cdot \left[\left(X_{kn} \cdot \frac{f_{11}}{f} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{11}}{f}} \right)^2 \right]}$$

$$M_{12}(s) := \frac{3 \cdot \left(U \cdot \frac{f_{12}}{f} \right)^2 \cdot R_2}{w_0 \cdot \frac{f_{12}}{f} \cdot s \cdot \left[\left(X_{kn} \cdot \frac{f_{12}}{f} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{12}}{f}} \right)^2 \right]}$$

$$M_{13}(s) := \frac{3 \cdot \left(U \cdot \frac{f_{13}}{f} \right)^2 \cdot R_2}{w_0 \cdot \frac{f_{13}}{f} \cdot s \cdot \left[\left(X_{kn} \cdot \frac{f_{13}}{f} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{13}}{f}} \right)^2 \right]}$$

$$M_{14}(s) := \frac{3 \cdot \left(U \cdot \frac{f_{14}}{f} \right)^2 \cdot R_2}{w_0 \cdot \frac{f_{14}}{f} \cdot s \cdot \left[\left(X_{kn} \cdot \frac{f_{14}}{f} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{14}}{f}} \right)^2 \right]}$$

$$M_{15}(s) := \frac{3 \cdot \left(U \cdot \frac{f_{15}}{f} \right)^2 \cdot R_2}{w_0 \cdot \frac{f_{15}}{f} \cdot s \cdot \left[\left(X_{kn} \cdot \frac{f_{15}}{f} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{15}}{f}} \right)^2 \right]}$$

$$M_{16}(s) := \frac{3 \cdot \left(U \cdot \frac{f_{16}}{f} \right)^2 \cdot R_2}{w_0 \cdot \frac{f_{16}}{f} \cdot s \cdot \left[\left(X_{kn} \cdot \frac{f_{16}}{f} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{16}}{f}} \right)^2 \right]}$$

$$w_{11}(s) := w_0 \cdot \frac{f_{11}}{f} \cdot (1 - s) \quad w_{13}(s) := w_0 \cdot \frac{f_{13}}{f} \cdot (1 - s) \quad w_{15}(s) := w_0 \cdot \frac{f_{15}}{f} \cdot (1 - s)$$

$$w_{12}(s) := w_0 \cdot \frac{f_{12}}{f} \cdot (1 - s) \quad w_{14}(s) := w_0 \cdot \frac{f_{14}}{f} \cdot (1 - s) \quad w_{16}(s) := w_0 \cdot \frac{f_{16}}{f} \cdot (1 - s)$$

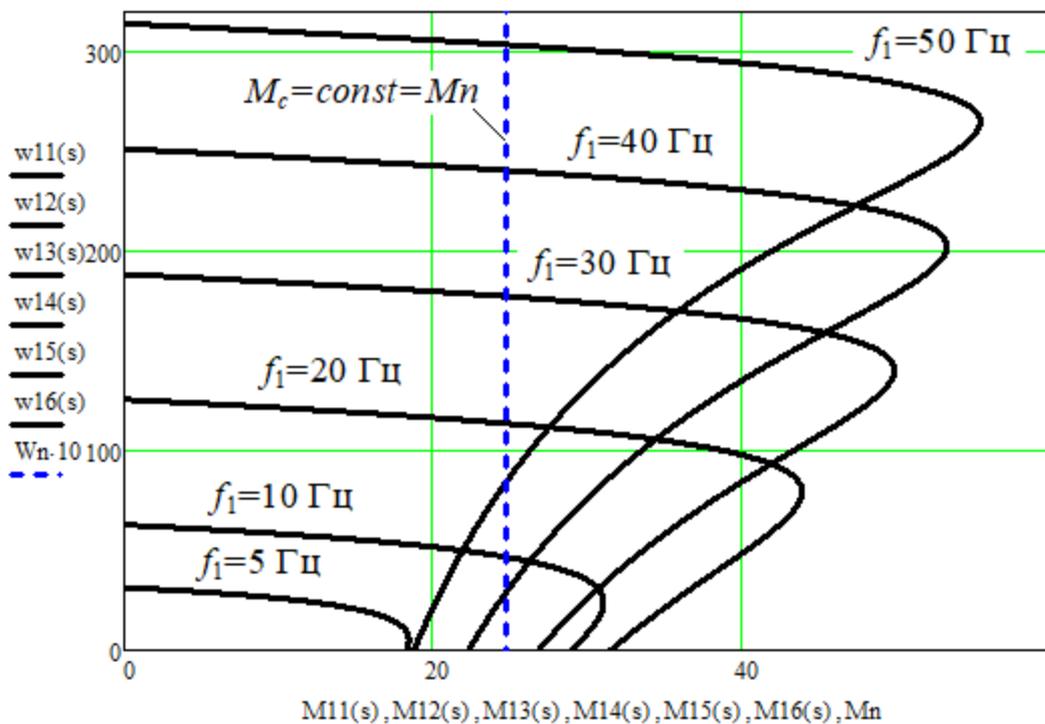


Рисунок 4 – Механические характеристики $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$

Графики статических механических характеристик свидетельствуют о невозможности запуска двигателя при значениях частоты питающего напряжения 5, 40 и 50 Гц (**момент нагрузки превышает пусковой момент**). Для увеличения пускового момента необходимо применение IR-компенсации.

Электромеханические характеристики $\omega(I_1)$ разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель рассчитываются для выбранных ранее значений частоты по выражениям:

$$I_1(s, f_1) = \sqrt{I_0^2(f_1) + I_2'^2(s, f_1) + 2 \cdot I_0(f_1) \cdot I_2'(s, f_1) \cdot \sin \varphi_2(s, f_1)};$$

$$I_0(f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_{\mu})^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}};$$

$$I_2'(s, f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}\right)^2}};$$

$$\sin \varphi_2(s, f_1) = \frac{X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}},$$

Пример для Маткада

$$I_{011} := \frac{U \cdot \frac{f_{11}}{f}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2 \cdot \left(\frac{f_{11}}{f}\right)^2}}$$

$$I_{013} := \frac{U \cdot \frac{f_{13}}{f}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2 \cdot \left(\frac{f_{13}}{f}\right)^2}}$$

$$I_{012} := \frac{U \cdot \frac{f_{12}}{f}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2 \cdot \left(\frac{f_{12}}{f}\right)^2}}$$

$$I_{014} := \frac{U \cdot \frac{f_{14}}{f}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2 \cdot \left(\frac{f_{14}}{f}\right)^2}}$$

$$I_{015} := \frac{U \cdot \frac{f_{15}}{f}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2 \cdot \left(\frac{f_{15}}{f}\right)^2}}$$

$$I_{016} := \frac{U \cdot \frac{f_{16}}{f}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2 \cdot \left(\frac{f_{16}}{f}\right)^2}}$$

$I_{211}(s) := \frac{U \cdot \frac{f_{11}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{11}}{f}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{11}}{f}}\right)^2}}$ $\sin_{11}(s) := \frac{X_{kn} \cdot \frac{f_{11}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{11}}{f}\right)^2}}$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> $i_{11}(s) := \sqrt{I_{011}^2 + I_{211}(s)^2 + 2 \cdot I_{011} \cdot I_{211}(s) \cdot \sin_{11}(s)}$	$I_{213}(s) := \frac{U \cdot \frac{f_{13}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{13}}{f}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{13}}{f}}\right)^2}}$ $\sin_{13}(s) := \frac{X_{kn} \cdot \frac{f_{13}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{13}}{f}\right)^2}}$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> $i_{13}(s) := \sqrt{I_{013}^2 + I_{213}(s)^2 + 2 \cdot I_{013} \cdot I_{213}(s) \cdot \sin_{13}(s)}$
$I_{212}(s) := \frac{U \cdot \frac{f_{12}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{12}}{f}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{12}}{f}}\right)^2}}$ $\sin_{12}(s) := \frac{X_{kn} \cdot \frac{f_{12}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{12}}{f}\right)^2}}$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> $i_{12}(s) := \sqrt{I_{011}^2 + I_{212}(s)^2 + 2 \cdot I_{012} \cdot I_{211}(s) \cdot \sin_{12}(s)}$	$I_{214}(s) := \frac{U \cdot \frac{f_{14}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{14}}{f}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{14}}{f}}\right)^2}}$ $\sin_{14}(s) := \frac{X_{kn} \cdot \frac{f_{14}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{14}}{f}\right)^2}}$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> $i_{14}(s) := \sqrt{I_{014}^2 + I_{214}(s)^2 + 2 \cdot I_{014} \cdot I_{214}(s) \cdot \sin_{14}(s)}$
$I_{215}(s) := \frac{U \cdot \frac{f_{15}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{15}}{f}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{15}}{f}}\right)^2}}$ $\sin_{15}(s) := \frac{X_{kn} \cdot \frac{f_{15}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{15}}{f}\right)^2}}$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> $i_{15}(s) := \sqrt{I_{015}^2 + I_{215}(s)^2 + 2 \cdot I_{015} \cdot I_{215}(s) \cdot \sin_{15}(s)}$	$I_{216}(s) := \frac{U \cdot \frac{f_{16}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{16}}{f}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_m \cdot \frac{f_{16}}{f}}\right)^2}}$ $\sin_{16}(s) := \frac{X_{kn} \cdot \frac{f_{16}}{f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(X_{kn} \cdot \frac{f_{16}}{f}\right)^2}}$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> $i_{16}(s) := \sqrt{I_{016}^2 + I_{216}(s)^2 + 2 \cdot I_{016} \cdot I_{216}(s) \cdot \sin_{16}(s)}$

По результатам расчета построено семейство электромеханических характеристик $\omega(I_1)$ системы преобразователь-двигатель.

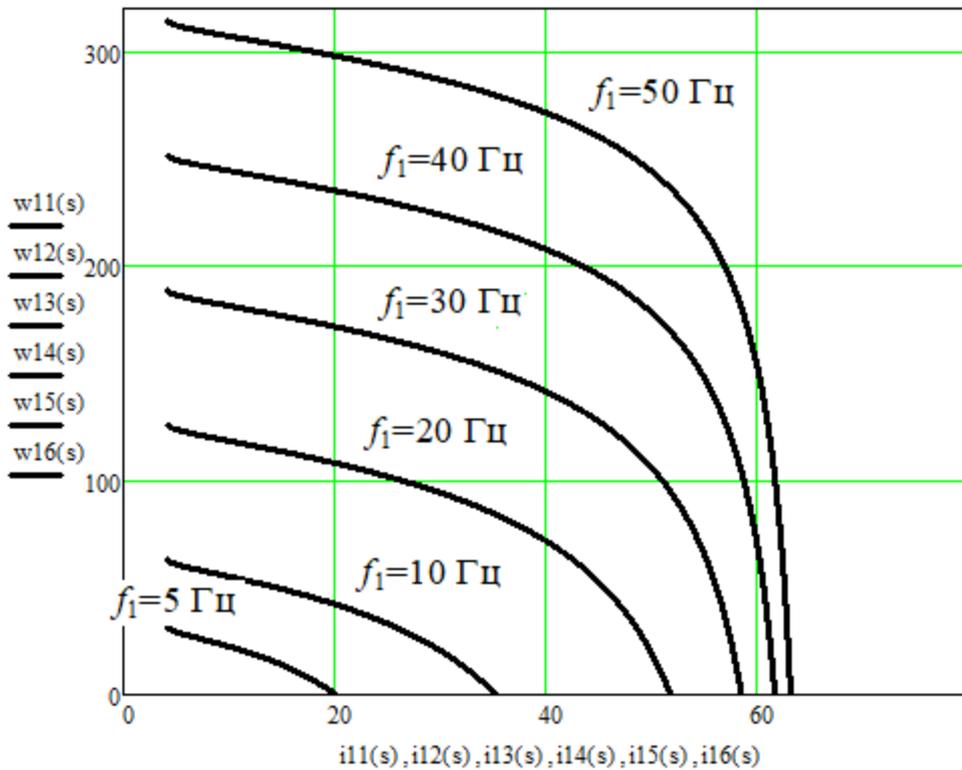


Рисунок 5 – Электромеханические характеристики электропривода $\omega(I_1)$ при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$

Механические искусственные статические характеристики при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$ с ИР-компенсацией

Для увеличения пускового момента увеличим напряжение статора на величину падения напряжения на активном сопротивлении статора (ИР-компенсация). В этом случае механические характеристики будут рассчитываться по следующим выражениям:

$$\omega(s, f_1) = \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1-s);$$

$$M(s, f_1) = \frac{3 \cdot U_1^2(s, f_1) \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot s \cdot \left[\left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2 \right]}$$

где $U_1(s, f_1) = R_1 \cdot i_1(s) + U_{1\Phi H} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right)$.

Пример для Маткада

$$M11(s) := \frac{3 \cdot \left(R1 \cdot i11(s) + U \cdot \frac{f11}{f} \right)^2 \cdot R2}{w0 \cdot \frac{f11}{f} \cdot s \cdot \left[\left(Xkn \cdot \frac{f11}{f} \right)^2 + \left(R1 + \frac{R2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R1 \cdot R2}{s \cdot Xm \cdot \frac{f11}{f}} \right)^2 \right]}$$

$$M12(s) := \frac{3 \cdot \left(R1 \cdot i12(s) + U \cdot \frac{f12}{f} \right)^2 \cdot R2}{w0 \cdot \frac{f12}{f} \cdot s \cdot \left[\left(Xkn \cdot \frac{f12}{f} \right)^2 + \left(R1 + \frac{R2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R1 \cdot R2}{s \cdot Xm \cdot \frac{f12}{f}} \right)^2 \right]}$$

$$M13(s) := \frac{3 \cdot \left(R1 \cdot i13(s) + U \cdot \frac{f13}{f} \right)^2 \cdot R2}{w0 \cdot \frac{f13}{f} \cdot s \cdot \left[\left(Xkn \cdot \frac{f13}{f} \right)^2 + \left(R1 + \frac{R2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R1 \cdot R2}{s \cdot Xm \cdot \frac{f13}{f}} \right)^2 \right]}$$

$$M14(s) := \frac{3 \cdot \left(R1 \cdot i14(s) + U \cdot \frac{f14}{f} \right)^2 \cdot R2}{w0 \cdot \frac{f14}{f} \cdot s \cdot \left[\left(Xkn \cdot \frac{f14}{f} \right)^2 + \left(R1 + \frac{R2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R1 \cdot R2}{s \cdot Xm \cdot \frac{f14}{f}} \right)^2 \right]}$$

$$M15(s) := \frac{3 \cdot \left(R1 \cdot i15(s) + U \cdot \frac{f15}{f} \right)^2 \cdot R2}{w0 \cdot \frac{f15}{f} \cdot s \cdot \left[\left(Xkn \cdot \frac{f15}{f} \right)^2 + \left(R1 + \frac{R2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R1 \cdot R2}{s \cdot Xm \cdot \frac{f15}{f}} \right)^2 \right]}$$

$$M16(s) := \frac{3 \cdot \left(R1 \cdot i16(s) + U \cdot \frac{f16}{f} \right)^2 \cdot R2}{w0 \cdot \frac{f16}{f} \cdot s \cdot \left[\left(Xkn \cdot \frac{f16}{f} \right)^2 + \left(R1 + \frac{R2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R1 \cdot R2}{s \cdot Xm \cdot \frac{f16}{f}} \right)^2 \right]}$$

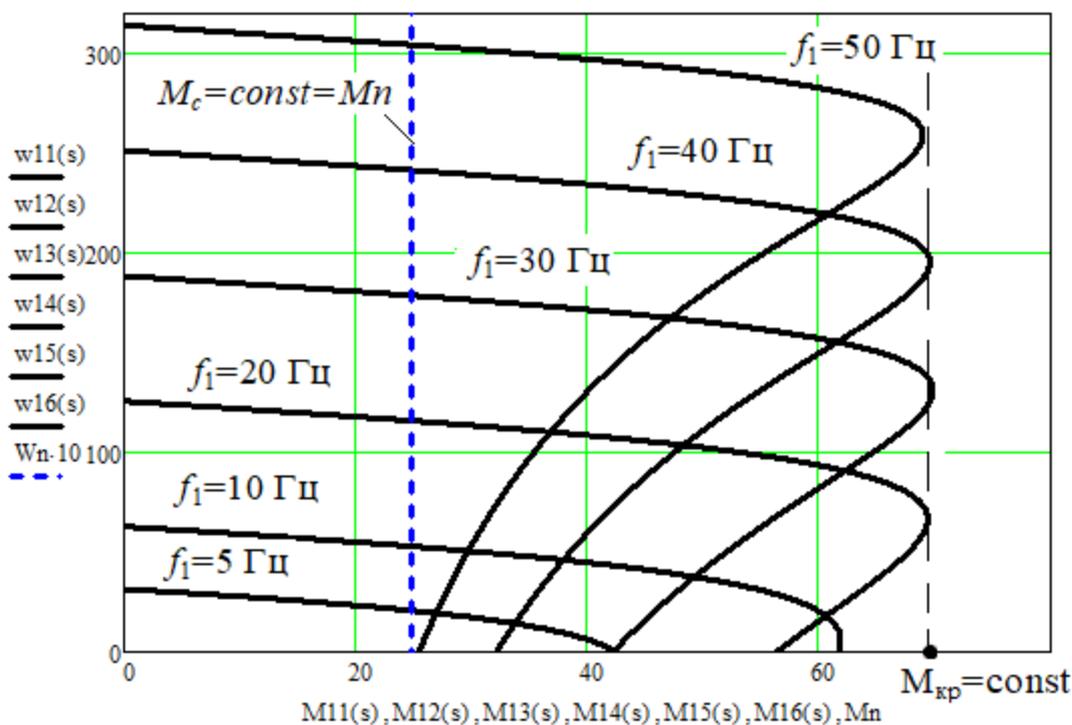


Рисунок 6 – Механические характеристики $\omega(M)$ при законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$ и IR-компенсации

Моделирование скалярной системы управления с IR-компенсацией

Структура частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением и IR-компенсацией представлена на рисунке.

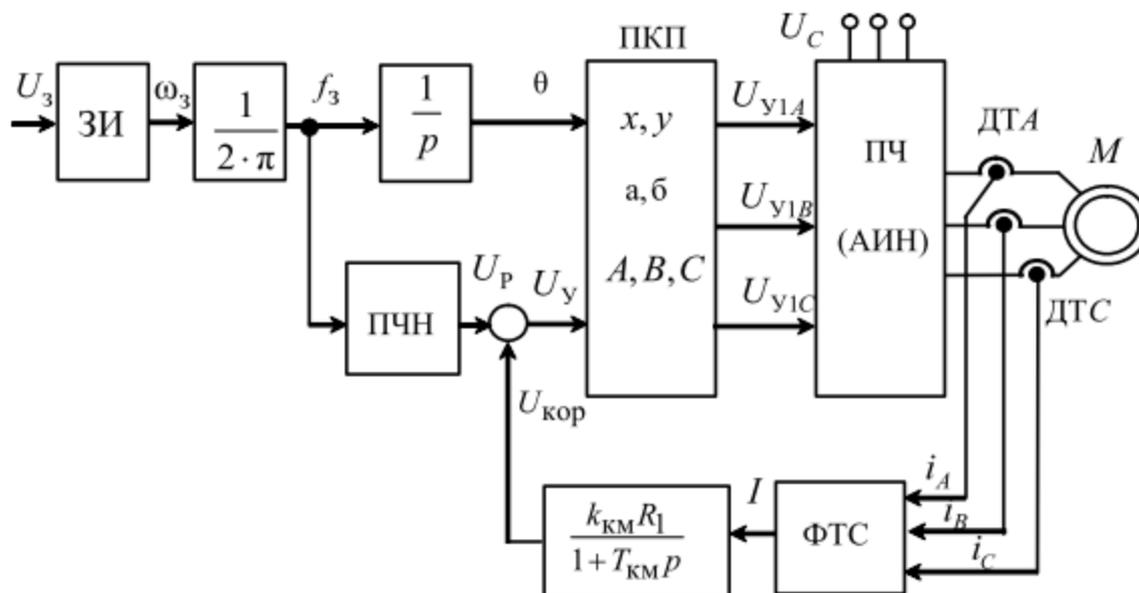


Рисунок 7 – Структура асинхронного электропривода со скалярным управлением и IR-компенсацией

ЗИ – задатчик интенсивности, формирующий форму кривой и темп разгона двигателя.

ПЧН – блок преобразования частота-напряжение формирует требуемую зависимость скалярного управления, устанавливает требуемый закон частотного регулирования в зависимости от нагрузки.

ПКП – прямой координатный преобразователь из вращающейся системы координат (сигналы постоянной величины) в трехфазную неподвижную А-В-С (синусоидальные сигналы токов и напряжений).

ПЧ – преобразователь частоты.

АИН – автономный инвертор частоты.

ФТС – формирователь тока статора.

Имитационная модель асинхронного электропривода со скалярным управлением и IR-компенсацией в программной среде MATLAB Simulink представлена на рисунке 8.

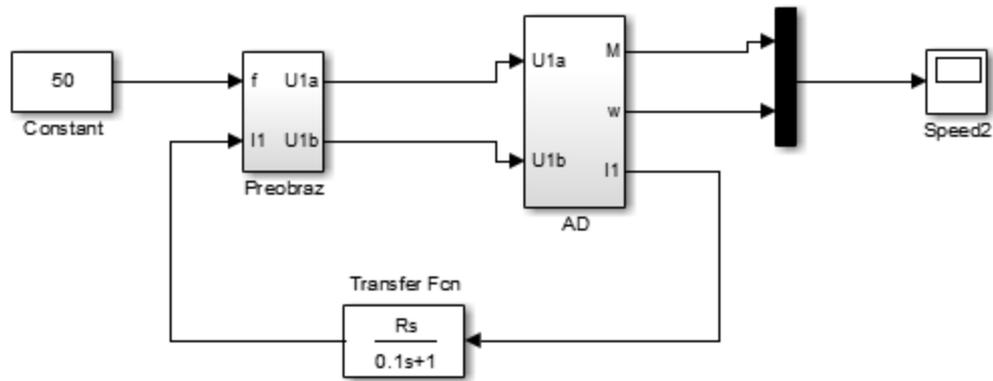


Рисунок 8 – Имитационная модель асинхронного электропривода со скалярным управлением и IR-компенсацией

Имитационная модель асинхронного двигателя (подсистема «AD») с вычислением тока статора по формуле

$$I_1 = \frac{\sqrt{i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2}}{\sqrt{2}}$$

представлена на рисунке 9.

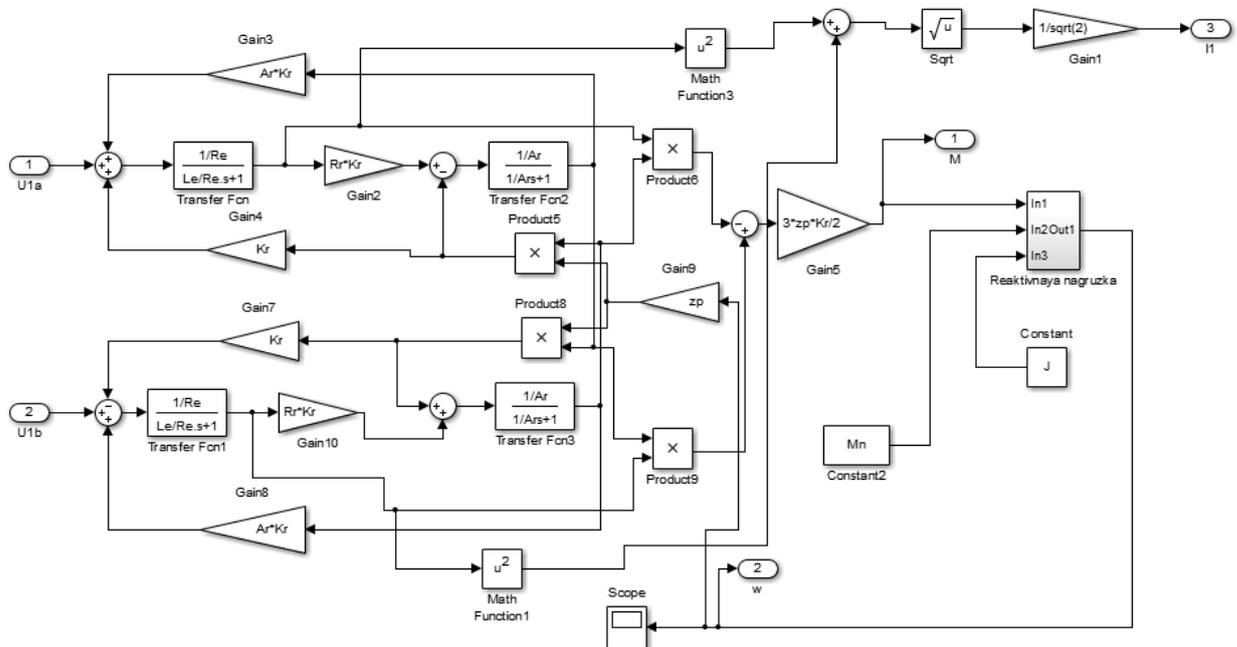


Рисунок 9 – Имитационная модель асинхронного двигателя с вычислением тока статора

Имитационная модель преобразователя частоты (подсистема «Preobraz») представлена на рисунке 10.

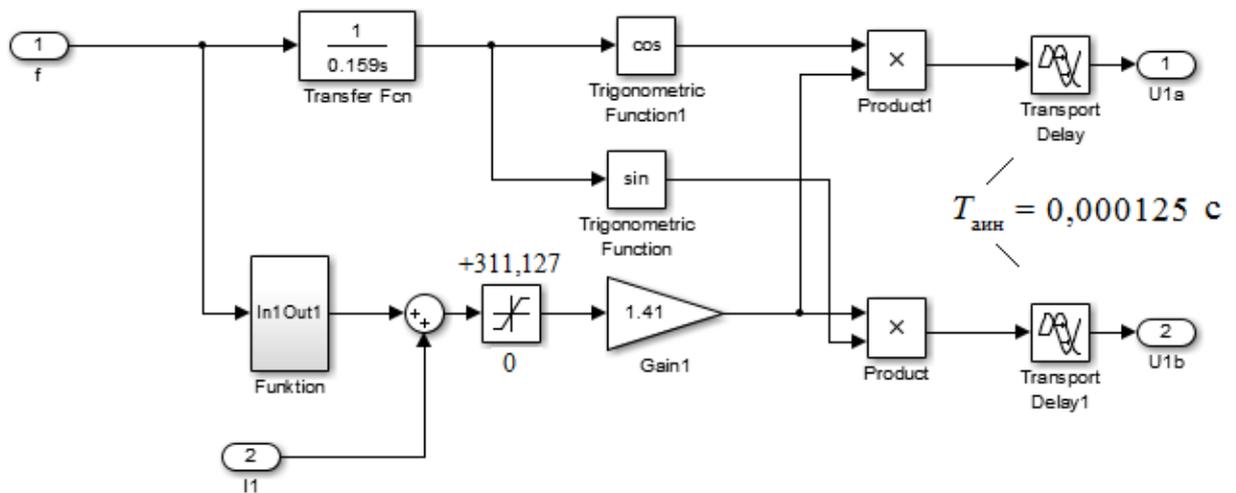


Рисунок 10 – Имитационная модель преобразователя частоты

Подсистема «Function» реализует закон управления:

$$U_1(f_1) = U_{1\text{фн}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right) = 220 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right) = 4,4 \cdot f_1 = \text{const}$$

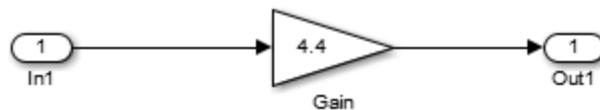


Рисунок 11 – Подсистема «Function»

```
%Параметры двигателя
f=50;
Rs=0.574;
Rr=0.564;
Ls_=1.491/(2*pi*f);
Lr_=2.022/(2*pi*f);
Lm=50.379/(2*pi*f);
p=2;
J=0.01*2.5; %эквивалентный момент инерции = 2.5Jдв
Ls=Ls_+Lm;
Lr=Lr_+Lm;
zp=p/2;
Kr=Lm/Lr;
Re=Rs+Rr*Kr^2;
Le=Ls-Lm^2/Lr;
Uamp=220*sqrt(2);
Ar=Rr/Lr;
Wref=2*pi*f;

Mn=24;
```

Параметры моделирования (Ctrl+E) желательно настроить следующим образом (рисунок 12).

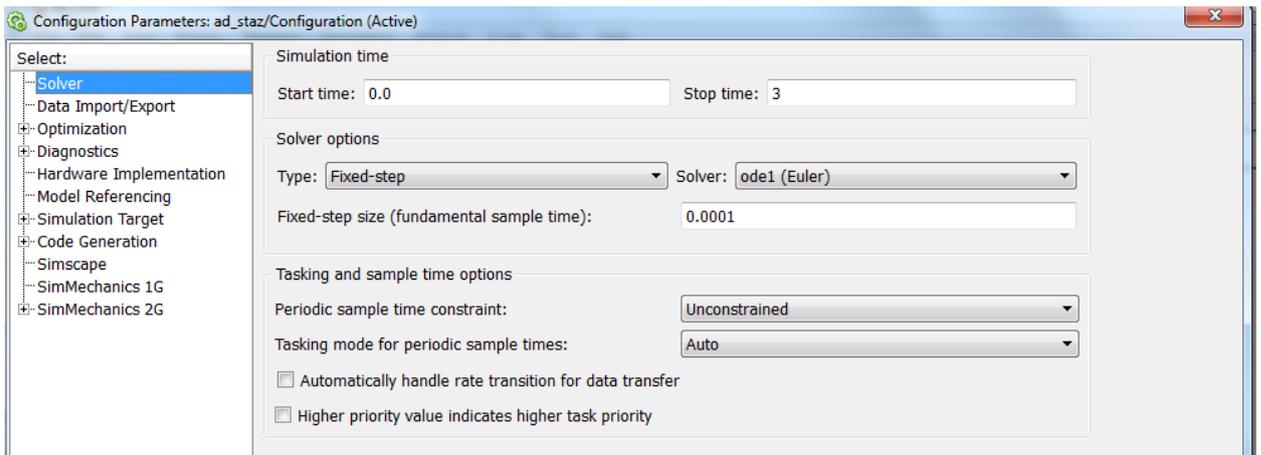


Рисунок 12 – Настройка параметров моделирования

Переходные процессы в системе скалярного управления с ИР-компенсацией и без неё представлены на рисунках 13 – 18.

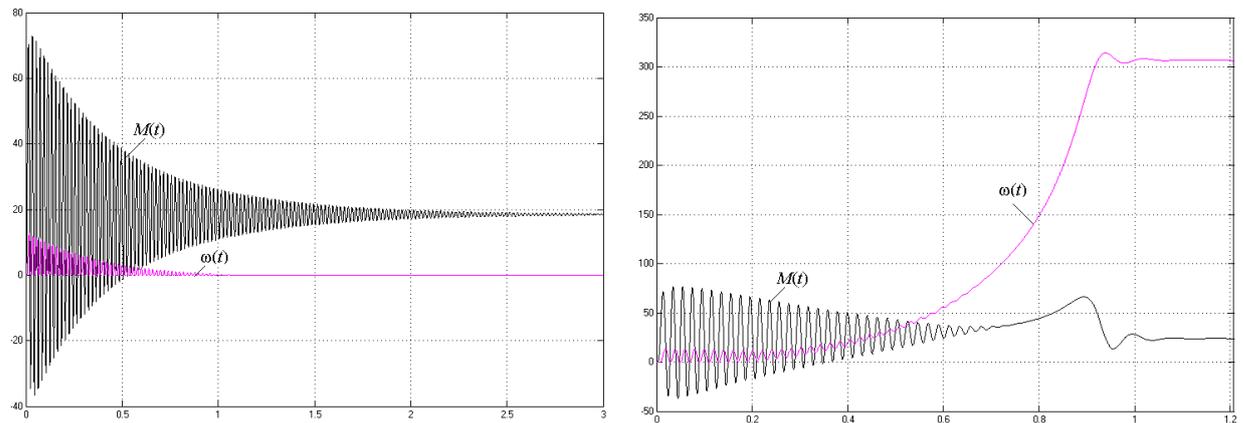


Рисунок 13 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f=\text{const}$ при значении частоты $f=50$ Гц
а) без ИР-компенсации; б) с ИР-компенсацией

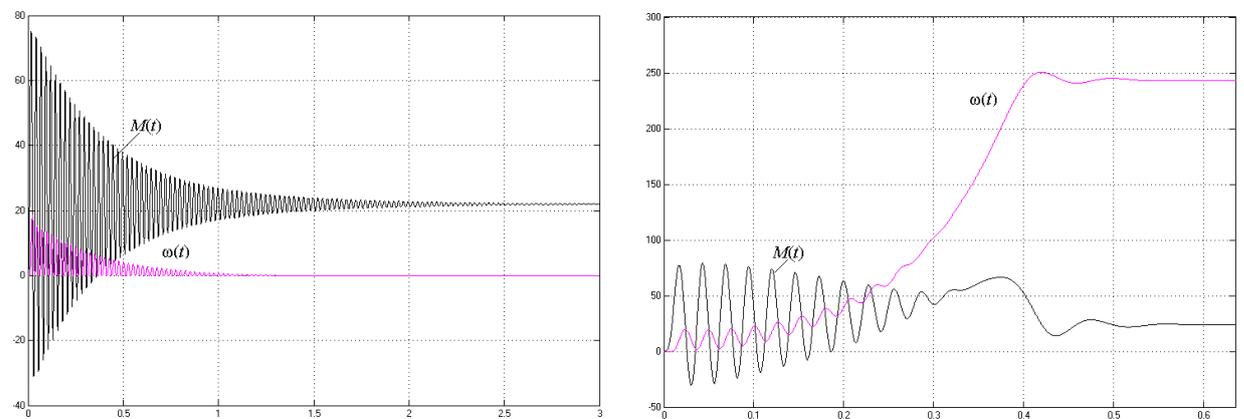


Рисунок 14 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f=\text{const}$ при значении частоты $f=40$ Гц
а) без ИР-компенсации; б) с ИР-компенсацией

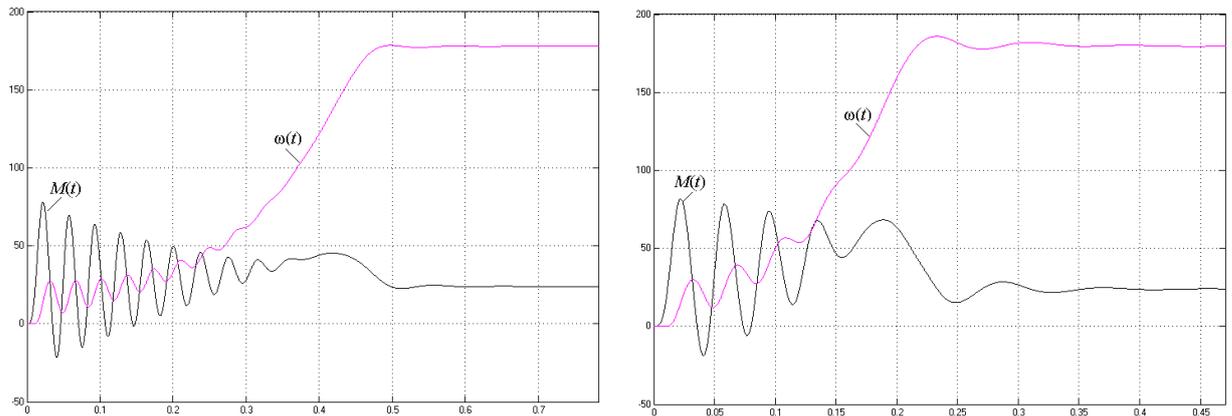


Рисунок 15 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f=\text{const}$ при значении частоты $f=30$ Гц
 а) без IR-компенсации; б) с IR-компенсацией

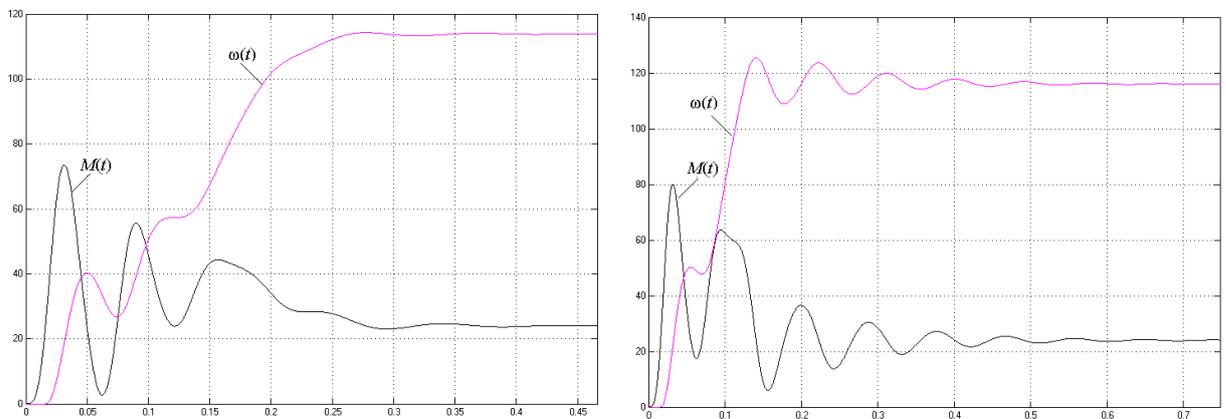


Рисунок 16 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f=\text{const}$ при значении частоты $f=20$ Гц
 а) без IR-компенсации; б) с IR-компенсацией

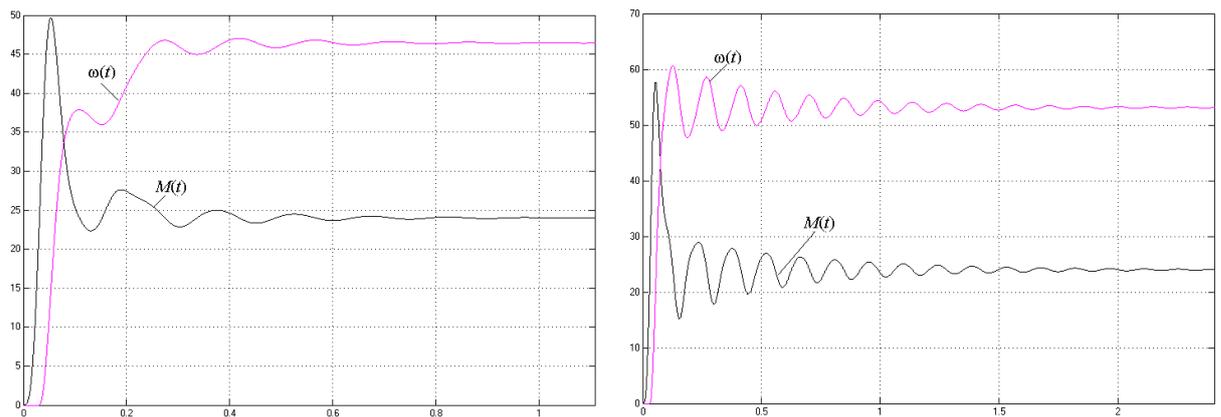


Рисунок 17 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f=\text{const}$ при значении частоты $f=10$ Гц
 а) без IR-компенсации; б) с IR-компенсацией

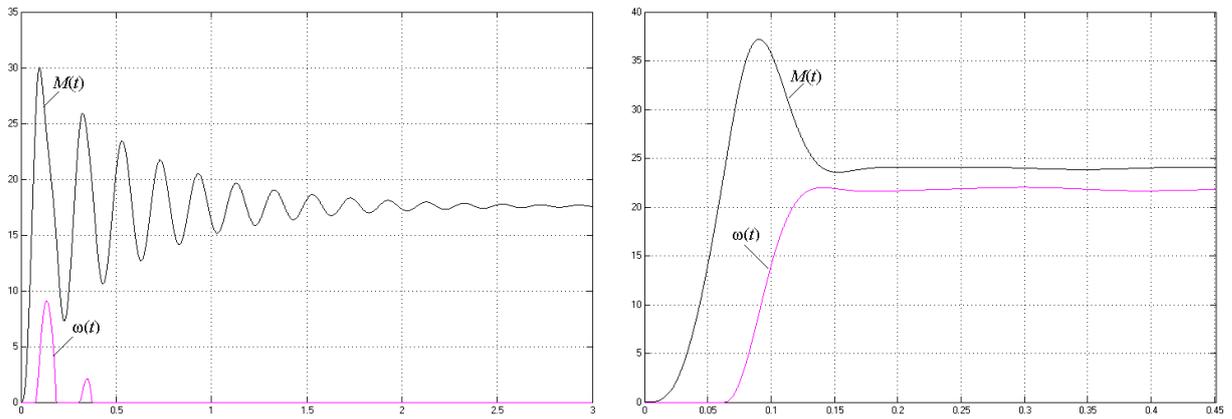


Рисунок 18 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f=\text{const}$ при значении частоты $f=5$ Гц
а) без IR-компенсации; б) с IR-компенсацией

Как видно из результатов моделирования, в электроприводе со скалярным управлением и законом регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$ в отсутствие IR-компенсации невозможен пуск на частоты 5, 40 и 50 Гц (рисунки 13, 14, 18), что позволяет устранить введение положительной обратной связи по статорному току двигателя.