

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время регулируемые электроприводы все больше вытесняют из производства нерегулируемые. При этом одной из главных тенденций развития электропривода считается применение бездатчиковых систем управления, позволяющих удешевить электропривод путем отказа от механических датчиков координат электродвигателей (например, скорости вала). Задачу бездатчикового управления решают с помощью применения математических алгоритмов, позволяющих в реальном времени рассчитать координаты электропривода на основании сигналов, доступных для измерения (в случае двигателя постоянного тока – это напряжение и ток якорной обмотки, для асинхронного двигателя – статорные токи и напряжения). К таким методам относятся фильтр Калмана, наблюдатель Люенбергера, метод наименьших квадратов и другие. В данной работе исследуется применение наблюдателя полного порядка для создания бездатчиковых электроприводов переменного тока.

Известно, что если некоторая динамическая система имеет математическое описание в пространстве состояний

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \\ y(t) = C^T \cdot x(t) \end{cases},$$

где  $x(t)$  – вектор переменных состояния системы,  $y(t)$  – вектор выходных переменных,  $u(t)$  – вектор входных воздействий,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – матрицы коэффициентов, то при условии полной наблюдаемости объекта возможно построение наблюдателя полного порядка, позволяющего получить вектор оценки состояния исследуемой системы. Математическое описание наблюдателя в этом случае:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} = A \cdot \hat{x}(t) + B \cdot u(t) + L \cdot [y(t) - \hat{y}(t)] \\ \hat{y}(t) = C^T \cdot \hat{x}(t) \end{cases},$$

где  $[y(t) - \hat{y}(t)]$  – разница между реальными и наблюдаемыми выходными координатами (так называемая «невязка»);  $L$  – матрица усиления наблюдателя.

Основываясь на представленных выше кратких основах построения наблюдателя полного порядка, рассмотрим построение наблюдателей для асинхронного двигателя.

# 1 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОЛНОГО ПОРЯДКА ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Математическая модель асинхронного двигателя (АД) в неподвижной системе координат  $\alpha$ - $\beta$  выглядит следующим образом:

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

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,

$R_\sigma$ ,  $L_\sigma$ ,  $K_r$ ,  $A_r$ ,  $R_r$ ,  $K_m$  – коэффициенты, учитывающие параметры АД,

$J$ ,  $z_p$ ,  $\omega(t)$ ,  $M_c$  – момент инерции, число пар полюсов, частота вращения и момент нагрузки.

При создании бездатчикового векторного асинхронного электропривода стремятся избавиться от участия в работе системы управления датчиков скорости (тахогенератор) и потокосцепления (датчики Холла). В таком случае вектор выходных координат АД:

$$Y = \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix}.$$

Входными сигналами для наблюдателя полного порядка в этом случае являются компоненты пространственных векторов тока и напряжения статора (рисунок 1).

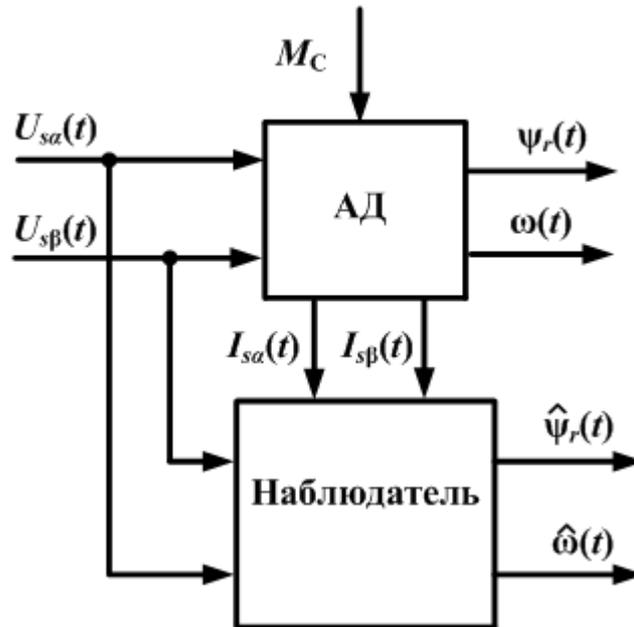


Рисунок 1

Математическая модель наблюдателя для АД согласно теории:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\hat{i}_{s\alpha}(t)}{dt} &= \frac{1}{L_{\dot{y}}} \cdot \left[ U_{s\alpha}(t) - R_{\dot{y}} \cdot \hat{i}_{s\alpha}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \hat{\psi}_{r\alpha}(t) + K_r \cdot z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\psi}_{r\beta}(t) + \right. \\ &\left. + L_1 \cdot (i_{s\alpha}(t) - \hat{i}_{s\alpha}(t)) \right] \\ \frac{d\hat{i}_{s\beta}(t)}{dt} &= \frac{1}{L_{\dot{y}}} \cdot \left[ U_{s\beta}(t) - R_{\dot{y}} \cdot \hat{i}_{s\beta}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \hat{\psi}_{r\beta}(t) - K_r \cdot z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\psi}_{r\alpha}(t) + \right. \\ &\left. + L_2 \cdot (i_{s\beta}(t) - \hat{i}_{s\beta}(t)) \right] \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}(t)}{dt} &= R_r \cdot K_r \cdot \hat{i}_{s\alpha}(t) - A_r \cdot \hat{\psi}_{r\alpha}(t) - z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\psi}_{r\beta}(t) \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}(t)}{dt} &= R_r \cdot K_r \cdot \hat{i}_{s\beta}(t) - A_r \cdot \hat{\psi}_{r\beta}(t) + z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\psi}_{r\alpha}(t) \\ \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} &= \frac{K_m}{J} \cdot \left[ \hat{\psi}_{r\alpha}(t) \cdot \hat{i}_{s\beta}(t) - \hat{\psi}_{r\beta}(t) \cdot \hat{i}_{s\alpha}(t) \right] \end{aligned} \right.$$

Для моделирования процессов в двигателе и наблюдателе запишем решение методом Эйлера систем дифференциальных уравнений, описывающих динамику объектов.

Для двигателя:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{s\alpha k+1} = i_{s\alpha k} + \frac{\Delta t}{L_\Sigma} \cdot (U_{s\alpha k} - R_\Sigma \cdot i_{s\alpha k} + K_r \cdot A_r \cdot \Psi_{r\alpha k} + K_r \cdot z_p \cdot \omega_k \cdot \Psi_{r\beta k}) \\ i_{s\beta k+1} = i_{s\beta k} + \frac{\Delta t}{L_\Sigma} \cdot (U_{s\beta k} - R_\Sigma \cdot i_{s\beta k} + K_r \cdot A_r \cdot \Psi_{r\beta k} - K_r \cdot z_p \cdot \omega_k \cdot \Psi_{r\alpha k}) \\ \Psi_{r\alpha k+1} = \Psi_{r\alpha k} + \Delta t \cdot (R_r \cdot K_r \cdot i_{s\alpha k} - A_r \cdot \Psi_{r\alpha k} - z_p \cdot \omega_k \cdot \Psi_{r\beta k}) \\ \Psi_{r\beta k+1} = \Psi_{r\beta k} + \Delta t \cdot (R_r \cdot K_r \cdot i_{s\beta k} - A_r \cdot \Psi_{r\beta k} + z_p \cdot \omega_k \cdot \Psi_{r\alpha k}) \\ \omega_{k+1} = \omega_k + \frac{\Delta t}{J} \cdot [K_m \cdot (\Psi_{r\alpha k} \cdot i_{s\beta k} - \Psi_{r\beta k} \cdot i_{s\alpha k}) - M_c] \end{array} \right. ;$$

для наблюдателя:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{i}_{s\alpha k+1} = \hat{i}_{s\alpha k} + \frac{\Delta t}{L_\Sigma} \cdot (U_{s\alpha k} - R_\Sigma \cdot \hat{i}_{s\alpha k} + K_r \cdot A_r \cdot \hat{\Psi}_{r\alpha k} + K_r \cdot z_p \cdot \hat{\omega}_k \cdot \hat{\Psi}_{r\beta k} + L_1 \cdot (i_{s\alpha k} - \hat{i}_{s\alpha k})) \\ \hat{i}_{s\beta k+1} = \hat{i}_{s\beta k} + \frac{\Delta t}{L_\Sigma} \cdot (U_{s\beta k} - R_\Sigma \cdot \hat{i}_{s\beta k} + K_r \cdot A_r \cdot \hat{\Psi}_{r\beta k} - K_r \cdot z_p \cdot \hat{\omega}_k \cdot \hat{\Psi}_{r\alpha k} + L_2 \cdot (i_{s\beta k} - \hat{i}_{s\beta k})) \\ \hat{\Psi}_{r\alpha k+1} = \hat{\Psi}_{r\alpha k} + \Delta t \cdot (R_r \cdot K_r \cdot \hat{i}_{s\alpha k} - A_r \cdot \hat{\Psi}_{r\alpha k} - z_p \cdot \hat{\omega}_k \cdot \hat{\Psi}_{r\beta k}) \\ \hat{\Psi}_{r\beta k+1} = \hat{\Psi}_{r\beta k} + \Delta t \cdot (R_r \cdot K_r \cdot \hat{i}_{s\beta k} - A_r \cdot \hat{\Psi}_{r\beta k} + z_p \cdot \hat{\omega}_k \cdot \hat{\Psi}_{r\alpha k}) \\ \hat{\omega}_{k+1} = \hat{\omega}_k + \frac{\Delta t}{J} \cdot K_m \cdot (\hat{\Psi}_{r\alpha k} \cdot \hat{i}_{s\beta k} - \hat{\Psi}_{r\beta k} \cdot \hat{i}_{s\alpha k}) \end{array} \right. .$$

Для того чтобы наблюдатель реагировал на возмущающие воздействия, прилагаемые к двигателю, также сначала введем в уравнение для скорости наблюдателя невязки по току с обратным знаком:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\hat{i}_{s\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{L_\Sigma} \cdot [U_{s\alpha}(t) - R_\Sigma \cdot \hat{i}_{s\alpha}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \hat{\Psi}_{r\alpha}(t) + K_r \cdot z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{r\beta}(t) + \\ + L_1 \cdot (i_{s\alpha}(t) - \hat{i}_{s\alpha}(t))] \\ \frac{d\hat{i}_{s\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{L_\Sigma} \cdot [U_{s\beta}(t) - R_\Sigma \cdot \hat{i}_{s\beta}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \hat{\Psi}_{r\beta}(t) - K_r \cdot z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{r\alpha}(t) + \\ + L_2 \cdot (i_{s\beta}(t) - \hat{i}_{s\beta}(t))] \\ \frac{d\hat{\Psi}_{r\alpha}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot \hat{i}_{s\alpha}(t) - A_r \cdot \hat{\Psi}_{r\alpha}(t) - z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{r\beta}(t) \\ \frac{d\hat{\Psi}_{r\beta}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot \hat{i}_{s\beta}(t) - A_r \cdot \hat{\Psi}_{r\beta}(t) + z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{r\alpha}(t) \\ \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} = \frac{K_m}{J} \cdot [\hat{\Psi}_{r\alpha}(t) \cdot (\hat{i}_{s\beta}(t) - i_{s\beta}(t)) - \hat{\Psi}_{r\beta}(t) \cdot (\hat{i}_{s\alpha}(t) - i_{s\alpha}(t))] \end{array} \right. \quad (3)$$

В качестве объекта исследований был принят электродвигатель типа АИР 90L4 ( $P_n=2,2$  кВт,  $n_0=1500$  об/мин). Коэффициенты усиления наблюдателя был подобран экспериментально  $L_1=L_2=0,001$ .

Задаем амплитуду и частоту питающего напряжения:

$$U := 220 \quad f := 50$$

Статорные напряжения в трехфазной системе координат:

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

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

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

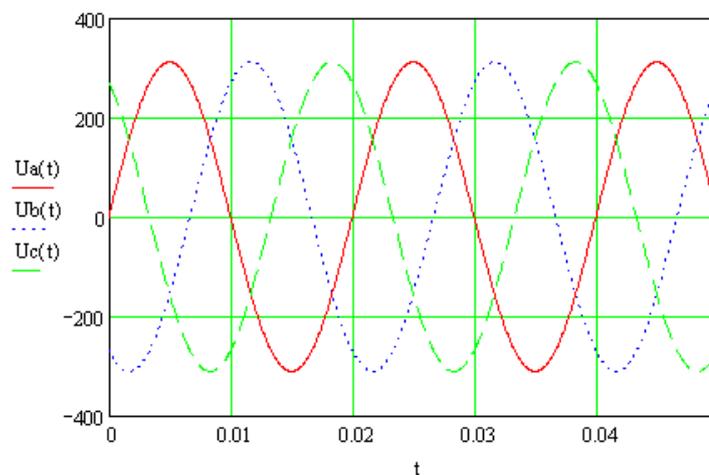


Рисунок 2 – Система трехфазных статорных напряжений

Применим прямое преобразование Кларка для перехода к двухфазной неподвижной системе координат:

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

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

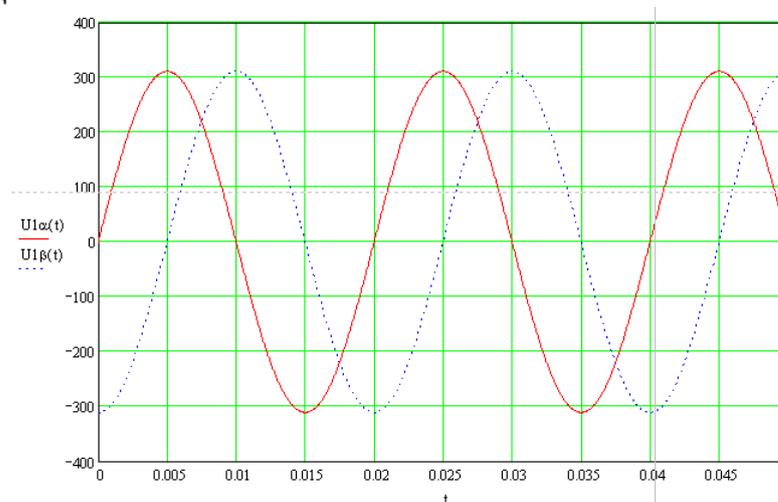


Рисунок 3 – Система двухфазных статорных напряжений

Задаем параметры двигателя в MathCAD:

$$R2 := 2.757 \quad z_p := 2$$

$$X_m := 102.897 \quad J := 0.02$$

$$K_r := 0.957 \quad A_r := 8.052$$

$$L_e := 0.025 \quad R_e := 5.369$$

$$K_m := 2.87$$

Момент нагрузки:

$$M_c(t) := \begin{cases} 14 & \text{if } 0.3 \leq t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Шаг интегрирования методом Эйлера:

$$h := 0.0001$$

Число точек расчета:

$$k := 0..6000$$

Начальные условия для двигателя и наблюдателя:

$$\begin{pmatrix} t_0 \\ I_{sa0} \\ I_{sb0} \\ \psi_{ra0} \\ \psi_{rb0} \\ w_0 \\ L I_{sa0} \\ L I_{sb0} \\ L \psi_{ra0} \\ L \psi_{rb0} \\ L w_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Коэффициенты усиления наблюдателя:

$$L1 := 0.001$$

$$L2 := 0.001$$

Численная модель двигателя:

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

Численная модель наблюдателя:

$$\begin{pmatrix} t_{k+1} \\ LI_{sa_{k+1}} \\ LI_{sb_{k+1}} \\ L\psi_{ra_{k+1}} \\ L\psi_{rb_{k+1}} \\ Lw_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_k + h \\ LI_{sa_k} + \frac{h}{L_e} \cdot [U1\alpha(t_k) - Re \cdot LI_{sa_k} + Kr \cdot Ar \cdot L\psi_{ra_k} + Kr \cdot zp \cdot Lw_k \cdot L\psi_{rb_k} + L1 \cdot (I_{sa_k} - LI_{sa_k})] \\ LI_{sb_k} + \frac{h}{L_e} \cdot [U1\beta(t_k) - Re \cdot LI_{sb_k} + Kr \cdot Ar \cdot L\psi_{rb_k} - Kr \cdot zp \cdot Lw_k \cdot L\psi_{ra_k} + L1 \cdot (I_{sb_k} - LI_{sb_k})] \\ L\psi_{ra_k} + h \cdot [R2 \cdot Kr \cdot LI_{sa_k} - Ar \cdot L\psi_{ra_k} - zp \cdot Lw_k \cdot L\psi_{rb_k}] \\ L\psi_{rb_k} + h \cdot [R2 \cdot Kr \cdot LI_{sb_k} - Ar \cdot L\psi_{rb_k} + zp \cdot Lw_k \cdot L\psi_{ra_k}] \\ Lw_k + \frac{h}{J} \cdot [Km \cdot [L\psi_{ra_k} \cdot (LI_{sb_k} - I_{sb_k}) - L\psi_{rb_k} \cdot (LI_{sa_k} - I_{sa_k})]] \end{pmatrix}$$

Переходные процессы угловой скорости АД и ее оценки наблюдателем:

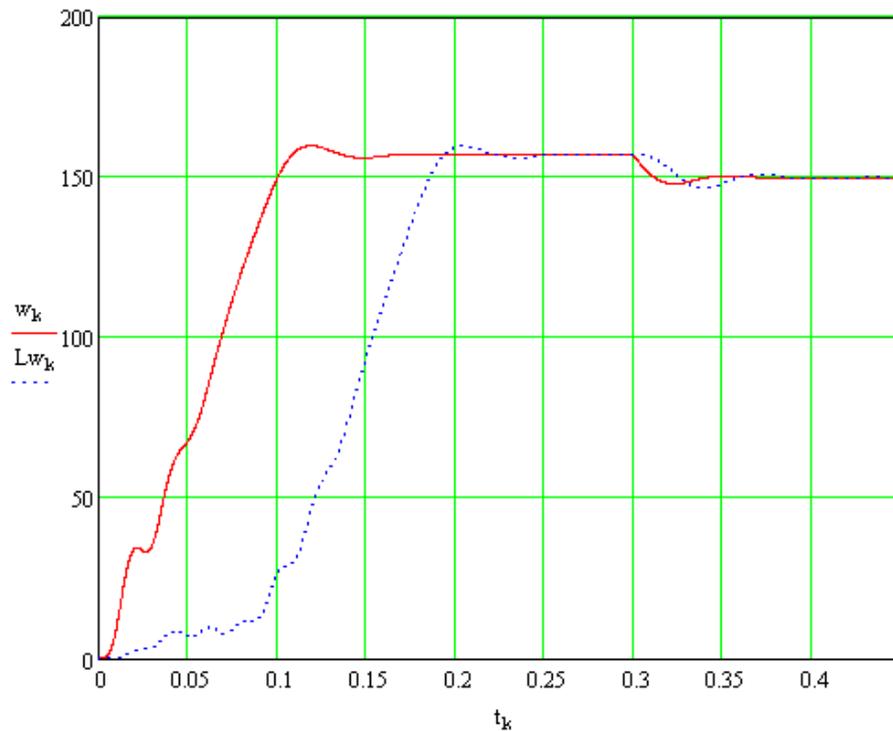


Рисунок 4

Переходные процессы момента двигателя и его оценки:

$$M_k := Km \cdot (\psi_{ra_k} \cdot Isb_k - \psi_{rb_k} \cdot Isa_k)$$

$$LM_k := Km \cdot (L\psi_{ra_k} \cdot LIsb_k - L\psi_{rb_k} \cdot LIsa_k)$$

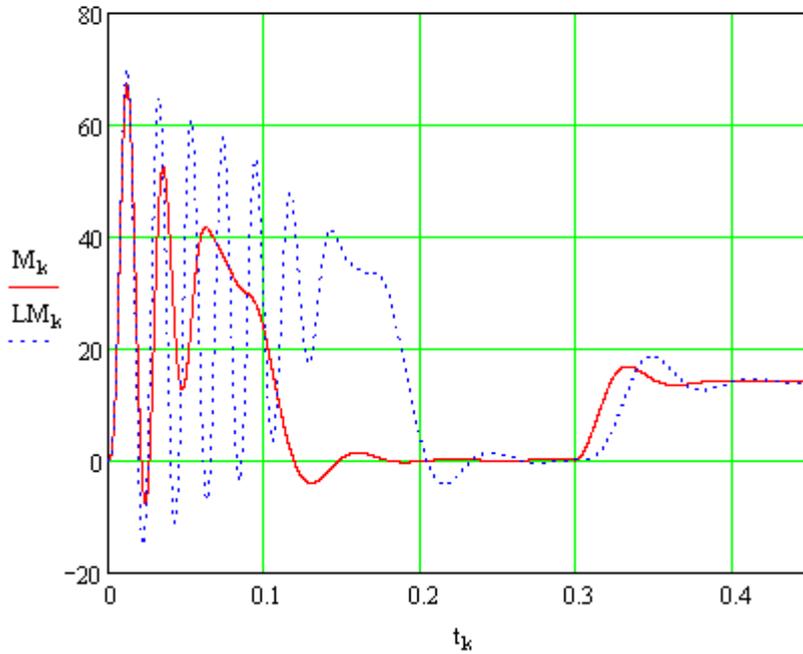


Рисунок 5

Переходные процессы статорного тока двигателя и его оценки:

$$Is_k := \sqrt{(Isa_k)^2 + (Isb_k)^2}$$

$$LIs_k := \sqrt{(LIsa_k)^2 + (LIsb_k)^2}$$

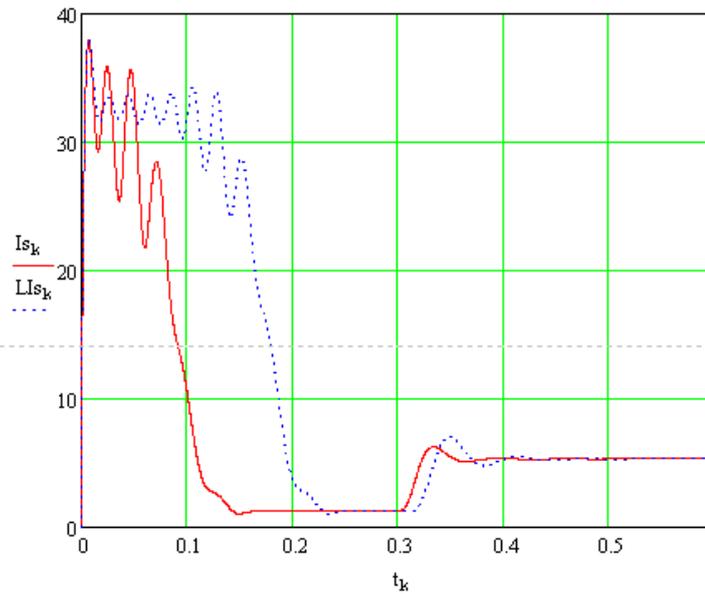


Рисунок 6

Переходные процессы потокосцепления ротора двигателя и его оценки:

$$\psi r_k := \sqrt{(\psi r a_k)^2 + (\psi r b_k)^2}$$

$$L\psi r_k := \sqrt{(L\psi r a_k)^2 + (L\psi r b_k)^2}$$

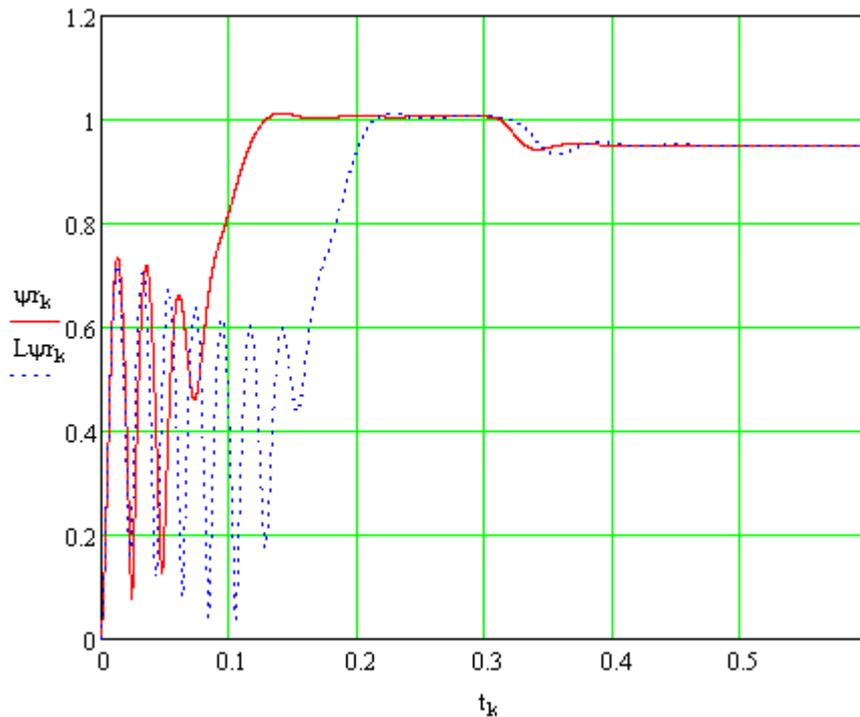


Рисунок 7

После введения невязки по току в уравнение для скорости наблюдателя оценки переменных АД отстают от реальных величин по времени, но в то же время наблюдатель реагирует на возмущающие воздействия, приложенные к двигателю. Для устранения отставания по времени введем также в уравнение для скорости наблюдателя дополнительное слагаемое:

$$\begin{pmatrix} t_{k+1} \\ L i s a_{k+1} \\ L i s b_{k+1} \\ L \psi r a_{k+1} \\ L \psi r b_{k+1} \\ L w_{k+1} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} t_k + h \\ L i s a_k + \frac{h}{L e} \left[ U 1 \alpha(t_k) - R e \cdot L i s a_k + K r \cdot A r \cdot L \psi r a_k + K r \cdot z p \cdot L w_k \cdot L \psi r b_k + L 1 \cdot (I s a_k - L i s a_k) \right] \\ L i s b_k + \frac{h}{L e} \left[ U 1 \beta(t_k) - R e \cdot L i s b_k + K r \cdot A r \cdot L \psi r b_k - K r \cdot z p \cdot L w_k \cdot L \psi r a_k + L 1 \cdot (I s b_k - L i s b_k) \right] \\ L \psi r a_k + h \cdot \left\{ R 2 \cdot K r \cdot L i s a_k - A r \cdot L \psi r a_k - z p \cdot L w_k \cdot L \psi r b_k \right\} \\ L \psi r b_k + h \cdot \left\{ R 2 \cdot K r \cdot L i s b_k - A r \cdot L \psi r b_k + z p \cdot L w_k \cdot L \psi r a_k \right\} \\ L w_k + \frac{h}{J} \cdot \left[ K m \cdot \left[ L \psi r a_k \cdot (L i s b_k - I s b_k) - L \psi r b_k \cdot (L i s a_k - I s a_k) \right] + K p \cdot \left[ K m \cdot \left[ L \psi r a_k \cdot (L i s b_k - I s b_k) - L \psi r b_k \cdot (L i s a_k - I s a_k) \right] \right] \right] \end{pmatrix}$$

Дополнительный коэффициент для наблюдателя:

$$K_p := 0.4$$

Снимаем аналогичные переходные процессы:

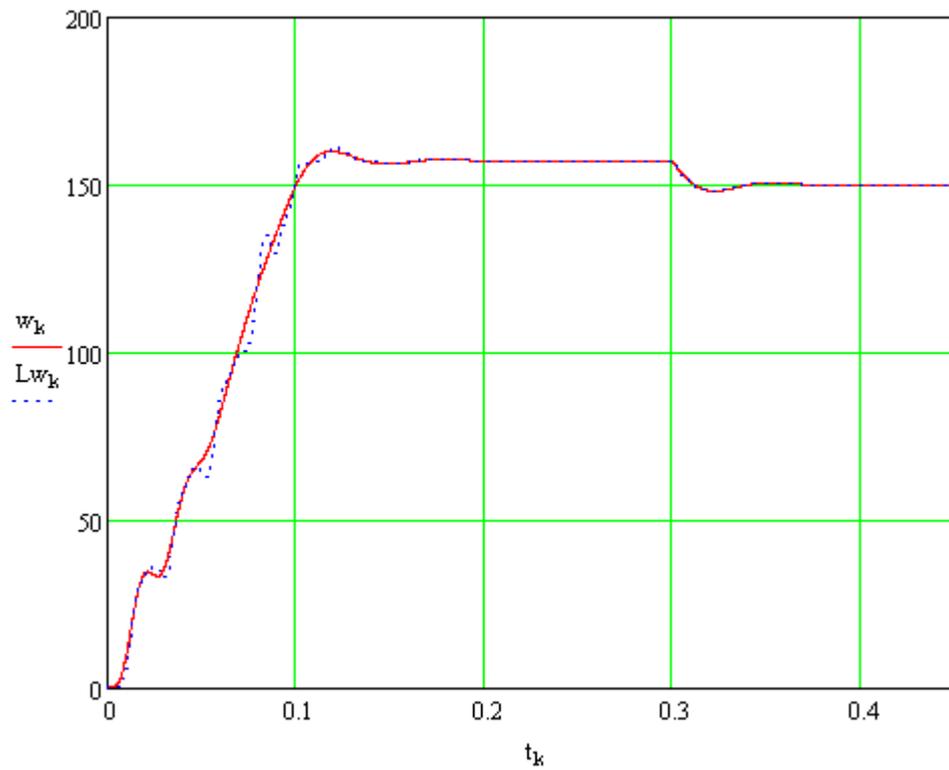


Рисунок 8

$$M_k := Km \cdot (\psi_{ra_k} \cdot Isb_k - \psi_{rb_k} \cdot Isa_k)$$

$$LM_k := Km \cdot (L\psi_{ra_k} \cdot LIsb_k - L\psi_{rb_k} \cdot LIsa_k)$$

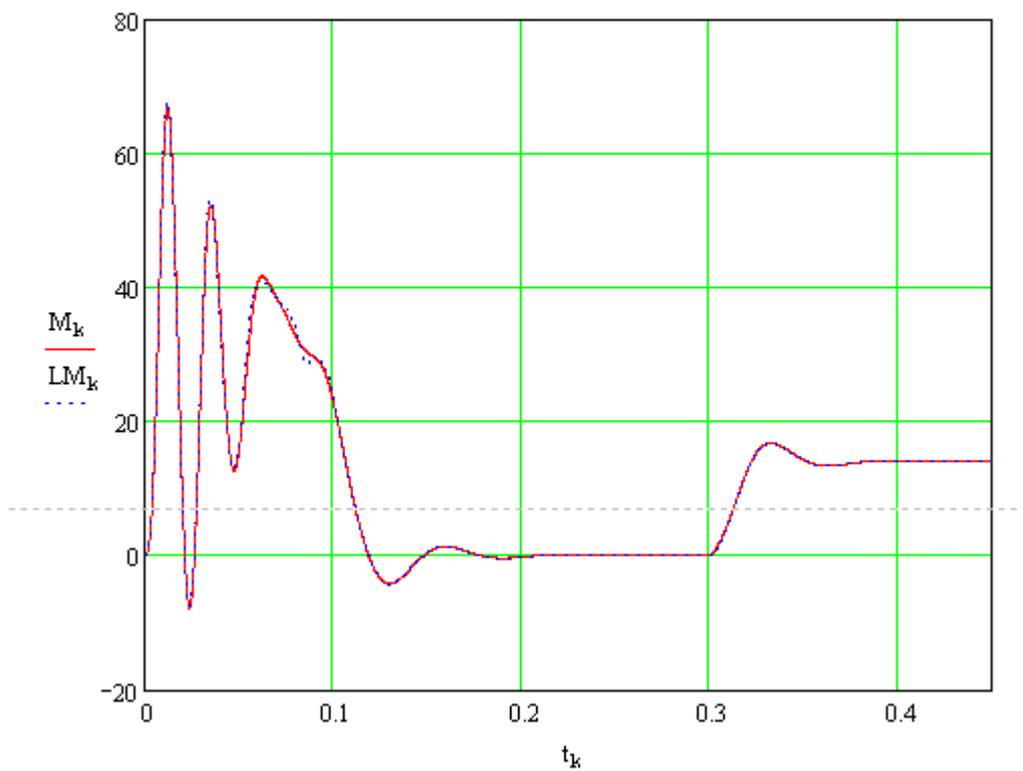


Рисунок 9

$$I_{s_k} := \sqrt{(I_{sa_k})^2 + (I_{sb_k})^2}$$

$$LI_{s_k} := \sqrt{(LI_{sa_k})^2 + (LI_{sb_k})^2}$$

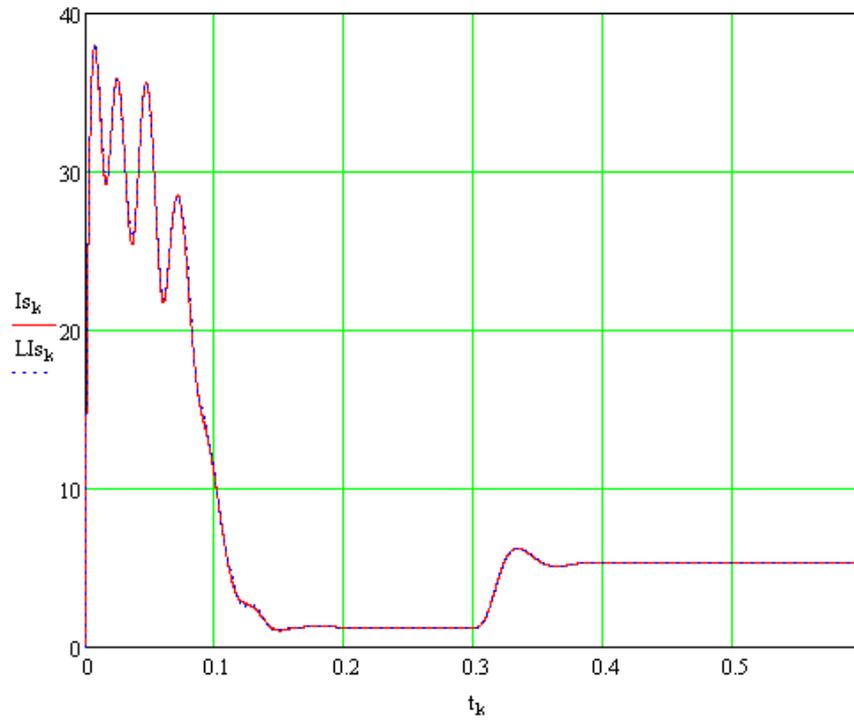


Рисунок 10

$$\psi_{r_k} := \sqrt{(\psi_{ra_k})^2 + (\psi_{rb_k})^2}$$

$$L\psi_{r_k} := \sqrt{(L\psi_{ra_k})^2 + (L\psi_{rb_k})^2}$$

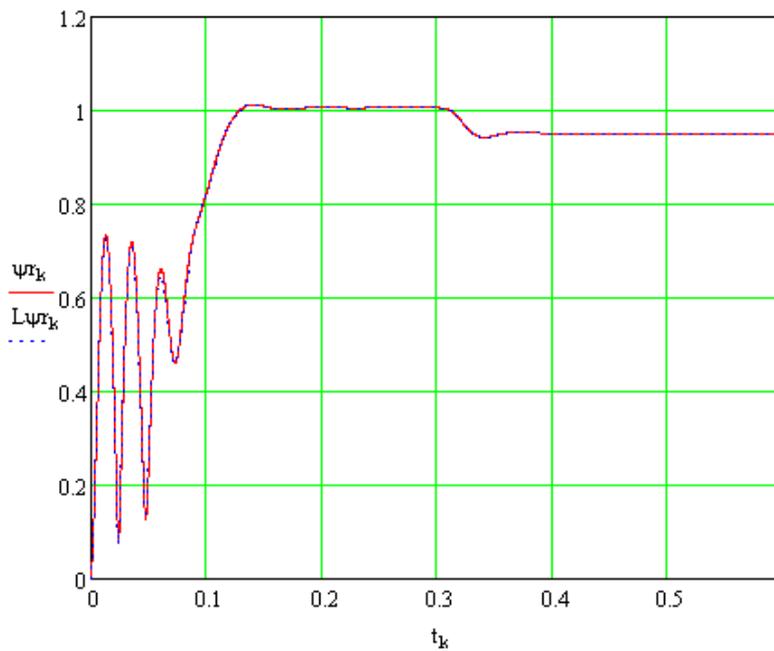


Рисунок 11

Из полученных графиков видно, что выходные переменные наблюдателя полного порядка практически абсолютно совпадают с аналогичными процессами в эталонной модели АД. Этот факт свидетельствует о возможности создания модели бездатчикового векторного асинхронного электропривода, в котором сигналы обратной связи по скорости и потокосцеплению ротора приходят в систему управления с наблюдателя полного порядка.

Проведем исследования при различных начальных условиях двигателя и наблюдателя.

Случай 1:  $\omega(0) = -\omega_H$ ;  $\hat{\omega}(0) = 0$

Изменяем вектор начальных условий:

$$\begin{pmatrix} t_0 \\ Isa_0 \\ Isb_0 \\ \psi_{ra0} \\ \psi_{rb0} \\ w_0 \\ LIsa_0 \\ LIsb_0 \\ L\psi_{ra0} \\ L\psi_{rb0} \\ Lw_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -148.7 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

В модели двигателя устанавливаем нулевой момент нагрузки:

$$\begin{pmatrix} t_{k+1} \\ Isa_{k+1} \\ Isb_{k+1} \\ \psi_{ra_{k+1}} \\ \psi_{rb_{k+1}} \\ w_{k+1} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} t_k + h \\ Isa_k + \frac{h}{Le} \cdot \left( U1\alpha(t_k) - Re \cdot Isa_k + Kr \cdot Ar \cdot \psi_{ra_k} + Kr \cdot zp \cdot w_k \cdot \psi_{rb_k} \right) \\ Isb_k + \frac{h}{Le} \cdot \left( U1\beta(t_k) - Re \cdot Isb_k + Kr \cdot Ar \cdot \psi_{rb_k} - Kr \cdot zp \cdot w_k \cdot \psi_{ra_k} \right) \\ \psi_{ra_k} + h \cdot \left( R2 \cdot Kr \cdot Isa_k - Ar \cdot \psi_{ra_k} - zp \cdot w_k \cdot \psi_{rb_k} \right) \\ \psi_{rb_k} + h \cdot \left( R2 \cdot Kr \cdot Isb_k - Ar \cdot \psi_{rb_k} + zp \cdot w_k \cdot \psi_{ra_k} \right) \\ w_k + \frac{h}{J} \cdot \left[ Km \cdot \left( \psi_{ra_k} \cdot Isb_k - \psi_{rb_k} \cdot Isa_k \right) - 0 \right] \end{pmatrix}$$

Снимаем графики переходных процессов.

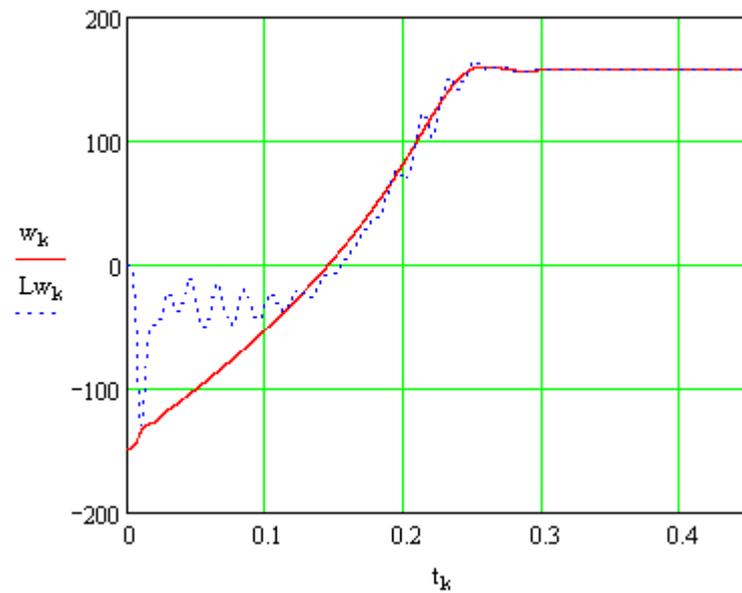


Рисунок 12

$$M_k := Km \cdot (\psi_{ra_k} \cdot Isb_k - \psi_{rb_k} \cdot Isa_k)$$

$$LM_k := Km \cdot (L\psi_{ra_k} \cdot LIsb_k - L\psi_{rb_k} \cdot LIsa_k)$$

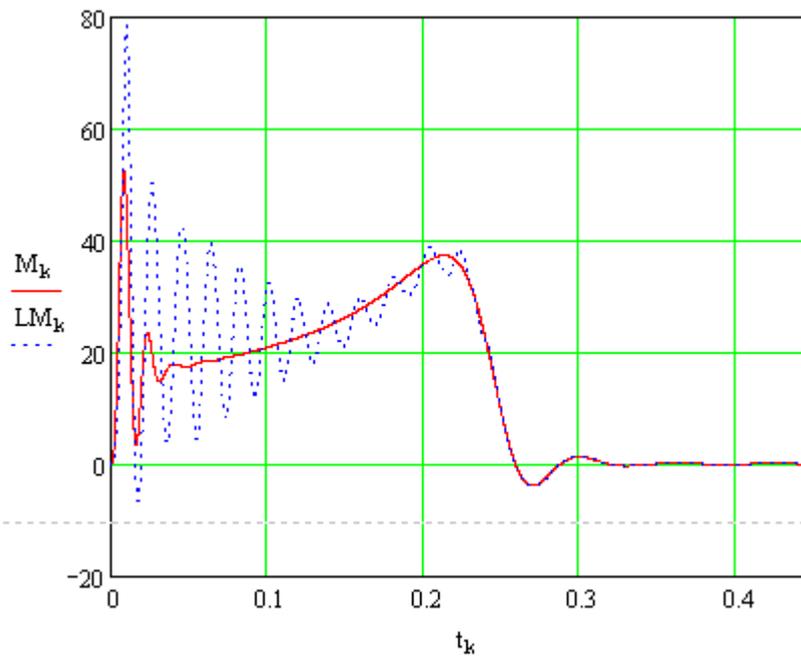


Рисунок 13

$$Is_k := \sqrt{(Isa_k)^2 + (Isb_k)^2}$$

$$LIs_k := \sqrt{(LIsa_k)^2 + (LIsb_k)^2}$$

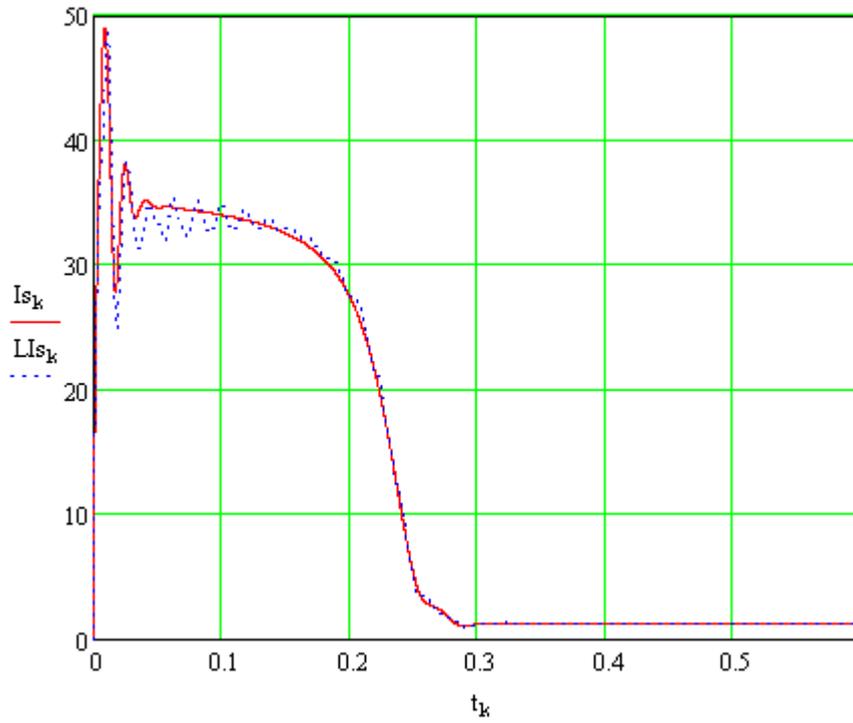


Рисунок 14

$$\psi r_k := \sqrt{(\psi r a_k)^2 + (\psi r b_k)^2}$$

$$L \psi r_k := \sqrt{(L \psi r a_k)^2 + (L \psi r b_k)^2}$$

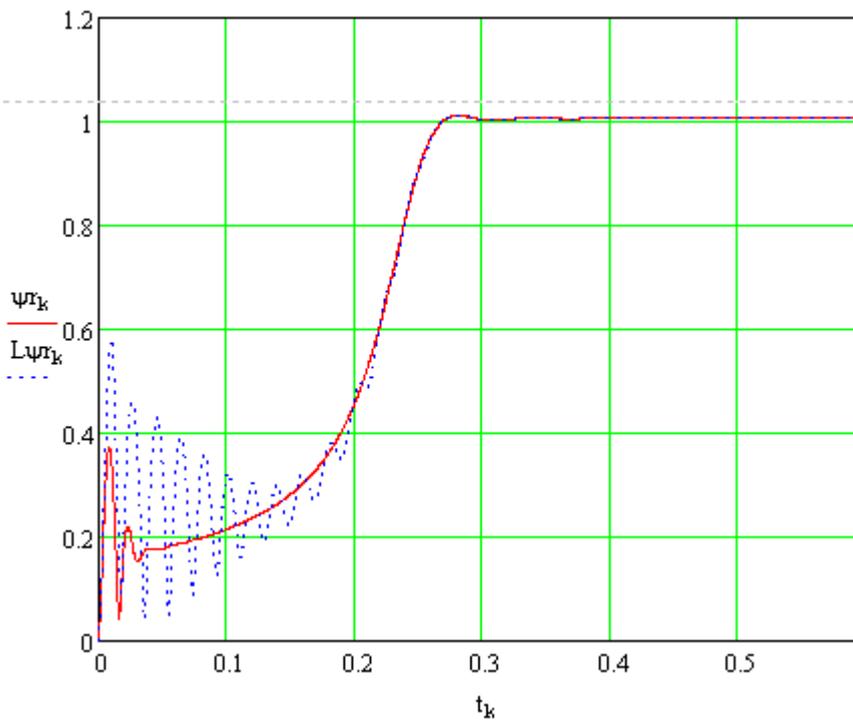


Рисунок 15

Случай 2:  $\omega(0) = -\omega_H$ ;  $\hat{\omega}(0) = \omega_H$

Аналогично меняем вектор начальных условий:

$$\begin{pmatrix} t_0 \\ I_{sa_0} \\ I_{sb_0} \\ \psi_{ra_0} \\ \psi_{rb_0} \\ w_0 \\ LI_{sa_0} \\ LI_{sb_0} \\ L\psi_{ra_0} \\ L\psi_{rb_0} \\ Lw_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -148.7 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 148.7 \end{pmatrix}$$

Момент нагрузки в модели двигателя оставляем нулевым.  
Снимаем графики переходных процессов.

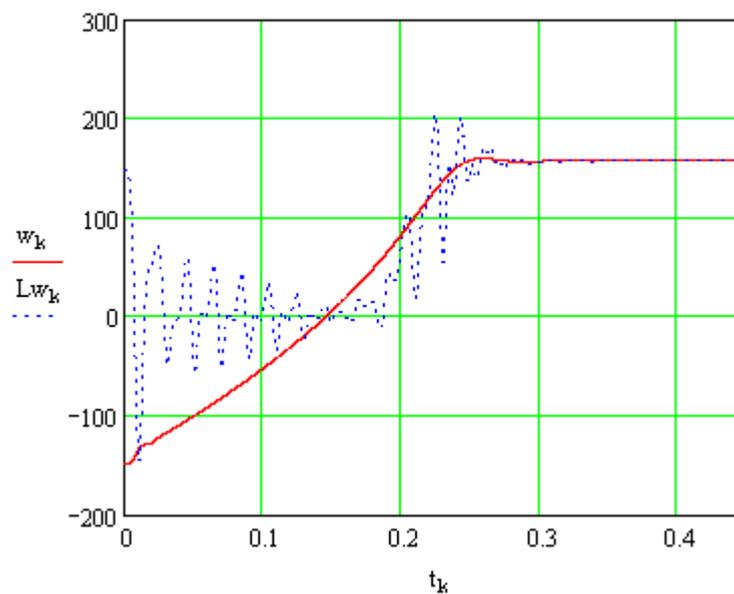


Рисунок 16

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

$$LM_k := Km \cdot \{ L\psi_{ra_k} \cdot LI_{sb_k} - L\psi_{rb_k} \cdot LI_{sa_k} \}$$

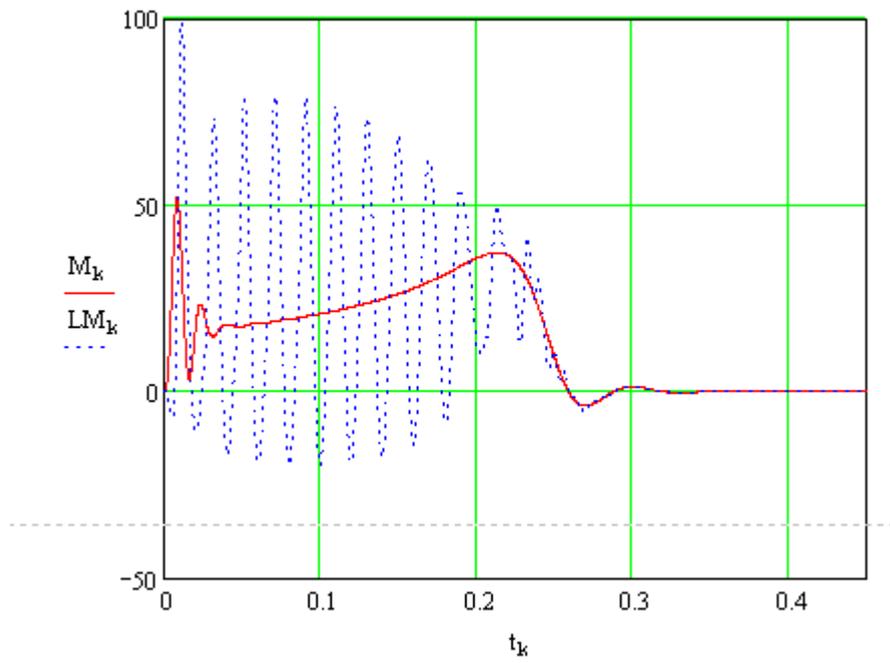


Рисунок 17

$$Is_k := \sqrt{(Isa_k)^2 + (Isb_k)^2}$$

$$LIs_k := \sqrt{(LIsa_k)^2 + (LIsb_k)^2}$$

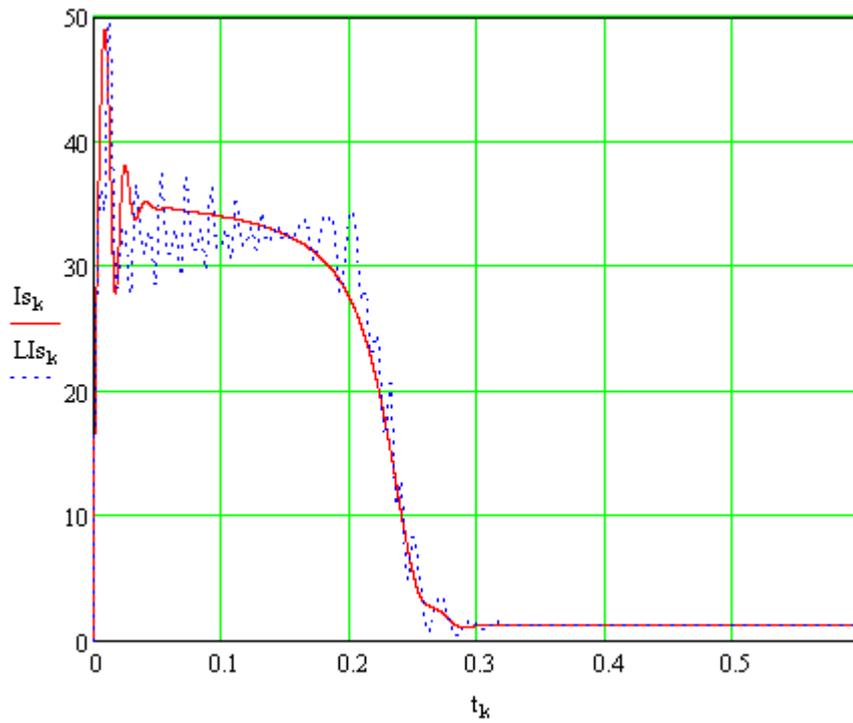


Рисунок 18

$$\psi_{rk} := \sqrt{(\psi_{ra_k})^2 + (\psi_{rb_k})^2}$$

$$L\psi_{rk} := \sqrt{(L\psi_{ra_k})^2 + (L\psi_{rb_k})^2}$$

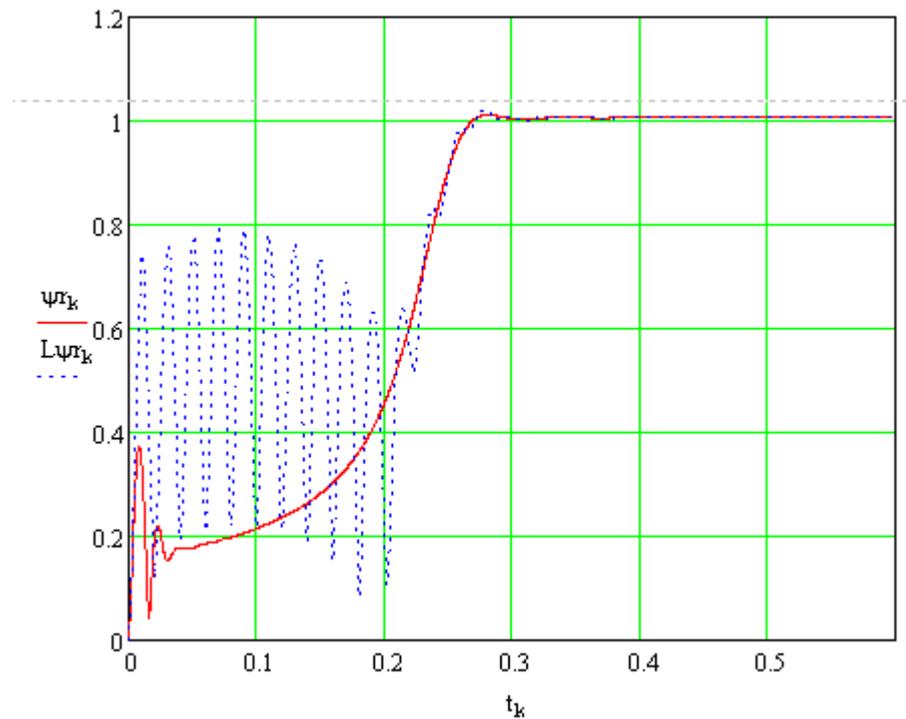


Рисунок 19

Из полученных графиков видно, что наблюдатель отрабатывает заданное значение скорости АД при ненулевых начальных условиях.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С НАБЛЮДАТЕЛЕМ ПОЛНОГО ПОРЯДКА В ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Для создания глубоко регулируемого высокودинамичного электропривода переменного тока наиболее целесообразным методом управления является векторное управление с ориентацией по вектору потокосцепления ротора.

Привода с векторным управлением обеспечивают:

- полное управление моментом двигателя во всём диапазоне скоростей;
- высокое качество регулирования момента и скорости;
- более высокую энергетическую эффективность двигателя и инвертора;
- раздельное управление потоком и моментом;
- значительную кратковременную перегрузку по моменту;
- работу привода во всех четырёх квадрантах.

Функциональная схема бездатчикового векторного асинхронного электропривода с наблюдателем полного порядка представлена на рисунке 10. Имитационная модель электропривода в программной среде MATLAB Simulink представлена на рисунке 11. Структурная схема наблюдателя

полного порядка и его имитационная модель приведены на рисунках 20 и 21 соответственно.

Система управления может быть создана только во вращающейся системе координат, а реальные токи и напряжения – это сигналы в неподвижной системе координат. В связи с этим регуляторы координат электропривода и модель двигателя в неподвижной системе координат необходимо согласовать посредством координатных преобразователей. Преобразование координат из неподвижной системы координат во вращающуюся и наоборот производят путем применения прямого и обратного преобразований Парка соответственно:

$$\left. \begin{aligned} i_x &= i_\alpha \cos\theta + i_\beta \sin\theta \\ i_y &= -i_\alpha \sin\theta + i_\beta \cos\theta \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} i_\alpha &= i_x \cos\theta - i_y \sin\theta \\ i_\beta &= i_x \sin\theta + i_y \cos\theta \end{aligned} \right\}.$$

На структурной схеме рисунка 10 эти преобразования осуществляются блоками ПКП (прямой преобразователь координат) и ОКП (обратный преобразователь координат).

Нелинейностями в представленном электроприводе являются ограничения на выходе регуляторов. Введение ограничений обусловлено необходимостью ограничения максимальной амплитуды напряжения обмоток АД, ограничения токов в статорных обмотках АД, а также ограничения момента на валу двигателя. Ограничения регуляторов имеют следующие значения:

$$U_x = 0,312 \cdot U_{\max} = 0,312 \cdot U_{\text{amp}} = 0,312 \cdot \sqrt{2} \cdot 220 = 97,072;$$

$$U_y = 0,95 \cdot U_{\max} = 0,95 \cdot U_{\text{amp}} = 0,95 \cdot \sqrt{2} \cdot 220 = 295,571;$$

$$I_x = 1,5 \cdot I_{\text{amp}} = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 4,958 = 10,518; \quad I_y = 2 \cdot I_{\text{amp}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 4,958 = 14,023.$$

На вход наблюдателя (НЛ) поступают статорные токи и напряжения АД, на выходе формируются оцененные значения скорости двигателя, модуля и угла поворота вектора потокосцепления ротора.

#### Протокол вводимых параметров:

```
%Параметры двигателя
n=1420;
w=pi*n/30;
f=50;
Rs=2.852;
Rr=2.785;
Ls_=3.533/(2*pi*f);
Lr_=4.765/(2*pi*f);
Lm=136.49/(2*pi*f);
p=4;
J=0.02;
Ls=Ls_+Lm;
Lr=(Lr_+Lm);
zp=p/2;
In=4.958;
Kr=Lm/Lr;
Re=Rs+Rr*Kr^2;
Le=Ls-Lm^2/Lr;
Uamp=220*sqrt(2);
```

```

Iamp=In*sqrt(2);
Ar=Rr/Lr;
Wref=2*pi*f;
Psi=0.95;
%Параметры системы управления
Kinv=1;
finv=10000;
Tinv=1/finv;
Te=Le/Re;
Krt=(Te*Re)/(2*Tinv*Kinv);
Trt=Te;
Krp=1/(2*2*Kr*Rr*Tinv);
Trp=1/Ar;
Krc=(98*J)/(1.5*zp*8*1024*Tinv*Psi);
Trc=98*Tinv;
Tf=32*4*Tinv;
%Нелинейности
Ux=0.312*Uamp;
Uy=0.95*Uamp;
Ix=1.5*Iamp;
Iy=2*Iamp;
Imax=2*Iamp;
Umax=Uamp;
Ka=2;
%шаг интегрирования
h=0.00001;L1=0.001;
L2=0.001;
Kpr=110;

```

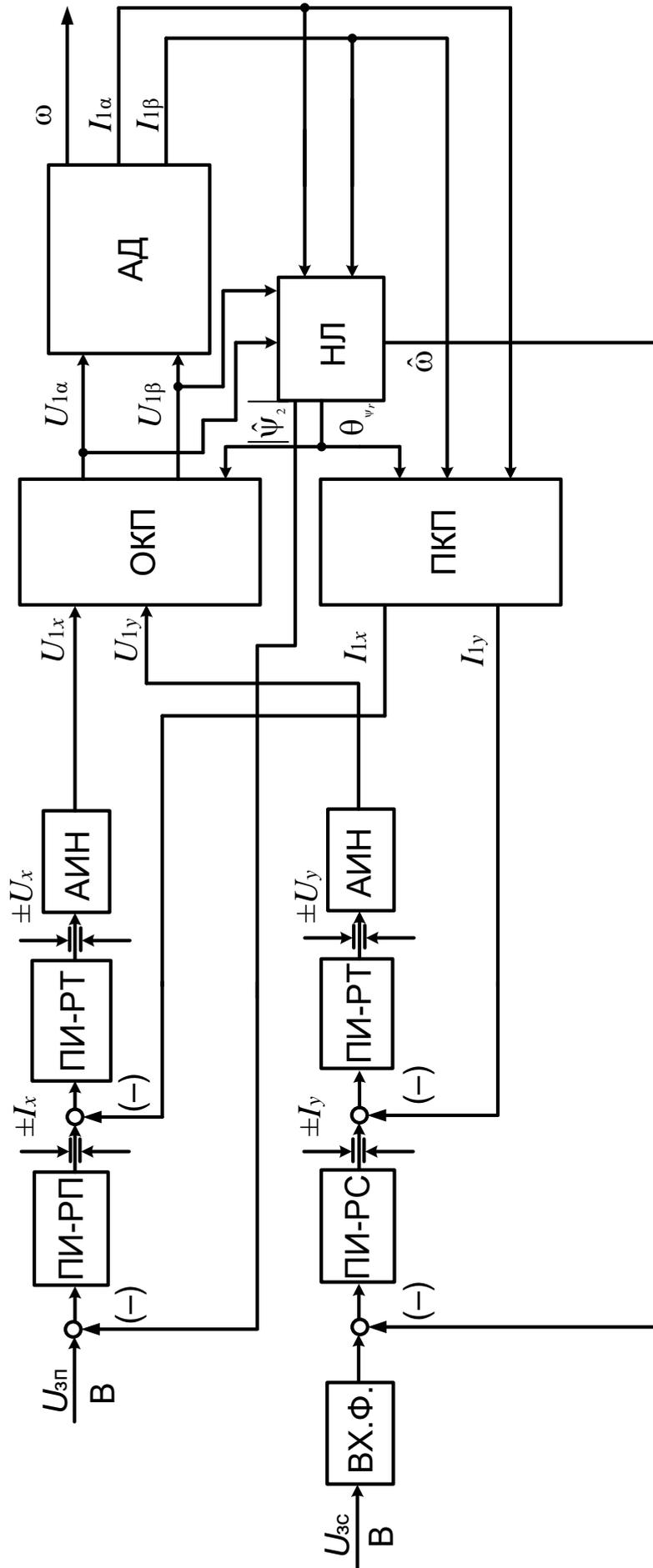


Рисунок 20 – Функциональная схема бездатчикового векторного асинхронного электропривода с наблюдателем Люенбергера в цепи обратной связи

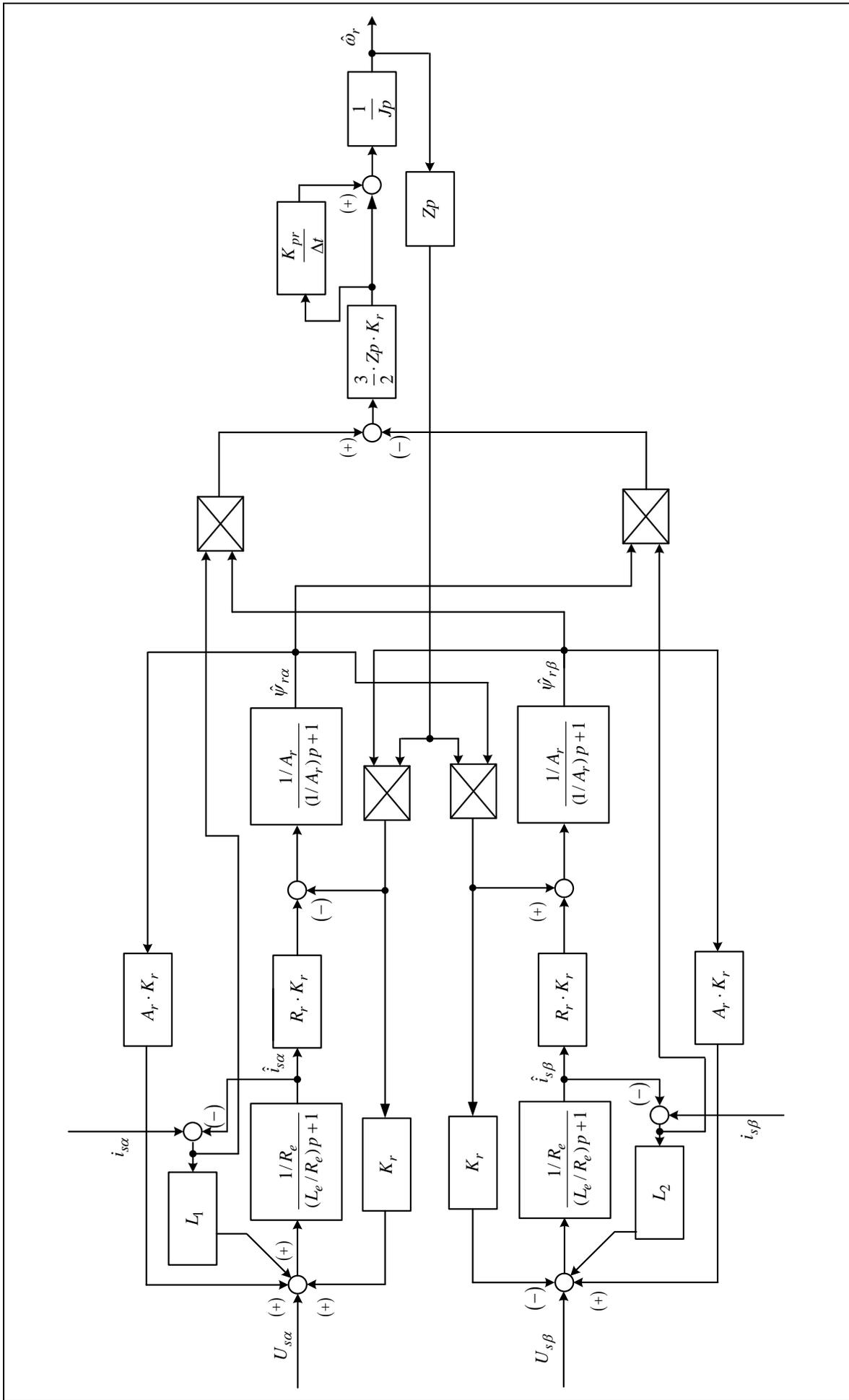


Рисунок 21 – Структурная схема наблюдателя Люенбергера



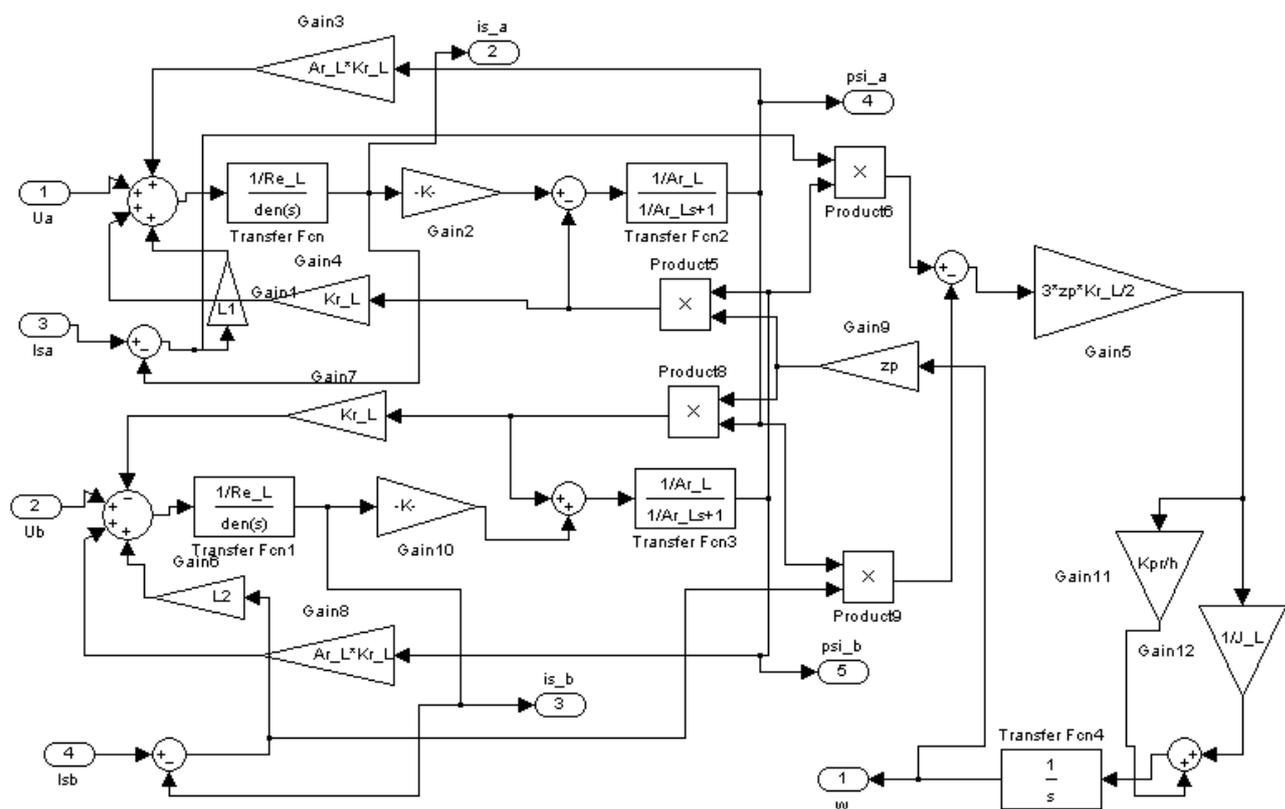


Рисунок 23 – Подсистема «Luenberger»

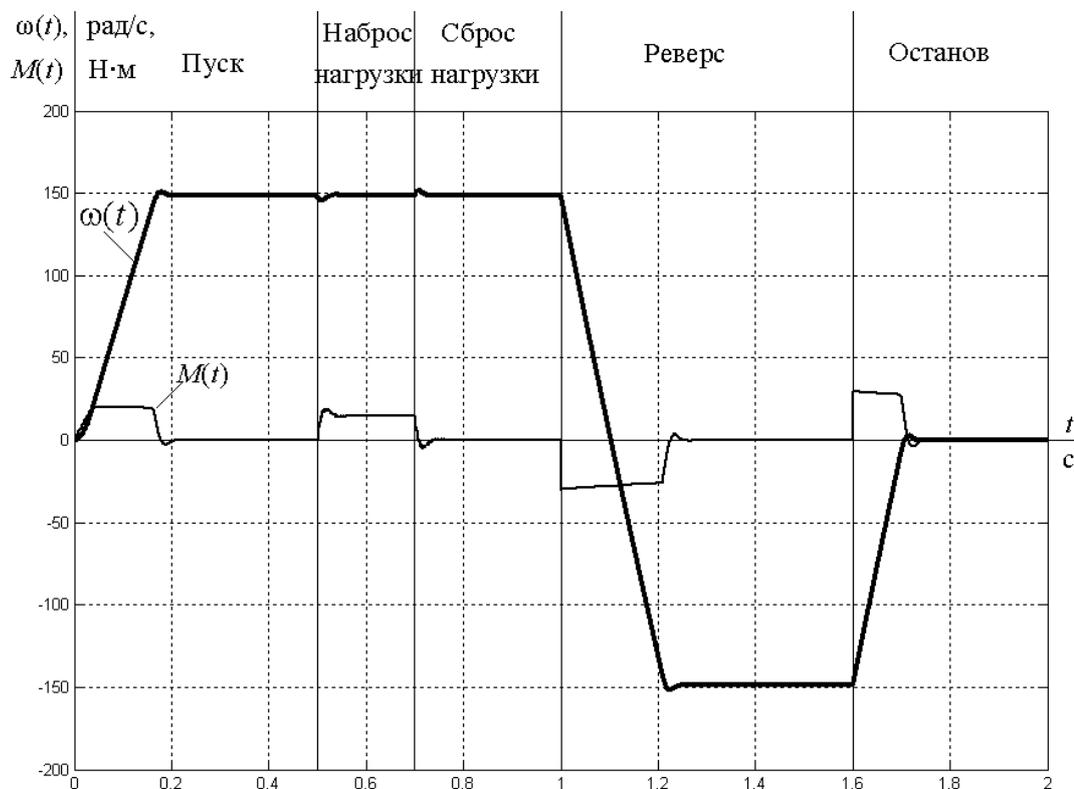


Рисунок 24 – Переходные процессы в векторном асинхронном электроприводе с наблюдателем полного порядка работе на максимальной скорости

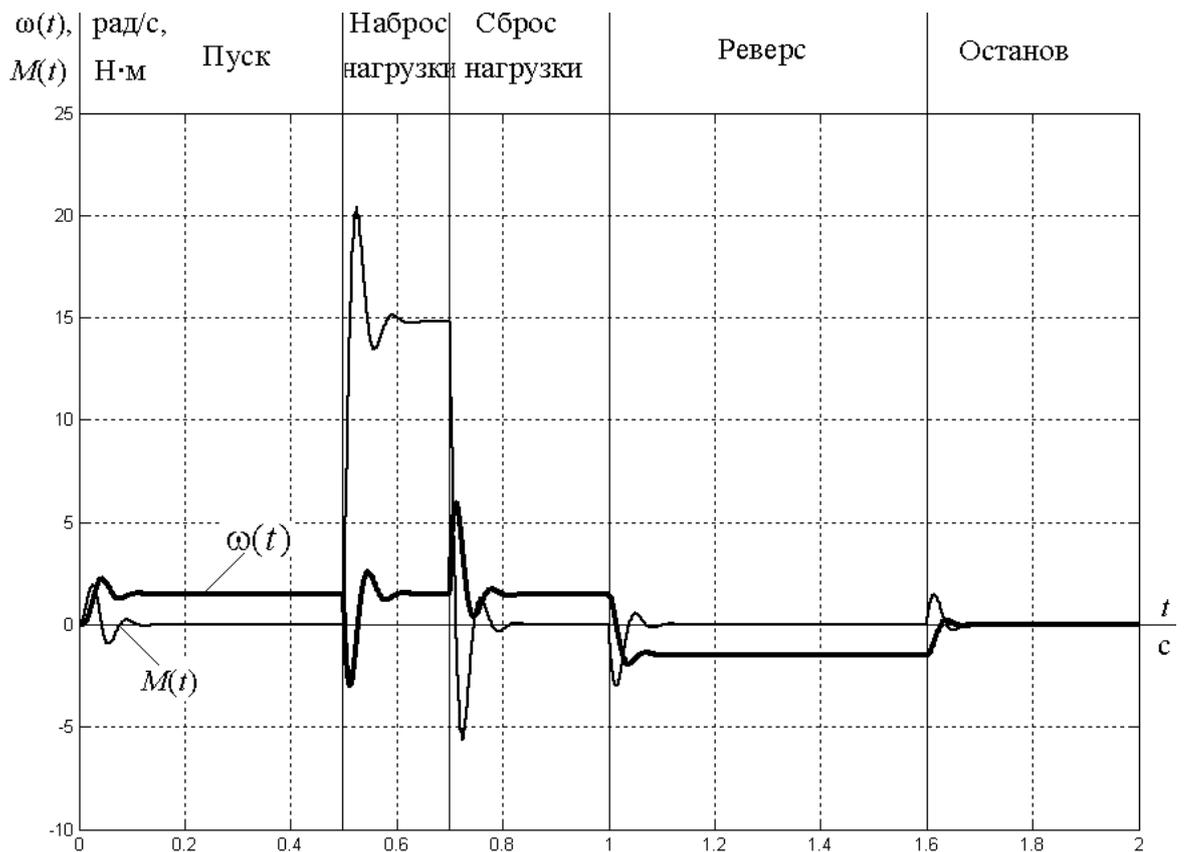


Рисунок 25 – Переходные процессы в векторном асинхронном электроприводе с наблюдателем полного порядка при работе на минимальной скорости в диапазоне регулирования 1:100

Результаты исследования доказали работоспособность модели векторного асинхронного электропривода с наблюдателем полного порядка в цепи обратной связи.