

УДК 621.313.333

**РАЗРАБОТКА ТРЕХФАЗНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ****МУСТАФАЕВ Р.И., САИДОВ Р.А., ГАСАНОВА Л.Г.***Аз НИ и ПИИ Энергетики, Аз Технологический институт*

Для исследования как нормальных, так и несимметричных и несинусоидальных режимов работы асинхронных двигателей, разработана трехфазная математическая модель, где уравнения машины записаны в заторможенных координатах. Подтверждена адекватность разработанной математической модели.

Наиболее целесообразным в настоящее время считается математическое моделирование асинхронных двигателей. При этом в качестве инструмента исследований широко используются аналоговые (АВМ) и цифровые (ЦВМ) вычислительные машины, однако в последние годы для моделирования и исследования режимов работы асинхронных машин широко используются персональные компьютеры (ПК). [1, 2, 3]

Математическая модель обобщенной электрической машины (ЭМ) [1] предполагает запись уравнений для заторможенной машины, причем, чтобы сохранить инвариантность мощности в реальной машине и машине с неподвижными обмотками, в уравнения вводят эдс вращения. Таким образом, уравнения Кирхгофа содержат выражения напряжений, падений напряжений на активных сопротивлениях, эдс вращения и трансформаторные эдс.

Практическое применение при моделировании машин нашли следующие системы координат, в которых записаны уравнения ЭМ: система координат d, q , жестко связанная с ротором машины, система координат α, β, θ , неподвижная относительно статора, система координат α_s, β_s , вращающаяся строго с синхронной скоростью или со скоростью вектора напряжения на зажимах машины, а также система координат d_v, q_v , вращающаяся с произвольной скоростью V .

Применение осей d, q , жестко связанных с ротором ЭМ, при исследовании переходных процессов имеет существенное преимущество только для несимметричных в магнитном и электрическом отношении машин (синхронные явнополюсные машины); для симметричных машин (асинхронные машины) наибольшее распространение получили оси α, β, θ , неподвижные относительно статора ЭМ, а также оси α_s, β_s , вращающиеся с синхронной скоростью ω_s .

При исследовании переходных процессов в асинхронных и синхронных машинах обычно рассматривают идеализированную двухфазную двухполюсную ЭМ, у которой вращаются обмотки ротора и неподвижны обмотки статора. На таких моделях можно исследовать большинство режимов работы асинхронных двигателей: пуск, разгон, наброс и сброс нагрузки и т.п. Однако, такое рассмотрение упускает вопросы несимметричных и несинусоидальных режимов работы, перевод машины, например, из трехфазного режима в однофазный и т.д.

Поэтому, для исследования таких режимов необходимо использовать трехфазную идеализированную машину, уравнения которой, представлены в [1]. Уравнения в заторможенных трехфазных координатах представляются в виде:

$$\begin{aligned}
U_{s\alpha} &= r_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \\
U_{s\beta} &= r_{s\beta} \cdot i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \\
U_{s\gamma} &= r_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} + \frac{d\psi_{s\gamma}}{dt} \\
-U_{r\alpha} &= r_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \frac{(\psi_{r\beta} - \psi_{r\gamma}) \cdot \omega_2}{\sqrt{3}} \\
-U_{r\beta} &= r_{r\beta} \cdot i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + \frac{(\psi_{r\gamma} - \psi_{r\alpha}) \omega_2}{\sqrt{3}} \\
-U_{r\gamma} &= r_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} + \frac{d\psi_{r\gamma}}{dt} + \frac{(\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta}) \cdot \omega_2}{\sqrt{3}} \\
\psi_{s\alpha} &= L_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} M \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{2} M \cdot i_{s\gamma} + M \left(i_{r\alpha} - \frac{1}{2} i_{r\beta} - \frac{1}{2} i_{r\gamma} \right) \\
\psi_{s\beta} &= L_{s\beta} \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{2} M \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} M \cdot i_{s\gamma} + M \left(i_{r\beta} - \frac{1}{2} i_{r\alpha} - \frac{1}{2} i_{r\gamma} \right) \\
\psi_{s\gamma} &= L_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} - \frac{1}{2} M \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} M \cdot i_{s\beta} + M \left(i_{r\gamma} - \frac{1}{2} i_{r\alpha} - \frac{1}{2} i_{r\beta} \right) \\
\psi_{r\alpha} &= L_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} + M \left(i_{s\alpha} - \frac{1}{2} i_{s\beta} - \frac{1}{2} i_{s\gamma} \right) - \frac{1}{2} M \cdot i_{r\beta} - \frac{1}{2} M \cdot i_{r\gamma} \\
\psi_{r\beta} &= L_{r\beta} \cdot i_{r\beta} + M \left(-\frac{1}{2} i_{s\alpha} + i_{s\beta} - \frac{1}{2} i_{s\gamma} \right) - \frac{1}{2} M i_{r\gamma} \\
\psi_{r\gamma} &= L_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} + M \left(-\frac{1}{2} i_{s\alpha} - \frac{1}{2} i_{s\beta} + i_{s\gamma} \right) - \frac{1}{2} M \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} M \cdot i_{r\beta} \\
M_{\text{ЭМ}} &= p_M \frac{\sqrt{3}}{2} M \left[(i_{s\alpha} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\beta} \cdot i_{r\alpha} + i_{s\gamma} \cdot i_{r\beta}) - (i_{s\alpha} \cdot i_{r\beta} + i_{s\beta} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\gamma} \cdot i_{r\alpha}) \right] \\
J \frac{d\omega_2}{dt} &= p_M (M_{\text{ЭМ}} - M_C)
\end{aligned} \tag{1}$$

В системе уравнений (1) $U_{s\alpha}, U_{s\beta}, U_{s\gamma}, U_{r\alpha}, U_{r\beta}, U_{r\gamma}$ – напряжения по осям α, β, γ , (т.е. фактически это фазные напряжения U_a, U_b, U_c) статорных и роторных контуров; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{s\gamma}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}, i_{r\gamma}$ – токи по тем же осям; $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{s\gamma}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}, \psi_{r\gamma}$ – потокосцепления по тем же осям; $L_{s\alpha}, L_{s\beta}, L_{s\gamma}, L_{r\alpha}, L_{r\beta}, L_{r\gamma}$ – полные индуктивности по осям α, β, γ ; M – взаимоиндуктивность между контурами; $M_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитный момент машины; p_M – число пар полюсов; ω_2 – частота вращения ротора; J – момент инерции ротора и приводного механизма.

Указанная система уравнений трехфазной асинхронной машины записана в заторможенной системе координат в именованных единицах.

Из этих уравнений необходимо перейти к такой форме записи, чтобы эту систему можно было бы решить на персональном компьютере (ПК). Приведем систему в относительные единицы, как это принято при исследовании переходных процессов в электрических машинах [2, 3].

За базисные величины принимаются: базисное напряжение $U_{\bar{\alpha}\beta\gamma} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{нф}}$; базисный ток $I_{\bar{\alpha}\beta\gamma} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{нф}}$; базисное сопротивление $Z_{\bar{\alpha}\beta\gamma} = \frac{U_{\bar{\alpha}\beta\gamma}}{I_{\bar{\alpha}\beta\gamma}}$; базисная мощность $P_{\bar{\alpha}\beta\gamma} = \frac{3}{2} U_{\bar{\alpha}\beta\gamma} \cdot I_{\bar{\alpha}\beta\gamma}$; угловая частота $\omega_{\bar{\alpha}\beta\gamma} = 314 \frac{1}{c}$; время $t_{\bar{\alpha}\beta\gamma} = 0,00318c$; момент $M_{\bar{\alpha}\beta\gamma} = \frac{P_{\bar{\alpha}\beta\gamma}}{\omega_{\bar{\alpha}\beta\gamma}}$; потокосцепление $\psi_{\bar{\alpha}\beta\gamma} = \frac{U_{\bar{\alpha}\beta\gamma}}{\omega_{\bar{\alpha}\beta\gamma}}$; момент инерции $J_{\bar{\alpha}\beta\gamma} = \frac{M_{\bar{\alpha}\beta\gamma}}{\omega_{\bar{\alpha}\beta\gamma}^2}$.

С учетом этого система уравнений (1) предстанет в о.е. в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned}
 U_{s\alpha} &= r_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} + p\psi_{s\alpha} \\
 U_{s\beta} &= r_{s\beta} \cdot i_{s\beta} + p\psi_{s\beta} \\
 U_{s\gamma} &= r_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} + p\psi_{s\gamma} \\
 -U_{r\alpha} &= r_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} + p\psi_{r\alpha} + (\psi_{r\beta} - \psi_{r\gamma})\omega_2 / \sqrt{3} \\
 -U_{r\beta} &= r_{r\beta} \cdot i_{r\beta} + p\psi_{r\beta} + (\psi_{r\gamma} - \psi_{r\alpha})\omega_2 / \sqrt{3} \\
 -U_{r\gamma} &= r_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} + p\psi_{r\gamma} + (\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta})\omega_2 / \sqrt{3} \\
 \psi_{s\alpha} &= x_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} - 0,5x_m \cdot i_{s\beta} - 0,5x_m \cdot i_{s\gamma} + x_m (i_{r\alpha} - 0,5i_{r\beta} - 0,5i_{r\gamma}) \\
 \psi_{s\beta} &= x_{s\beta} \cdot i_{s\beta} - 0,5x_m \cdot i_{s\alpha} - 0,5x_m \cdot i_{s\gamma} + x_m (i_{r\beta} - 0,5i_{r\alpha} - 0,5i_{r\gamma}) \\
 \psi_{s\gamma} &= x_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} - 0,5x_m \cdot i_{s\alpha} - 0,5x_m \cdot i_{s\beta} + x_m (i_{r\gamma} - 0,5i_{r\alpha} - 0,5i_{r\beta}) \\
 \psi_{r\alpha} &= x_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} + x_m (i_{s\alpha} - 0,5i_{s\beta} - 0,5i_{s\gamma}) - 0,5x_m \cdot i_{r\beta} - 0,5x_m \cdot i_{r\gamma} \\
 \psi_{r\beta} &= x_{r\beta} \cdot i_{r\beta} + x_m (-0,5i_{s\alpha} + i_{s\beta} - 0,5i_{s\gamma}) - 0,5x_m i_{r\gamma} - 0,5x_m \cdot i_{r\alpha} \\
 \psi_{r\gamma} &= x_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} + x_m (-0,5i_{s\alpha} - 0,5i_{s\beta} + i_{s\gamma}) - 0,5x_m \cdot i_{r\alpha} - 0,5x_m \cdot i_{r\beta} \\
 m_{\text{ЭМ}} &= p_M \frac{\sqrt{3}}{2} x_m [(i_{s\alpha} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\beta} \cdot i_{r\alpha} + i_{s\gamma} \cdot i_{r\beta}) - (i_{s\alpha} \cdot i_{r\beta} + i_{s\beta} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\gamma} \cdot i_{r\alpha})] \\
 \frac{J}{p_M} p\omega_2 &= m_{\text{ЭМ}} - m_C
 \end{aligned} \right\} (2)$$

В системе (2) требуют пояснения применительно к нашей задаче следующие обозначения: p – символ дифференцирования по времени $\tau = 314 t$; p_M – число пар полюсов; так как погружные асинхронные двигатели симметричны относительно всех трех фаз, то $r_{s\alpha} = r_{s\beta} = r_{s\gamma} = r_s$; $r_{r\alpha} = r_{r\beta} = r_{r\gamma} = r_r$; $x_{s\alpha} = x_{s\beta} = x_{s\gamma} = x_s = x_{\sigma s} + x_m$; $x_{r\alpha} = x_{r\beta} = x_{r\gamma} = x_r = x_{\sigma r} + x_m$; ротор короткозамкнутый, и поэтому $U_{r\alpha} = U_{r\beta} = U_{r\gamma} = 0$

Рассмотрим моделирование и исследование пускового режима асинхронной машины на разработанной трехфазной модели.

Но прежде, чем оперировать уравнениями (2), нужно представить их в удобном виде, в соответствии с требованиями решения алгебро-дифференциальных уравнений на персональных компьютерах (ПК).

Что касается первых шести уравнений, они должны быть решены относительно потокосцеплений.

$$\left. \begin{aligned}
 p\psi_{s\alpha} &= U_{s\alpha} - r_s \cdot i_{s\alpha} \\
 p\psi_{s\beta} &= U_{s\beta} - r_s \cdot i_{s\beta} \\
 p\psi_{s\gamma} &= U_{s\gamma} - r_s \cdot i_{s\gamma} \\
 p\psi_{r\alpha} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\psi_{r\gamma} \cdot \omega_2 - \frac{1}{\sqrt{3}}\psi_{r\beta} \cdot \omega_2 - r_2 \cdot i_{r\alpha} \\
 p\psi_{r\beta} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\psi_{r\alpha} \cdot \omega_2 - \frac{1}{\sqrt{3}}\psi_{r\gamma} \cdot \omega_2 - r_2 \cdot i_{r\beta} \\
 p\psi_{r\gamma} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\psi_{r\beta} \cdot \omega_2 - \frac{1}{\sqrt{3}}\psi_{r\alpha} \cdot \omega_2 - r_2 \cdot i_{r\gamma}
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Роторные и статорные токи $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{s\gamma}$ и $i_{r\alpha}, i_{r\beta}, i_{r\gamma}$ должны определяться из уравнений потокосцеплений. Для этого запишем последующие шесть уравнений системы (2) в матричной форме [3]:

$$\begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{s\gamma} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \\ \psi_{r\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & x_s & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & -0,5x_m & x_s & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m \\ x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_r & -0,5x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_r & -0,5x_m \\ -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{s\gamma} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \\ i_{r\gamma} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Из выражения (4) легко могут быть получены уравнения для токов, если использовать обратную матрицу индуктивных сопротивлений. Эти уравнения предстанут в виде:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{s\gamma} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \\ i_{r\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & x_s & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & -0,5x_m & x_s & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m \\ x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_r & -0,5x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_r & -0,5x_m \\ -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{s\gamma} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \\ \psi_{r\gamma} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Таким образом, уравнения (3) и (5), а также два последних уравнения системы (2), составляют трехфазную цифровую модель.

Составим математическую модель конкретного двигателя.

Данные двигателя: мощность $P_H = 11$ кВт, номинальный момент $M_H = 72$ Нм, к.п.д. $\eta = 0,875$, $\cos \varphi = 0,87$; $U_{нф} = 220$ В; $I_{нф} = 21,53$ А; $R_1 = 0,462$ Ом; $R_2 = 0,312$ Ом (сопротивления роторных контуров приведены к статору), $x_{\sigma 1} = 0,831$ Ом; $x_{\sigma 2} = 1,262$ Ом; $x_m = 27,5$ Ом; $m_n = 2,2$; $m_k = 3$; $s_H = 0,028$; $2p = 4$; $J_{рот} = 0,04$ кгм²; $J_{мех} = 0,065$ кгм².

$$\begin{aligned}
 \text{Базисные величины:} \quad U_{\bar{\alpha}\beta\gamma} &= \sqrt{2} \cdot U_{нф} = 310 \text{ В}; & I_{\bar{\alpha}\beta\gamma} &= \sqrt{2} \cdot I_{нф} = 30,44 \text{ А}; \\
 Z_{\bar{\alpha}\beta\gamma} &= \frac{U_{\bar{\alpha}\beta\gamma}}{I_{\bar{\alpha}\beta\gamma}} = 10,2 \text{ Ом}; & \psi_{\bar{\alpha}\beta\gamma} &= \frac{U_{\bar{\alpha}\beta\gamma}}{\omega_{\bar{\alpha}\beta\gamma}} = 0,987 \text{ Вб}; & \omega_{\bar{\alpha}\beta\gamma} &= 314 \frac{1}{\text{с}}; & P_{\bar{\alpha}\beta\gamma} &= \frac{3}{2} U_{\bar{\alpha}\beta\gamma} I_{\bar{\alpha}\beta\gamma} = 0,987 \text{ Вт}; \\
 M_{\bar{\alpha}\beta\gamma} &= \frac{P_{\bar{\alpha}\beta\gamma}}{\omega_{\bar{\alpha}\beta\gamma}} = 45,1 \text{ Н} \cdot \text{м}; & J_{\bar{\alpha}\beta\gamma} &= \frac{M_{\bar{\alpha}\beta\gamma}}{\omega_{\bar{\alpha}\beta\gamma}} = 0,46 \cdot 10^{-3}.
 \end{aligned}$$

Возьмем вентиляторную характеристику [4] момента сопротивления, тогда в относительных единицах он предстанет в виде: $-m_{сн} = 0,4 + 1,26 \cdot \omega_2^2$. Напряжения

$$U_{s\alpha} = U_s \cdot \sin \tau; U_{s\beta} = U_s \cdot \sin(\tau + 2,09); U_{s\gamma} = U_s \cdot \sin(\tau - 2,09) \quad (6)$$

Цифровая модель для исследуемого двигателя предстанет в виде:

$$\left. \begin{aligned} p\psi_{s\alpha} &= 1 \cdot \sin \tau - 0,045 \cdot i_{s\alpha} \\ p\psi_{s\beta} &= 1 \cdot \sin(\tau + 2,09) - 0,045 \cdot i_{s\beta} \\ p\psi_{s\gamma} &= 1 \cdot \sin(\tau - 2,09) - 0,045 \cdot i_{s\gamma} \\ p\psi_{r\alpha} &= 0,578\psi_{r\gamma} \cdot \omega_2 - 0,578\psi_{r\beta} \cdot \omega_2 - 0,03 \cdot i_{r\alpha} \\ p\psi_{r\beta} &= 0,578\psi_{r\alpha} \cdot \omega_2 - 0,578\psi_{r\gamma} \cdot \omega_2 - 0,03 \cdot i_{r\beta} \\ p\psi_{r\gamma} &= 0,578\psi_{r\beta} \cdot \omega_2 - 0,578\psi_{r\alpha} \cdot \omega_2 - 0,03 \cdot i_{r\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Прямая матрица индуктивных сопротивлений двигателя принимает вид:

$$X = \begin{bmatrix} 2,78 & -1,348 & -1,348 & 2,69 & -1,348 & -1,348 \\ -1,348 & 2,78 & -1,348 & -1,348 & -2,69 & -1,348 \\ -1,348 & -1,348 & 2,78 & -1,348 & -1,348 & 2,69 \\ 2,69 & -1,348 & -1,348 & 2,82 & -1,348 & -1,348 \\ -1,348 & 2,69 & -1,348 & -1,348 & 2,82 & -1,348 \\ -1,348 & -1,348 & -1,348 & -1,348 & -1,348 & 2,82 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Ей соответствует обратная матрица:

$$X^{-1} = \begin{bmatrix} 7,069 & 2,438 & 2,438 & -2,798 & 1,688 & 1,688 \\ 2,438 & 7,069 & 2,438 & 1,688 & -2,798 & 1,688 \\ 2,438 & 2,438 & 7,069 & 1,688 & 1,688 & -2,798 \\ -2,798 & 1,688 & 1,688 & 5,755 & 1,169 & 1,169 \\ 1,688 & -2,798 & 1,688 & 1,169 & 5,755 & 1,169 \\ 1,688 & 1,688 & -2,798 & 1,169 & 1,169 & 5,755 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Выражение для электромагнитного момента:

$$m_{эм} = 4,65 \left[(i_{s\alpha} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\beta} \cdot i_{r\alpha} + i_{s\gamma} \cdot i_{r\beta}) - (i_{s\alpha} \cdot i_{r\beta} + i_{s\beta} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\gamma} \cdot i_{r\alpha}) \right] \quad (10)$$

Уравнение движения:

$$p\omega_2 = 0,012(m_{эм} - 0,4 - 1,26 \cdot \omega_2^2) \quad (11)$$

На рис. 1 представлена флюктограмма изменения электромагнитного момента погружного асинхронного электродвигателя мощностью 11 кВт, параметры которого были представлены выше, а также кривая изменения частоты вращения двигателя. Анализ этих кривых показывает, что при номинальной нагрузке кривая электромагнитного момента устанавливается на значении $m = 1,6$, что соответствует моменту $M = 72,16 \text{ Нм}$, так как паспортное значение номинального момента равно $M_{ном} = 72 \text{ Нм}$, то можно констатировать, что с погрешностью 0,2%, он отрабатывается правильно. Величина частоты вращения, определяется по флюктограмме (рис. 1) и равна 0,98, что также указывает на хорошее совпадение с паспортными данными ($\omega_n = 0,972$). Величины амплитуд токов по фазам А, В и С $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{s\gamma}$ (рис. 2, 3, 4) отрабатываются с чуть большей погрешностью. Все это подтверждает, что выбранная математическая модель, с определенной (не более 10%) погрешностью адекватно отражает значения ключевых параметров машины $m_{\max}; m_{\text{пуск}}; i_{s\max}; m_{ном}; S_{ном}$.

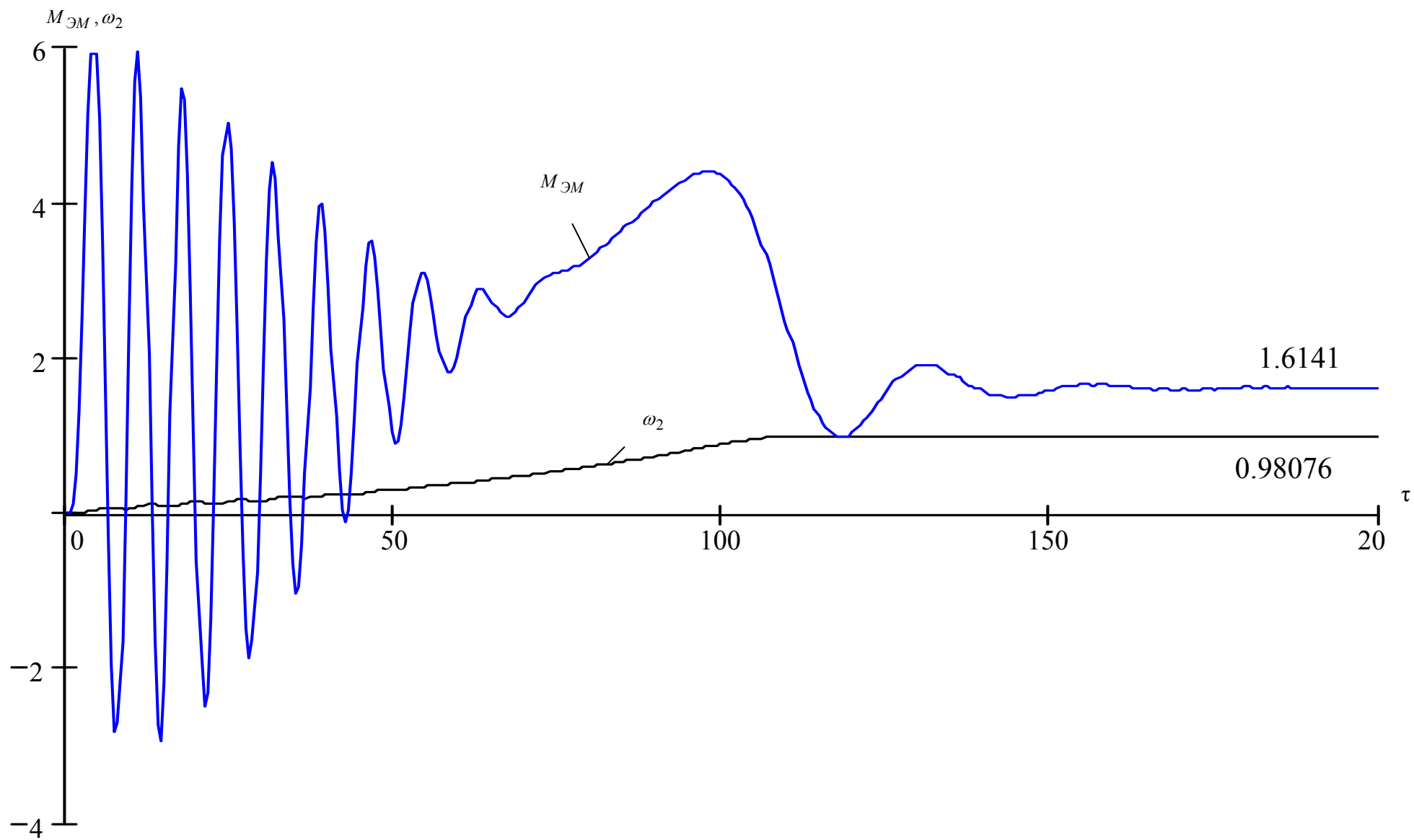


Рис. 1

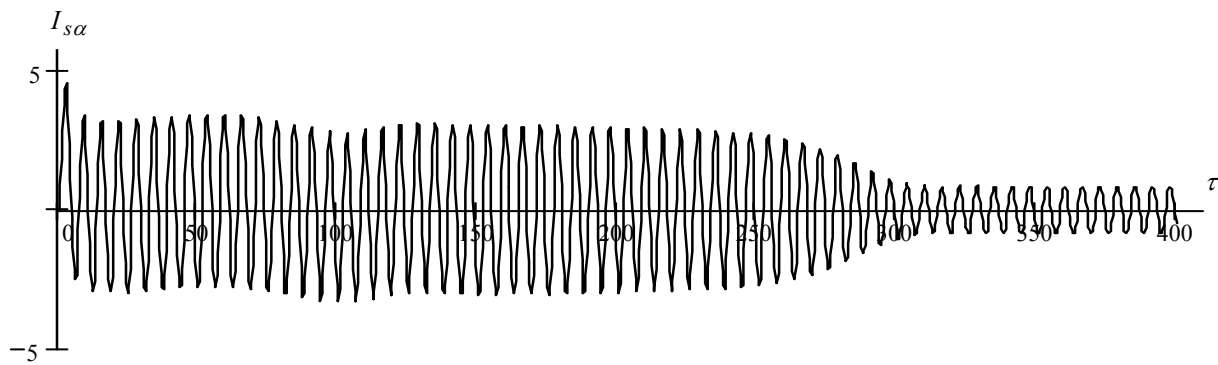


Рис. 2

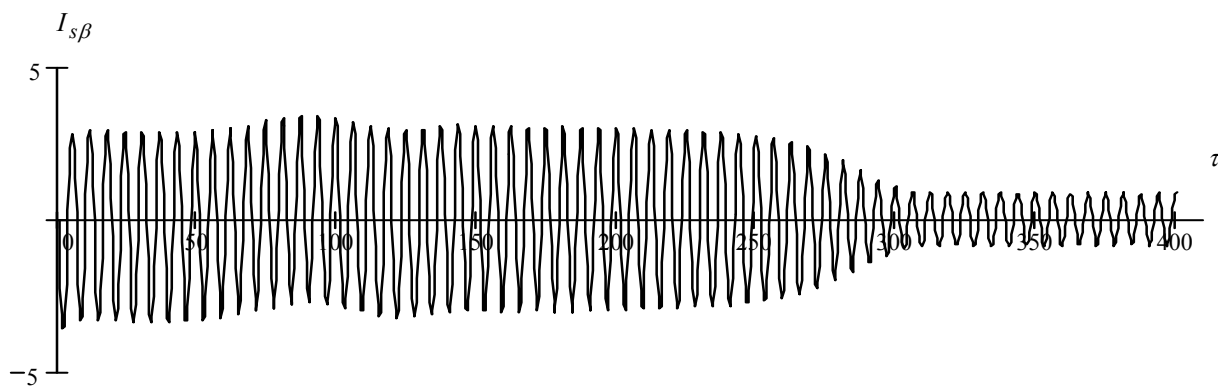


Рис. 3

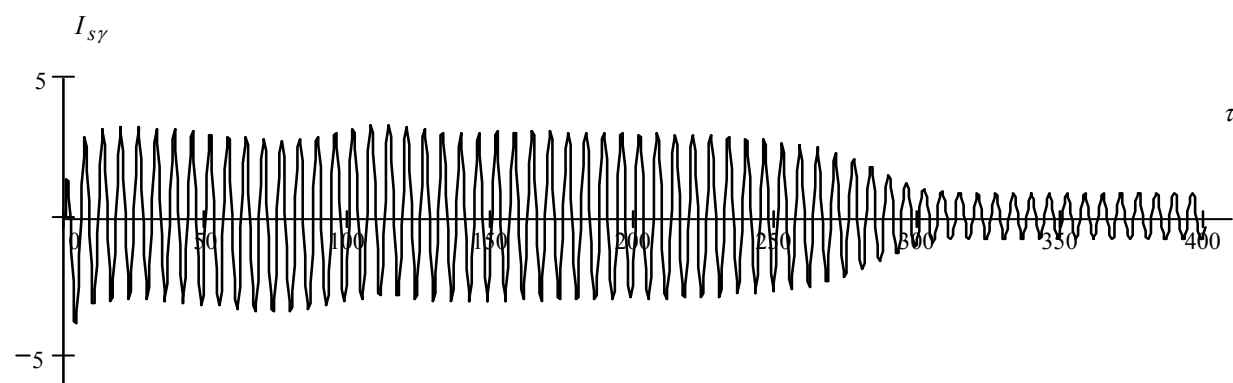


Рис. 4

Таким образом, флюктограммы рис. 1-4 отображают переходные и установившиеся процессы в исследуемой трехфазной машине в симметричном режиме, с нагрузкой, практически равной номинальной.

Вывод.

На базе подхода, представленного в [1], разработана математическая модель асинхронной трехфазной машины, подтверждена ее адекватность.

-
1. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин. М., Высшая школа, 1987 – 248с.
 2. *Сипайлов Т.А., Лоос А.В.* Математическое моделирование электрических машин. М., Высшая школа, 1980 – 176с.
 3. *Мустафаев Р.И.* Об универсальной структуре математической модели энергетических машин. Изв. Вузов СССР Электромеханики 1989 № 4
 4. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей М., Энергоатомиздат, 1984 – 240с.

ÜÇFAZALI ASINXRON İNTİQALIN RİYAZİ MODELİNİN İŞLƏNMƏSİ

MUSTAFAYEV R.İ., SƏİDOV R.Ə., HƏSƏNOVA L.H.

Asinxron intiqalın həm normal, həm də qeyri-simmetrik və qeyri sinusoidal rejimlərinin tədqiq olunması üçün tənlikləri yavaşıldılmış üçfazlı koordinat sistemində yazılmış maşının riyazi modeli işlənmişdir. İşlənmiş riyazi modelin adekvatlığı təsdiqlənmişdir.

DEVELOPMENT TO THREE-PHASE MATHEMATICAL MODEL OF THE ANISOCHRONOUS MOTOR

MUSTAFAYEV R.I., SAIDOV R.A., HASSANOVA L.H.

For analysis as normal so asymmetrical and nonsinusoidal state of working anisochronous engines is designed three-phase mathematical model where equations of the machine recorded in dullard coordinate. The adequacy of designed mathematical model is confirmed.