

УДК 622.625.28-83

Ю. М. Иньков, О. Н. Синчук, доктора техн. наук,
В. Ю. Захаров, канд. техн. наук,
Л. В. Сменова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Аннотация. Представлены предложения по практической реализации системы мониторинга электрических параметров тяговых асинхронных двигателей в составе тяговых электромеханических систем шахтных электровозов. Рассмотрены теоретические аспекты синтеза дискретной математической модели типа асинхронный двигатель – автономный инвертор напряжения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, шахтный электровоз, мониторинг электрических параметров, режимы функционирования, переходные процессы, математическая модель

Yu. In'kov, ScD., O. Sinchuk, ScD.,
V. Zaharov, PhD.,
L. Smenova

MODELING OF TRANSIENTS IN THE ASYNCHRONOUS TRACTION MOTOR OF MINE ELECTRIC LOCOMOTIVES

Abstract. Presents proposals for the practical implementation of electric parameters monitoring system of asynchronous traction engines in structure of mine electric locomotives traction electromechanical systems. The authors consider the theoretical aspects of the synthesis of discrete mathematical model type induction motor - autonomous inverter voltage.

Keywords: asynchronous motor, mine electric locomotive, monitoring electrical parameters, modes of functioning, transients, mathematical model

Ю. М. Иньков, О. М. Синчук, доктори техн. наук,
В. Ю. Захаров, канд. техн. наук,
Л. В. Сменова

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННОМУ ТЯГОВОМУ ДВИГУНІ ШАХТНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Анотація. Наведені пропозиції щодо практичної реалізації системи моніторингу електричних параметрів тягових асинхронних двигунів у складі тягових електромеханічних систем шахтних електровозів. Розглянуто теоретичні аспекти синтезу дискретної математичної моделі типу асинхронний двигун - автономний інвертор напруги.

Ключові слова: асинхронний двигун, шахтний електровоз, моніторинг електричних параметрів, режими функціонування, перехідні процеси, математична модель

Введение. Основным источником наполнения ВВП Украины является металлургическая промышленность и её базовая составляющая – горно-рудная подотрасль [1, 2], для которой важнейшей насущной задачей является сдерживание процесса естественного повышения себестоимости добываемого полезного ископаемого – железорудного сырья (ЖРС). Среди нереализованных направлений в этом стратегически важном для страны направлении является процесс доставки ЖРС от места добычи на поверхность [3].

Актуальность исследований. Основным видом транспорта, обеспечивающим 100 % доставки ЖРС в железорудных шахтах, является электровозный. В шахтных и подземных рудниках страны эксплуатируется около четырех тысяч электровозов 20 типов [3].

Как известно, технологические показатели электровозов во многом определяются соответствующими

показателями их тяговых электромеханических систем (ТЭМС) [6]. К сожалению, эксплуатируемые на отечественных шахтных электровозах контактно-резисторные ТЭМС далеки от совершенства по критериям надежности, энергоэффективности и возможности автоматического управления [7]. Вместе с тем отрадно, что в последние годы созданы и успешно прошли испытания в промышленных условиях новые образцы ТЭМС, в том числе: IGBT – преобразователи – тяговые асинхронные двигатели (ТАД) [7]. Однако, уже первые испытания подтвердили обязательность включения в ТЭМС подсистем мониторинга текущего состояния оборудования, в том числе идентификации электрических параметров тяговых электродвигателей [8].

Методы исследований. Как известно, важным шагом для достижения достоверности получаемых результатов и разработки способов идентификации параметров ТАД в комплексе ТЭМС является, прежде всего, оценка режимов их функционирования [6]. Анализ известных исследований в этом направлении

© Иньков Ю.М., Синчук О.Н., Захаров В.Ю.,
Сменова Л.В., 2014

свидетельствует о том, что тяговые двигатели шахтных электровозов в отличие, к примеру, от магистральных типов, около 60 % времени функционирования находятся в неустановившихся переходных режимах [8].

Важно, что для различных шахт и различных глубин добычи ЖРС эти режимы неизменны. Изменяется, да и то незначительно, только их долевое участие во времени этой слагаемой технологического цикла движения электровозов [9].

Однако, не взирая на этот тезис, нужно иметь в виду, что в силу весьма сложных базовых основ процессов, протекающих в шахтных электровозах, безусловно целесообразным видится проведение исследований математического моделирования с последующим сравнением полученных результатов с экспериментальными значениями. При этом моделированию подвергнем именно процессы в ТАД – объекте идентификации в действующем периоде времени.

Материалы исследований. В практике моделирования процессов в ТАД имеется немалое количество апробированных моделей, которые, как правило, создавались адресно для конкретных исследовательских целей [4 – 12].

Между тем известно [6], что непрерывная математическая модель тягового асинхронного двигателя представляет собой многосвязную систему, которая содержит внутренние нелинейные обратные связи. Поэтому при синтезе с целью упрощения непрерывной системы используют математическую модель ТАД во вращающейся системе координат. Синтезированные при этом системы носят название систем с векторным управлением, которые используют как опорный вектор главного потокосцепления или потокосцепления ротора ТАД. Реже используется в качестве опорного вектора потокосцепление статора [6].

Для синтеза автоматических регуляторов и анализа динамических режимов замкнутых САР с асинхронными двигателями, синтезированными для векторного управления, используются двухфазные математические модели, которые адекватно отбивают процессы, которые протекают в реальной машине. Наиболее общей формой математического описания двухфазных моделей есть система дифференциальных уравнений и уравнений связи, которые оперируют с токами и напряжениями в координатах $\alpha - \beta$, получаемыми из фазных координат [3],

$$\begin{aligned} U_{\alpha S} &= \frac{d\psi_{\alpha S}}{dt} + R_S I_{\alpha S} + \psi_{\beta R} \omega_K \\ U_{\beta S} &= \frac{d\psi_{\beta S}}{dt} + R_S I_{\beta S} + \psi_{\alpha R} \omega_K \\ 0 &= \frac{d\psi_{\alpha R}}{dt} + R_R I_{\alpha R} + \psi_{\beta R} (\omega_K - \omega) \\ 0 &= \frac{d\psi_{\beta R}}{dt} + R_R I_{\beta R} - \psi_{\alpha R} (\omega_K - \omega) \\ M &= \frac{3}{2} L_m A (\psi_{\alpha S} \psi_{\beta R} - \psi_{\beta S} \psi_{\alpha R}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$M \pm M_C = J \frac{d\omega}{dt},$$

где R_S, R_R – активные, приведенные к статору сопротивления статора и ротора; L_S, L_R – активные, приведенные к статору сопротивления статора и ротора; L_m – главная магнитная взаимная индуктивность статора и ротора; A – коэффициент асинхронного двигателя; J – момент инерции механизма.

В неподвижной системе координат скорость обращения координатной системы $\omega_K = 0$, и выражение для напряжений

$$\begin{aligned} U_{\alpha S} &= U_m \cos \omega_S t = \sqrt{2} U_H \cos \omega_S t \\ U_{\beta S} &= -U_m \sin \omega_S t = -\sqrt{2} U_H \sin \omega_S t \end{aligned} \quad (2)$$

Токи статора $I_{\alpha\beta S}$ и ротора $I_{\alpha\beta R}$ с потокосцеплениями статора $\Psi_{\alpha\beta S}$ и ротора $\Psi_{\alpha\beta R}$ связаны соотношениями

$$\begin{aligned} I_{\alpha S} &= A (\psi_{\alpha S} L'_R - \psi_{\alpha R} L_m) \\ I_{\beta S} &= A (\psi_{\beta S} L'_S - \psi_{\beta R} L_m) \\ I_{\alpha R} &= A (\psi_{\alpha R} L_{SR} - \psi_{\alpha S} L_m) \\ I_{\beta R} &= A (\psi_{\beta R} L_{SR} - \psi_{\beta S} L_m) \end{aligned} \quad (3)$$

Дифференциальным уравнениям и уравнениям связей соответствует структурная схема электропривода в координатах $\alpha - \beta$ с ориентацией по току и потокосцеплению статора, приведенная на рис. 1. Она представляет собой нелинейную многосвязную систему.

Для исследования замкнутых САР для приводов на базе асинхронных двигателей (АД) с автономным инвертором напряжения (АИН) целесообразно перейти к трем фазным значениям напряжений и токов, которые можно непосредственно измерить.

Система дифференциальных уравнений при этом

$$\begin{cases} U_a = \frac{d\psi_a}{dt} + R_S I_a \\ U_b = \frac{d\psi_b}{dt} + R_S I_b \\ U_c = \frac{d\psi_c}{dt} + R_S I_c \\ 0 = \frac{d\psi_{\alpha R}}{dt} + R_R I_{\alpha R} + \psi_{\beta R} \omega \\ 0 = \frac{d\psi_{\beta R}}{dt} + R_R I_{\beta R} - \psi_{\alpha R} \omega \\ \frac{3}{2} L_m A (\psi_{\alpha S} \psi_{\beta R} - \psi_{\beta S} \psi_{\alpha R}) \pm M_C = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

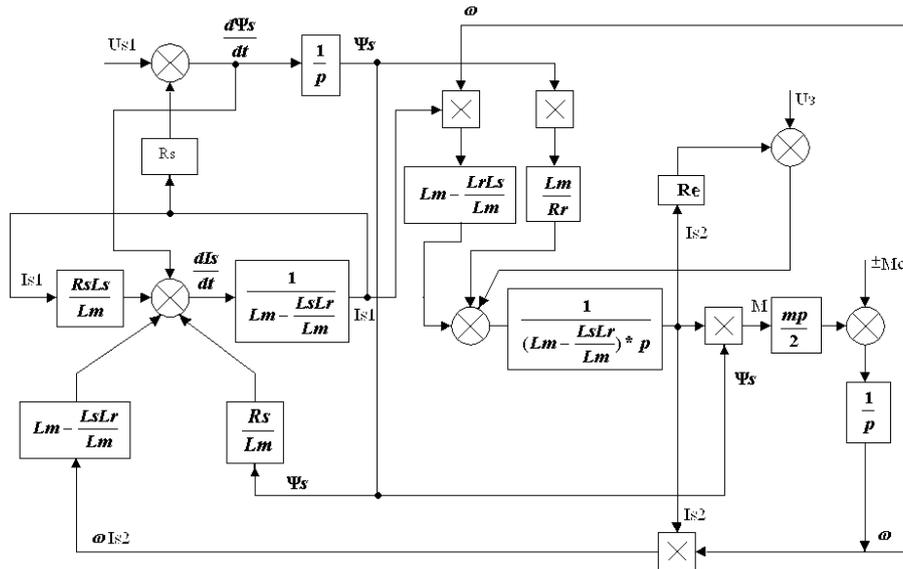


Рис. 1. Структурная схема тягового асинхронного электрического двигателя в осях $\alpha\beta$ с ориентацией по току статора

Уравнение связи фазных переменных с координатами α, β и $\omega_K = 0$

$$\begin{aligned} \psi_{\alpha S} &= \psi_a - 0.5(\psi_b + \psi_c) \\ \psi_{\beta S} &= \frac{\sqrt{3}}{2}(\psi_b - \psi_c) \\ \psi_S &= \sqrt{\psi_{\alpha S}^2 + \psi_{\beta S}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Фазные токи по математической модели АД в координатах ABC определяются [4] следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{3}{2} I_{\alpha S} \\ I_b &= \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\beta S} - \frac{1}{3} I_{\alpha S} \\ I_c &= -\frac{1}{\sqrt{3}} I_{\beta S} - \frac{1}{3} I_{\alpha S} \end{aligned} \quad (6)$$

Переходные процессы, полученные по приведённым выше формулам для измеряемых координат тягового асинхронного двигателя, представлены на рисунках 2; 3 и 4.

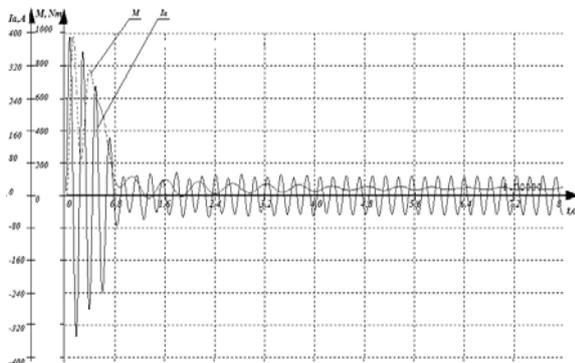


Рис. 2. Изменение во времени момента и тока статора тягового асинхронного двигателя при пуске

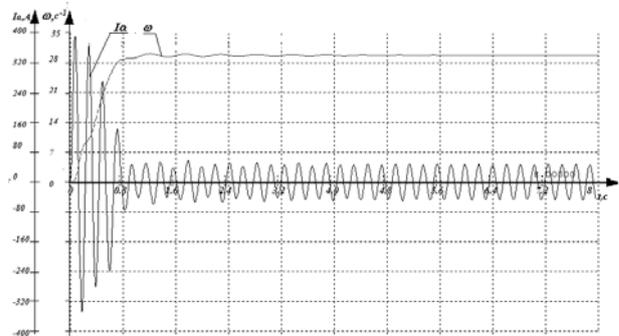


Рис. 3. Изменение во времени тока статора и скорости вращения тягового асинхронного двигателя при пуске

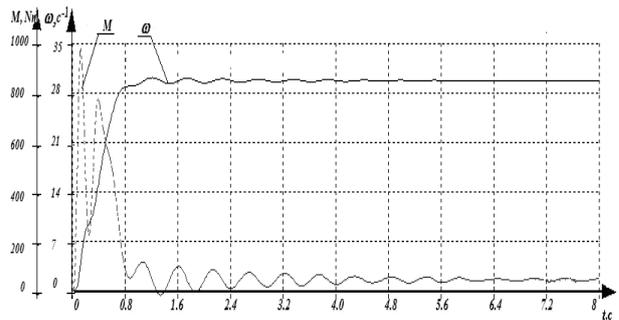


Рис. 4. Изменение во времени момента и тока статора тягового асинхронного двигателя при пуске

Уравнения возбуждения статора постоянным напряжением U_{Π}

$$\begin{aligned} \frac{dI_a}{dt} &= AL_r U_{\Pi} - I_a AL_r (R_S + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) + \psi_{\alpha} AL_r \frac{R_r}{L_r} \\ \frac{d\psi_a}{dt} &= 1,5 R_r \frac{L_m}{L_r} I_a - \frac{R_r}{L_r} \psi_a \\ \frac{d\psi_{\beta}}{dt} &= -0,886 I_a R_r \frac{L_m}{L_r} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{\beta} \\ I_b &= -I_a \end{aligned} \quad (7)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (7) позволяет получить информацию о токе и потокоцеплении статора в переходном процессе при включении на постоянное напряжение двух фаз тягового асинхронного двигателя (рис. 5).

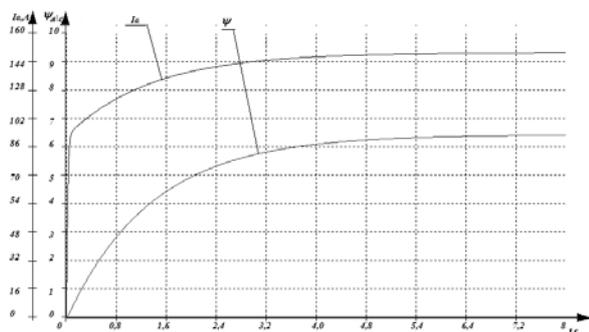


Рис. 5. Переходные процессы по току статора и потокоцеплению тягового асинхронного двигателя

Полученные выше результаты позволяют перейти к дифференцированному строению моделей асинхронных электрических двигателей в комплексе двухдвигательного тягового электропривода шахтных электровозов.

Системы управления, синтезированные на основе непрерывных моделей, которые не учитывают дискретность преобразователя частоты, для исключения нежелательных явлений уменьшают быстродействие системы в 1,5 – 2 раза в сравнении с возможным быстродействием.

Дискретная модель АД с АИН во вращающейся системе координат может быть полученная при рассмотрении непрерывного объекта АД – АИН обеспеченного импульсными и фиксирующими элементами. В таких системах возникает необходимость многоазовых координатных преобразований токов, потокоцеплений и напряжений АД и исходные сигналы регуляторов. Для реализации таких систем нужен микропроцессор (МП) значительной вычислительной мощности. Если при синтезе используются дискретные модели АД относительно значений переменных станом на концах интервала дискретности АИН, то возникает необходимость быстродействующих аналогово-цифровых преобразований в строго определенное время, которое снижает надежность преобразований через препятствия в измеренных цепях и через собственную погрешность преобразователя, особенно при переходе их значений через нуль. Кроме того, неучет конечного времени фиксации существенным образом снижает точность работы всей системы.

В данное время важным фактором, который влияет на стоимость и применимость ПЧ-АД, это необходимость применения датчика скорости или положения, непосредственно связанного с валом АД. Отсутствие датчика скорости приводит к тому, что системы управления АД строятся по принципу поддержания необходимого закона частотного управления. Диапазон регулирования скорости не

превышает 1:20. Определение скорости без механических или встроенных в конструкцию датчиков электрических и магнитных величин наталкивается на трудности в определении производных токов или статора и ротора АД.

Таким образом, актуальной является задача синтеза дискретной математической модели АД-АИН, что разрешает осуществить разработку высококачественных систем микропроцессорного управления, которые не требуют для своей реализации датчика скорости или датчиков магнитного потока.

Построение дискретной модели АД-АИН следует осуществлять в неподвижной системе координат, так как параметры такой модели не зависят от частоты обращения ротора, а также легкость перехода в другие системы координат.

Уравнения возбуждения статора постоянным током

$$\frac{dI_a}{dt} + I_a AL_r (R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) = AL_r U_{\Pi} - \psi_{\alpha} AL_r \frac{R_r}{L_r} \quad (8)$$

$$\frac{d\psi_{\alpha}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \psi_{\alpha} = 1,5 R_r \frac{L_m}{L_r} I_a$$

Анализ полученных дифференциальных уравнений при включении двух фаз на постоянное напряжение показывает, что переходные процессы, протекающие в электромагнитной системе асинхронного двигателя, описываются двумя уравнениями или системой второго порядка и имеют аналитическое решение.

Введем постоянные коэффициенты:

$$b_1 = AL_r; b_2 = 0$$

$$a_{11} = AL_r (R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}); a_{12} = 1,5 AL_m \frac{R_r}{L_r}$$

$$a_{21} = 1,5 R_r \frac{L_m}{L_r}; a_{22} = \frac{R_r}{L_r}$$

Считая, что на интервале времени $0 < t < T$ и $U_s = U - const$, значения тока и потокоцепления в момент времени T определим путем замены интеграла произведения произведением интегралов. При этом получим

$$b_1 U \int_0^T e^{-t\rho} dt = b_1 \bar{U} \frac{1 - e^{-T\rho}}{\rho} \quad (9)$$

Введем обозначение $\bar{I}_a = \int_0^T I_a(t) dt$, называемое средним. Применим теорему Чебышева о замене интеграла произведения двух функций произведением интегралов и представим второй интеграл следующим образом:

$$\int_0^T I_a(t) e^{-t\rho} dt = \frac{\int_0^T I_a(t) dt \int_0^T e^{-t\rho} dt}{\int_0^T dt} + R_{01} \quad (12)$$

Преобразуя интеграл с учетом \bar{I}_a , получим:

$$\int_0^T I_a(t)e^{-T\rho} dt = \frac{\bar{I}_a(1-e^{-T\rho})}{\rho} + R_{01} = \frac{\bar{I}_a(1-e^{-T\rho})}{\rho} - \frac{T^4/3 - T^4/4}{T} \rho \left(\frac{dI_S}{dt} \right)_{MAX}, \quad (13)$$

где $(de^{-T\rho}/dt)_{MAX} = -\rho e^{-t\rho} = -\rho$ при $t=0$ на интервале $0 < t < T$.

Аналогично

$$\int_0^T \psi_\alpha(t)e^{-T\eta} dt = \frac{\bar{\psi}_\alpha(1-e^{-T\eta})}{\eta} + R_{02} = \frac{\bar{\psi}_\alpha(1-e^{-T\eta})}{\eta} - \frac{T^4/3 - T^4/4}{T} \eta \left(\frac{d\psi_\alpha}{dt} \right)_{MAX}, \quad (14)$$

Подставим полученные значения интегралов в уравнения

$$I_a(T) - I_a(0)e^{-T\rho} = b_1 \bar{U} (1 - e^{-T\rho}) + a_{12} \frac{\bar{\psi}_\alpha}{\eta} (1 - e^{-T\eta}), \quad (15)$$

$$\psi_\alpha(T) - \psi_\alpha(0)e^{-T\eta} = a_{21} \frac{\bar{I}_a}{\rho} (1 - e^{-T\rho}), \quad (16)$$

где $I_a(T), \psi_\alpha(T), I_a(0), \psi_\alpha(0)$ – значения тока статора и потокосцепления статора в конце и начале интервала $0 < t < T$.

Уравнения в Z-форме по мгновенному значению тока в дискретные моменты

$$I_a(z)(Z - e^{-T\rho}) = b_1 \bar{U}(z) - a'_{12} \bar{\psi}_\alpha. \quad (17)$$

Уравнение среднего значения тока

$$\bar{I}_a(z)\rho = b_1 \bar{U}(z) - a_{12} \bar{\psi}_\alpha - \frac{b_1 \bar{U}(z) - a'_{12} \bar{\psi}_\alpha}{Z - e^{-T\rho}} (Z - 1). \quad (18)$$

В окончательном виде система рекуррентных формул для среднего значения тока и потокосцепления при включении двух фаз асинхронного двигателя на постоянное напряжение имеет вид:

$$\begin{cases} \bar{I}_a[n] = \bar{I}_a[n-1]e^{-T\rho} + \bar{U}[n] \frac{(b_1 - b_1')}{\rho} - \bar{U}[n-1] \times \\ \times \frac{(b_1 e^{-T\eta} - b_1')}{\rho} - \frac{\bar{\psi}_\alpha[n-1](1 - e^{-T\rho}) a'_{21}}{\rho} \\ \bar{\psi}_\alpha[n] = \bar{\psi}_\alpha[n-1]e^{-T\eta} + \bar{I}_a[n] \left(1 - a_{21} \frac{1 - e^{-T\eta}}{\eta} \right) \end{cases} \quad (19)$$

Для получения разностного уравнения, в котором используются только средние значения токов, измеренные на n -ом интервале, примем, что среднее значение тока с большой точностью определяется с помощью трапеций, причем на первом интервале $I_S(n=0) = 0$. Тогда среднее значение тока на интервале $n = 1$

$$\bar{I}_{S1} = \frac{I_S(T) + I_S(0)}{2} T = \frac{I_S(n=1)}{2} T. \quad (20)$$

На втором интервале $n = 2$, $I_{S(1)} = 2\bar{I}_{S1}$, а среднее значение тока по методу трапеций:

$$\bar{I}_{S2} = \frac{I_{S(2)} + I_{S(1)}}{2} T = \frac{I_{S(2)} + 2\bar{I}_{S1}}{2} \frac{1}{T} T. \quad (21)$$

Выражение (21) позволяет определить мгновенное значение тока в конце второго ($n=2$) интервала:

$$I_{S(2)} = 2(\bar{I}_{S2} - \bar{I}_{S1})/T. \quad (22)$$

Таким образом, можно составить рекуррентную формулу для определения тока на концах интервала по средним значениям

$$I_{S(n+1)} = 2(\bar{I}_{S(n+1)} - \bar{I}_{S_n})/T \quad (23)$$

или в Z-форме

$$\begin{aligned} I_S Z^2 &= 2(\bar{I}_S Z - \bar{I}_S Z^0)/T \\ I_S Z^1 &= 2(\bar{I}_S Z^0 - \bar{I}_S Z^{-1})/T \\ I_S Z^0 &= 2(\bar{I}_S Z^{-1} - \bar{I}_S Z^{-2})/T \end{aligned} \quad (24)$$

Использование форм представления средних значений переменных зависит от требований, которые предъявляются к качеству результатов вычислений, в которых используется измеренное или расчетное значение. Использование значений переменных в определенные моменты времени, как например, в моменты окончания периода, требуют высокого быстродействия технических средств и сильно подвержено влиянию помех. Избежать негативных явлений при использовании быстродействующих и дорогих аналого-цифровых преобразователей возможно при использовании аппаратной реализации преобразовании средних значений переменных необходимых для реализации требуемых законов регулирования и идентификации.

На рис. 6 для сравнения приведены осциллограммы расчёта переходного процесса для тока статора при включении статорной обмотки на постоянное напряжение, рассчитанные по мгновенным значениям при решении дифференциальных уравнений и по средним значениям в соответствии с формулами (16).

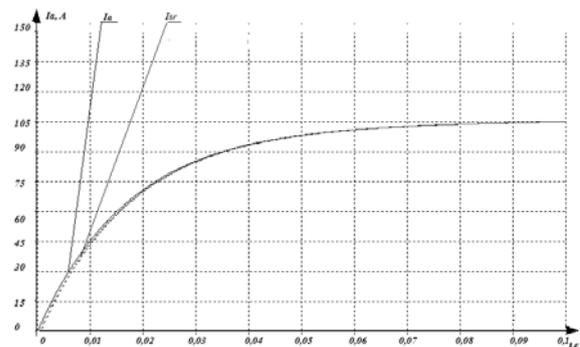


Рис. 6. Осциллограммы расчета переходных процессов при включении фазной обмотки тягового асинхронного на постоянное напряжение для мгновенных и средних токов

Переходные процессы для тока статора в режиме включения на трехфазное переменное напряжение с амплитудой 40 В и частотой 5 Гц приведены на рис. 7. Период дискретности аналого-цифрового преобразователя $\Delta T_{\Delta} = 10^{-4}$ с. Расхождение в расчетах составляет по току $\Delta I = 1,5$ А, что соответствует 1 %. Хорошее совпадение результатов расчетов, дает

возможность заменить решение системы дифференциальных уравнений методами Рунге –Кутты или методом Башарина расчетом по рекуррентным формулам. При этом в 15 – 20 раз сокращается время вычислений параметров асинхронных двигателей, что дает возможность идентификации в реальном времени в штатных режимах работы.

На рис. 8 приведены осциллограммы частоты вращения ТАД при пуске.

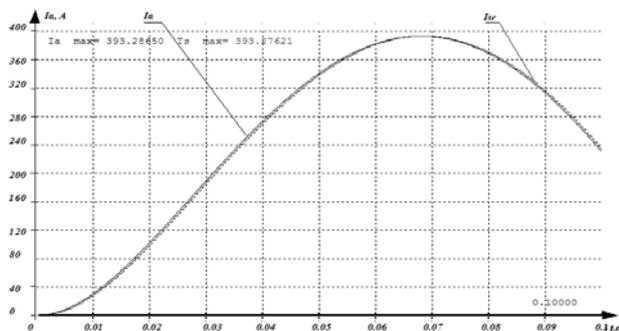


Рис. 7. Осциллограммы расчета переходных процессов при включении фазной обмотки тягового асинхронного двигателя на переменное напряжение для мгновенных и средних токов

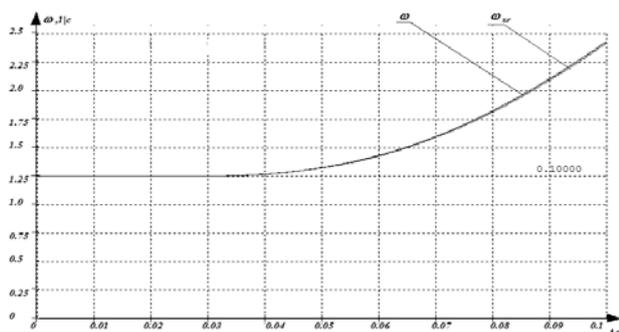


Рис. 8. Осциллограммы частоты вращения тягового асинхронного двигателя при пуске

Построение систем идентификации и микропроцессорного управления асинхронным электроприводом с преобразователем частоты на основе АИН возможно при наличии дискретной математической модели, которая, будучи относительно простой, довольно точно описывает процессы.

Расчет параметров осуществляется по внутреннему диаметру D статора и расчетной длине l_σ воздушного зазора АД. Диаметр статора D и длина l_σ воздушного зазора определяются требуемым моментом M' , с мощностью P' , угловой скоростью Ω и электромагнитными нагрузками AB_δ :

$$D^2 l_\sigma = \frac{2M'}{\pi A \alpha_\delta B_\delta K_{об} K_B'},$$

$$D^2 l_\sigma = \frac{2P'}{\Omega \pi A \alpha_\delta B_\delta K_{об} K_B'}.$$
 (25)

Мощность асинхронного двигателя P и электромагнитный момент M при постоянстве конструктивных параметров

$$P' = \pi A \alpha_\delta B_\delta K_{об} K_B' D^2 l_\sigma \Omega / 2,$$
 (26)

$$M = \pi A \alpha_\delta B_\delta K_{об} K_B' D^2 l_\sigma / 2,$$
 (27)

Таким образом, P' и развиваемый момент M определяются токовой нагрузкой A магнитной индукцией B_δ в воздушном зазоре. В свою очередь, индукция P' зависит от магнитного потока в зазоре Φ_δ , определяемого магнитными свойствами сердечников стали статора и ротора. Ухудшение магнитной проницаемости стали при постоянстве нагрузки на валу двигателя приводит к увеличению токовой нагрузки A и перегреву обмоток двигателя с их последующим разрушением. Поэтому необходимо параллельно с изменением свойства стали в худшую сторону уменьшать нагрузку на двигатель.

Анализ полученных выражений для расчета индуктивности статора и ротора по конструктивным параметрам показывает, что они определяются только конструкцией АД и их изменение может произойти только при нарушении целостности конструкции. Отсюда следует, что при расчете параметров АД по экспериментальным данным их можно считать известными. Таким образом, основное влияние на эксплуатационные показатели и характеристики асинхронного двигателя оказывает взаимная индукция обмоток статора и ротора L_μ , зависящая от состояния магнитной системы.

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора X_μ для Т – образной схемы замещения приводится в справочных данных изготовителя.

При исполнении обмоток статора и ротора из одного материала конструктивный коэффициент K_{sr} можно принять постоянным и независимым от температуры.

Расчет конструктивных коэффициентов для всего диапазона мощностей и скоростей вращения показывает, что их границы значений находятся в следующих пределах:

$$K_{sr} = 2,76 - 0,4;$$

$$K_{ls} = 1,17 - 1,01;$$

$$K_{lr} = 1,23 - 1,017.$$

Для тягового асинхронного двигателя мощностью 55 кВт расчетные значения конструктивных коэффициентов по каталожным данным таковы:

$$K_{sr0} = 44;$$

$$K_{ls0} = 1,034;$$

$$K_{lr0} = 1,06.$$

Выводы

1. При работе ТЭМС шахтных электровозов они превращаются в чрезвычайно сложный динамический объект, который с большим трудом поддается математическому описанию, математическому моделированию. Математические модели должны быть органически включены в работу системы управления при наличии соответствующей нормативной базы, наличия классификаторов, оперативно корректируемой информации, адекватного технического и программного обеспечения.

2. Недостатком известных методов определения параметров с применением известных методов оптимизации является необходимость применения функциональных зависимостей, которые должны быть заранее известны. Выполнение большого числа математических действий при реализации перечисленных ранее методов – решении системы линейных или дифференциальных уравнений высокого порядка повышает требования к функциональным возможностям микропроцессорной вычислительной системы и усложнению программного обеспечения.

Список использованной литературы

1. Синчук О. Н. К вопросу стратегии создания энергоэффективного и безопасного в эксплуатации двухосного электровоза для рудных шахт [Текст] / О. Н. Синчук, Е. С. Гузов, А. В. Омельченко, Д. А. Шокарев, Е. И. Скапа // *Гірничий вісник*. – Кривий Ріг : – 2012. – Вип. 95(1). – С. 139 – 141.

2. Оат Георгий Петрович. Исследование нагрузок тяговых двигателей электровозов рудных шахт / Автореферат диссертационной работы на соискание ученой степени канд. техн. наук. Спец. 05.09.03 – *Электротехнические комплексы и системы*. – Ленинград : Ленинградский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горный институт им. Г. В. Плеханова. – 1962. – 18 с.

3. Синчук О. Н. Вероятностно-статистический метод расчёта электрических нагрузок тяговых двигателей рудничных электровозов. [Текст] / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, А. В. Омельченко, Е. И. Скапа, В. О. Чёрная // *Электротехнические и компьютерные системы*. – К. : Техника. – 2012. – Вып. № 7(83). – С. 34 – 41.

4. Копылов И. П. Проектирование электрических машин: Учеб. Пособие для вузов / И. П. Копылов, Ф. А. Горянов, Б. К. Клоков и др.; под ред. Копылова И. П. – М. : Энергия, – 1980. – 496 с.

5. Потапенко Е. М. Определение скорости и постоянной времени ротора асинхронного двигателя с помощью адаптивного наблюдателя [Текст] / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко, А. В. Соломаха // *Матеріали 12-ої міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2005»*. – Харків : НТУ«ХПІ». – 2005. – Т.2. – С. 123 – 124.

6. Башарин А. И. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ: пособие для вузов. / А. И. Башарин, Ю. В. Постников – Л. : Энергоатомиздат, – 1990. – 512 с.

7. Столяров И. М. Метод косвенной оценки параметров и устройство для определения координат асинхронного двигателя [Текст] / И. М. Столяров, Г. А. Синельников, Н. И. Литвинов // *Изв. вузов. Горный журнал*. – 1984. – Вып. 10. – С. 102 – 105.

8. Берюляев Ю. А. Определение параметров условно-нелинейной модели асинхронной машины [Текст] / Ю. А. Берюляев, П. В. Ермутский, Г. П. Лычкин и др. // *Электрическое моделирование*. – 1985. – Вып. № 5. – С. 89 – 92.

9. Deleroi W. Определение параметров асинхронных машин по результатам измерений под нагрузкой [нем.] / W. Deleroi // *Etz. Arch.* (1985), – № 10. – С. 329 – 336.

10. А.с. 1372259 СССР. Способ определения активных и индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки ротора асинхронного двигателя / Г. Г. Рогозин, Ю. И. Печуркин, Н. Г. Пятлина, В. И. Алексеев. Заявл. 24.07.86.

11. Казаков Ю. Б. Микрокомпьютерная установка для снятия характеристик асинхронных двигателей [Текст] / Ю. Б. Казаков, С. А. Королев, В. А. Рубахин, С. Н. Рябов // *Регулирование электродвигателей переменного тока* – Владимир-Суздаль : *Электротехника*. – 1987. – № 5. – С. 29 – 31.

12. Коноплінський М. А. Дослідження алгоритму ідентифікації активних опорів статора і ротора асинхронного двигуна за різних тестових сигналів [Текст] / М. А. Коноплінський // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – Вінниця : – 2014. – № 1(112). – С. 86 – 90.

Получено 04.07.2014

References

1. Sinchuk O.N., Guzov E.S., Omel'chenko A.V., Shokarev D.A., and Skapa E.I. K voprosu strategii sozdaniya jenergojeffektivnogo i bezopasnogo v jekspluatácii dvuhosnogo jelektrovoza dlja rudnyh shaht [To the Question of Strategy of Energy-efficient and Safe in Operation for two-axle Electric Locomotive for ore Mines], (2012), *Girnichij Visnik*, Krivoy Rog, Ukraine, Vol. 95(1), pp. 139 – 141 (In Russian).

2. Oat Georgij Petrovich. Issledovanie nagruzok tjagovyh dvigatelej jelektrovozov rudnyh shaht; Avtoreferat dissertacionnoj raboty na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Spec. 05.09.03 – *Jelektrotehnicheskie komplekxy i sistemy* – Oat Georgij Petrovich [The study Loads of Traction Engines of Locomotives ore Mines], (1962), *Abstract of Cand. Sci. (Tech.) Dissertation*, Leningrad, Russian Federation, *Leningradskij Ordena Lenina i Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Gornyj Institut im. G. V. Plehanova*, 18 p. (In Russian).

3. Sinchuk O.N., Guzov Je.S., Omel'chenko A.V., Skapa E.I., and Chjornaja V.O. Verojatnostno-statisticheskij metod raschjota jelektricheskijh nagruzok tjagovyh dvigatelej rudnichnyh jelektrovozov [Probabilistic-statistical Method of Calculation of Electrical Loads of Traction Motors Mine Electric Locomotives], (2012), *Jelektrotehnicheskie and Komp'juternye Sistemy, Tehnika Publ.*, Kiev, Ukraine, Vol. 7(83), pp. 34 – 41 (In Russian).

4. Kopylov I.P., Gorjanov F.A., Klovov B.K. etc. Proektirovanie jelektricheskijh mashin: Ucheb. Posobie dlja vuzov [Design of Electric Machines: a Manual for High Schools], (1980), Moscow, Russian Federation, *Energiya Publ.*, 496 p. (In Russian).

5. Potapenko E.M., Potapenko E. E., and Solomaha A.V. Opredelenie skorosti i postojannoj vremeni rotora asinhronnogo dvigatelja s pomoshh'ju adaptivnogo nabl-

judatelja [Determination of Speed and Time Constant Rotor Induction Motor with Adaptive Observer], (2005), *Materiali XII Mizhnarodnoi Konferencii z Avtomatichnogo Upravlinnja "Avtomatika-2005", NTU "HPI" Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 2, pp. 123 – 124 (In Russian).

6. Basharin A.I., and Postnikov Ju.V. Primery rascheta avtomatizirovannogo jelektroprivoda na JeVM: Posobie dlja vuzov [Examples of the Calculation of Automated Electric Drive on the Computer: Manual for High Schools], (1990), Leningrad, Russian Federation, *Energoatomizdat Publ.*, 512 p. (In Russian)

7. Stoljarov I.M., Sinel'nikov G.A. and Litvinov N.I. Metod kosvennoj ocenki parametrov i ustrojstvo dlja opredelenija koordinat asinhronnogo dvigatelja [Method for Indirect Evaluation of Parameters and Device for Determination of Coordinates of Asynchronous Motor], (1984), *Izv. Vuzov. Goryz Zhurnal*, Russian Federation, Vol. 10, 102 p. (In Russian)

8. Berjuljaev Ju.A., Ermutskij P.V., Lychkin G.P. etc. Opredelenie parametrov uslovno-nelinejnoj modeli asinhronnoj mashiny [Determination of Parameters of Conditionally Nonlinear Model of Asynchronous Machines], (1985), *Jelektricheskoe Modelirovanie*, Vol. 5, pp. 89 – 92 (In Russian).

9. Deleroi W. Opredelenie parametrov asinhronnyh mashin po rezul'tatam izmerenij pod nagruzkoy [Determination of Parameters of Asynchronous Machines on the Results of Measurements under Load], (1985), *Etz. Arch. Publ.*, Vol. 10, pp. 329 – 336 (In German)

10. Rogozin G.G., Pechurkin Ju.I., Pjatlina N.G., and Alekseev V.I. Sposob opredelenija aktivnyh i induktivnyh soprotivlenij rassejaniya obmotki rotora asinhronnogo dvigatelja [The Method of Definition of Active and Inductive Resistance Scattering Rotor Winding Induction Motor], (1986), USSR, *Copyright Certificate*, No. 1372259 (In Russian).

11. Kazakov Ju.B., Korolev S.A., Rubahin V.A., and Rjabov S.N. Mikrokompjuternaja ustanovka dlja snjatija harakteristik asinhronnyh dvigatelej [Microcomputer unit for Removal of the Characteristics of Induction Motors], (1987), *Regulirovanie Jelektrodvigatelej Peregennogo Toka, Jelektrotehnika Publ.*, Vladimir-Suzdal', Russian Federation, Vol. 5, pp. 29 – 31 (In Russian).

12. Konoplins'kyj M.A. Doslidzhennja algoritmu identyfikacii' aktyvnyh oporiv statora i rotora asinhronnogo dvyguna za riznyh testovyh sygnaliv [Analysis of the Algorithm of Identification of Active Resistance of the Stator and Rotor Induction Motor with Different Test Signals], (2014), *Visnyk Vinnyc'kogo Politehničnogo Instytutu*, Vinnica, Ukraine, Vol. 1(112), pp. 86 – 90 (In Ukrainian)



Иньков
Юрий Моисеевич, д-р техн. наук, проф. каф. электропоездов и локомотивов Московского госуд. ун-та путей сообщения.
Россия, г. Москва,
ул. Образцова, 9.
Тел. +7 (495)681-13-40.
E-mail: tu@miit.ru



Синчук
Олег Николаевич, д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизированных электро-механических систем в промышленности и транспорте ГВУЗ «Криворожский национальный университет».
Украина, г. Кривой Рог,
ул. XXII партсъезда, 11.
Тел. (056) 409-17-30.
E-mail: speet@ukr.net



Захаров
Вячеслав Юрьевич,
канд. техн. наук, доц. каф. автоматизированных электро-механических систем в промышленности и транспорте ГВУЗ «Криворожский национальный университет».
Украина, г. Кривой Рог,
ул. XXII партсъезда, 11.
Тел. (056) 409-17-30.
E-mail: speet@ukr.net



Сменова
Людмила Витальевна, студентка Украинской госуд. академии железнодорожного транспорта.
Украина, г. Харьков,
пл. Файербаха, 7.
Тел. (056) 409-17-30.
E-mail: speet@ukr.net