

УДК 622.625.28-83

О. Н. Синчук, д-р техн. наук,
В. Ю. Захаров, И. О. Синчук, кандидаты техн. наук,
Л. В. Сменова

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

***Аннотация.** Приведены результаты исследований по разработке методов идентификации и оценке электрических параметров тяговых асинхронных двигателей. Предложена математическая модель двигателя и метод расчета его параметров. Обоснован способ определения реальных параметров асинхронных тяговых двигателей на базе новых информационных признаков, разработан алгоритм, позволяющий реализовать простые устройства для идентификации и диагностики параметров двигателей, определения минимума дополнительных аппаратных устройств, требуемых для их реализации.*

***Ключевые слова:** асинхронные тяговые электрические двигатели, процедуры идентификации и диагностики, параметры, электротехнические системы, конструктивный коэффициент асинхронного двигателя, математические модели, логарифмические функции, степенные ряды, линейная аппроксимация*

O. N. Sinchuk, ScD.,
V. Yu. Zakharov, PhD., **I. O. Sinchuk**, PhD.,
L. V. Smenova

IDENTIFICATION ELECTRICAL PARAMETERS OF THE TRACTION ASYNCHRONOUS ENGINES OF ELECTRIC LOCOMOTIVES

***Abstract.** Results of researches on working out of methods of identification and an estimation of electric parameters of traction asynchronous engines are resulted in the article. The mathematical model of the engine and a method of calculation of it parameters is offered. The way of asynchronous traction engines real parameters definition on the basis of new information signs is proved, the algorithm is developed, allowing to realize simple and sensitive, on a condition of calculations, devices for identification and diagnostics of parameters of engines, definitions of a minimum of the additional hardware devices demanded for their realization.*

***Keywords:** asynchronous traction electric motors, identification and diagnostics procedures, parameters, traction electrotechnical systems, constructive factor of the asynchronous engine, mathematical models, logarithmic functions, sedate numbers, linear approximation*

О. М. Сінчук, д-р техн. наук,
В. І. Захаров, І. О. Сінчук, кандидати техн. наук,
Л. В. Сменова

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

***Анотація.** Викладені результати досліджень з розробки методів ідентифікації та оцінки електричних параметрів тягових асинхронних двигунів. Запропоновано математичну модель двигуна та метод розрахунку його параметрів. Обґрунтовано спосіб визначення реальних параметрів асинхронних тягових двигунів на базі нових інформаційних ознак, розроблено алгоритм, який дає змогу реалізувати прості пристрої для ідентифікації та діагностики параметрів двигунів, визначення мінімуму допоміжних апаратних пристроїв, потрібних для їх реалізації.*

***Ключові слова:** асинхронні тягові електричні двигуни, процедури ідентифікації й діагностики, параметри, електротехнічні системи, конструктивний коефіцієнт асинхронного двигуна, математичні моделі, логарифмічні функції, степеневі ряди, лінійна апроксимація*

Введение. Энергоэффективные виды электротехнических комплексов, включающих IGBT-преобразователи и асинхронные двигатели, находят свое достойное применение в тяговых системах магистральных и различных типов электрифицированного

транспорта, в промышленных электровозах [1].

Тяговый электропривод, будучи одним из ключевых звеньев тягового электротехнического комплекса (ТЭТК) электровоза, должен жестко соответствовать заранее определенным критериям качества функционирования [1]. Последнее возможно лишь при соответствии реальных параметров слагаемых

© Синчук О.Н., Захаров В.Ю., Синчук И.О.,
Сменова Л.В., 2013

элементов ТЭТК их паспортным – заданным значениям [1]. Это, наряду с алгоритмами управления, определяет качество функционирования всего тягового комплекса. Поэтому состояние параметров и их изменение в процессе эксплуатации необходимо постоянно контролировать и отслеживать, иначе неизбежно возникнет аварийная ситуация [2].

Актуальность. Эффективность реализации в практику создания новых тяговых электротехнических комплексов во многом определяется тем, насколько разработчиками учтен комплекс требований, выдвигаемый к создаваемым типам транспорта с учётом условий их эксплуатации. В частности, выполнение требований, предъявляемых к электрифицированным видам транспорта, функционирующих в условиях подземных рудников (шахт), имеет решающее значение для эффективности работы всего горнодобывающего комплекса.

К сожалению, именно по причине недостаточности удовлетворения требований, проявившие себя положительно в последнее десятилетие экспериментальные разработки ТЭТК применительно к шахтным видам электровозов пока не пошли дальше опытных образцов.

И это притом, что уже первые результаты предварительных испытаний ТЭТК типа IGBT- преобразователь – тяговые асинхронные электрические двигатели с КЗ ротором подтвердили эффективность данных комплексов.

Вместе с тем специфика эксплуатации шахтных электровозов, оборудованных энергоэффективными тяговыми электротехническими комплексами, использующими тяговые асинхронные электрические двигатели (ТАД) с короткозамкнутым ротором (КЗ), выдвигает особые требования к таким их показателям, как КПД, коэффициент мощности, максимальный крутящий момент, начальный пусковой момент, начальный пусковой ток. Эти требования диктуют необходимость знания электрических параметров слагаемых ТЭТК, в частности, электродвигателя, его эксплуатационных характеристик, основой для получения которых является

или опыт, или информация о его параметрах в процессе эксплуатации.

Предложения по определению параметров и диагностированию ТАД в процессе эксплуатации многочисленны. В одних предлагается диагностировать ТАД в специальных режимах, например, при пуске с пониженным напряжением и заторможенном роторе [3]. В других – измерять пульсации тока статора, активной мощности и скольжения ротора двигателя [4 – 8]. Однако эти известные методы сложны, а главное – недостаточно эффективны, особенно для условий эксплуатации шахтных электровозов.

В связи с изложенным разработка методов идентификации состояния и диагностики электрических параметров ТАД с короткозамкнутым ротором является актуальной научной задачей.

Цель исследований. Поиск и разработка эффективного метода идентификации и построения на этой основе подсистемы мониторинга параметров тяговых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (к.з.) ротором в структуре тягового электротехнического комплекса шахтных двухосных электровозов.

Материалы исследований. Предлагаемая последовательность операций при идентификации электрических параметров и диагностике тяговых асинхронных двигателей в комплексе ТЭТК шахтных электровозов приведена на рис.1.

Модель объекта для проведения мониторинга должна включать:

- тип тягового асинхронного двигателя;
- вид и особенности работы частотного преобразователя: симметричные и несимметричные режимы работы с отдельным регулированием напряжения и частоты, возможность формирования напряжения требуемого значения в анализируемых цепях нагрузки (фазах асинхронного двигателя);
- возможность задания режимов работы: пуск, торможение, непрерывное вращение, двухфазное включение на постоянное напряжение;
- условия работы ТЭТК: характер и вероятная величина тяговой нагрузки, приведенный к валу двигателя момент инерции

механизма, зависящего от нагрузки шахтного электровоза.

Выбор структуры – последовательности операций идентификации определяется режимом работы, который реализуется определённым способом выполнения команд машиниста электровоза.

При автоматическом управлении электровозом структура модели объекта задается командами оператора.



Рис. 1. Последовательность операций при идентификации и диагностике параметров тяговых асинхронных электрических двигателей шахтных электровозов

В этом варианте обрабатываются необходимые для идентификации следующие режимы работы ТЭТК: поочередное двухфазное включение статора двигателя на постоянное напряжение [11 – 13], пуск двигателя с заданной амплитудой и частотой напряжения питания. При этом измеряемые параметры ТАД – значения фазных напряжений, токов и частота вращения. Формализованные микропроцессорной системой управления ТЭТК данные по соответствующим каналам передаются в бортовую ЭВМ, содержащую необходимое программное обеспечение для идентификации и диагностики этих параметров.

В оперативную память бортовой ЭВМ загружаются требуемые для диагностики и идентификации параметров массивы данных о переходных процессах:

– три массива данных $I_{a1...aN}$, $I_{b1...bN}$, $I_{c1...cN}$ о токах и три массива данных $U_{a1...aN}$, $U_{b1...bN}$, $U_{c1...cN}$ для по-парного фазного включения на постоянное напряжение U_n (т.е. сначала включаются фазы ab , затем – bc и в конце – ca);

– три массива данных $I_{a1...aN}$, $I_{b1...bN}$, $I_{c1...cN}$ о токах в трех фазах и три массива данных $U_{a1...aN}$, $U_{b1...bN}$, $U_{c1...cN}$ о трех фазных напряжениях при пуске или рабочем режиме.

– при наличии датчика формируется соответствующий массив данных частоты вращения ТАД – ω .

Обработанные данные масштабируются и сравниваются с необходимыми (заданными) параметрами, полученными на математических моделях идентифицируемого объекта. Выбор масштабов для измеренных значений, представляющих переходный процесс, с точностью, необходимой для решения задач идентификации, определяется допустимой ошибкой дальнейших вычислений и является задачей самостоятельной [4 – 9].

Математический аппарат для решения поставленной задачи следующий.

Система линейных неоднородных дифференциальных уравнений относительно тока $I_a(t)$ и потокосцепления статора ψ_a при двухфазном включении на постоянное напряжение U_{II} имеет вид:

$$\frac{dI_a}{dt} = A_{Lr} U_{II} - I_a A_{Lr} (R_S + R_r \frac{L_{\mu}^2}{L_r^2}) + \psi_a A_{Lr} \frac{R_r}{L_r}$$

$$\frac{d\psi_a}{dt} = 1,5 \frac{L_{\mu}}{L_r} I_a - \frac{R_r}{L_r} \psi_a \quad (1)$$

Решение системы относительно тока статора:

$$I_a(t) = \frac{U_{II}}{R_{sr}} (1 - A_1 e^{t p_{n1}} - A_2 e^{t p_{n2}}) \quad (2)$$

где $I_a(t)$ – ток статора, U_{II} – постоянное напряжение, приложенное к статорным обмоткам, R_S, R_r – активные сопротивления статора и ротора соответственно, L_S, L_r – индуктивности статора и ротора соответственно, L_{μ} – взаимная индуктивность статора и ротора, ψ_a – потокосцепление статора, R_{sr} – активное сопротивление статора,

p_{i1} и p_{i2} – корни характеристического уравнения системы (1), которые обратно пропорциональны постоянным времени T_{i1} и T_{i2} , A_1 и A_2 – постоянные коэффициенты, определяемые начальными условиями системы (1), $A = (LsLr - L\mu^2)^{-1}$ – конструктивный коэффициент ТАД [3].

На основе анализа переходных процессов в статорной цепи разработан алгоритм идентификации активных сопротивлений, индуктивностей и взаимоиндуктивностей статора и ротора ТАД, предусматривающий проведение процедуры включения ТЭТК и расчеты в реальном времени.

Обработка результатов идентификации является составной частью диагностики. Алгоритм диагностики состояния параметров ТАД представлен на рис.2.

Сравнивая значения токов в каждой фазе, определяют промежутки времени переходного и установившегося процессов. Процедуры диагностики проводятся после приема массивов данных о фазных токах и напряжениях статора ТАД и их масштабирования (блок 2).

Расчет активных сопротивлений фаз ТАД по данным режима включения статора на постоянное напряжение и дальнейшее сравнение их между собой и с паспортными данными позволяет системе диагностики сделать вывод о наличии витковых замыканий или обрыве параллельных ветвей в обмотках двигателя.

Алгоритм диагностики целостности ротора ТАД проводится в случае допустимых значений активных сопротивлений статорной обмотки и заключается в следующем.

На участке установившегося процесса суммируются мгновенные значения фазных токов статора (блок 3) и их сумма сравнивается с допустимой величиной отклонения (блок 4). Превышение допустимого отклонения параметров свидетельствует о наличии токов нулевой последовательности и несимметрии в трехфазной системе, т.е. фактически это повреждения обмоток ротора двигателя (блок 5).

При допустимой величине тока нулевой последовательности производится расчет значений активных сопротивлений статора и ротора блоком 6 (рис. 2).

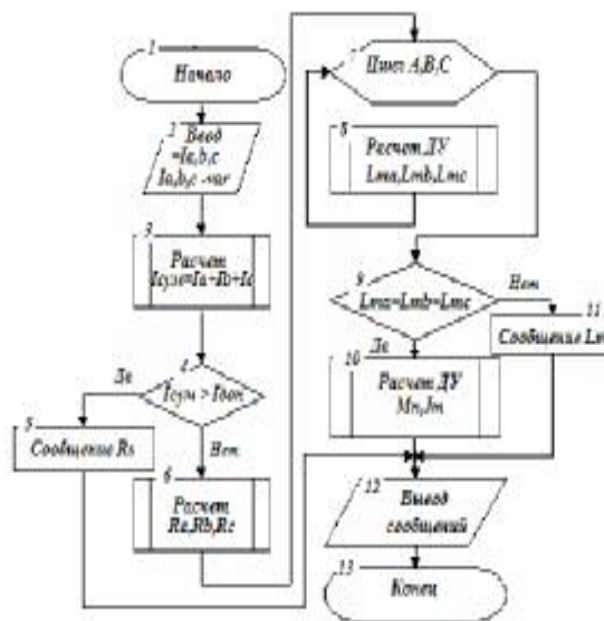


Рис. 2. Алгоритм определения параметров тягового асинхронного двигателя шахтного электровоза

Циклический расчет по трем фазам значений электромагнитных постоянных времени каждой пары фаз (блоки 7; 8), включенных на постоянное напряжение, и сравнение полученных значений между собой (блок 9) определяет взаимную индуктивность статора и ротора по величинам постоянных времени электромагнитного контура.

Рассчитанные, с помощью далее предложенного алгоритма, корни характеристического уравнения системы (1), позволяют определить взаимную индуктивность статора и ротора, характеризующую состояние магнитной проницаемости стали, и дает возможность прогнозировать основные эксплуатационные параметры и определять допустимую нагрузку двигателя в анализируемый момент времени (блок 12).

По значениям массива данных, характеризующих установившийся режим работы ТАД, определяются значения активных сопротивлений фаз статора. Оценивается среднее значение фазного сопротивления за N измерений и анализируется величина отклонения для каждой пары фазных уровней сопротивлений.

Алгоритм расчета активных сопротивлений статора асинхронного двигателя приведен на рис. 3. Оператор 2 обеспечивает ввод

для каждой пары фазного включения на напряжение U_{II} исходных данных массива тока $I_{a1...1000}, I_{b1...1000}, I_{c1...1000}$. Блоки 3; 4; 5; 7 производят вычисление активного сопротивления фазы статора, рассчитывают среднее значение сопротивления.

Само же активное сопротивление статора определяется путем усреднения данных при заданном количестве точек N и установившемся значении тока I_{Ktu} и напряжения

$$R_{sr} = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{U_f}{I_{Ktu-N}}, \quad (3)$$

где Ktu – порядковый номер конечного значения тока; N – число используемых значений тока; I_{Ktu} – значение установившегося тока.

Блоки 8; 10; 12 циклически по фазам определяют отклонение активного сопротивления фазы статора и сравнивают с допустимым значением.

При превышении допустимого значения блоком 13 формируется «сообщение 2», например, о невозможности эксплуатации тягового двигателя или эксплуатации в щадящем режиме, а в блоке 14 сохраняется информация о значениях сопротивлений для проведения диагностики.

При допустимом значении рассчитанного активного сопротивления статора R_{sr} активное сопротивление ротора в соответствии с [3; 8; 11 – 13]

$$R_r = R_s \cdot K_{SRO}, \quad (4)$$

где конструктивный коэффициент K_{SRO} – отношение активного сопротивления фаз ротора к активному сопротивлению фазы статора при изготовлении обмоток статора и ротора из одного и того ж материала; он определяется по каталожным данным, и используются в вычислительной программе как постоянная величина [3; 8].

При допустимых значениях сопротивлений блоком 13 формируется «сообщение 1». Блок 14 по-прежнему обеспечивает хранение и передачу данных о значениях сопротивлений для использования их при моделировании процессов в ТАД.

Корни характеристического уравнения системы (1)

$$p_{1,2} = -\frac{A(R_s L_r + R_r L_s)}{2} \pm \frac{A}{2} \sqrt{(R_s L_r + R_r L_s)^2 + 4 R_s R_r L_\mu^2} \quad (5)$$

$$p_{1,2} = -\frac{A(R_s L_r + R_r L_s)}{2} \pm \frac{A}{2} \sqrt{(R_s L_r + R_r L_s)^2 + 4 R_s R_r L_\mu^2} \quad (6)$$

При допустимых отклонениях, используя массивы о переходных процессах, производят поиск характерных точек, необходимых для определения взаимоиндукции статора и ротора L_μ . Алгоритм определения характерных точек заключается в следующем. Графики переходного процесса по току двигателя аппроксимируются двумя линейными графиками L_{n1} и L_{n2} (рис. 4), характеризующих начальный и конечный временные периоды переходного процесса. Точка пересечения графиков определяет характерную точку с временной координатой T_{per} (рис. 4), относительно которой выбираются значения токов для определения взаимоиндукции статора и ротора L_μ .

Точка пересечения T_{per} находят по алгоритму (рис. 3).

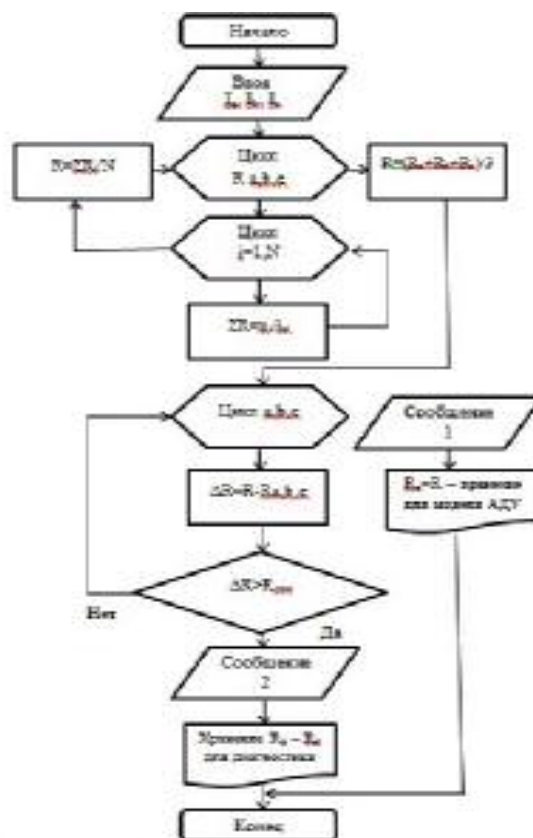


Рис. 3. Алгоритм определения активных сопротивлений статора тягового асинхронного двигателя шахтного электровоза

Переходный процесс по току статора $I_a(t)$ представлен на рис. 4.

Коэффициенты уравнений линейных зависимостей изменения тока на линейных участках в начале и конце переходного процесса вычисляются по значениям тока.

В общем случае уравнение для определения L_{n1}

$$I(t) = a + bt. \quad (7)$$

Ток I_0 и I_1 в моменты времени соответственно t_0 и t_1 :

$$I_0 = a_1 + b_1 t_0; I_1 = a_1 + b_1 t_1. \quad (8)$$

Решая систему уравнений (8) относительно постоянных коэффициентов a_1 и b_1 ,

$$a_1 = \frac{I_0 t_1 - I_1 t_0}{t_0 - t_1}; b_1 = \frac{I_1 - I_0}{t_1 - t_0}. \quad (9)$$

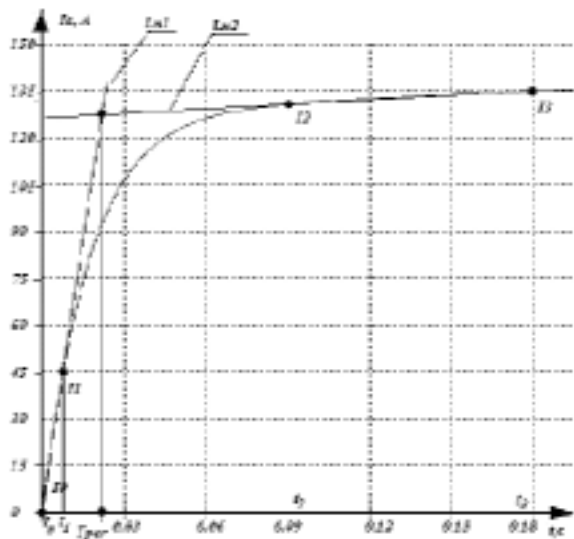


Рис. 4. График переходного процесса в тяговом асинхронном двигателе по току и его аппроксимация

Уравнение линий L_{n1} и L_{n2}

$$L_{n1}(t) = \frac{I_0 t_1 - I_1 t_0}{t_0 - t_1} + \frac{I_1 - I_0}{t_1 - t_0} t, \quad (10)$$

$$L_{n2}(t) = \frac{I_2 t_3 - I_1 t_2}{t_2 - t_3} + \frac{I_3 - I_2}{t_3 - t_2} t. \quad (11)$$

Точка пересечения T_{per} определяется из условия $L_{n1} = L_{n2}$

$$T_{per} = \frac{\frac{I_2 t_3 - I_1 t_2}{t_2 - t_3} - \frac{I_0 t_1 - I_1 t_0}{t_0 - t_1}}{\frac{I_1 - I_0}{t_1 - t_0} - \frac{I_3 - I_2}{t_3 - t_2}}. \quad (12)$$

С учетом шага дискретности вычислений определяются порядковые номера координат тока $K t_1$ и $K t_2$, по которым будут

производиться расчеты для определения следующих параметров:

$$K t_1 = \frac{T_{per}}{\Delta t} - N; K t_2 = \frac{T_{per}}{\Delta t} + N, \quad (13)$$

где N – целое число, оно подбирается при отладке программного обеспечения.

Корни характеристического уравнения p_{i1} и p_{i2} статорной цепи определяются относительно координатной точки $K t_{per} = T_{per}/\Delta t$ (рис.5).

По значениям токов относительно координаты $K t_2$ выбираются N_k значений токов I_{p2} и I_{p2-1} , необходимых для определения таких вспомогательных промежуточных величин:

$$d I_{21} = \frac{I_{Ip2} - I_{Ip2-1}}{\Delta t} \quad (14)$$

$$d I_{22} = \frac{I_{Ip2+10} - I_{Ip2-1+10}}{\Delta t}. \quad (15)$$

Значения корней характеристического уравнения p_{i1} и p_{i2}

$$p_{i2} = \frac{d I_{21} - d I_{22}}{I_{Ip2+10} - I_{Ip2-1+10}} \quad (16)$$

$$p_{i1} = \frac{1}{I_{p1}} \text{Log} \frac{I_{ust}(1 - e^{p_{i2} K t_2 \Delta t}) + I_{Ip2} e^{p_{i2} K t_2 \Delta t}}{I_{Ip2} - I_{Ip2-1} p_{i2}} \quad (17)$$

$$D_a = \frac{I_{ust}(1 - e^{p_{i2} K t_2 \Delta t}) + I_{Ip2} e^{p_{i2} K t_2 \Delta t}}{I_{ust} e^{p_{i2} K t_2 \Delta t} - I_{Ip2} e^{p_{i2} K t_2 \Delta t}}. \quad (18)$$

Применяя формулы первых членов разложения по степенному ряду для уравнений (16), (17) и (18), получим приближенные формулы определения значений корней характеристического уравнения p_{i1} и p_{i2} для ТАД:

$$p_{i2}^1 = \frac{d I_{21} - d I_{22}}{I_{Ip2+10} - I_{Ip2-1+10}}, \quad (19)$$

$$p_{i1} = \frac{1}{I_{p1}} \text{Log} \left[\frac{(I_{ust} + I_{Ip2}) p_{i2} K t_2 \Delta t}{I_{Ip2} - I_{Ip2} p_{i2}} \right], \quad (20)$$

$$D_a^1 = \frac{I_{ust} p_{i2} K t_2 \Delta t + I_{Ip2} (1 - p_{i2} K t_2 \Delta t)}{(I_{ust} - I_{Ip2})(1 - p_{i2} K t_2 \Delta t)}. \quad (21)$$

Используя разложение логарифмической функции в степенной ряд и ограничившись первыми двумя членами (так как аргумент логарифмической функции имеет порядок $10^{-3} - 10^{-4}$), можно определить значение p_{i1}

$$P_{i1}^1 = \frac{1}{I_{p1}} \left\{ \left[\frac{(I_{ust} + I_{ip2}) P_{i2}' K_{i2} \Delta t}{I_{ip2} - I_{ip2} P_{i2}} - 1 \right] - \frac{1}{2} \left[\frac{(I_{ust} + I_{ip2}) P_{i2}' K_{i2} \Delta t}{I_{ip2} - I_{ip2} P_{i2}} - 1 \right]^2 \right\} \quad (22)$$

Усреднение значений корней характеристического уравнения p_{i1} и p_{i2} достаточно производить по пяти соседним значениям тока в окрестностях точек с координатами I_{p1} и I_{p2} (рис. 5).

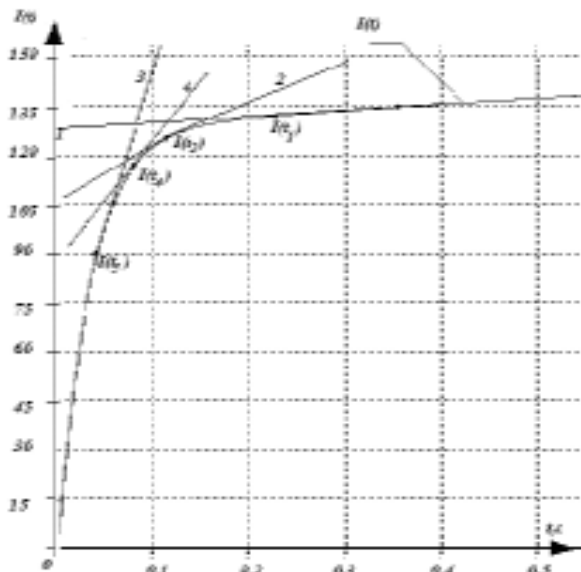


Рис. 5. График протекания переходного процесса по току статора тягового асинхронного двигателя

Используя аналитическое выражение разности Δp корней характеристического уравнения p_{i1} и p_{i2}

$$\Delta p = p_{i2} - p_{i1} = A \sqrt{(R_s L_r + R_r L_s)^2 + 4 R_s R_r L_\mu^2} \quad (23)$$

и учитывая, что $A = (L_s L_r - L_\mu^2)^{-1}$, получим:

$$\Delta p (L_s L_r - L_\mu^2) = \sqrt{(R_s L_r + R_r L_s)^2 + 4 R_s R_r L_\mu^2} \quad (24)$$

Используя конструктивные коэффициенты асинхронного двигателя K_{ls} и K_{lr} , связывающие индуктивные сопротивления статора и ротора соотношениями $L_s = K_{ls} \cdot L_\mu$ и $L_r = K_{lr} \cdot L_\mu$, получим квадратное уравнение относительно L_μ

$$L_{\mu 1,2} = -\frac{2BC - \Delta p (L_{sk} - L_{rk})}{2(B^2 + C^2 + 4R_s^2 L_{sk} K_{rs})} \pm \sqrt{\frac{(2BC - \Delta p (L_{sk} - L_{rk}))^2}{4(B^2 + C^2 + 4R_s^2 L_{sk} K_{rs})} + \frac{4\Delta p L_{sk} L_{rk}}{(B^2 + C^2 + 4R_s^2 L_{sk} K_{rs})^2}} \quad (30)$$

$$L_\mu^2 + L_\mu \frac{\Delta p}{K_{ls} P_{i1} P_{i2}} + \frac{K_{lr} R_s^2}{K_{ls} P_{i1} P_{i2} (K_{ls} K_{lr}^{-1})} = 0 \quad (25)$$

Решение полученного уравнения определяет взаимную индуктивность статора и ротора асинхронного двигателя:

$$L_{\mu 1,2} = -\frac{\Delta p}{2K_{ls} P_{i1} P_{i2}} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{2K_{ls} P_{i1} P_{i2}} \right)^2 - \frac{K_{lr} R_s^2}{K_{ls} P_{i1} P_{i2} (K_{ls} K_{lr}^{-1})}} \quad (26)$$

Более простой путь определения главной индуктивности ТАД заключается в следующем.

Определяем сумму корней характеристического уравнения

$$p_{i1} + p_{i2} = -(R_s L_r + R_r L_s) \quad (27)$$

С учетом того, что $K_{lr} = L_r / L_\mu$, $K_{ls} = L_s / L_\mu$, $K_{sr} = R_r / R_s$, $K_{sr} = P_{i1} P_{i2} L_\mu^2$, окончательно получим формулу для расчета взаимной индуктивности статора и ротора:

$$L_\mu = \left(-\frac{R_{sr} (p_{i1} + p_{i2})}{K_{ls} P_{i1} P_{i2}} + \frac{R_{sr} (D_a p_{i1} + p_{i2})}{(1 + D_a) K_{ls} P_{i1} P_{i2}} \right) \quad (28)$$

При известных индуктивностях рассеяния статора и ротора и взаимной индуктивности определяются собственные индуктивности статора и ротора:

$$L_s = L_\mu + L_{sk}; L_r = L_\mu + L_{rk}.$$

Получим второй вариант расчета этих значений.

Для этого введем обозначения:

$$B = R_s + R_s K_{rs}, C = R_s (L_{rk} + K_{rs} L_{sk}).$$

Используя значение разности Δp , получим уравнение:

$$\Delta p (L_s L_r - L_\mu^2) = \sqrt{(R_s L_r + R_r L_s)^2 + 4 R_s R_r L_\mu^2} \quad (29)$$

его решение и есть взаимная индуктивность статора и ротора.

В полученном выражении определения взаимной индуктивности статора и ротора L_{μ} знак перед радикалом положительный.

Процедура вычислений, представленная структурной схемой на рис.6, заключается в следующем.

Оператор 2 обеспечивает ввод массива данных тока $I_{a1} \dots I_{aktu}$, полученных экспериментальным путем, и предварительно рассчитанных значений $R_s, R_r, Kls, Klr, p_{i1}, p_{i2}$. Оператор 3 вычисляет значение ΔI_0 численным интегрированием массива значений экспериментального тока.

Оператор 4 изменяет конструктивный коэффициент Kls . Оператор 5 производит вычисление индуктивностей обмоток статора и ротора, которые используются при решении системы дифференциальных уравнений. Оператором 6 массив рассчитанного тока численно интегрируется и его величина ΔI_1 сравнивается с ΔI_0 . Логический оператор 7 проверяет условие $\Delta I_0 < \Delta I_1$. Для решения дифференциальных уравнений авторами предлагается использовать метод Башарина [2 – 4], который обладает достаточной точностью вычислений при минимальном количестве операций.

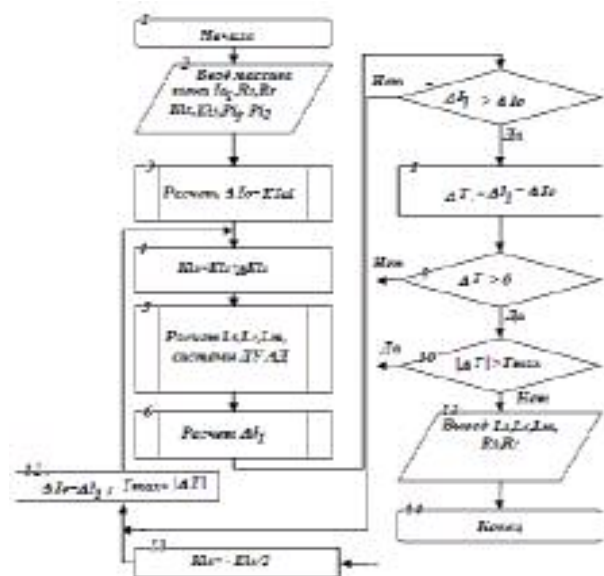


Рис. 6. Алгоритм вычислений индуктивных сопротивлений тягового асинхронного двигателя

Графики переходных процессов, построенные по результатам расчетов токов статора при изменении Kls на величину $-\Delta Kls$, представлены на рис. 7. При этом начальное

приближение $Kls=1,17$, а шаг приближения $\Delta Kls=0,016$.

После седьмого приближения (рис. 7) графики переходных процессов, полученные при $Kls=0,974$ и построенные по результатам экспериментальных значений, практически совпадают. По каталожным данным для реального тягового асинхронного двигателя мощностью 55 кВт расчетное значение $Kls=1,01$. Отклонения каталожных от рассчитанных по предложенному алгоритму значений активных сопротивлений, индуктивностей и взаимоиндукции статора и ротора такие: $\Delta R_s = 0,13 \%$; $\Delta R_r=0,36 \%$; $\Delta L_{\mu}=3,06 \%$; $\Delta L_s=1,20 \%$; $\Delta L_r=6,20 \%$.

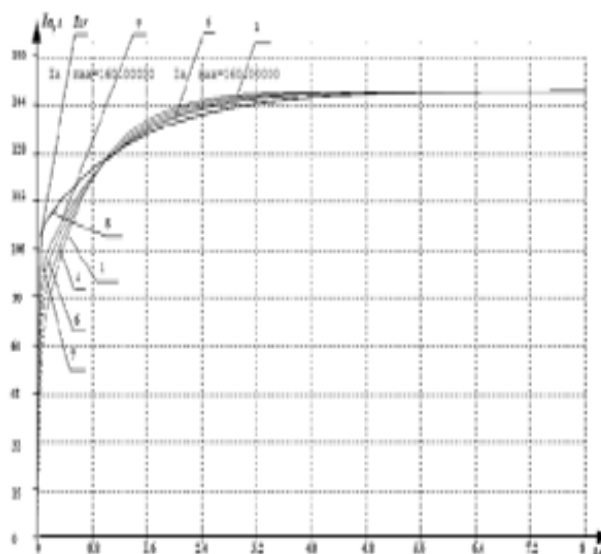


Рис. 7. Графики тока статора при двухфазном включении ТАД на постоянное напряжение и семи приближениях по Kls

Выводы

1. Разработанный и предлагаемый для практической реализации в структурах тяговых электротехнических комплексов шахтных электровозов метод идентификации параметров тяговых асинхронных двигателей, основанный на отработке алгоритма приближений с прямым решением дифференциальных уравнений и сравнении получаемых вычислительных результатов с паспортными (экспериментальными) значениями, отличается от известных относительной простотой вычислений и отсутствием сложных функций.

2. Результаты проведенных исследований микропроцессорного варианта системы

управления тяговым электротехническим комплексом шахтных электровозов свидетельствуют о достаточно высокой универсальности и точности данного метода: максимальная ошибка при применении составляет 6,2 %, минимальная – 0,13 %.

Список использованной литературы

1. Синчук О. Н. К вопросу стратегии создания энергоэффективного и безопасного в эксплуатации двухосного электровоза для рудных шахт [Синчук О. Н., Гузов Е. С., Омельченко А. В., Шокарев Д. А., Скапа Е. И.] // *Гірничий вісник. Наук.-техн. збірник. – Кривий Ріг* : – 2012. – Вип. 95(1). – С. 139 – 143.

2. Kwynke Mifoslaw. Расчетно-экспериментальный метод определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя с глубокопазным ротором / Kwynke Mifoslaw // *Zesz. Nauk. Plodz. Elek.* –1985. – № 78. – С. 5 – 16.

3. Копылов И. П. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов. [Копылов И.П., Горянов Ф.А., Клоков Б.К. и др.] / Под общей редакцией Копылова И. П. – М. : Энергия, 1980. – 496 с.

4. Потапенко Е. М. Определение скорости и постоянной времени ротора асинхронного двигателя с помощью адаптивного наблюдателя / 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.

5. Башарин А. И. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ / А. И. Башарин, Ю. В. Постников :Учеб. пособие для вузов [3-е изд.]. –Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. –512 с.

6. Столяров И. М. Определение параметров асинхронной машины / И. М. Столяров, З. Н. Слепцова // *Изв. Вузов, горн. журн.* – 1984. – № 10. – С. 96 – 98.

7. Столяров И. М. Метод косвенной оценки параметров и устройство для определения координат асинхронного двигателя / И. М. Столяров, Г. А. Синельников, Н. И. Литвинов // *Изв. вузов, горн.журн.* – 1984. № 10. – С. 102 – 105.

8. Берюляев Ю. А. Определение параметров условно-нелинейной модели асинхронной машины [Берюляев Ю.А., Ермутский П.В., Лычкин Г.П и др.] // *Электр. Моделир.* – 1985. – 7. – № 5. – С. 89 – 92.

9. Казаков Ю. Б. Микрокомпьютерная установка для снятия характеристик асинхронных двигателей [Казаков Ю. Б., Королев С. А. Рубахин В. А., Рябов С. Н.] // *Регулир. Электродвигателей переменного тока: Всес. науч.-техн. совещание.* – Владимир-Суздаль, 10-13 марта, 1987. – Владимир : Электротехника. – 1987. – № 5. – С.29 – 31.

10. Ковач К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. В., Рац. – М.-Л : Госэнергоиздат. – 1963. – 774 с.

11. Deleroi W., (1985), Определение параметров асинхронных машин по результатам измерений под нагрузкой / W. Deleroi // *Etz. Arch.* – 7. – No. 10. – Pp. 329 – 336.

12. Павлина В. Ф. Способ экспериментального определения параметров электрических машин переменного тока / В. Ф. Павлина, С. В. Семенова // *Техническая электродинамика.* – 1986. – № 5. – С. 62 – 66.

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

Получено 02.04.2013

References

1. Sinchuk O.N., (2012), On the strategy of creating energy-efficient and safe to use for a two-axle electric ore mines / Sinchuk O.N., Guzov E.S., Omelchenko O.V., Shokarev D.A., Scapa E.I. // *Girnichy Visnick. Nauk.-Tech. zbirnik.* – Krivoy Rog: – Vip. 95 (1). – Pp. 139 – 143 [in Ukrainian].

2. Kwynke Mifoslaw, (1985), Computational-experimental method of determining the electromagnetic parameters of the induction motor with rotor glubokopaznym / Kwynke Mifoslaw // *Zesz. Nauk. Plodz. Elek.* – No. 78. – Pp. 5 – 16

3. Kopylov I. P., (1980), Project electrical machine: Manual for schools / I. P. Kopylov, F. A. Goryanov, B. K. Klokov, and others // Edited by Kopylov I. P. – Moscow : *Energy*. – 496 p. [in Russian].

4. Potapenko E.M., (2005), Determination of velocity and time constant of the rotor asynchronous in engine with adaptive an observer / E.M. Potapenko, E. E. Potapenko, A. V. Solomakha // *Materiali 12-th mizhnarodnoi konferentsii s upravlinnya automaticity. "Automation-2005"* – Kharkiv: NTU "HPI". – V.2. – Pp. 123 –124 [in Russian].

5. Basharin A.V., (1990), Examples of calculation of automatic electric drive on computer / A.V. Basharin, Y.V. Postnikov. – Leningrad : *Energoatomizdat*, 512 p. [in Russian].

6. Stolyarov I.M., (1984), Determination of parameters of the induction machine / I. M. Stolyarov, Z. N. Slepčova // *Izv. Vuzov, gorn. zhurn.* – No. 10. – Pp. 96 – 98 [in Russian].

7. Stolyarov I.M., (1984), The method of indirect estimation of parameters and the device for determining the coordinates of the induction motor / I. M. Stolyarov, G. A. Sinel'nikov, N. I. Litvinov // *Izv. Vuzov, Gorn. Zhurn.* – No. 10. – Pp. 102 – 105 [in Russian].

8. Beryulyaev Yu. A., (1985), Determination of parameters of conditional nonlinear model of asynchronous machines / Beryulyaev Yu.A., Ermutskii P.V., Lychkin G.P. i dr. // *Elektr. Modelir.* – 7, No. 5. – Pp. 89 – 92 [in Russian].

9. Kazakov Yu., (1987), Microcomputer system for the characterization of asynchronous motors /Kazakov Yu. B., Korolev S. A., Rubaxin V. A., Ryabov S. N. // *Regulir. Elektrodvigateli peremennogo toka: Vses. nauch.-texn. soveschan., Vladimir-Suzdal'*, 10–13 Marta, 1987. –Vladimir. – *Elektrotexnika.* –. – No. 5. – Pp. 29 – 31 [in Russian].

10. Kovach K. P., (1963), Transients in AC machines / K. P. Kovach, I. V. Rac. – M.-L : *Gosenergoizdat*, 774 p. [in Russian].

11. Deleroi W., (1985), Defining the parameters of induction machines as measured under load / W. Deleroi // *Etz. Arch.* – 7. No. 10. – Pp. 329 – 336 [in German].

12. Pavlina V. F., (1986), The method of experimental determination of parameters of AC electrical machines / V. F. Pavlina, S. V Se-

menova // *Texn. electrodynamics.* – No. 5. – P. 62 – 66 [in Russian].

13. A.s. 1372259, SSSR. Zayavl. 24.07.86. Rogozin G. G. A method for determining active and inductances of the scattering of the rotor winding induction motor [G. G. Rogozin , Yu. I. Pechurkin, N.G. Pyatlina, V.I.Alekseev]



Синчук
Олег Николаевич,
д-р техн. наук, проф.,
зав. каф. СПЭЭТ, ГВУЗ
Криворожского националь-
ного ун-та.
E-mail: speet@ukr.net



Захаров
Вячеслав Юрьевич,
канд. техн. наук, доцент
каф. ТСБДД Националь-
ного транспортного ун-
та, Учебно-консульта-
ционный центр,
г. Кривой Рог



Синчук
Игорь Олегович,
канд. техн. наук,
доц. каф. СПЭЭТ, ГВУЗ
Криворожского националь-
ного ун-та.
E-mail: speet@ukr.net



Сменова
Людмила Виталиевна,
Украинская государст-
венная академия желез-
нодорожного транспорта,
г. Харьков