

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ
МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ТЯГОВЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Актуальность исследований. Специфика эксплуатации шахтных электровозов, оборудованных энергоэффективными тяговыми электротехническими комплексами, использующими тяговые асинхронные электрические двигатели (ТАД) с короткозамкнутым ротором (к.з.), выдвигает особые требования к таким их показателям как К.П.Д., коэффициент мощности, максимальный крутящий момент, начальный пусковой момент, начальный пусковой ток []. Эти требования диктуют необходимость знания электрических параметров слагаемых ТЭТК в т.ч. электродвигателя, его эксплуатационных характеристик, основой для получения которых является или опыт или информация о состоянии его параметров в процессе эксплуатации.

Предложения по определению параметров и диагностированию ТАД в процессе эксплуатации многочисленны. В одних из них предлагается диагностировать ТАД в специальных режимах, например, при пуске, пониженном напряжении и заторможенном роторе [2, 3]. В других – измерять пульсации тока статора, активной мощности и скольжения ротора двигателя [4-5]. Однако эти известные методы сложны, а главное – не достаточно эффективны, особенно для условий шахтных электровозов с условиями их эксплуатации.

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 к.з. ротором в структуре тягового электротехнического комплекса шахтных двусосных электровозов.

Материалы исследований. Предлагаемая последовательность операций при идентификации электрических параметров и диагностики тяговых асинхронных двигателей в комплексе ТЭТК шахтных электровозов заключается в следующем.

Модель объекта для проведения мониторинга должна включать в себя:

- 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.

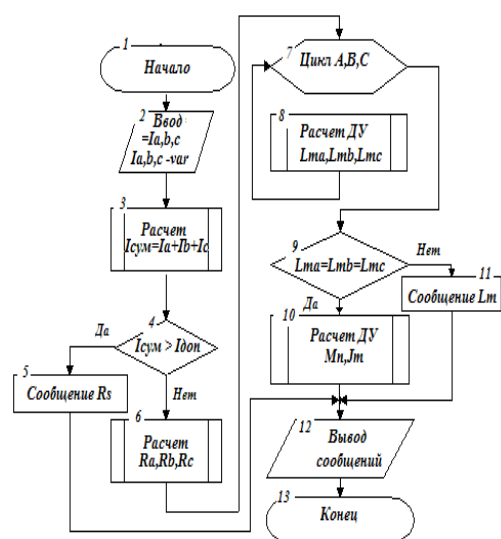


Рис. 1 Алгоритм определения параметров тягового асинхронного двигателя шахтного электровоза

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

При этом отрабатываются необходимые для идентификации следующие режимы работы ТЭТК: поочередное двухфазное включение статора двигателя на постоянное напряжение [6], пуск двигателя с заданной амплитудой и частотой напряжения питания. При этом измеряемые параметры ТАД – значения фазных напряжений, токов и частота вращения. Форматизированные 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 параметры 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 с регуляризацией во времени 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 как и требуемое обеспечение вычислительных операций на основе специально разрабатываемого для этих целей математического аппарата [6].

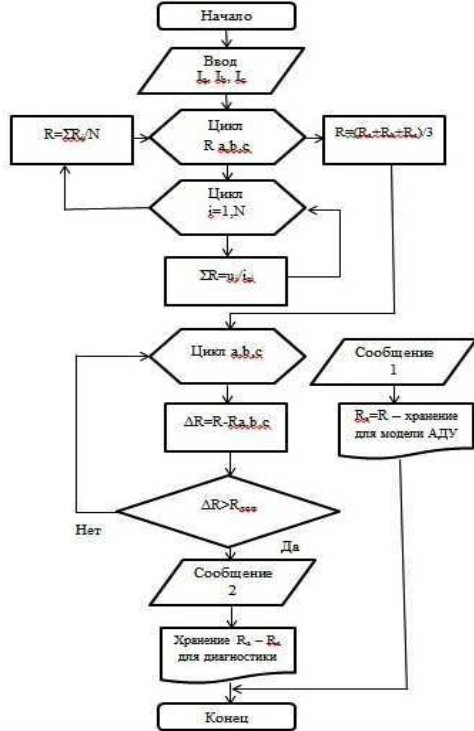


Рис. 2 Алгоритм для определения активных сопротивлений статора тягового асинхронного двигателя шахтного электровоза

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.

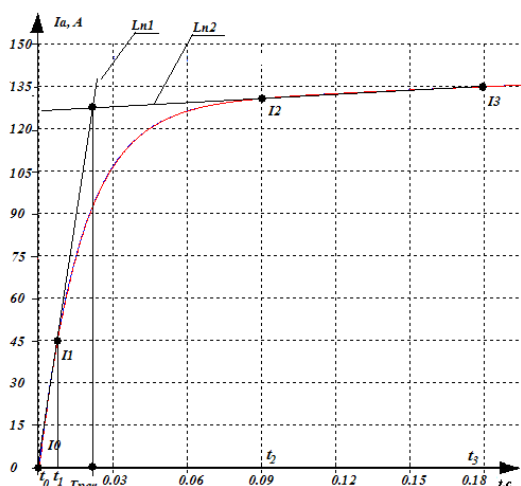


Рис. 3 График переходного процесса в тяговом асинхронном двигателе по току и его аппроксимация

переходного процесса вычисляются по значениям тока.

Обработка результатов идентификации является составной частью диагностики. Алгоритм диагностики состояния параметров ТАД представлен на рис.1.

Сравнивая значения токов в каждой фазе, определяют промежутки времени, переходного и установившегося процесса. 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 (Блок5).

При допустимой величине тока нулевой последовательности производится расчет значений активных сопротивлений статора и ротора блоком 6 (рис. 1).

Рассчитанные, с помощью далее предложенного алгоритма, корни характеристического уравнения системы, позволяют определить значение взаимной индуктивности статора и ротора, что определяет состояние магнитной проницаемости стали и дает возможность прогнозировать основные эксплуатационные параметры и определить допустимую нагрузку двигателя в анализируемый момент времени (блок 12).

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

Точка пересечения T_{per} определяется по алгоритму, рис. 2.

Переходный процесс по току статора $I_a(t)$ представлен на рис.3.

Коэффициенты уравнений линейных зависимостей изменения тока на линейных участках в начале и конце

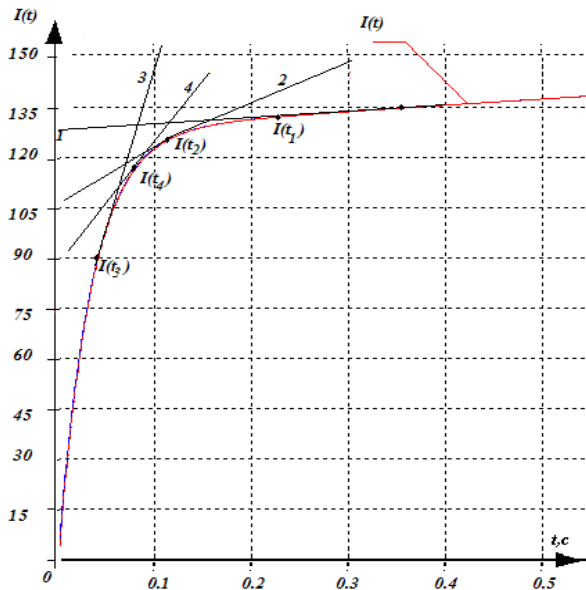


Рис. 4 График протекания переходного процесса по току статора тягового асинхронного двигателя

С учетом шага дискретности вычислений определяются порядковые номера координат тока $K t_1$ и $K t_2$, по которым будут производиться расчеты для определения параметров:

$$K t_1 = \frac{T_{per}}{\Delta t} - N; K t_2 = \frac{T_{per}}{\Delta t} + N \quad (7)$$

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

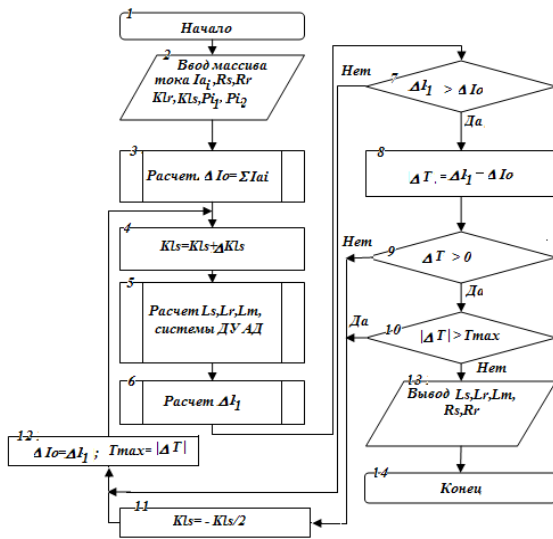


Рис. 5 Алгоритм вычислений индуктивных сопротивлений тягового асинхронного двигателя.

чим приближенные формулы определения значений корней характеристического уравнения p_{i1} и p_{i2} для ТАД:

$$p_{i2}^1 = \frac{d I_{21} - d I_{22}}{I_{Ip2+10} - I_{Ip2-1+10}} \quad (13)$$

$$p_{i1} = \frac{1}{I_{p1}} \text{Log} \left[\frac{(I_{ust} + I_{Ip2}) p_{i2} K_{t2} \Delta t}{I_{Ip2} - I_{Ip2} p_{i2}} \right] \quad (14)$$

$$D_a^1 = \frac{I_{ust} p_{i2} K_{t2} \Delta t + I_{Ip2} (1 - p_{i2} K_{t2} \Delta t)}{(I_{ust} - I_{Ip2}) (1 - p_{i2} K_{t2} \Delta t)} \quad (15)$$

Используя разложение логарифмической функции в степенной ряд, и ограничившись первыми 2 –мя члена-

В общем случае уравнение для определения L_{n1} имеет вид:

$$I(t) = a + bt \quad (1)$$

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

$$I_0 = a + b t_0; I_1 = a + b t_1 \quad (2)$$

Решая, систему уравнений (2) относительно постоянных коэффициентов a_1 и b_1 получим:

$$a_1 = \frac{I_0 t_1 - I_1 t_0}{t_0 - t_1}; b_1 = \frac{I_1 - I_0}{t_1 - t_0} \quad (3)$$

Уравнение линий L_{n1} и L_{n2} :

$$L_{n1}(t) = \frac{I_0 t_1 - I_1 t_0}{t_0 - t_1} + \frac{I_1 - I_0}{t_1 - t_0} t \quad (4)$$

$$L_{n2}(t) = \frac{I_2 t_3 - I_1 t_2}{t_2 - t_3} + \frac{I_3 - I_2}{t_3 - t_2} t \quad (5)$$

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

$$T_{per} = \frac{\frac{I_2 t_3 - I_1 t_2}{t_2 - t_3} - \frac{I_0 t_1 - I_1 t_0}{t_0 - t_1}}{\frac{I_1 - I_0}{t_1 - t_0} - \frac{I_3 - I_2}{t_3 - t_2}} \quad (6)$$

Корни характеристического уравнения p_{i1} и p_{i2} статорной цепи определяются относительно координатной точки $K t_{per} = T_{per} / \Delta t$ (рис.4).

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

$$d I_{21} = \frac{I_{Ip2} - I_{Ip2-1}}{\Delta t} \quad (8)$$

$$d I_{22} = \frac{I_{Ip2+10} - I_{Ip2-1+10}}{\Delta t} \quad (9)$$

Значения корней характеристического уравнения p_{i1} и p_{i2} рассчитываются по формулам:

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

$$p_{i1} = \frac{1}{I_{p1}} \frac{I_{ust}(1 - e^{p_{i2} K_{t2} \Delta t}) + I_{Ip2} e^{p_{i2} K_{t2} \Delta t}}{I_{Ip2} - I_{Ip2} p_{i2}} \quad (11)$$

$$D_a = \frac{I_{ust}(1 - e^{p_{i2} K_{t2} \Delta t}) + I_{Ip2} e^{p_{i2} K_{t2} \Delta t}}{I_{ust} e^{p_{i2} K_{t2} \Delta t} - I_{Ip2} e^{p_{i2} K_{t2} \Delta t}} \quad (12)$$

Применяя формулы первых членов разложения по степенному ряду для уравнений (10), (11), (12) полу-

ми, так как аргумент логарифмической функции имеет порядок $10^{-3} - 10^{-4}$, можно определить значение p_{i1} , используя следующую формулу:

$$p_{i1}^1 = \frac{1}{I_{p1}} \left\{ \left[\frac{(I_{ust} + I_{Ip2}) p'_{i2} K_{t2} \Delta t}{I_{Ip2} - I_{Ip2} p_{i2}} - 1 \right] - \frac{1}{2} \left[\frac{(I_{ust} + I_{Ip2}) p'_{i2} K_{t2} \Delta t}{I_{Ip2} - I_{Ip2} p_{i2}} - 1 \right]^2 \right\} \quad (16)$$

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.4).

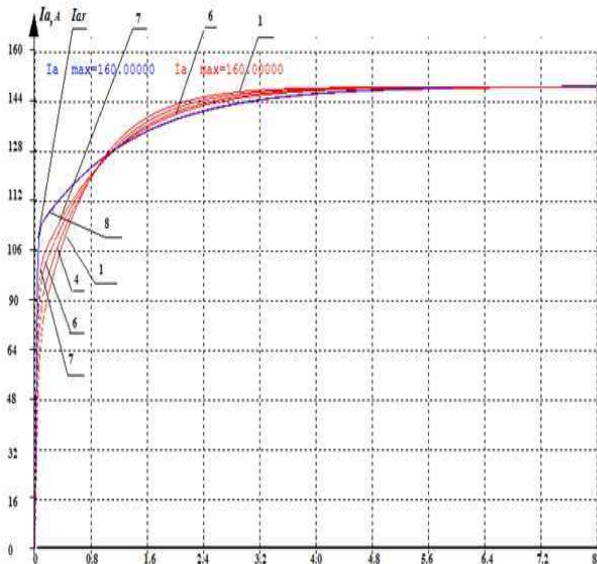


Рис. 6 Графики тока статора при двух фазном включении ТАД на постоянное напряжение и 7-ми приближениях по K_{ls}

После 7-го приближения (рис.6) графики переходных процессов, полученные при $K_{ls}=0,974$ и построенные по результатам экспериментальных значений практически совпадают. По каталожным данным для реального тягового асинхронного двигателя мощностью 55 кВт расчетное значение $K_{ls}=1,01$. Ошибки между каталожными и рассчитанными по предложенному алгоритму значениями активных сопротивлений, индуктивностей и взаимной индукции статора и ротора составляют: $\Delta R_s=0,13\%$; $\Delta R_r=0,36\%$; $\Delta L_\mu=3,06\%$; $\Delta L_s=1,20\%$; $\Delta L_r=6,20\%$.

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

ЛИТЕРАТУРА:

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

2. Kuyunke Mifoslaw. Расчетно-экспериментальный метод определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя с глубокопазым ротором// “Zesz. Nauk. Plodz. Elek.” -1985.-№78.-С. 5-16.

3. Копылов И.П., Горянов Ф.А., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов. 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. Синчук О.Н., Захаров В.Ю., Синчук И.О., Сменова Л.В. Идентификация электрических параметров тяговых асинхронных двигателей электровозов. Электротехнические и компьютерные системы. № 10 (86), 2013. – с. 58 – 64.