

**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ  
АКТИВНОГО СТАТОРНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
ПРИ НЕПОДВИЖНОМ РОТОРЕ**

Асп. ОДНОЛЬКО Д. С.

*Белорусский национальный технический университет*

На качество процессов регулирования в автоматизированном электроприводе (АЭП) существенное влияние оказывают объем и точность информации о текущем состоянии привода, т. е. о его электромагнитных параметрах. Оценка характеристик объекта имеет значение главным образом для синтеза управления на основании модели электромагнитных и механических процессов двигателя. В то же время оценивание параметров в процессе работы электропривода дает важную информацию о состоянии двигателя, что может быть использовано для оценки его работоспособности. Поэтому информация о параметрах полезна и в нерегулируемых электроприводах для их диагностики, что способствует своевременному устранению неисправностей и продлению срока службы оборудования. К легко доступной для измерения информации в электроприводе относят фазные токи статора и напряжение его обмоток. В приводах с широким диапазоном и высокой точностью регулирования скорости оправдано применение датчиков скорости (положения), устанавливаемых на валу двигателя. Все остальные переменные и параметры привода, используемые в процессе управления и мониторинга, необходимо вычислять в специальных устройствах, именуемых наблюдателями состояния или идентификаторами.

Одним из показателей эффективности автоматической настройки параметров являются простота и возможность реализации автонастроечных режимов исключительно внутренними ресурсами привода в реальных условиях его работы [1]. Ряд известных методов экспериментального определения параметров двигателя предполагает привлечение дополнительных средств, связанных, например, с фиксацией вала в режиме короткого замыкания АД, измерением напряжения на зажимах АД в режиме его отключения от источника питания постоянным током. Наиболее удачный тестовый режим – режим, выполняемый при питании двигателя «неподвижным» вектором напряжения (частота вращения вектора напряжения равна нулю) [2]. Проведение идентифицирующего теста на вращающейся машине зачастую недопустимо по технологическим причинам, поэтому использование алгоритмов идентификации при неподвижном роторе более целесообразно в условиях реального внедрения.

В [3] приведен алгоритм идентификации электрических параметров АД при неподвижном двигателе. Теоретическая основа алгоритма – прямое адаптивное управление током статора на основе функции Ляпунова. Недостатком метода являются его сложность и отсутствие конструктивной процедуры настройки. В [4] авторы используют метод наименьших квадратов (МНК) для идентификации электрических параметров. Для получения линейно-параметризованной модели оценивания дополнительно предполагается, что

угловая скорость – медленно изменяющийся параметр. Данный метод [4] не требует использования настроечных коэффициентов, а оперирует лишь доступной для непосредственного измерения информацией, поэтому имеет прозрачную структуру в отличие от [3]. Недостатком метода является ограничение, при котором машина должна работать с постоянной скоростью, пока накапливаются данные. Это сужает применимость метода в условиях реального внедрения.

В настоящей статье предложен новый алгоритм идентификации активного статорного сопротивления при неподвижном роторе на основе рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК), а также проведен анализ его работы с целью оценки погрешностей измерений, вызванных эффектами немоделируемой динамики (несимметричность АД, насыщение, измерительные шумы) и неидеальностью модели.

**Постановка задачи исследования и метод решения.** При общепринятых допущениях [2] электромагнитные процессы в АД с короткозамкнутым ротором могут быть описаны в неподвижной относительно статора системе координат  $\alpha$ - $\beta$ . Если в стационарной системе координат статора возбуждается только одна ось, например ось  $\alpha$ , то момент двигателя равен нулю и при отсутствии момента нагрузки ротор остается неподвижным. Уравнения динамики электрической части АД при этом имеют вид [3]:

$$\begin{aligned} di_{s\alpha}/dt &= -R_s \sigma^{-1} i_{s\alpha} - \alpha(1 + L_m \beta) i_{s\alpha} + \alpha \sigma^{-1} \psi_{s\alpha} + \sigma^{-1} u_{s\alpha}; \\ d\psi_{s\alpha}/dt &= -R_s i_{s\alpha} + u_{s\alpha}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $i_{s\alpha}$ ,  $u_{s\alpha}$ ,  $\psi_{s\alpha}$  – ток, напряжение и потокосцепление статора по оси  $\alpha$ ;  $\sigma = L_s(1 - L_m^2/L_s L_r)$ ,  $\beta = L_m/\sigma L_r$ ,  $\alpha = R_r/L_r$  – общепринятое определение положительных констант;  $R_s$ ,  $R_r$  – активные сопротивления статора и ротора;  $L_s$ ,  $L_r$ ,  $L_m$  – индуктивность статора, ротора и намагничивающего контура. Все параметры, кроме  $R_s$ , предполагаются заданными.

На основании модели (1) невозможно организовать оценивание параметров, так как она включает в себя недоступный для прямого измерения вектор потокосцепления статора. После преобразований, направленных на исключение  $\psi_{s\alpha}$ , получаем следующее уравнение:

$$0 = -\frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} - R_s \sigma^{-1} \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \alpha(1 + L_m \beta) \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \alpha \sigma^{-1} R_s i_{s\alpha} + \alpha \sigma^{-1} u_{s\alpha} + \sigma^{-1} \frac{du_{s\alpha}}{dt}. \quad (2)$$

В данной математической модели двигателя (2) вектор состояния системы доступен для измерения полностью. Управляющим сигналом является компонента двумерного вектора напряжения статора  $u_{s\alpha}$ . На основании полученного выражения и принятых допущений решим задачу синтеза алгоритма текущей идентификации активного статорного сопротивления РМНК [5]. Выбор МНК во многом обусловлен тем, что при решении задач оценивания данным методом не требуется знание статистических характеристик ошибок измерений, которые во многих случаях неизвестны или известны с низкой точностью. Технология применения МНК предусматривает составление критерия оптимальности, формирование нормальной системы уравнений и получение опти-

мальной оценки путем ее решения. Параметрическая идентификация модели объекта позволяет сразу находить искомое значение коэффициента модели по измеряемым значениям управляемого и управляющего сигналов объекта. Важным преимуществом параметрической идентификации является возможность проведения текущей идентификации в реальном времени при нормальных режимах работы АЭП.

Для формализации методики решения задачи идентификации сформулируем и запишем критерий оптимальности. Алгоритм текущей идентификации построен с учетом того, что оценка искомого параметра определяется из условия минимума суммы квадратов ошибок измерений, т. е. как решение соответствующей оптимизационной задачи [6]:

$$F(R_s) = E^T E = (Z - \Psi(R_s, i_{s\alpha}, u_{s\alpha}))^T (Z - \Psi(R_s, i_{s\alpha}, u_{s\alpha})) \rightarrow \min_{R_s}. \quad (3)$$

Решение оптимизационной задачи (3) позволяет получить аналитическое выражение для МНК-оценки искомого параметра асинхронной машины

$$R_s = R_s^{(0)} + (Q^T Q)^{-1} Q^T (Z - \Psi(R_s^{(0)}, i_{s\alpha}, u_{s\alpha})), \quad (4)$$

где  $R_s^{(0)}$  – опорное значение активного статорного сопротивления (начальные условия рекуррентной идентификации);  $Q$  – параметр, представляющий «информационное состояние» на текущем шаге оценивания.

Из уравнения (2) для выражения (4) получаем регрессионную модель:

$$Z(t) = -\frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} - \alpha(1 + L_m \beta) \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \alpha \sigma^{-1} u_{s\alpha} + \sigma^{-1} \frac{du_{s\alpha}}{dt}; \quad (5)$$

$$\Psi(R_s, i_{s\alpha}, u_{s\alpha}, t) = \left( \sigma^{-1} \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \alpha \sigma^{-1} i_{s\alpha} \right) \times R_s = Q(t) \times R_s.$$

Исходя из того, что синтезируемый алгоритм предполагает дискретный вид, запишем для выражения (4) итоговый вид рекуррентной процедуры оценки:

$$R_s((k+1)\Delta t) = R_s^{(0)}(k\Delta t) + (Q(k\Delta t)^T Q(k\Delta t))^{-1} \times \quad (6)$$

$$\times Q(k\Delta t)^T (Z(k\Delta t) - Q(k\Delta t)R_s(k\Delta t)),$$

где  $\Delta t$  – период обновления матрицы «информационного состояния»;  $k\Delta t$  – интервал наблюдаемости системы, характеризующийся фиксированными значениями элементов дискретной оценки на данном периоде измерений.

В уравнении (6) теоретически точное решение для неизвестного параметра может быть получено за конечное число шагов  $\Delta t$ . Тем не менее ряд негативных факторов не позволяет говорить о справедливости этого утверждения на практике. Выражения, входящие в оценку (6), формируются из сигналов, которые зашумлены из-за квантования и дифференцирования, так как регрессионная модель (5) требует первую и вторую производные сигналов тока и

напряжения. Ввиду дискретизации сигналы производных формируются с задержкой. В качестве шага дискретизации выбирается период  $\Delta t$ , что позволяет сделать систему стационарной на каждом шаге наблюдений. Численное дифференцирование выполняется согласно следующим выражениям, рекомендуемым в [4]:

$$\frac{dx(k\Delta t)}{dt} \approx \frac{x((k+1)\Delta t) - x((k-1)\Delta t)}{2\Delta t},$$

$$\frac{d^2x(k\Delta t)}{dt^2} \approx \frac{x((k+1)\Delta t) - 2x(k\Delta t) + x((k-1)\Delta t)}{\Delta t^2}.$$

При этом необходимо выбрать не только оптимальное с точки зрения качества оценки значение  $\Delta t$ , но и момент начала идентификации, который свел бы к минимуму влияние «паразитных эффектов», не учитываемых в моделях АД, но присутствующих в реальной электрической машине.

**Основные результаты.** В общем виде алгоритм текущей идентификации будет иметь вид, представленный на рис. 1.

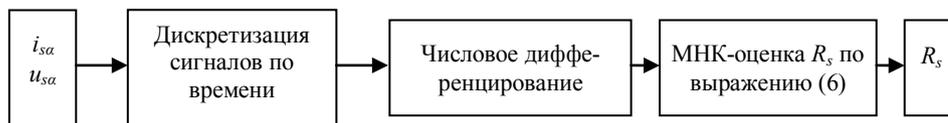


Рис. 1. Алгоритм МНК-оценки активного статорного сопротивления при неподвижном роторе

На основании алгоритма разработана программа в среде MatLab.

Исследование проводилось путем математического имитационного моделирования в программе MatLab. В качестве объекта исследования выбран двигатель АИР132М4 со следующими номинальными параметрами:  $P_n = 11$  кВт;  $L_m = 0,0857$  Гн;  $L_r = 0,0885$  Гн;  $L_s = 0,0885$  Гн;  $R_s = 0,517$  Ом;  $R_r = 0,394$  Ом;  $J = 0,04$  кг·м<sup>2</sup>;  $n_p = 2$ .

Структура имитационной модели включает модель трехфазного АД с короткозамкнутым ротором, источник постоянного напряжения, питающий одну из фаз асинхронной машины, подсистему идентификации активного статорного сопротивления, устройства регистрации переменных и блок квантования измеряемых сигналов (ток, напряжения) по времени. Подсистема идентификации организована в виде отдельно написанного *m*-файла, который имитирует работу микроконтроллера, выполняющего алгоритм МНК-оценки.

Моделирование выполнено для различных значений статорных сопротивлений обмоток двигателя в пределах от 0,5 до 1,5 расчетных значений, что соответствует реальным температурным изменениям в электрической машине [7]. При этом учитывалось, что аналогичные температурные изменения сказываются и на колебаниях роторного сопротивления. Однако, что очень важно, сама структура идентификатора (5) оперирует лишь номинальными значениями машинных параметров.

Кривые переходных процессов тока возбуждения  $i_{sa}$  и оценки активного статорного сопротивления для указанных выше вариантов сопротивлений представлены на рис. 2, 3.

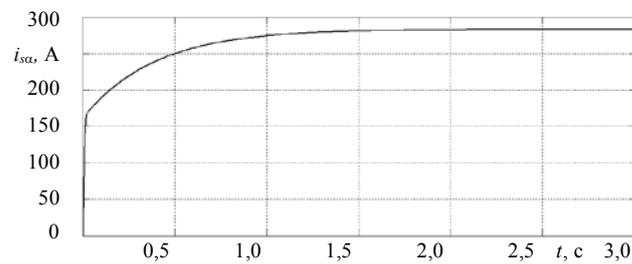


Рис. 2. График переходного процесса тока возбуждения  $i_{sa}$

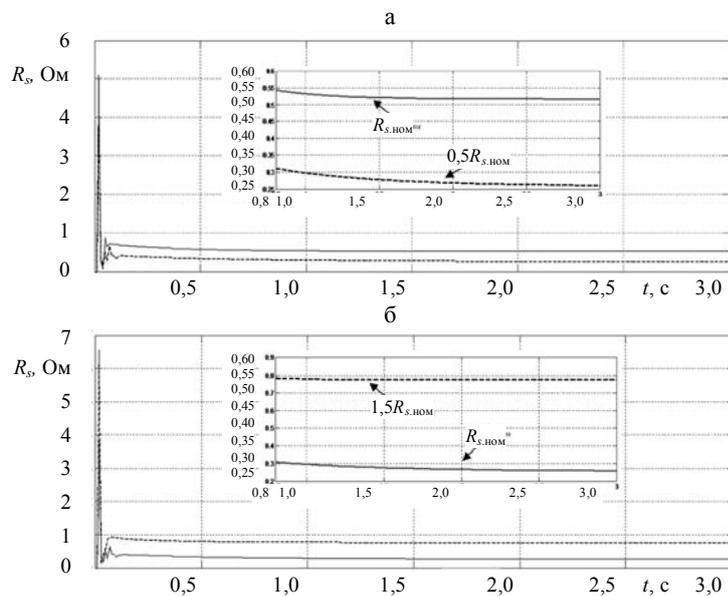


Рис. 3. Кривые переходных процессов при оценке активного статорного сопротивления:  
 а – сравнение процесса оценки сопротивления при  $R_s = R_{s,ном}$  и  $R_s = 0,5R_{s,ном}$ ; б – то же при  $R_s = R_{s,ном}$  и  $R_s = 1,5R_{s,ном}$

Запуск идентифицирующего теста АД производился при питании одной из фаз постоянным напряжением, что соответствует стандартному случаю идентифицирующего теста, реализованному в большинстве зарубежных АЭП. При этом время переходного процесса от возбуждения одной оси модели двухфазного АД составило около 1,5 с.

В целом, исходя из полученных графиков, видно, что процесс сходимости оценки  $R_s$  к истинному значению занимает больше времени, чем возбуждение машины, так как требует наступления установившегося режима. Однако, как известно, точность в оценке физических параметров АД считается приемлемой, если погрешность не превышает 5 %. Таким образом, если по технологическим причинам не заявлены более высокие требования к точности определения статорного сопротивления, синтезированный алгоритм МНК-оценки позволяет получить значение искомого параметра по итогам менее 1 с после запуска идентифицирующего теста.

Анализ влияния интервала дискретности на скорость сходимости оценки и точность определения  $R_s$  показал, что оптимальный результат достигается при  $\Delta t = 0,01$  с. Если на идентификацию может быть выделен более продолжительный интервал времени (3–4 с), искомый параметр сходится к своему истинному значению независимо от интервала дискретизации с погрешностью в оценке, равной долям процента. Вначале процесса идентификации отклонение сопротивления от истинного значения весьма велико и пропорционально росту частоты квантования входных сигналов.

Анализ влияния начального условия  $R_s^{(0)}$  на точность оценки искомого параметра показал превосходную сходимость к истинному значению переменного параметра даже при нулевом начальном условии (не требуется предварительная информация о номинальном значении данного параметра). Таким образом, метод идентификации независим от начальных условий (чем обычно «грешат» алгоритмы на основе МНК), что соответствует требованиям, предъявляемым к методам идентификации и их реализации.

К недостаткам данного метода определения активного статорного сопротивления можно отнести необходимость априорной информации о значениях остальных параметров схемы замещения АД (сопротивление ротора, индуктивности). Однако исследование алгоритма на имитационной модели показало, что точное знание отмеченных параметров не обязательно, можно оперировать лишь их каталожными данными.

В заключение отметим еще одну важность проведенного исследования. Так, в отдельных работах, например [3], решение задачи идентификации всех электромагнитных параметров АД достигается при ряде допущений. Среди них есть допущение, что активные сопротивления статора определяются отдельно, на первой стадии идентифицирующего теста по закону Ома, при питании обмотки статора постоянным током, полагаясь на следующее выражение:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i_{sa} = u_{sa} / R_s.$$

При этом умалчивается, насколько затягивается идентифицирующий тест, а также не оговаривается, по результатам скольких наблюдений и при каких условиях результаты расчета по закону Ома выдаются за итог теста. Поэтому возникает вопрос: насколько обоснованным является использование в автоматической процедуре идентификации принятых допущений по вычислению активного статорного сопротивления? Синтезированный же алгоритм по результатам исследования демонстрирует свою эффективность по быстродействию и точности полученной оценки. При этом теоретически может использоваться как при однофазном возбуждении (неподвижном роторе), так и при полнофазном управлении АД со свободно вращающимся ротором.

## ВЫВОДЫ

1. Синтез алгоритма текущей идентификации активного статорного сопротивления РМНК при неподвижном роторе оправдан и дает высокую точность оценки в условиях присутствия эффектов немоделируемой динамики.

2. Анализ алгоритма выявил, что выбор интервала дискретности не влияет на результат оценки, если на идентифицирующий тест может быть выделен достаточно продолжительный интервал времени. Оптимальная работа наблюдателя достигается при интервале дискретизации 0,01 с.

3. Гибкая структура, заложенная в идентификаторе, позволяет совершенствовать модель в сторону решения задачи идентификации во всех режимах работы ЭП.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров, В. Г. Анализ состояния и перспективы развития работ по идентификации параметров электрических машин / В. Г. Макаров, Ю. А. Яковлев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 1. – С. 134–144.

2. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2008. – 298 с.

3. Пересада, С. М. Оценка параметров асинхронного двигателя при известном активном сопротивлении статора / С. М. Пересада, А. Н. Серeda // Системы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Вестник НТУ «ХПИ». – 2004. – Вып. 43. – С. 28–31.

4. Kaiyu, W. An online rotor time constant estimator for the induction machine / W. Kaiyu, J. Chiasson, M. Bodson, L. Tolbert // IEEE Trans. on Control Systems Technology. – 2007. – Vol. 15, No. 2. – P. 339–348.

5. Цыпкин, Я. З. Основы информационной теории идентификации / Я. З. Цыпкин. – М.: Наука, 1984. – 320 с.

6. Муха, В. С. Статистические методы обработки данных / В. С. Муха. – Минск: Изд. центр БГУ, 2009. – 183 с.

7. Волков, А. В. Идентификация потокосцепления ротора и скорости асинхронного двигателя с учетом изменений его активных сопротивлений / А. В. Волков, Ю. С. Скалько // Электротехника. – 2009. – № 11. – С. 2–12.

Представлена кафедрой электропривода  
и автоматизации промышленных установок  
и технологических комплексов

Поступила 09.09.2011