

УДК 621.34

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ РАБОТЕ ОТ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Асп. ОДНОЛЬКО Д. С.

Белорусский национальный технический университет

Требования к повышению надежности и энергетической эффективности технологических процессов и внедряемого промышленного оборудования определяют постановку и решение научно-технических задач по созданию интеллектуальных систем автоматического управления и самодиагностирования на базе автоматизированных электроприводов переменного тока. Хотя во многом показатели качества формируемых статических и динамических режимов и определяются особенностями машины, заложенными конструкторами при проектировании, большая роль в обеспечении требуемых регулировочных характеристик возлагается на внедрение современных интеллектуальных систем, которые призваны оперативно выполнять структурную идентификацию объекта управления – асинхронной машины – и корректировать алгоритмы управления под текущее состояние электродвигателя. В данном случае под текущим состоянием понимается совокупность переменных параметров схемы замещения асинхронного двигателя (АД), реальные значения которых могут существенно отличаться от паспортных данных, а также данных, приводимых в справочной и технической документации, клиентских и наладочных формулярах.

В рабочих режимах электропривода возможно 50%-е изменение активного статорного R_s и роторного R_r сопротивлений двигателя, а также 10%-е увеличение взаимной индуктивности L_m , вызванное ослаблением поля, относительно их значений, полученных для номинального режима [1]. Изменение индуктивностей рассеяния $L_{\sigma s}$, $L_{\sigma r}$ в связи с насыщением зубцовой зоны двигателя потоками рассеяния заметным образом проявляется при кратностях тока статора, превышающих 2–3 от номинального значения и, как правило, не превышает 20%-го снижения относительно своего ненасыщенного значения, даже при токах прямого пуска двигателей на номинальное напряжение [2].

В отдельных случаях производители могут и вовсе не указывать параметры схемы замещения в сопроводительной документации, и тогда перед наладчиками возникает задача их предварительной оценки. Процедура предварительной автоподстройки преобразователя частоты под конкретный двигатель является важной функцией современных асинхронных электроприводов, которая во многом определяет последующую эффективность процедур онлайн адаптации к дрейфующим параметрам схемы замещения.

В литературе представлено лишь незначительное число аналитически обоснованных алгоритмов предварительной и текущей идентификации параметров, краткий обзор которых дан в [3]. Отмеченные в публикации алгоритмы зачастую требуют предварительной информации об отдельных параметрах электрической части АД либо о технических характеристиках

машины. Непосредственно в [3] синтезирован алгоритм с использованием теории адаптивных систем при известном сопротивлении статора, который может быть применен как при неподвижном роторе (определение параметров при инициализации системы на неработающем технологическом оборудовании), так и при полнофазном управлении АД со свободно вращающимся ротором (оперативная идентификация).

В [1] предложен алгоритм, который на основе предварительно введенной информации о технических характеристиках машины в автоматическом режиме работы позволяет определять электромагнитные параметры АД. Определение активного сопротивления статорной цепи осуществляется в режиме «неподвижного» вектора напряжения, соответствующего формированию на обмотках статора постоянного эквивалентного напряжения. Определение эквивалентной индуктивности рассеяния осуществляется также в режиме неподвижного вектора напряжения, при этом производятся две выборки тока статора на интервале включения нулевого вектора напряжения в пределах цикла модуляции, а сам расчет выполняется на основе линейной аппроксимации кривой изменения мгновенного значения тока. Определение индуктивности намагничивания осуществляется в режиме холостого хода на частоте, близкой к номинальной частоте двигателя. Активное сопротивление роторной цепи вычисляется на основании упрощенной схемы замещения АД. Таким образом, способ предварительной идентификации параметров электрической части АД предполагает реализацию целого комплекса специальных тестовых режимов с учетом предварительных данных о технических характеристиках двигателя.

В [4] рассмотрена методика расчета параметров АД по каталожным данным. Согласно методике определяют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора. В [5] авторы используют метод наименьших квадратов для идентификации сопротивления статора R_s и постоянной времени ротора T_r , предполагая, что индуктивности электромагнитных цепей АД известны. Линейно-параметризованная модель оценивания синтезируется на основе математической модели АД в осях, связанных с вращающимся ротором, при допущении, что угловая скорость является медленно изменяющимся параметром.

Необходимо также отметить, что задача идентификации традиционно понимается как определение по результатам измерений параметров схемы замещения. Однако в [6] авторами было показано, что такая постановка проблемы несостоятельна. Одним и тем же значениям напряжений, токов и частот вращения соответствует не один АД, в смысле конкретных значений параметров схемы замещения, а множество машин с одинаковыми величинами сопротивления и индуктивности статорной обмотки, но отличающихся значениями индуктивностей рассеяния и взаимоиндукции, при сохранении величины обобщенного рассеяния, сопротивления ротора и постоянной времени ротора. Поэтому задача идентификации АД должна принципиально пониматься как задача определения четырех значений параметров R_s , L_s , σ и T_r , полностью определяющих величины коэффициентов дифференциальных уравнений обобщенной электрической машины и не являющихся избыточными.

В данной статье синтезирован алгоритм совместной идентификации активного сопротивления статора R_s , эквивалентной индуктивности рассеяния статора σL_s и постоянной времени короткозамкнутого ротора T_r методом наименьших квадратов. Наблюдатель функционирует при полнофазном управлении АД со свободно вращающимся ротором и не требует предварительной информации о технических данных машины и отдельных параметрах схемы замещения двигателя. Проведено исследование полученного алгоритма методом имитационного моделирования и выполнен анализ полученных результатов.

Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Динамическая модель электромагнитных процессов в идеализированной двухфазной машине описывается уравнениями электрического равновесия для замкнутых контуров, образованных обмотками и источниками их питания. Для учета наиболее существенных явлений в реальной машине принимается ряд упрощающих предположений, в рамках которых сохраняются основные физические особенности процессов [1, 3, 5]: симметричность машины, равномерность зазора и равномерность распределения обмоток вдоль зазора, ненасыщенность магнитного материала и др. Записанная в стационарной системе координат статора $(\alpha-\beta)$ -модель имеет вид:

$$\sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} = u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} - k_r \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt}; \quad (1)$$

$$\sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} = u_{s\beta} - R_s i_{s\beta} - k_r \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt}; \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = -\alpha \Psi_{r\alpha} - n_p \omega_r \Psi_{r\beta} + \alpha L_m i_{s\alpha}; \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = -\alpha \Psi_{r\beta} + n_p \omega_r \Psi_{r\alpha} + \alpha L_m i_{s\beta}; \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left[k_r n_p (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - M_c \right], \quad (5)$$

где $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ – ток статора; $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ – потокосцепление ротора; $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ – напряжение статора; ω_r – механическая угловая скорость ротора; n_p – число пар полюсов; J – суммарный момент инерции механической части АД; M_c – момент нагрузки.

В (1)–(5) использовано общепринятое определение положительных коэффициентов:

$$\sigma = \frac{1 - L_m^2}{L_s L_r}; \quad k_r = \frac{L_m}{L_r}; \quad \alpha = \frac{R_r}{L_r} = \frac{1}{T_r}, \quad (6)$$

где R_s, R_r – активные сопротивления статора и ротора; L_s, L_r, L_m – индуктивность статора, ротора и взаимная индуктивность; σ – коэффициент рассеяния; T_r – постоянная времени короткозамкнутого ротора.

Регрессионная модель асинхронного двигателя как объекта идентификации. Решаемая задача заключается в совместном определении ак-

тивного сопротивления статора R_s , эквивалентной индуктивности рассеяния статора σL_s и постоянной времени короткозамкнутого ротора T_r . Их точные значения позволяют рассчитывать параметры и коэффициенты регуляторов системы векторного управления. Однако для полной настройки системы управления необходимо обладать информацией о величине индуктивности статора L_s , которая по результатам идентифицирующего теста, предлагаемого в данной статье, не определяется. В то же время работа наблюдателя не зависит от указанного параметра. Поэтому в случае необходимости дополнительная стадия теста по оценке L_s может быть реализована в процедуре идентификации двигателя после окончания основной части работы наблюдателя с учетом точных значений R_s , σL_s , T_r , либо предполагается, что данный параметр известен, и тем самым устранена параметрическая недостаточность, необходимая для наладки частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП).

Измерение переменных $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$, $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$, ω_r предполагается в алгоритме доступным. Вместе с тем получение информации о значениях $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ предполагается напрямую невозможным. Метод оценивания параметров основан на равенствах, где известные сигналы линейно зависят от неизвестных параметров. Однако модель АД не относится к этой категории объектов и поэтому должна быть преобразована. В динамической модели АД необходимо избавиться от переменных $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$, $d\Psi_{r\alpha}/dt$, $d\Psi_{r\beta}/dt$, недоступных для измерения. Для этого выражения (3) и (4) подставляем соответственно в (1) и (2) и дифференцируем обе части полученных уравнений:

$$\sigma L_s \frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} = \frac{du_{s\alpha}}{dt} - R_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} - k_r \left(-\alpha \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} - n_p \frac{d\omega_r}{dt} \Psi_{r\beta} - n_p \omega_r \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + \alpha L_m \frac{di_{s\alpha}}{dt} \right); \quad (7)$$

$$\sigma L_s \frac{d^2 i_{s\beta}}{dt^2} = \frac{du_{s\beta}}{dt} - R_s \frac{di_{s\beta}}{dt} - k_r \left(-\alpha \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + n_p \frac{d\omega_r}{dt} \Psi_{r\alpha} + n_p \omega_r \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + \alpha L_m \frac{di_{s\beta}}{dt} \right). \quad (8)$$

Далее из уравнений (1) и (2) выражаем переменные $d\Psi_{r\alpha}/dt$, $d\Psi_{r\beta}/dt$ и подставляем в (7) и (8), при этом в качестве упрощающего допущения принимаем постоянство угловой скорости ω_r (далее будет показано, что данное допущение не сказывается на точности получаемых оценок даже в режиме непостоянства угловой скорости):

$$\begin{aligned} & -\alpha u_{s\alpha} + R_s n_p \omega_r i_{s\beta} + \sigma L_s n_p \omega_r \frac{di_{s\beta}}{dt} + \sigma L_s \frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} + \\ & + (R_s + \alpha \sigma L_s + k_r \alpha L_m) \frac{di_{s\alpha}}{dt} + (\alpha R_s) i_{s\alpha} = \frac{du_{s\alpha}}{dt} + n_p \omega_r u_{s\beta}; \quad (9) \\ & -\alpha u_{s\beta} - R_s n_p \omega_r i_{s\alpha} - \sigma L_s n_p \omega_r \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \sigma L_s \frac{d^2 i_{s\beta}}{dt^2} + \end{aligned}$$

$$+(R_s + \alpha\sigma L_s + k_r \alpha L_m) \frac{di_{s\beta}}{dt} + (\alpha R_s) i_{s\beta} = \frac{du_{s\beta}}{dt} - n_p \omega_r u_{s\alpha}. \quad (10)$$

Выражения (9), (10) описывают многомерную динамическую систему с несколькими входами и выходами. Каждое уравнение полученной системы может рассматриваться отдельно друг от друга, так как содержит все переменные, обусловленные состоянием асинхронной машины ($i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, ω_r) и характером управляющего воздействия ($u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$), а также полный вектор неизвестных параметров. Таким образом, для построения идентификационной модели асинхронной машины воспользуемся выражением (9) и получим регрессионную модель АД

$$z_{(k)} = X^T Q_{(k)}, \quad (11)$$

где X – вектор неизвестных параметров (коэффициенты перед переменными состояния в дифференциальном уравнении (9)),

$$X^T \stackrel{\Delta}{=} [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6] \stackrel{\Delta}{=} [\alpha, R_s, \sigma L_s, \sigma L_s, R_s + \alpha\sigma L_s + k_r \alpha L_m, \alpha R_s]; \quad (12)$$

$z_{(k)}$ – наблюдение на k -м измерительном интервале,

$$z_{(k)} = \left[\frac{du_{s\alpha}}{dt} + n_p \omega_r u_{s\beta} \right]; \quad (13)$$

$Q_{(k)}$ – матрица «информационного» состояния на k -м измерительном интервале,

$$Q_{(k)} = \left[-u_{s\alpha}, n_p \omega_r i_{s\beta}, n_p \omega_r \frac{di_{s\beta}}{dt}, \frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2}, \frac{di_{s\alpha}}{dt}, i_{s\alpha} \right]^T. \quad (14)$$

Необходимо также внести ясность в выборе заявленной совокупности оцениваемых параметров (R_s , σL_s , T_r) из общего вектора неизвестных коэффициентов (12). Как было отмечено выше, задача идентификации АД ставит главной целью получить исчерпывающую информацию для настройки системы управления ЧРЭП, и из шести неизвестных параметров в (12) R_s , σL_s , T_r являются решением задачи идентификации по [6].

Синтез алгоритма идентификации методом наименьших квадратов. Методы идентификации, основанные на последовательном методе наименьших квадратов (МНК), по своему быстрдействию и точности получаемых оценок не уступают встречающимся в последнее время в литературе идентификационным моделям. Их сравнительная простота при реализации на микропроцессорной технике и наглядность в наладке позволяют искать оптимальное решение проблемы по наблюдению за состоянием асинхронной машины в данном направлении. Минимальные требования, выдвигаемые условиями применимости данной структуры, и теоретическая устойчивость получаемых оценок к внешним возмущениям, действующим на объект наблюдения, позволяют утверждать об актуальности исследований по применимости МНК в идентификации электромагнитных параметров АД. Справедливости ради стоит отметить, что задача построения идентификационных моделей на основе МНК встречается как в зарубежной [5],

так и в отечественной [7] литературе. Однако несмотря на отмеченные выше работы, получение «конкурентоспособного» наблюдателя (по сравнению с исследованиями [1–3]), одинаково эффективного как в системах предварительной, так и текущей идентификации в комплексе с системой векторного управления, остается до конца нерешенной задачей.

Для синтеза алгоритма воспользуемся полученной регрессионной моделью (11)–(14). Оценивание вектора параметров X осуществляется таким образом, чтобы оценка \hat{X}_n минимизировала среднеквадратичный критерий $J_n^2(\hat{X}_n)$:

$$J_n^2(\hat{X}_n) = \sum_{k=1}^n q_{(k)} (z_{(k)} - \hat{X}_n^T Q_{(k)})^2, \quad (15)$$

где $q_{(k)}$ – произвольный весовой коэффициент; n – число измерений.

Функция $J_n^2(\hat{X}_n)$ квадратичная и обладает единственным минимумом в точке

$$\frac{\partial J_n^2(\hat{X}_n)}{\partial \hat{X}_n} = 0. \quad (16)$$

Решения, порождаемые условием (16), представляют собой рекуррентный алгоритм наименьших квадратов (подробный вывод результирующих выражений можно изучить, например, в [8]):

$$\begin{aligned} \hat{X}_n &= \hat{X}_{n-1} + R_n q_n Q_n (z_n - Q_n^T \hat{X}_{n-1}), \\ R_n^{-1} &= R_{n-1}^{-1} + q_n Q_n Q_n^T. \end{aligned} \quad (17)$$

Полученная структура (17) примет более конкретный вид с учетом дополнений, указанных ниже. Произвольный весовой коэффициент принимается $q_n = 1$ для всех n измерений. Исследование алгоритма путем имитационного моделирования показало, что придание более высоких весовых коэффициентов каким-то конкретным оценкам вносит дополнительную сложность в алгоритм, не повышая его практическую эффективность.

Чтобы избежать обращения матрицы R_n и тем самым упростить ее рекуррентное вычисление, удобно воспользоваться леммой об обращении матриц [8]. Получим

$$\begin{aligned} R_n &= R_{n-1} - R_{n-1} Q_n (\lambda_n + Q_n^T R_{n-1} Q_n)^{-1} Q_n^T R_{n-1}, \\ \lambda_n &= q_n E, \end{aligned} \quad (18)$$

где E – единичная матрица.

Поскольку в нашем случае $\lambda_n + Q_n^T R_{n-1} Q_n$ – скаляр, при получении R_n по рекуррентному соотношению (16) обращение матриц не требуется.

Действительно, анализ применимости алгоритма (15) и его модификации с учетом (16) для идентификации параметров АД показал, что игнорирование (16) при оценке комплекса неизвестных параметров АД (R_s , σL_s , T_r) приводит к асимптотической расходимости оценок и неэффективности наблюдателя.

Результаты моделирования. Функционирование алгоритма идентификации проходит в соответствии с этапами, отмеченными на рис. 1.

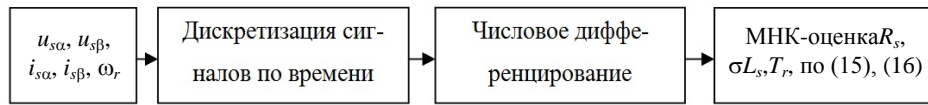


Рис. 1. Алгоритм МНК-оценки электромагнитных параметров АД при свободно вращающемся роторе

Предложенный наблюдатель исследован методом имитационного моделирования согласно модели, разработанной в инженерной среде 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; $R_s = 0,523$ Ом; $R_r = 0,394$ Ом; $J = 0,04$ кг·м²; $n_p = 2$.

Структура имитационной модели включает модель трехфазного АД с короткозамкнутым ротором, источник неуправляемого трехфазного синусоидального напряжения, подсистему идентификации активного статорного сопротивления, устройства регистрации переменных и блок квантования измеряемых сигналов (ток, напряжение, угловая скорость ротора) по времени. Подсистема идентификации организована в виде отдельно написанного *m*-файла, который имитирует работу микроконтроллера, выполняющего алгоритм МНК-оценки.

При исследованиях начальные значения идентифицируемых параметров приняты нулевыми. Переходные процессы, полученные при моделировании, показаны на рис. 2–5. Пуск двигателя производится напрямую от сети с напряжением 220/380 В и частотой 50 Гц. Нагрузка, приложенная к валу машины, соответствует $M_c = 0,1M_{ном}$. Запуск идентифицирующего теста происходит одновременно с пуском двигателя. Графики изменения тока в обмотке статора в осях α – β и процесс разгона машины до номинальной скорости представлены на рис. 2.

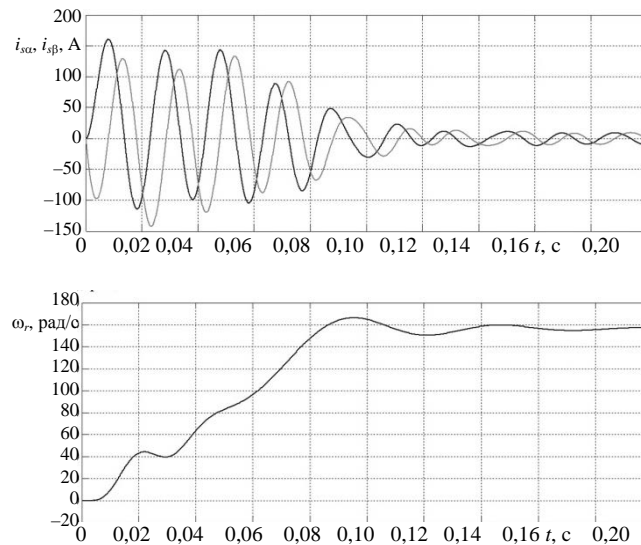


Рис. 2. Графики переходных процессов токов статора и угловой скорости ротора

Из графиков переходных процессов оценивания неизвестных параметров, приведенных на рис. 3–5, следует, что асимптотическая сходимость оценок к истинным значениям достигается за время менее 0,15 с. При этом наибольшая скорость сходимости свойственна параметру R_s . Каждая из получаемых оценок обладает существенным первоначальным отклонением от истинной оценки и обусловлена нулевыми начальными условиями, заданными в алгоритме. При этом на степень отклонения во многом влияет выбор шага оценивания k .

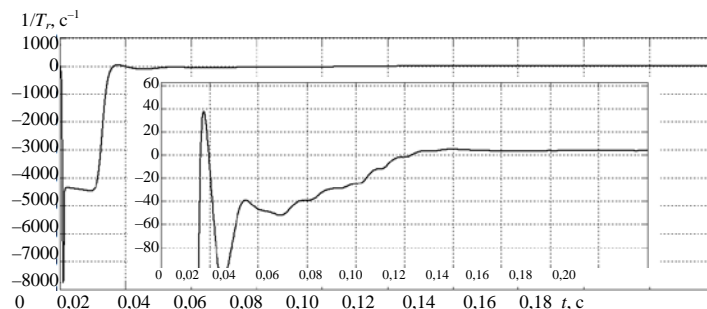


Рис. 3. Переходный процесс при оценке постоянной времени ротора

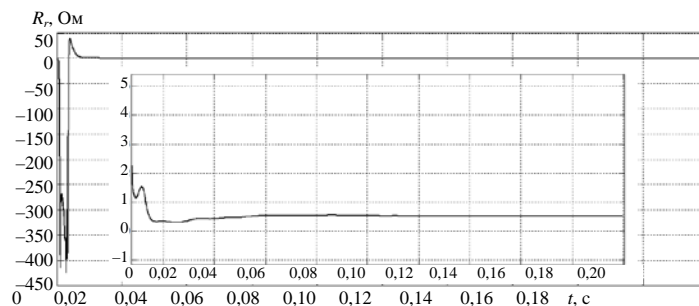


Рис. 4. Переходный процесс при оценке активного сопротивления статора

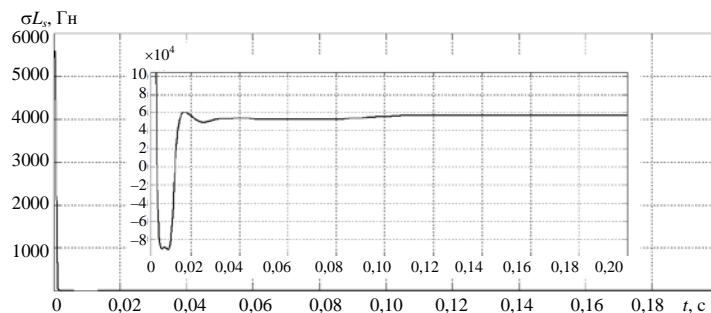


Рис. 5. Переходный процесс при оценке эквивалентной индуктивности рассеяния статора

Отклонение полученных оценок от их истинных значений (за истинные данные выбраны паспортные характеристики машины) показано в табл. 1.

Таблица 1

Точность идентификации электромагнитных параметров АД

Оцененный параметр	Паспортное значение	Оцененное значение	Ошибка, %
R_s , Ом	0,5230	0,5310	1,53
σL_s , Гн	0,0055	0,0056	1,82
$1/T_r$, с ⁻¹	4,4500	3,9500	11,2

Как видно из табл. 1, качество получаемых оценок и быстродействие наблюдателя позволяют эффективно использовать его для предварительной идентификации электромагнитных параметров (R_s , σL_s , T_r) АД с короткозамкнутым ротором. Следует также отметить, что ведутся дальнейшие работы по адаптации наблюдателя на основе МНК в условиях программно реализуемой широтно-импульсной модуляции питающего АД напряжения. Это позволит проводить не только предварительную идентификацию параметров машины, но и выполнять оперативную отладку системы управления.

ВЫВОДЫ

1. Алгоритм идентификации параметров R_s , σL_s , T_r асинхронного двигателя, синтезированный на основе рекуррентного метода наименьших квадратов, функционирует при полнофазном управлении АД со свободно вращающимся ротором и не требует предварительной информации о технических данных машины и отдельных параметрах схемы замещения двигателя.

2. Результаты имитационного моделирования свидетельствуют о высокой скорости сходимости наблюдателя и низкой погрешности оценивания, не превышающей 2 % для активного сопротивления и эквивалентной индуктивности статора. Ошибка оценивания постоянной времени ротора не превышает 12 %.

3. Наблюдатель может применяться в процедуре предварительной идентификации электромагнитных параметров асинхронной машины, а также имеет перспективу на использование в процессе оперативной работы асинхронного двигателя в составе частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. В и н о г р а д о в, А. Б. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ / А. Б. Виноградов, И. Ю. Колодин, А. Н. Сибирицев // Силовая электроника. – 2006. – № 3. – С. 46–51.
2. В и н о г р а д о в, А. Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А. Б. Виноградов // Электротехника. – 2005. – № 5. – С. 57–61.
3. П е р е с а д а, С. М. Новый алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя полного порядка / С. М. Пересяда, А. Н. Середа // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 5. – С. 32–40.
4. Ф и р а г о, Б. И. Расчеты по электроприводе производственных машин и механизмов / Б. И. Фираго. – Минск: Техноперспектива, 2012. – 639 с.
5. Anonline rotor time constant estimator for the induction machine / W. Kaiyu [etal.] // IEEE-Trans. on Control Systems Technology. – 2007. – Vol. 15, No 2. – P. 339–348.
6. И з о с и м о в, Д. Б. Свойства уравнений обобщенного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором / Д. Б. Изосимов, Е. Н. Аболемов // Электричество. – 2008. – № 4. – С. 35–39.
7. К а ш и р с к и х, В. Г. Идентификация параметров асинхронного электродвигателя с помощью метода наименьших квадратов / В. Г. Каширских, В. М. Завьялов, Е. Н. Аболемов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2002. – № 2. – С. 17–19.
8. Ц ы п к и н, Я. З. Информационная теория идентификации / Я. З. Цыпкин. – М.: Наука, 1995. – 336 с.

Представлена кафедрой электропривода
и автоматизации промышленных установок
и технологических комплексов

Поступила 19.09.2012