

УДК 621.34

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА  
ИДЕНТИФИКАЦИИ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ  
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО  
ЛОГИЧЕСКОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ**

**Асп. ОДНОЛЬКО Д. С.**

*Белорусский национальный технический университет*

Трехфазный асинхронный двигатель (АД) получил широкое распространение в промышленном мире и все чаще используется в высокопроизводительных электроприводах, так как является более надежным по конструкции и менее дорогим из-за используемых материалов, чем любые другие двигатели, доступные сегодня на рынке. Асинхронная машина имеет несколько конструктивных параметров, которые являются непостоянными, особенно сопротивление ротора, варьируемое для различных условий эксплуатации. Кроме того, сопротивление статорных и роторных обмоток широко меняется в зависимости от температурных режимов, присутствующих в машине [1].

Известно, что эффективность работы систем управления электроприводов и электротехнических комплексов, содержащих электродвигатели, зависит от знания текущих значений электромагнитных параметров электродвигателей.

В то же время, например на этапе приемо-сдаточных испытаний АД, измеряется только активное сопротивление обмотки статора, а значения параметров, которые приводятся в каталогах, являются расчетными при проектировании и могут заметно отличаться от реальных значений параметров конкретных электродвигателей. Для повышения эксплуатационной надежности электроприводов при управлении их состоянием, контроле и функциональном диагностировании предусматриваются алгоритмы предварительной и текущей идентификации электромагнитных параметров, которые призваны адаптировать систему управления к переменным параметрам объекта управления и выявить на ранней стадии зарождающиеся дефекты в асинхронной машине.

В настоящее время наиболее теоретически обоснованными и применяемыми на практике являются алгоритмы пассивной идентификации на основе анализа информации об основных рабочих гармониках (первой, «фундаментальной», т. е. 50 Гц) электрических величин [2], доступных во внутренней структуре и на выходных клеммах управляемого преобразователя электрической энергии. Между тем, в мировой практике существует устойчивая тенденция наряду с совершенствованием классических подходов в построении идентификационных систем разработки систем, основанных на приемах искусственного интеллекта. В особенности это относится к нечеткой логике и нейронным сетям [3].

В [4] представлен наблюдатель сопротивления ротора в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе с использованием искусственных нейронных сетей, дополненный нечеткой логикой, на которой основан наблюдатель активного сопротивления статора. Ошибка между потоко-сцеплением ротора, вычисленного на основе модели нейронной сети и модели напряжения АД, используется для оценки сопротивления ротора. При этом модель напряжения получается из уравнений статорной цепи АД и представлена следующим алгоритмом:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Psi_{dr}}{dt} \\ \frac{d\Psi_{qr}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \left\{ \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} - R_s \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} - \sigma L_s \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \end{bmatrix} \right\},$$

где  $i_s$ ,  $u_s$  – ток и напряжение статора;  $\Psi_r$  – потоко-сцепление ротора;  $L_r$ ,  $L_m$ ,  $R_s$ ,  $\sigma L_s$  – параметры схемы замещения АД.

Измеренный ток статора и соответствующее рассчитанное его значение сопоставляются для оценки сопротивления статора в наблюдателе на основе нечеткой логики. Сопротивление статора, вычисленное при таком подходе, используется для уточнения величины сопротивления ротора. Недостатком данного алгоритма является его сложность из-за использования сразу нескольких моделей асинхронной машины, основанных как на приеме искусственного интеллекта, так и на классической модели напряжений АД. При этом необходимо отметить отсутствие конструктивной процедуры настройки модели нейронной сети, что требует в каждом отдельном случае предварительного обоснования правильности выбора настроечных коэффициентов.

Целью данной статьи является совершенствование оценивания параметров АД путем использования нечеткой логики для совместной оценки как сопротивления статора, так и короткозамкнутого ротора АД. В статье впервые синтезирован алгоритм идентификации АД на основе нечеткой логики, который позволяет решать задачи оценки нескольких параметров, не прибегая к дополнительным математическим моделям. Данный подход позволяет получить менее громоздкую структуру по сравнению с [4], а процедура настройки нового алгоритма проще, так как исключена подсистема нейронной сети как более сложная по структуре и требовательная к качеству наладки.

**Постановка задачи идентификации и синтез наблюдателя.** Электромагнитные процессы в идеализированной эквивалентной двухфазной машине описываются 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 [5]: симметричность машины, равномерность зазора и равномерность распределения обмоток вдоль зазора, ненасыщенность магнитного материала и др. Уравнения будут иметь вид:

$$\sigma L_s \frac{dI_s}{dt} = -R_s I_s - \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_r}{dt} - \omega_k J \left( \sigma L_s I_s + \frac{L_m}{L_r} \Psi_r \right) + U_s; \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} I_s - (\omega_k - \omega_e) J \Psi_r - \frac{R_r}{L_r} \Psi_r,$$

где  $I_s$ ,  $\Psi_r$  – двумерные векторы-столбцы токов статора и потоко-сцепления ротора;  $\omega_k$  – угловая скорость системы координат;  $\omega_e$  – электриче-

ская частота вращения ротора;  $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ;  $L_r$ ,  $L_m$ ,  $R_r$ ,  $R_s$ ,  $\sigma L_s$  – параметры схе-

мы замещения АД.

Идентификатор активных сопротивлений АД строится на основе адаптивного наблюдателя с использованием приемов нечеткой логики (ННЛ). Структура представляет собой математическую модель электромагнитных процессов АД в системе координат  $d-q$ , вращающейся с синхронной скоростью ( $\omega_k = \omega_0$ ), на входы которой подаются вектор напряжений статора и скорость вращения ротора. Использование вращающейся системы координат позволяет в статике оперировать с постоянными значениями всех переменных, однако предполагает наличие датчика скорости.

От системы (1) перейдем к модели установившегося режима АД в системе координат, вращающейся с синхронной скоростью:

$$U_s = R_s I_s + \omega_0 J \sigma L_s I_s + \omega_0 J \frac{L_m}{L_r} \Psi_r; \quad (2)$$

$$0 = \frac{L_m R_r}{L_r} I_s - \omega_s J \Psi_r - \frac{R_r}{L_r} \Psi_r,$$

где  $\omega_0$  – синхронная электрическая угловая скорость;  $\omega_s$  – частота скольжения.

Из второго уравнения системы (2) выразим вектор потокосцепления ротора и подставим в первое уравнение. Следовательно, после преобразований первое уравнение системы (2) будет иметь вид

$$U_s = \begin{bmatrix} \frac{R_s R_r (1 + \omega_s^2 T_r^2) + L_m^2 \omega_s \omega_0}{R_r (1 + \omega_s^2 T_r^2)} & \frac{-\omega_0 (L_m^2 + \sigma L_s L_r (1 + \omega_s^2 T_r^2))}{L_r (1 + \omega_s^2 T_r^2)} \\ \frac{\omega_0 (L_m^2 + \sigma L_s L_r (1 + \omega_s^2 T_r^2))}{L_r (1 + \omega_s^2 T_r^2)} & \frac{R_s R_r (1 + \omega_s^2 T_r^2) + L_m^2 \omega_s \omega_0}{R_r (1 + \omega_s^2 T_r^2)} \end{bmatrix} I_s = Z I_s, \quad (3)$$

где  $T_r = L_r/R_r$  – постоянная времени короткозамкнутого ротора АД;  $Z$  – полное сопротивление двигателя, представленное в матричной форме [6].

На основании модели (3) в ННЛ определяется оценка вектора токов статора. Однако для этого выражение (3) необходимо преобразовать к виду

$$Z^{-1} U_s = \tilde{I}_s, \quad (4)$$

где  $Z^{-1}$  – матрица, обратная полному сопротивлению двигателя;  $\tilde{I}_s = [\tilde{i}_{sd}, \tilde{i}_{sq}]$  – оцененное значение компонентов тока статора.

Оцененное амплитудное значение тока статора вычисляется следующим образом:

$$\tilde{I}_{ms} = \sqrt{\tilde{i}_{sd}^2 + \tilde{i}_{sq}^2}. \quad (5)$$

С целью вычисления активных сопротивлений обмоток машины ННЛ дополнен алгоритмом адаптации, который призван сводить к нулю отклонение оценки тока статора, вычисленного по (5), от его измеренного значения. На вход контроллера нечеткой логики (КНЛ) подаются два сигнала: ошибка между измеренной и вычисленной амплитудами статорного тока  $eI(k)$  и изменение токовой ошибки  $\Delta eI(k)$ :

$$eI(k) = \tilde{I}_{ms}(k) - I_{ms}(k);$$

$$\Delta eI(k) = eI(k) - eI(k-1).$$

Выход нечеткой модели формирует на каждом такте вычислений величину приращения  $\Delta R(k)$  согласно синтезированной структуре: базе знаний, параметрам функций принадлежности ( $\mu_{eI}$ ,  $\mu_{\Delta eI}$ ,  $\mu_{\Delta R}$ ), методу дефазификации, а также типу нечеткой модели.

На рис. 1 представлена укрупненная структурная схема предлагаемого алгоритма идентификации активных сопротивлений АД на основе аппарата нечеткой логики.

Сигналы с датчиков тока ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ) и напряжения статора ( $U_{sa}$ ,  $U_{sb}$ ,  $U_{sc}$ ) преобразуются в переменные двухфазной машины в осях  $d$ - $q$ , для этого предусмотрены преобразователь фаз (ПФ)  $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} \rightarrow i_{sa}, i_{s\beta}$ ;  $U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} \rightarrow u_{sa}, u_{s\beta}$  и преобразователь координат (ПК)  $i_{sa}, i_{s\beta} \rightarrow i_{sd}, i_{sq}$ ;  $u_{sa}, u_{s\beta} \rightarrow u_{sd}, u_{sq}$  [7]. В структуре предусмотрен блок вычисления угла поворота осей координат  $\varphi$  и частоты скольжения  $\omega_s$  (БВ) согласно следующим выражениям [7]:

$$\varphi = \frac{1}{p} \omega_0; \quad \omega_0 = \omega_e + \omega_s; \quad \omega_e = n_p \omega_r; \quad \omega_s = \frac{L_m R_r}{L_r} \frac{1}{\Psi_{rd}} i_{sq}; \quad \Psi_{rd} = \frac{L_m}{L_r / R_r p + 1} i_{sd},$$

где  $\omega_r$  – механическая частота вращения ротора;  $n_p$  – число пар полюсов АД.

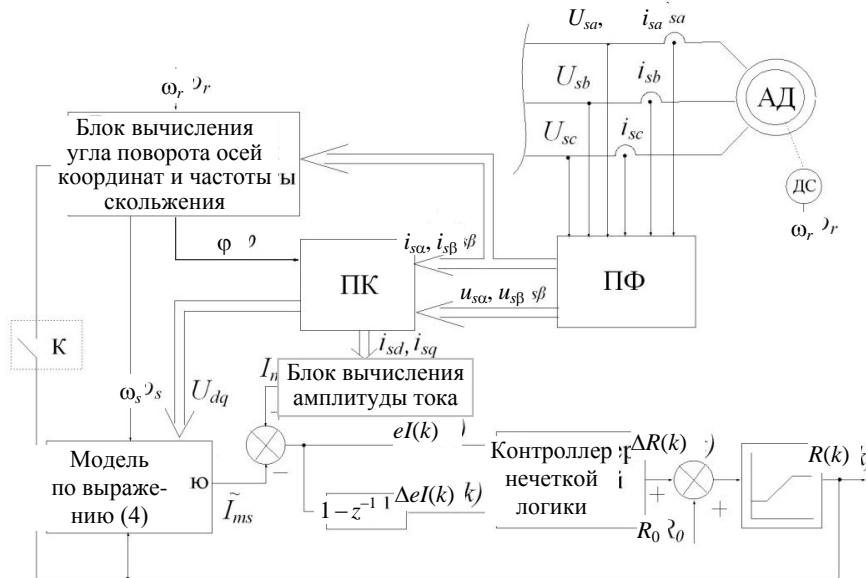


Рис. 1. Структурная схема адаптивного наблюдателя с контроллером нечеткой логики

Решение задачи идентификации  $R_r$  и  $R_s$  происходит в два этапа. На первом выполняется идентификация активного роторного сопротивления в установившемся режиме работы АД при допущении об известности номинальных параметров схемы замещения:  $L_r$ ,  $L_m$ ,  $R_s$ ,  $\sigma L_s$  (ниже будет проанализирована ошибка в оценке  $R_r$  в зависимости от отклонения параметров схемы замещения от своих номинальных значений). При этом в БВ подается полученная оценка  $R_r$  на каждом такте вычислений. На втором – идентификация активного статорного сопротивления с учетом оцененного значения  $R_r$ . При этом началу второго этапа должен предшествовать повторный переходный процесс: повторный пуск двигателя либо переход на другую угловую скорость вращения.

**Результаты моделирования.** Имитационное моделирование предлагаемого адаптивного идентификатора на аппарате нечеткой логики было выполнено в среде MATLAB/SIMULINK для двигателя 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 трехфазного синусоидального напряжения, датчики тока, напряжения, угловой скорости и подсистему идентификации с КНЛ. Подсистема идентификации организована в виде отдельно написанного файла в пакете Fuzzy Logic Toolbox, который имитирует работу нечеткого контроллера. На рис. 2а, б представлены база правил нечеткого вывода в виде поверхности вывода и вид функций принадлежности входных и выходных сигналов нечеткого контроллера.

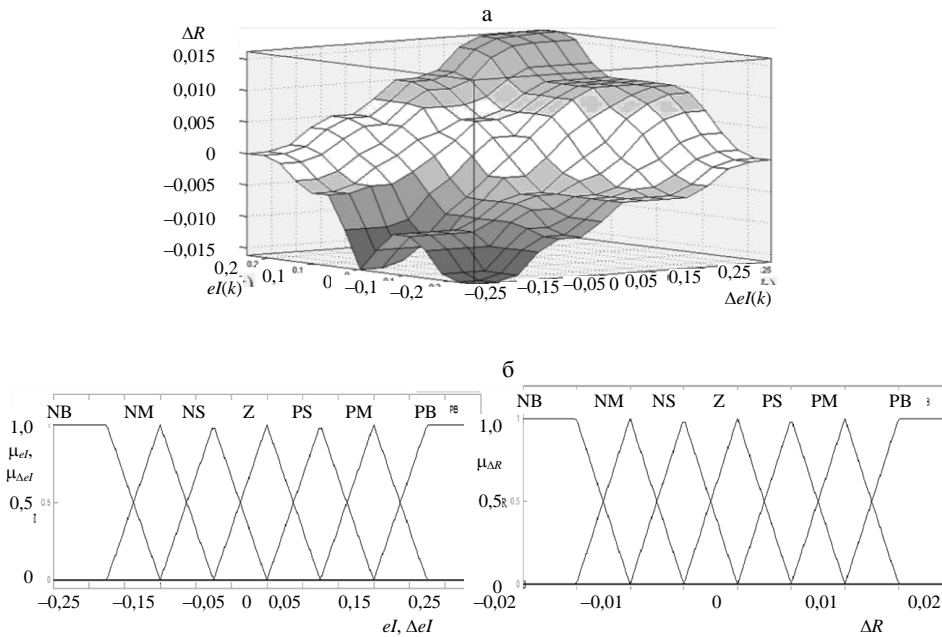


Рис. 2. а – база правил нечеткого вывода; б – функции принадлежности входных и выходных сигналов нечеткого контроллера

В качестве метода дефаззификации выбран метод центра тяжести, нечеткая модель представлена моделью Мамдани [8].

На рис. 3а, б показаны кривые переходных процессов по измеренному и вычисленному амплитудному значению токов статора, активному сопротивлению ротора, активному сопротивлению статора и их оценке. Двигатель предварительно разогнался до номинальной скорости под нагрузкой ( $M_c = 0,5M_n$ ), а затем при  $t = 1$  с скачком увеличивались активное статорное и роторное сопротивления (на 50 %) и «включался» алгоритм текущей идентификации активного сопротивления ротора.

Синтезированная структура нечеткого контроллера обеспечивает работоспособность наблюдателя по оценке  $\tilde{R}_r$  с погрешностью в доли процента, время оценки составляет 0,3 с. При этом нечеткий наблюдатель продемонстрировал сходимость оценки  $\tilde{R}_r$  к своему истинному значению в диапазоне изменений  $0,5R_{s,ном} < R_s < 2,0R_{s,ном}$ . Установлено, что изменение индуктивностей до 20 % от истинного значения не приводит к ошибке в оценке активных сопротивлений.

Как было отмечено выше, после окончания первого этапа работы наблюдателя необходимо обеспечить в системе электропривода (ЭП) повторный переходный процесс, при этом в модель наблюдателя «вводится» оцененное значение  $\tilde{R}_r$ . На рис. 3б видно, что был осуществлен повторный пуск двигателя до номинальной скорости, и в момент времени  $t = 1$  с «включался» идентификатор. Процесс сходимости оценки к истинному значению составил 0,1 с, при этом погрешность оценки активного статорного сопротивления составила 2,0 %.

Для обоснования принципиальной возможности совместной идентификации активных сопротивлений статора и ротора адаптивным наблю-

дателем на основе нечеткой логики необходимо отметить, что ошибка между расчетным и измеренным значениями тока статора при неточном задании  $R_r$  практически в 30 раз превышает ошибку, вызванную неполнотой информации об  $R_s$ , что отражено на рис. 3а, б. Поэтому первый этап идентифицирующего теста проводится при допущении, что ошибка обусловлена лишь отклонением сопротивления ротора от истинного значения. При этом алгоритм идентификации демонстрирует высокую эффективность.

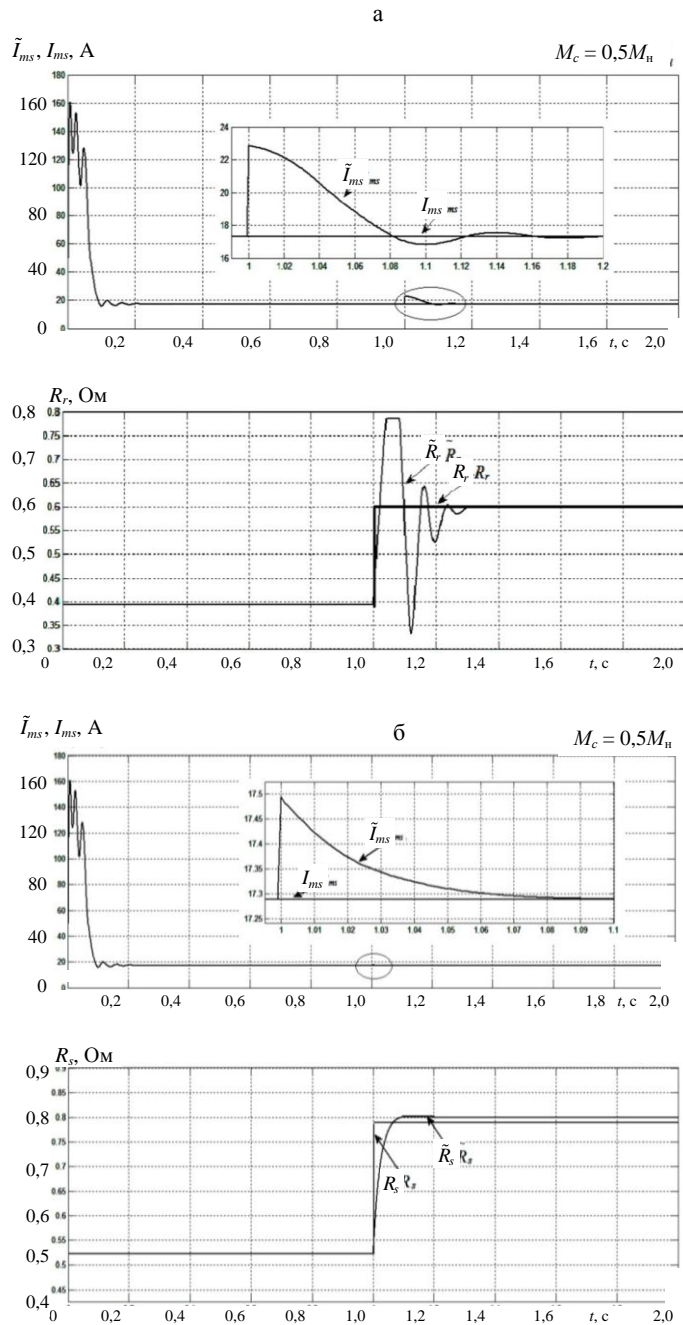


Рис. 3. Кривые переходных процессов при оценке сопротивления ротора (а) и статора (б)

Необходимо также отметить явный недостаток наблюдателя – это его ограниченная область применения: только для тех ЭП, в рабочем цикле которых присутствует (или возможна) кратковременная их остановка, а также необходимость информации об остальных параметрах схемы замещения АД. Однако в случае необходимости идентифицировать лишь активное сопротивление ротора кратковременные остановки не требуются, и наблюдатель может функционировать в режиме продолжительной работы ЭП.

## ВЫВОДЫ

1. Алгоритм идентификации показал высокую скорость сходимости к истинному значению оцениваемых параметров, при этом погрешность в оценке активного сопротивления короткозамкнутого ротора составляет доли процента, погрешность оценки сопротивления статора не превышает 2 %.

2. Для оптимальной работы идентификатора значения взаимной индуктивности и индуктивностей статора и ротора не должны отличаться от истинных значений более чем на 20 %. В противном случае погрешность начинает существенно нарастать.

3. Структура идентификатора не предполагает объемных математических вычислений, процедура настройки довольно прозрачна, что облегчает его использование на практике. При этом следует отметить, что ряд современных производителей микропроцессорных систем позволяют реализовывать в своих устройствах алгоритмы управления на основе нечеткой логики, поэтому применение разработанного алгоритма не представляет трудностей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Пересада, С. М. Оценка параметров асинхронного двигателя при известном активном сопротивлении статора / С. М. Пересада, А. Н. Серeda // Вестник НТУ «ХПИ». Сер. Системы автоматизированного электропривода: теория и практика. – 2004. – Вып. 43. – С. 28–31.
3. Bose, B. K. Expert System, Fuzzy Logic, and Neural Network Applications in Power Electronics and Motion Control / B. K. Bose // Proc. of the IEEE. – 1994. – Vol. 82. – P. 1303–1323.
4. Karanayil, B. Stator and Rotor Resistance Observers for Induction Motor Drive Using Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks / B. Karanayil, M. F. Rahman, C. Grantham // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2005. – Vol. 20, No. 4. – P. 771–780.
5. Изосимов, Д. Б. Свойства уравнений обобщенного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором / Д. Б. Изосимов, Е. Н. Аболемов // Электричество. – 2008. – № 4. – С. 35–39.
6. Кучер, Е. С. Исследование условий текущей идентифицируемости параметров асинхронного электропривода / Е. С. Кучер, В. В. Панкратов // Электричество. – 2011. – № 5. – С. 48–52.
7. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
8. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

Представлена кафедрой электропривода  
и автоматизации промышленных установок  
и технологических комплексов

Поступила 25.10.2011