

МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ ЕГО МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ТАКАГИ—СУГЕНО

Современные регулируемые асинхронные электроприводы по векторному типу управления осуществляют регулирующее воздействие на двигатель с помощью встроенных программируемых микропроцессоров, позволяющих реализовывать весьма сложные алгоритмы управления двигателями.

В связи с этим в статье рассмотрена модель, построенная на основе математического описания процессов в асинхронной машине с учетом насыщения ее магнитной системы. При этом нелинейность характеристики намагничивания реализована посредством метода, предложенного японскими учеными Т. Такаги и М. Сугено.

В статье приводятся разработанные для каждого из двух выделенных интервалов значения модуля вектора намагничивания, соответствующие функции принадлежности, а также вид функций-заклучений, с помощью которых реализуется кривая намагничивания. Процесс моделирования выполнялся посредством среды MATLAB Simulink. Статья содержит графическую интерпретацию двух моделей асинхронного короткозамкнутого двигателя с учетом насыщения магнитной системы, совмещенных по времени. При этом в одной модели учет насыщения выполняется с помощью полинома шестой степени, а в другой — с помощью нечеткого метода Такаги—Сугено. Алгоритмы, выполняющие учет насыщения, реализованы средствами языка программирования Си.

Простота реализации предлагаемого алгоритма позволяет рекомендовать его применение при программировании микропроцессоров, управляющих асинхронными электроприводами.

Показано, что управление современными асинхронными электроприводами должно строиться на более адекватной модели, учитывающей насыщение магнитной системы двигателя, которое достаточно просто реализуется с помощью нечеткого логического вывода Такаги—Сугено.

Показано, что энергоэффективное управление современных асинхронных электроприводов должно быть основано на более адекватной модели, учитывающей насыщение магнитной системы двигателя, что хорошо реализуется с помощью нечеткого логического вывода Такаги—Сугено.

Ключевые слова: модель, асинхронный электродвигатель, насыщение магнитной системы, функции принадлежности, нечеткая логика, нечеткий логический вывод.

Актуальность. В настоящее время технологические процессы различных производств реализуются на основе управляемых средствами силовой электроники электроприводами переменного тока, более 70 % процентов которых составляют электроприводы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. На их основе осуществляется рациональное управление и комплексная автоматизация реализуемых технологических процессов. Ввиду особого внимания в последние годы в России к вопросам энергосбережения на любом производстве возникает задача поиска энергоэффективных режимов управления асинхронными электродвигателями [1–4] в каждом отдельном случае, которая может быть решена на базе адекват-

ного представления протекающих в двигателе процессов [5–8].

При управлении асинхронными двигателями для математического описания процессов в асинхронной машине обычно используются дифференциальные уравнения, полученные при общепринятых допущениях, часто без учета насыщения магнитной системы. Это предположение выражается в форме постоянства коэффициентов индуктивности L_m , $L_{1\sigma}$ и $L_{2\sigma}$.

Данное допущение при описании электромагнитных процессов позволяет использовать упрощенные зависимости для расчетов, однако при решении задач поиска энергоэффективного режима работы асинхронного электродвигателя точность

расчетов оказывается недостаточной [2, 4], и для ее решения необходим учет нелинейности характеристики намагничивания [5–8].

Модель с учетом насыщения магнитной системы. Считается с достаточной степенью точности, что явление насыщения магнитной системы электродвигателя проявляется только в нелинейном изменении коэффициента L'_m , который связывает главный магнитный поток $\tilde{\Psi}_m$ с намагничивающим током \tilde{I}_m . Зависимости между потоками рассеяния статора и ротора от соответствующих токов остаются такими же, как и в ненасыщенной машине, что выражается в постоянстве индуктивностей рассеяния статора $L_{1\sigma}$ и ротора $L_{2\sigma}$.

Рис. 1а демонстрирует характеристику намагничивания асинхронной машины $|\tilde{\Psi}_m| = f(|\tilde{I}_m|)$ в виде зависимости между модулями векторов главного потокосцепления $|\tilde{\Psi}_m|$ и намагничивающего тока $|\tilde{I}_m|$ [2, 4, 5]. При записи уравнений, описывающих насыщенную машину, эту связь представляют в виде зависимости

$$|\tilde{\Psi}_m| = L'_m \cdot |\tilde{I}_m|, \quad (1)$$

где L'_m — переменный коэффициент индуктивности, который является нелинейной характеристикой связи главного потокосцепления и намагничивающего тока.

Обратная зависимость записывается следующим образом:

$$|\tilde{I}_m| = (L'_m)^{-1} \cdot |\tilde{\Psi}_m|. \quad (2)$$

Рис. 1а иллюстрирует уменьшение коэффициента L'_m по мере насыщения магнитной системы [2, 4], (рис. 1б) — в то же время — рост коэффициента $(L'_m)^{-1}$. Это явление объясняется тем, что для получения некоторого значения потокосцепления $|\tilde{\Psi}_m|$ в зоне насыщения требуется больший намагничивающий ток, чем для получения того же значения потокосцепления в случае отсутствия насыщения. В линейной части характеристики намагничивания выполняются равенства

$$L'_m = L_m \quad \text{и} \quad (L'_m)^{-1} = (L_m)^{-1}. \quad (3)$$

Построить зависимость $(L')^{-1} = f(|\tilde{\Psi}_m|)$ можно, выбрав в рабочей зоне характеристики намагничива-

ния ряд значений $|\tilde{I}_m|$ и определяя соответствующие им значения $|\tilde{\Psi}_m|$. Так, в литературе приводятся зависимости, полученные таким образом с помощью аппроксимации степенным полиномом [2]:

$$|\tilde{I}_m|(|\tilde{\Psi}_m|) = 0,1484|\tilde{\Psi}_m| + 0,2773|\tilde{\Psi}_m|^3 - 0,5464|\tilde{\Psi}_m|^5 + 0,4173|\tilde{\Psi}_m|^7. \quad (4)$$

Нелинейную зависимость коэффициента взаимной индукции обмоток статора и ротора $(L'_m)^{-1}$ в режиме насыщения предлагается в литературе [2] представить следующим образом:

$$(L'_m)^{-1} = 0,1484 + |\tilde{\Psi}_m|^2 \times (0,2773 + |\tilde{\Psi}_m|^2(-0,5464 + 0,4173|\tilde{\Psi}_m|^2)). \quad (5)$$

С помощью коэффициента $(L'_m)^{-1}$ вычисляют проекции вектора намагничивающего тока $|\tilde{I}_m|$, которые необходимы для определения состояния двигателя в каждый очередной для анализа момент времени. Известно, что микропроцессоры возведение в степень выполняют либо путем многократного умножения, либо с помощью логарифмирования, что реализуется посредством микропрограммы или подключения специального аппаратного средства. Такая операция по получению результата требует, наряду с делением, самого большого относительно интервала времени.

В связи с этим возникает задача упрощения вычисления функции (5), учитывающей насыщение магнитной системы асинхронного электродвигателя, что было выполнено на основе нечеткой логики [9], с помощью идентификации по Такаги–Сугено [10–13]. Основанием для идентификации, послужила информация, опубликованная в литературе [2], где полином вида (5) представлен в зависимости от модуля вектора намагничивания Ψ в относительных единицах. Такое представление позволяет применить данную зависимость для всех асинхронных двигателей.

Метод, предложенный Такаги и Сугено (TS) [12–13], основан на нечетком разбиении входного пространства, в данном случае относительных значений модуля вектора намагничивания Ψ . В каждом нечетком подпространстве формируется линейный вход–выход. Для построения нечеткой модели

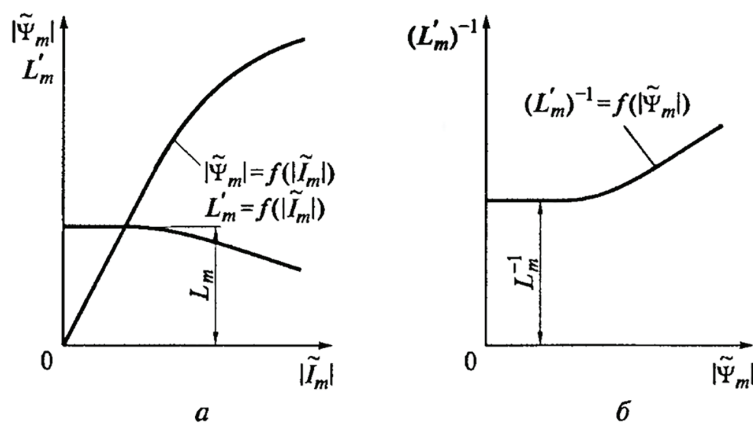


Рис. 1. Характеристика насыщения магнитной системы асинхронного двигателя:
а — характеристика намагничивания $|\tilde{\Psi}_m| = f(|\tilde{I}_m|)$ и зависимость $L'_m = f(|\tilde{I}_m|)$,
б — обратная зависимость $(L')^{-1} = f(|\tilde{\Psi}_m|)$

системы по Такаги – Сугено создается система правил продукции:

$$\text{IF ... THEN ... ,}$$

где «IF» — antecedent — условие, а «THEN» — consequent — следствие. В конкретных условиях это записывается в форме:

$$\text{ЕСЛИ (} x \text{ есть } A), \text{ ТО (} y = f(x)). \quad (6)$$

В общем виде функция заключений $f(x)$ может быть нелинейной, но чаще используются функции линейного вида. Следовательно, можно записать:

$$\text{ЕСЛИ (} x \text{ есть } A), \text{ ТО (} y = ax + b). \quad (7)$$

Если существует несколько нечетких интервалов значений переменной x , то база правил записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} & \text{1-й интервал: ЕСЛИ (} x \text{ есть } A_1), \text{ ТО (} y = f_1(x)) \\ & \text{2-й интервал: ЕСЛИ (} x \text{ есть } A_2), \text{ ТО (} y = f_2(x)) \\ & \dots\dots \\ & \text{N-й интервал: ЕСЛИ (} x \text{ есть } A_N), \text{ ТО (} y = f_N(x)) \end{aligned} \quad (8)$$

В этом случае значение на выходе модели вычисляется с помощью выражения, называемого центр масс

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{A_i}(x) \cdot f_i(x)}{\sum_{i=1}^N \mu_{A_i}(x)}, \quad (9)$$

где $\mu_{A_i}(x)$ — функции принадлежности переменной x интервалу A_i , а $f_i(x)$ — функции заключений. Если сумма функций принадлежности интервалам равна 1, формула 9 приобретает вид:

$$y = \sum_{i=1}^N \mu_{A_i}(x) \cdot f_i(x). \quad (10)$$

Исходя из этих положений, предлагается существенно новая модель, а именно, полиномы высокой степени эквивалентно заменяются системой правил продукции вида (8), где $N=2$. Таким образом, кривая насыщения магнитной системы представляется в виде двух участков, аппроксимируемых линейными зависимостями с двумя функциями принадлежности и одним интервалом пересечения:

$$\mu_1 = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq \psi < 0,85 \\ \frac{1-\psi}{0,15} & \text{при } 0,85 \leq \psi < 1, \\ 0 & \text{при } \psi \geq 1 \end{cases}$$

$$\mu_2 = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq \psi < 0,85 \\ 1 - \frac{1-\psi}{0,15} & \text{при } 0,85 \leq \psi < 1, \\ 1 & \text{при } \psi \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

Вид функций заключений для каждого из двух правил был определен с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} f_1 &= 0,15 \\ f_2 &= 4,84\psi - 4,57. \end{aligned} \quad (12)$$

В результате коэффициент взаимоиנדукции обмоток статора и ротора $(L'_m)^{-1}$ вычислялся с помощью зависимости:

$$(L'_m)^{-1} = \mu_1 \cdot f_1 + \mu_2 \cdot f_2 \quad (13)$$

или

$$(L'_m)^{-1} = 0,15\mu_1 + (4,84\psi - 4,57) \cdot \mu_2. \quad (14)$$

Таким образом, для получения коэффициента $(L'_m)^{-1}$ необходимо запрограммировать три операции сравнения, максимум пять и минимум три операции умножения и две — сложения.

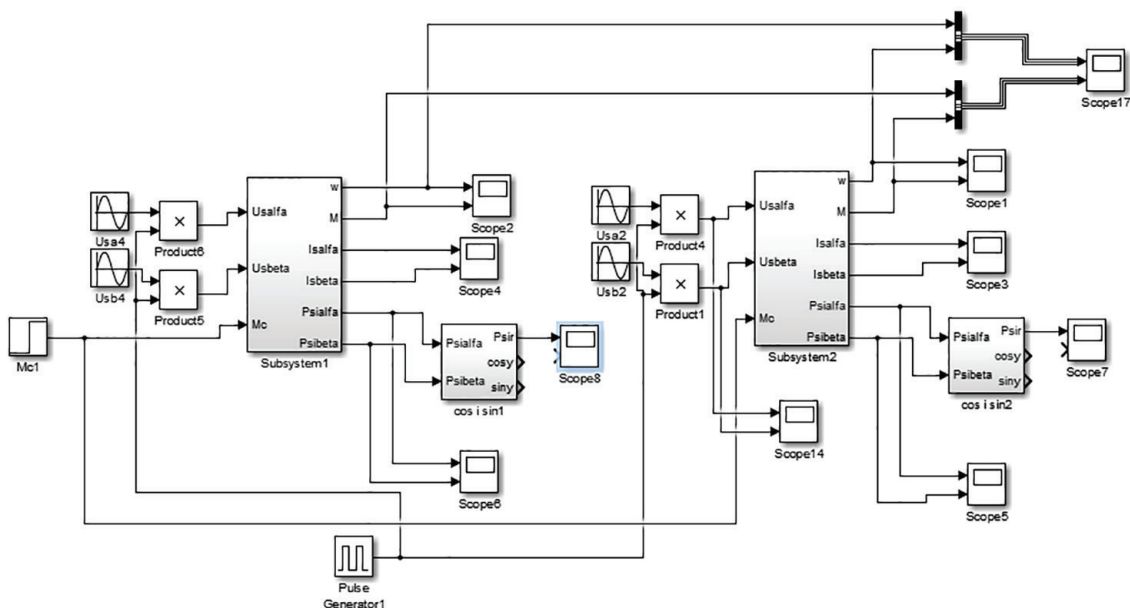


Рис. 2. Совмещенные по времени две модели асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, выполненные в системе MATLAB Simulink

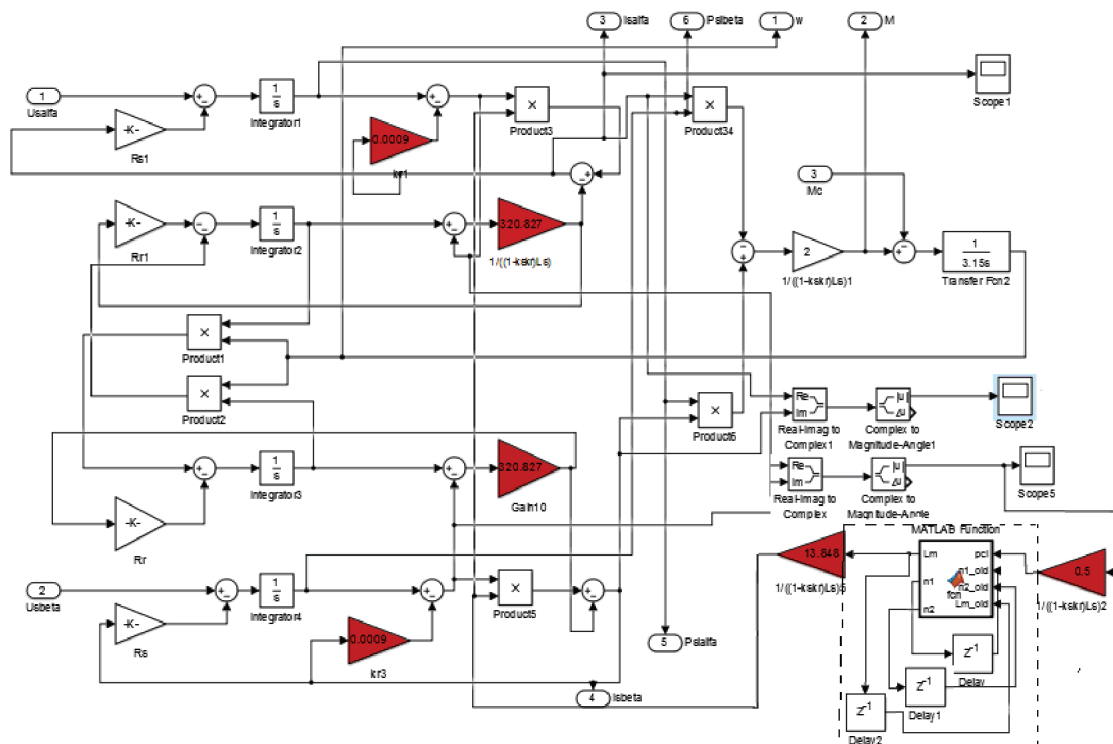


Рис. 3. Модель асинхронного электродвигателя с учетом насыщения магнитной системы, выполненной в блоке программирования

```

Editor - Block: AD_model_Lm81/Subsystem2/MATLAB Function*
Subsystem2/MATLAB Function*
1 function [Lm,n1,n2]= fcn(pci,n1_old,n2_old,Lm_old)
2
3 n1=n1_old;
4 n2=n2_old;
5 Lm=Lm_old;
6
7 if (pci>=0) && (pci<0.85)
8     n1=1;
9     n2=0;
10
11 if (pci>0.85) && (pci<1)
12     n1=(1-pci)/0.15;
13     n2=1-(1-pci)/0.15;
14
15 if pci>=1
16     n1=0;
17     n2=1;
18
19 Lm=0.15*n1+(4.84*pci-4.57)*n2;
20
end

```

Рис. 4. Интерфейс окна программирования блока, реализующего учет насыщения магнитной системы асинхронного электродвигателя по Такаги-Сугено

Для проверки правильности предлагаемого метода и сравнения методик учета нелинейности характеристики намагничивания электродвигателя были разработаны средствами MATLAB Simulink [3, 14] две модели асинхронного короткозамкнутого двигателя (рис. 2). Одна, учитывающая насыщение с помощью выражений (11–14), а другая — с помощью выражения (5). Для моделирования взят асинхронный короткозамкнутый двигатель 4A250S4У3. При этом, для общности выводов, явление насыщения магнитной системы двигателя моделировалось в относительных единицах, как это делалось в [2].

Моделирование магнитной системы двигателя выполнялось с помощью зависимостей потоко-сцеплений статора и ротора, которые отличаются от главного потоко-сцепления на величины потоко-сцеплений рассеяния:

$$\begin{aligned}\tilde{\Psi}_1 &= \tilde{\Psi}_m + L_{1\sigma} \cdot \tilde{I}_1 \\ \tilde{\Psi}_2 &= \tilde{\Psi}_m + L_{2\sigma} \cdot \tilde{I}_2.\end{aligned}\quad (15)$$

Вектор главного потоко-сцепления определяется как:

$$\tilde{\Psi}_m = L'_m \cdot (\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2) = L'_m \cdot \tilde{I}_m.\quad (16)$$

Моделирование электромагнитных процессов асинхронного двигателя в неподвижной системе координат выполнялось с помощью уравнений:

$$\frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt} = U_{1\alpha} - R_1 \cdot i_{1\alpha};$$

$$\frac{d\Psi_{1\beta}}{dt} = U_{1\beta} - R_1 \cdot i_{1\beta}; \quad (17)$$

$$\frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = -R_2 \cdot i_{2\alpha} - p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta};$$

$$\frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} = -R_2 \cdot i_{2\beta} + p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}, \quad (18)$$

где $\Psi_{1\alpha}, \Psi_{1\beta}$ — проекции вектора потокосцепления статора, $\Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ — проекции вектора потокосцепления ротора, $U_{1\alpha}, U_{1\beta}$ — проекции вектора напряжения на статоре, $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ — проекции вектора тока статора, $i_{2\alpha}, i_{2\beta}$ — проекции вектора тока ротора R_1 — активное сопротивление статора, R_2 — активное сопротивление ротора, ω — угловая скорость ротора.

Проекции главного потокосцепления, токов статора и ротора определялись с помощью уравнений:

$$\Psi_{m\alpha} = \Psi_{1\alpha} - L_{1\sigma} \cdot i_{1\alpha}; \quad i_{1\alpha} = \frac{1}{L_m} \Psi_{m\alpha} - i_{1\alpha};$$

$$\Psi_{m\beta} = \Psi_{1\beta} - L_{1\sigma} \cdot i_{1\beta}; \quad i_{1\beta} = \frac{1}{L_m} \Psi_{m\beta} - i_{1\beta}; \quad (19)$$

$$i_{2\alpha} = \frac{1}{L_{2\sigma}} (\Psi_{2\alpha} - \Psi_{m\alpha}); \quad i_{2\beta} = \frac{1}{L_{2\sigma}} (\Psi_{2\beta} - \Psi_{m\beta}),$$

где $\Psi_{m\alpha}, \Psi_{m\beta}$ — проекции главного потокосцепления по осям α и β , L_m — взаимная индуктивность, $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ — индуктивности рассеяния статора и ротора.

Динамический момент, развиваемый двигателем, определялся как:

$$M_g = \frac{3}{2} p (\Psi_{1\alpha} \cdot i_{1\beta} - \Psi_{1\beta} \cdot i_{1\alpha}). \quad (20)$$

Уравнение движения ротора:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_g - M_c, \quad (21)$$

где J — момент инерции ротора, M_c — статический момент сопротивления двигателя, p — число пар полюсов.

Сравнение двух различных методик учета нелинейности осуществлялось соединением моделей в единую систему с синхронизацией их работы по времени (рис. 2).

Выходы каждой модели по скорости вращения ротора и момента на валу двигателя подавались совместно на осциллограф (на рисунке он обозначен как Scope 17). Обе модели имели одинаковую структуру (рис. 3), отличающуюся только алгоритмом учета насыщения. На рис. 3 штриховой линией выделен блок расчета коэффициента $(L'_m)^{-1}$.

Средствами языка Си, встроенного в MATLAB Simulink [14], был запрограммирован алгоритм, реализующий насыщение магнитной системы асинхронного электродвигателя с помощью идентификации по Такаги–Сугено. Интерфейс окна программирования с кодом разработанного алгоритма представлен на рис. 4. Код программы расчета коэффициента $(L'_m)^{-1}$ с помощью полинома (5) изображен на рис. 5.

```

function [Lm,n1,n2]= fcn(pci,n1_old,n2_old,Lm_old)
1
2
3 -   n1=n1_old;
4 -   n2=n2_old;
5 -   Lm=Lm_old;
6 -   Lm=0.1484+pci*pci*(0.2773+pci*pci*(-0.5464+0.4173*pci*pci));
7   end
  
```

Рис. 5. Интерфейс окна программирования блока, реализующего учет насыщения магнитной системы асинхронного электродвигателя с помощью полинома

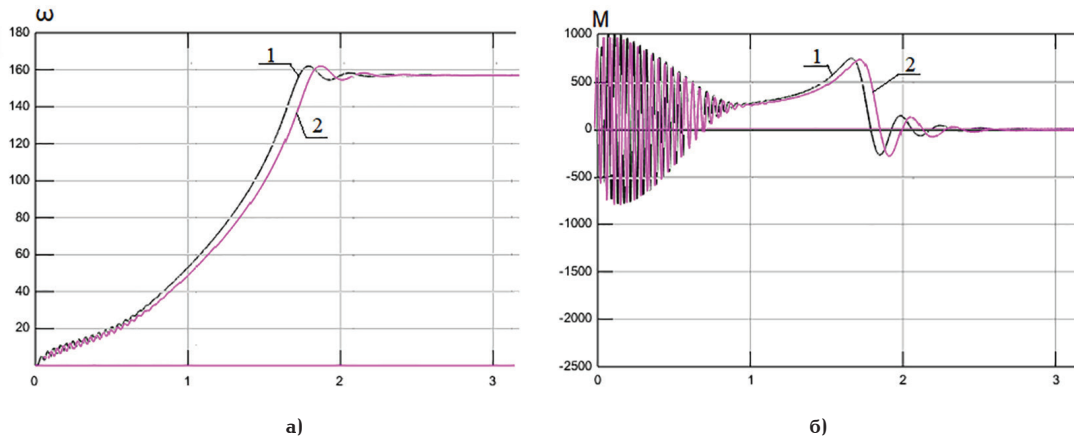


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования асинхронного короткозамкнутого электродвигателя по изменению скорости вращения вала двигателя (а) и момента, создаваемого на валу двигателя (б), во времени (линия 1 — модель с учетом насыщения магнитной системы по Такаги–Сугено, линия 2 — с помощью полинома 6-й степени)

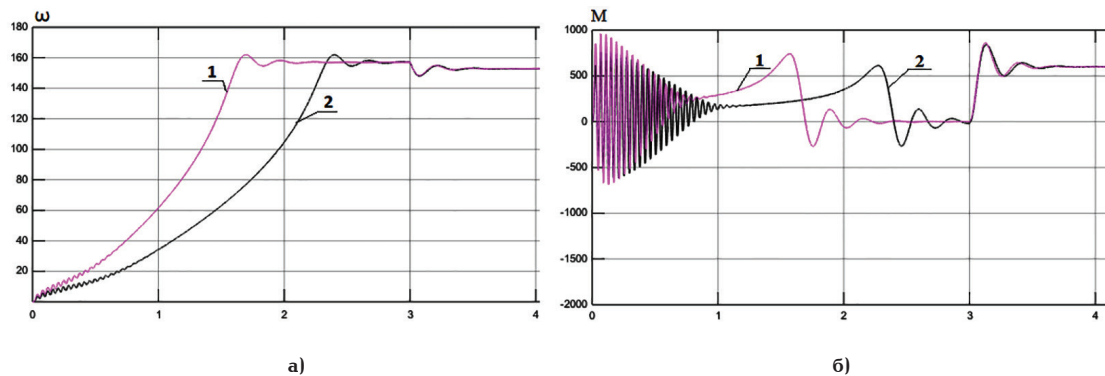


Рис. 7. Результат моделирования асинхронного короткозамкнутого электродвигателя с учетом намагничивания (линия 1) и без такового (линия 2) с набросом нагрузки через 3 секунды после включения двигателя по изменению скорости вращения вала двигателя (а) и момента, создаваемого на валу двигателя (б), во времени

На рис. 6 представлено сравнение результатов работы моделей с учетом насыщения двумя различными способами. Рисунок хорошо иллюстрирует, что учет насыщения магнитной системы асинхронного короткозамкнутого двигателя при моделировании работы с помощью алгоритма Такаги – Сугено (кривая, обозначенная цифрой 1) позволяет раньше получить значения скорости вращения вала двигателя (рис. 6а) и расчетного момента холостого хода (рис. 6б), чем в случае учета насыщения с помощью полинома (кривая, обозначенная цифрой 2, на этих же рисунках).

Предлагаемую модель асинхронного короткозамкнутого двигателя в ходе ее исследования сравнивали с аналогичной моделью, но без учета насыщения магнитной системы. Результаты этого сравнения приведены на рис. 7, где линия 1 — модель с учетом насыщения магнитной системы, а линия 2 — без учета такового. Помимо этого, данный рисунок иллюстрирует работу моделей с нагрузкой. Наброс нагрузки в 600Нм был выполнен через 3 секунды после пуска двигателя.

Корректность разработанных с учетом насыщения моделей подтверждается результатами исследований, опубликованными в литературе [4–6, 15, 16]. Сравнение полученных в работе данных возможно с результатами аналогичного моделирования с учетом нелинейности характеристики намагничивания асинхронного короткозамкнутого двигателя, выполненного средствами MATLAB Simulink и опубликованного в [15, с. 97–101], где учет нелинейности кривой намагничивания осуществлялся с помощью кусочно-линейной аппроксимации.

Заключение. 1. Предложена математическая модель, которая, в отличие от существующих, учитывает нелинейность характеристики насыщения магнитной системы с помощью идентификации по Такаги – Тугено. Аппроксимация этой характеристики выполнена путем склеивания «функций-заклучений» посредством функций принадлежности значения интервала значений магнитного потока.

2. Реализация функции, учитывающей насыщение магнитной системы асинхронного электродвигателя, выполнена на основе нечеткого логического вывода Такаги – Сугено. Предлагаемая модель с нечетким логическим выводом имеет преимущество по сравнению с существующими нечеткими моделями ввиду отсутствия в ней стадии дефаззификации и связанной с этой стадией процедурой вычисления центра масс.

3. Разработанный алгоритм вычисления функции намагничивания легко программируется в микропроцессорах и быстрее срабатывает по сравнению с вычислением этой же функции с помощью полинома шестой степени, что позволяет ускорить получение требуемых режимных параметров и быстрее сформировать управляющее воздействие.

4. Предлагаемая модель, учитывающая насыщение магнитной системы электродвигателя, может быть использована при векторном управлении асинхронным электроприводом ввиду простоты ее реализации.

Библиографический список

- Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: ACADEMA, 2004. 204 с.
- Шрейнер Р. Т., Емельянов А. А., Медведев А. В. Ресурсы энергосбережения в повторно-кратковременных режимах работы асинхронного привода // Промышленная энергетика. 2011. № 11. С. 22–27.
- Рушкин Е. И., Семёнов А. С. Анализ энергоэффективности системы электропривода центробежного насоса при помощи моделирования в программе MATLAB // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-2. С. 341–342.
- Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
- Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая шк., 2001. 327 с. ISBN 5-06-003861-0.
- Калинов А. П., Огарь В. А. Характеристики асинхронных двигателей с учетом нелинейности кривой намагничивания // Электромашиностроение и электрооборудование. 2006. № 66. С. 226–229.
- Макаров В. Г., Матюшин В. А. Математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с учетом нелинейности магнитопровода и потерь в стали // Электротехнические системы и комплексы. 2010. № 1. С. 161–173.
- Копырин В. Л., Смирнов О. В. Имитационное моделирование режимов работы погружного асинхронного электродвигателя // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 58–62.
- Манусов В. З., Зайцева Н. М. Определение коэффициента уравнения кинетики разложения раствора в гидрохимическом производстве на основе нечеткой логики // Научный вестник НГТУ. 2016. № 3. С. 7–15.
- Манусов В. З., Зайцева Н. М., Антоненков Д. В. Энергоэффективная модель управления асинхронного электропривода с учетом намагничивания на основе нечеткого логического

го вывода Такаги–Сугено // Научный вестник НГТУ. 2017. № 3. С. 31–48.

11. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит, 2001. 224 с. ISBN 5-94052027-8.

12. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1985. Vol. SMC-15, no. 1. P. 116–132.

13. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag. 2008. P. 687. ISBN 978-3-7908-1824-6.

14. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с. ISBN 978-5-903383-39-9.

15. Денисов В. А., Третьякова М. Н. Теория и переходные процессы электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей энергии. Тольятти: Кассандра, 2017. 108 с.

16. Денисов В. А., Третьякова М. Н., Бородин О. А. Математическое моделирование асинхронных электроприводов с векторным управлением // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 1. С. 5–12.

ЗАЙЦЕВА Наталья Михайловна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Энергетика, металлургия и информационные технологии».

SPIN-код: 4051-2245

AuthorID (РИНЦ): 324370

ORCID: 0000-0003-3779-0555

AuthorID (SCOPUS): 57188856097

Адрес для переписки: zaitzevns@mail.ru

Для цитирования

Зайцева Н. М. Модель асинхронного электродвигателя с учетом насыщения его магнитной системы на основе метода Такаги–Сугено // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 52–58. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-52-58.

Статья поступила в редакцию 16.04.2018 г.

© Н. М. Зайцева