

Моделирование асинхронного привода с нечетким прямым управлением момента в Simulink

М.Г. Данилова, С.Ю. Чернышов, Е.Н. Сидоров, М.С. Основин

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова

Аннотация: Проанализированы два метода прямого управления моментом (DTC) асинхронного двигателя. Первый метод основан на использовании гистерезисных регуляторов потокосцепления и момента. Заданные значения модуля потокосцепления статора и электромагнитного момента сравниваются с текущими значениями. Выходы компараторов используются для выбора соответствующих векторов напряжений. Системе присущи такие недостатки, как большие флуктуации момента и большое содержание высших гармоник в токе асинхронного двигателя. Другой метод системы прямого управления моментом основан на использовании нечетких регуляторов. В этом методе гистерезисные компараторы, используемые в классической системе DTC, заменяются регуляторами на основе нечеткой логики. Для аппроксимации нелинейных функций используется Алгоритм Такаги-Сугено.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, прямое управление моментом, нечеткий регулятор, флуктуации.

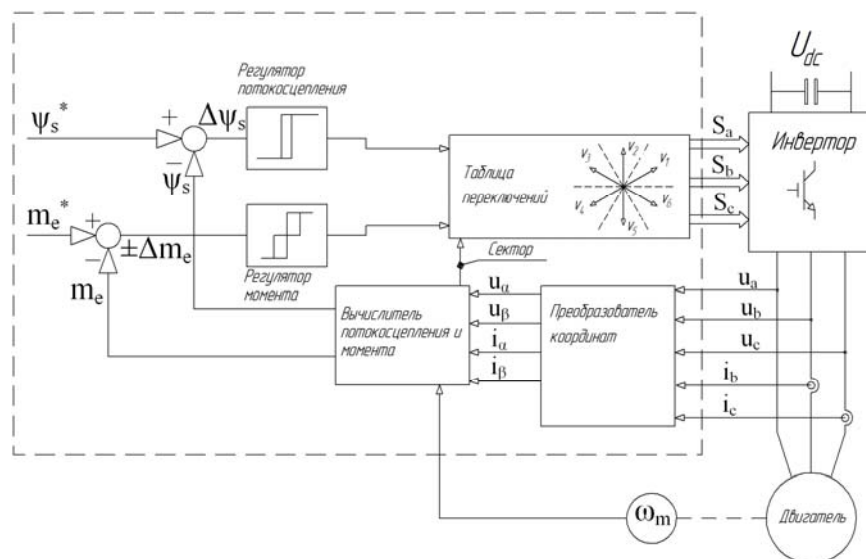
Системы с прямым управлением момента (Direct Torque Control - DTC) асинхронного двигателя обладают рядом преимуществ, например, они малочувствительны к изменению параметров асинхронного двигателя, обеспечивая при этом высокое быстродействие и астатическое регулирование момента на низких частотах вращения, включая нулевую скорость. Однако, системам присущ существенный недостаток - большие флуктуации момента. Несмотря на простоту классической системы с DTC и гистерезисными регуляторами потокосцепления и момента, получить аналитические выражения для этой величины достаточно сложно, что связано с нелинейностью системы, ее нестационарностью, влиянием случайного момента фиксации измеряемых координат [1-3].

В основу работы системы DTC легло уравнение электромагнитного момента асинхронного двигателя:

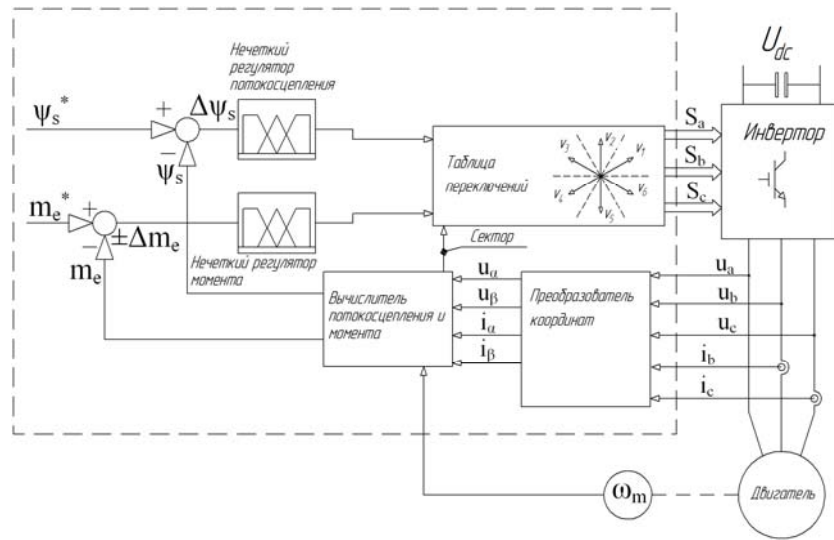
$$m_e = \frac{3}{2} z_p \frac{k_1 k_2}{\sigma L_m} |\psi_S \times \psi_R| = \frac{3}{2} z_p \frac{k_1 k_2}{\sigma L_m} \psi_{Sm} \cdot \psi_{Rm} \cdot \sin \vartheta, \quad (1)$$

где $k_1 = \frac{L_m}{L_s}$ - коэффициент электромагнитной связи статора; $k_2 = \frac{L_m}{L_r}$ - коэффициент электромагнитной связи ротора; z_p - число пар полюсов; $\sigma = 1 - k_1 k_2$ - коэффициент рассеяния; L_m - индуктивность обмотки статора от основного магнитного потока; ψ_s, ψ_r - потокоцепления статора и ротора; $\psi_{sm} = |\psi_s|$; $\psi_{rm} = |\psi_r|$; ϑ - пространственный угол между векторами потокоцеплений статора и ротора [4-6].

Функциональная схема классической системы DTC с гистерезисными регуляторами потокоцепления и момента представлена на рис. 1, а.



а)

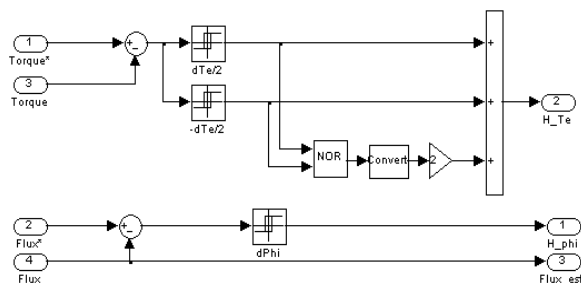


б)

Рис. 1. - Функциональная схема прямого управления моментом: а) с гистерезисными регуляторами потокосцепления и момента; б) с нечеткими регуляторами потокосцепления и момента

Применение в системах с DTC нечеткой логики становится не только оправданным, но и вполне актуальным по следующим причинам: наличие постоянной ошибки из-за неточности измерения наблюдаемых параметров и, как следствие, ошибки вычисления наблюдаемых параметров; а также накопление ошибки в процессе работы, что влечет за собой необходимость выполнения корректирующих операций.

На рис. 1, б представлена функциональная схема систем DTC, в которой гистерезисные регуляторы потокосцепления статора и электромагнитного момента двигателя (рис. 1, а) заменены на нечеткие регуляторы. На рис. 2 представлены подсистемы регуляторов момента и потокосцепления анализируемых систем.



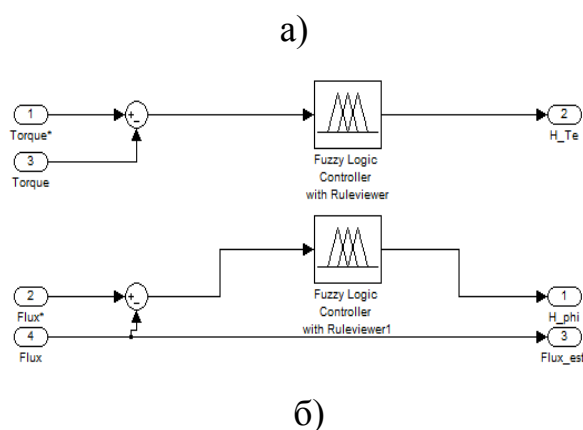


Рис. 2. - Модель подсистемы регуляторов потокосцепления и момента:
 а) с гистерезисными регуляторами; б) с нечеткими регуляторами

Этапы нечеткого вывода могут быть реализованы неоднозначным образом, поскольку включают в себя отдельные параметры, которые могут быть фиксированы или специализированы. При синтезе системы с DTC и нечеткими регуляторами был применен алгоритм Такаги-Сугено.

На этапе фаззификации в качестве терм-множеств лингвистической переменной «ErrFlux» (ошибка по потокосцеплению) используются: положительная ошибка – P, нулевая ошибка - Z, отрицательная - N (рис. 3, а). Функции принадлежности входной лингвистической переменной “ErrMoment” (ошибка по моменту) представлены пятью термами: большая отрицательная-NL, маленькая отрицательная-NS, нулевая-Z, маленькая положительная-PS, большая положительная-PL (рис. 3, б).

Для задания значений функций принадлежности нечетких регуляторов были использованы треугольные и трапецеидальные функции. Треугольная функция принадлежности в общем случае задана аналитически следующим выражением:

$$f_{\Delta}(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{x-b}, b \leq x \leq c \\ 0, c \leq x \end{cases} \quad (2)$$

где a , b и c – некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением $a \leq b \leq c$.

Трапецидальная функция принадлежности в общем виде может быть задана следующим выражением:

$$f_T(x, a, b, c, d) = \left\{ \begin{array}{l} 0, x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b \\ 1, b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, c \leq x \leq d \\ 0, d \leq x \end{array} \right\} \quad (3)$$

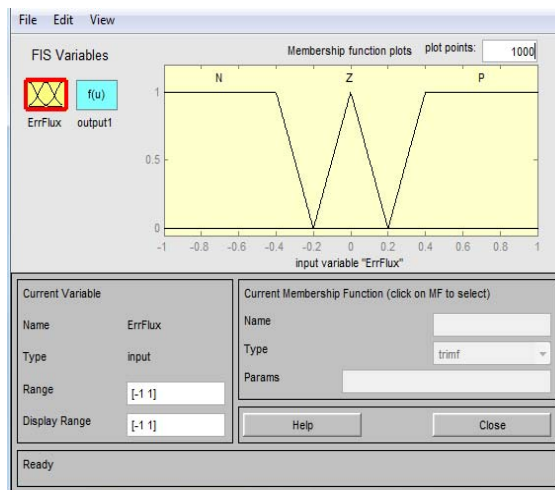
где a , b , c и d – некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением $a \leq b \leq c \leq d$ [7-8].

Выходная лингвистическая переменные фаззи-регулятора по потокосцеплению описываются тремя термами: P=1, Z=2, N=3 (см. рис. 3, в). Выходная лингвистическая переменные фаззи-регулятора по моменту описываются пятью термами: PL=1, PS=2, Z=3, NS=4, NL=5 (см. рис. 3, г).

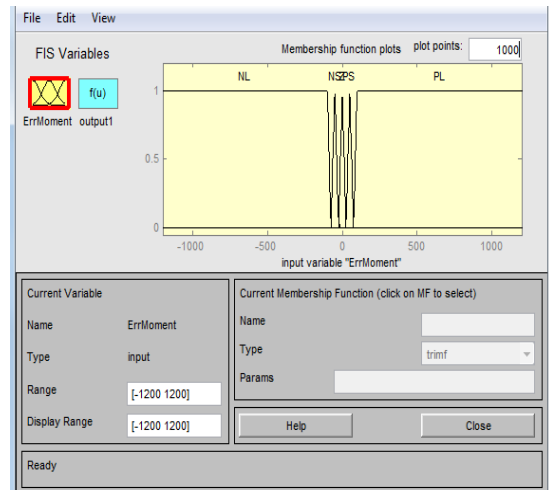
При синтезе базы правил нечеткого вывода, используются только правила нечетких продукций, записанные в виде:

$$\text{Если 'ErrFlux есть N' ТО 'OUTPUT}=\varepsilon_1 \cdot \text{N}', \quad (4)$$

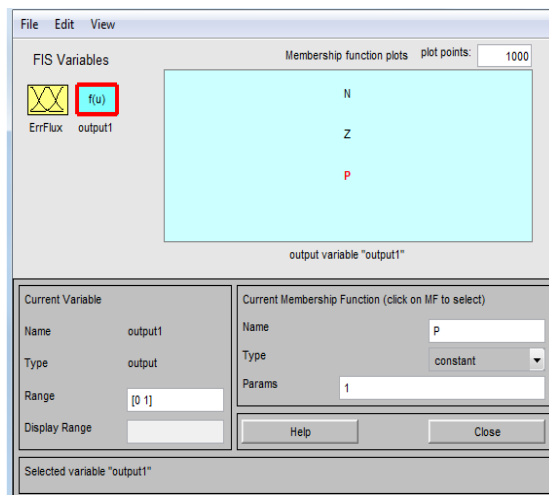
где N- входная лингвистическая переменная; ε_1 - некоторый весовой коэффициент.



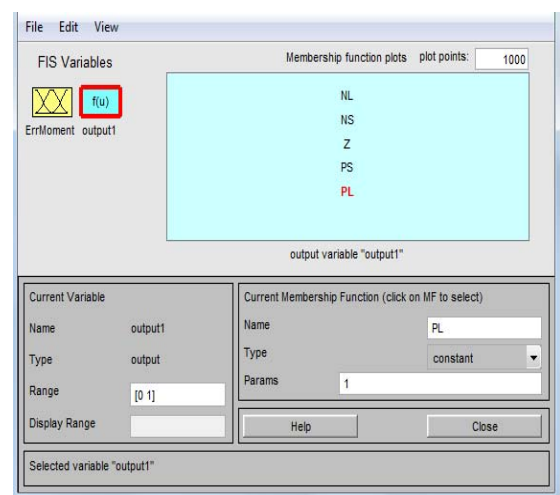
а)



б)



в)



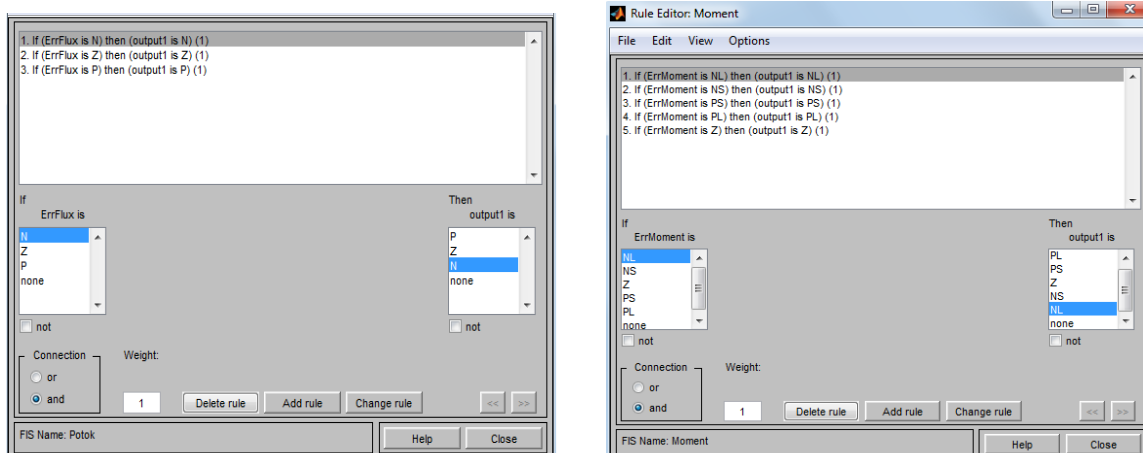
г)

Рис. 3. - Функции принадлежности входной лингвистической переменной и выходные переменные регулятора: а) «ErrFlux» (ошибка по потокосцеплению); б) “ErrMoment” (ошибка по моменту); в) выходные переменные потокосцепления; г) выходные переменные момента

Сформированная база правил регулятора потокосцепления представлена на рис. 4, а. База правил регулятора момента представлена на рис. 4, б.

При агрегировании подусловий в нечетких правилах продукций применялась операция \min -конъюнкции. Те правила, степень истинности

которых отлична от нуля, считаются активными и используются для дальнейших расчетов.



а)

б)

Рис. 4. - База правил нечеткого регулятора:

а) потокосцепления; б) момента

При активизации подзаключений в правилах нечетких продукций сначала находятся значения степеней истинности всех правил нечетких продукций, затем осуществляется расчет обычных (не нечетких) значений выходных переменных каждого правила. В правиле (4) вместо N подставляется значение входной переменной до этапа фаззификации. Тем самым определяются множество значений степеней истинности $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ и множество значений выходных переменных $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, где n – общее количество правил в базе правил.

Аккумуляция заключений нечетких правил продукций отсутствует, поскольку расчеты осуществляются с действительными числами.

При дефаззификации выходных переменных использовался модифицированный вариант в форме метода центра тяжести для одноточечных множеств:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \quad (5)$$

где y - результат дефаззификации, n – общее количество активных правил нечетких продукций [9-10].

Для исключения неоднозначности влияния выбранного базового вектора на потокосцепление статора и момент асинхронного двигателя плоскость базовых векторов разделена на секторы ошибок. В системе с DTC и гистерезисными регуляторами все пространство состояний инвертора разделяется на 6 секторов, каждый протяженностью 60° (рис. 5, а), а в системе с нечеткими регуляторами - на 12 секторов, каждый протяженностью 30° (рис.5, б).

Выходные значения нечетких регуляторов ошибок по моменту, потокосцеплению и текущее значение сектора поступают в таблицу переключений (рис. 5, в).

Эти величины формируют номер требуемого вектора напряжения статора (рис. 5, г

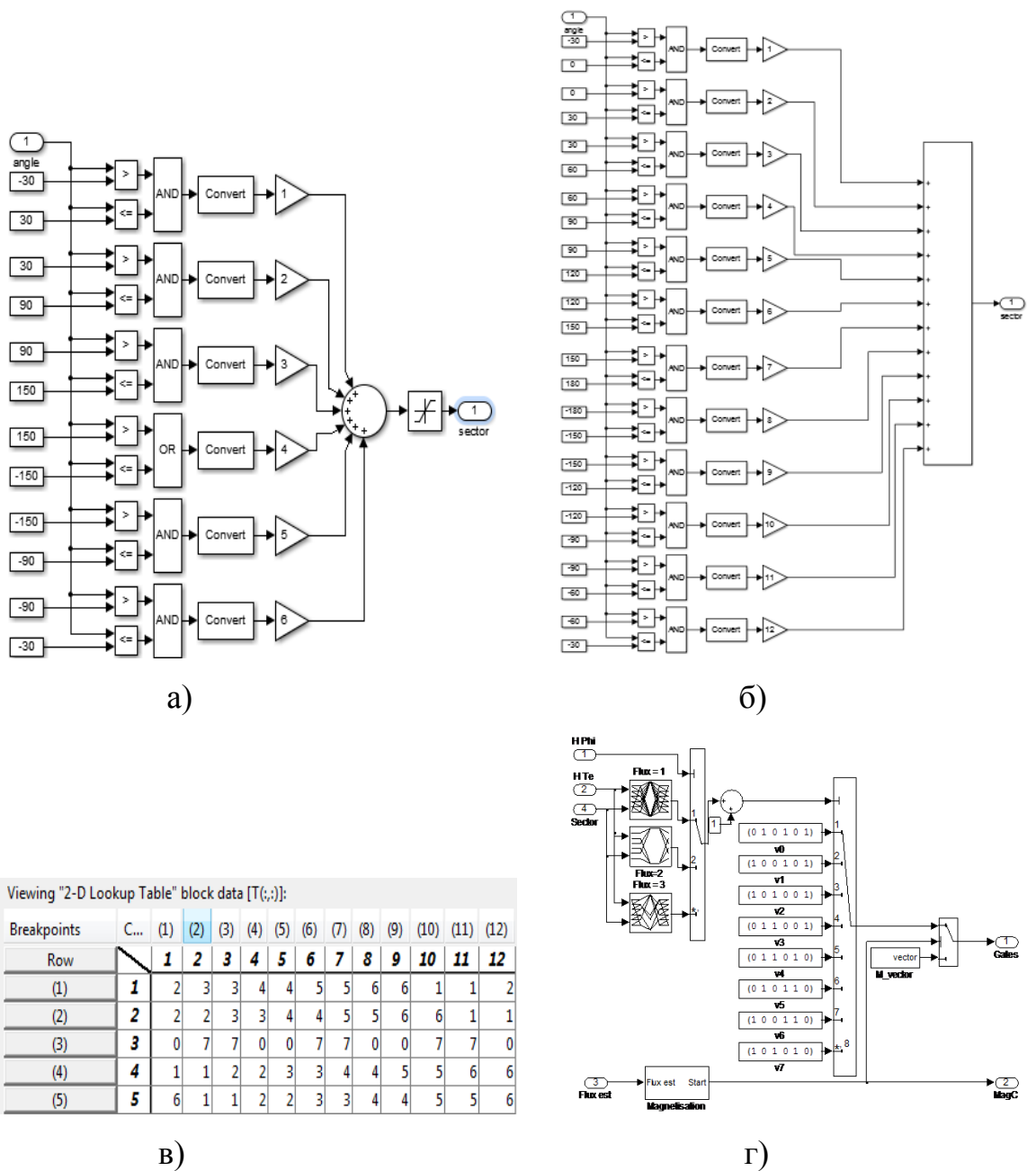
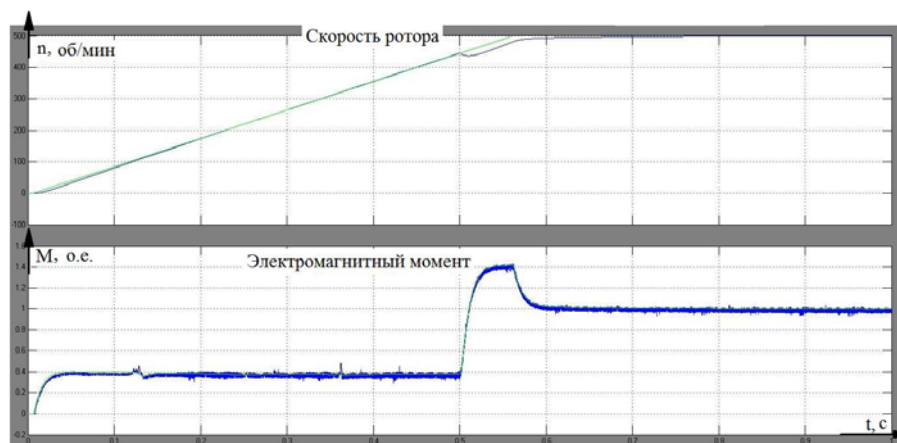


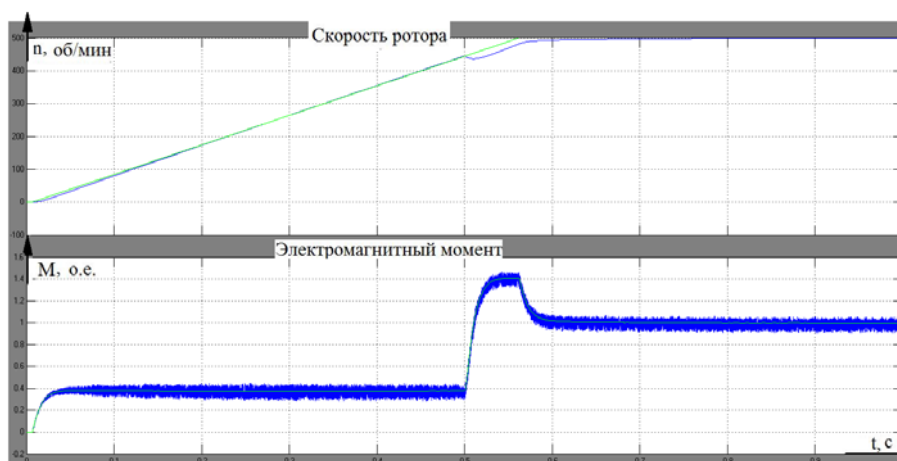
Рис. 5. - Определитель фазового сектора и формирователь комбинации ключей переключения инвертора: а) с гистерезисными регуляторами; б) с нечеткими регуляторами; в) комбинации ключей векторов; г) таблица переключений

Результаты моделирования систем с гистерезисными регуляторами и с нечеткими регуляторами (рис. б) показывают, что в системе с нечетким регулированием флуктуации момента значительно снизились.

При постоянном задании на момент 1000 Н·м размах колебаний момента $dm = M_{\max} - M_{\min}$ равен 100 Н·м, тогда как для системы с нечеткими регуляторами флуктуации момента, при этом же задании, составляет 40 Н·м.



а)



б)

Рис. 6. - Временные зависимости скорости вращения ротора и электромагнитного момента:

а) с нечеткими регуляторами; б) с гистерезисными регуляторами

Имитационное моделирование показало эффективность замены гистерезисных регуляторов на нечеткие регуляторы момента и потокосцепления для снижения пульсаций момента.

Литература

1. Depenbrock, M. Direct self-control of the flux and rotary moment of a rotary-field machine. U.S. Patent 4, 678, 248.
 2. Baader, U., Depenbrock, M. and Gierse, G., 1992. Direct Self Control (DSC) of Inverter-Fed-Induction Machine - A Basis for Speed Control Without Speed Measurement. IEEE Trans. of Industry Applications, 3(28): 581-588.
 3. Takahashi, I. and Noguchi, T. 1986. A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction machine. IEEE Trans. on Industrial Application, 5(Vol. IA-22): 820-827.
 4. Blaschke, F., 1971. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die transvector - Regelung von Drehfeldmaschinen. Siemens Z, 45: 757.
 5. Blaschke, F., 1972. Field-Oriented Closed-Loop Control of an Induction Machine with the New Transvektor Control System, Floler & Ripperger. Siemens Review, 6: 248-251.
 6. В.М. Перельмутер «Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока». Харьков: Основа, 2004. 210 с.
 7. Кралин А.А., Алтунин Б.Ю. Моделирование трансформаторов преобразовательных агрегатов в Simulink // «Инженерный вестник Дона», 2014, №2. Url:www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2362
 8. Ярошенко И.В. Математическая модель и метод классификации технического состояния высоковольтных мехатронных модулей. // «Инженерный вестник Дона», 2014, №2
Url:www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2330
 9. Buja, G. and Kaźmierkowski M.P., 2003. Direct torque control methods for voltage source inverter-fed induction motors – a review. Prace instytutu elektrotechniki, Zeszyt 218, pp: 43-52.
 10. Monmasson, E., Naassani, A., Louis, J., 2001. Extension of the DTC concept. IEEE Trans. of Industry Electronics, 3:715-717.
-

11. Lascu, C., Boldea, I., Blaabjerg F., 2000 A modified direct torque control for induction motor sensorless drive. IEEE Trans. of Industry Applications, 1: 122-130.

References

1. Depenbrock, M. Direct self-control of the flux and rotary moment of a rotary-field machine. U.S. Patent 4, 678, 248.
2. Baader, U., Depenbrock, M. and Gierse, G., 1992. Direct Self Control (DSC) of Inverter-Fed-Induction Machine - A Basis for Speed Control Without Speed Measurement. IEEE Trans. of Industry Applications, 3(28): 581-588.
3. Takahashi, I. and Noguchi, T. 1986. A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction machine. IEEE Trans. on Industrial Application, 5(Vol. IA-22): 820-827.
4. Blaschke, F., 1971. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die transvector - Regelung von Drehfeldmaschinen. Siemens Z, 45: 757.
5. Blaschke, F., 1972. Field-Oriented Closed-Loop Control of an Induction Machine with the New Transvektor Control System, Floler & Ripperger. Siemens Review, 6: 248-251.
6. V.M. Perel'muter «Pryamoe upravlenie momentom i tokom dvigateley peremennogo toka» [Direct torque control and current AC motors]. Khar'kov: Osnova, 2004. 210 p.
7. Kralin A.A., Altunin B.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2. Url:www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2362
8. Yaroshenko I.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2. Url:www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2330
9. Buja, G. and Kaźmierkowski M.P., 2003. Direct torque control methods for voltage source inverter-fed induction motors – a review. Prace instytutu elektrotechniki, Zeszyt 218, pp: 43-52.



10. Monmasson, E., Naassani, A., Louis, J., 2001. Extension of the DTC concept. IEEE Trans. of Industry Electronics, 3:715-717.
11. Lascu, C., Boldea, I., Blaabjerg F., 2000 A modified direct torque control for induction motor sensorless drive. IEEE Trans. of Industry Applications, 1: 122-130.