

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЙ СТАТОРА И РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Е. В. Душинова, асп., Е. М. Потапенко, д.т.н., проф.
Запорожский национальный технический университет
ул. Жуковского, 64, 69063, г. Запорожье, Украина
E-mail: zntu_dushinova@mail.ru*

Предложен объединённый алгоритм оценки сопротивления статора, работоспособный в процессе намагничивания двигателя и во всех его режимах работы. Синтезирован новый алгоритм оценки сопротивления ротора, отличающийся простотой.

Ключевые слова: сопротивление, намагничивание, асинхронный двигатель.

Введение. Векторное управление с использованием только клеммных датчиков дает положительные результаты при полностью известных параметрах электропривода. Фактически же все параметры являются неизвестными. Наибольшей неопределенностью среди электромагнитных параметров обладают изменяющиеся вследствие изменения температуры асинхронного двигателя (АД) сопротивление статора (обычно включаются собственно сопротивление статора АД, приведенное сопротивление инвертора преобразователя частоты и сопротивления соединяющих кабелей статорной цепи).

Анализ предыдущих исследований. Для оценки R_s и R_r разработано большое количество методов [1], обладающих теми или иными достоинствами и недостатками. Методы оценки сопротивлений должны обладать способностью работать как при заторможенном двигателе, так и в процессе его штатной работы: в двигательном, генераторном режимах, при реверсе и скоростях, близких к нулевой.

Цель работы. Создать такие методы оценки сопротивлений, которые в наибольшей степени соответствуют предъявленным выше требованиям.

Материал и результаты исследования. Сопротивление статора. **Алгоритм 1.** На рис. 1 представлена блок-схема оценки R_s [1].

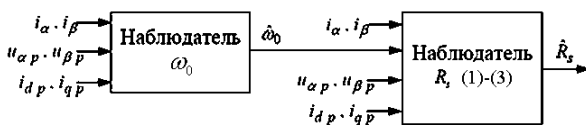


Рисунок 1 – Блок-схема оценки R_s

В этой схеме оценка сопротивления статора осуществляется по зависимости

$$\hat{R}_s = R_{s0} + \hat{R}_{s\delta}, \quad (1)$$

где

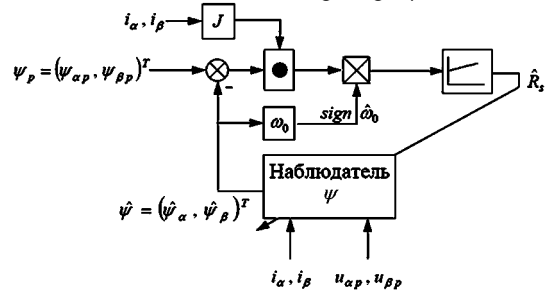
$$R_{s\delta} = z_s + l_s \frac{1}{2} \sigma L_s |i|^2; \quad (2)$$

$$\dot{z}_s = l_s \left[|i|^2 \left(z_s + l_s \frac{1}{2} \sigma L_s |i|^2 \right) - i^T u_p + R_{s0} |i|^2 + \omega_0 \frac{m_0}{n} \right], \quad (3)$$

где $R_{s0}, \hat{R}_{s\delta}$ – номинальное значение сопротивления статора и оценка его отклонения от номинального значения; l_s – коэффициент передачи наблю-

дателя; ω_0 – синхронная скорость ротора; σ – общий коэффициент рассеивания; m_0 – номинальный электромагнитный момент; L_s – индуктивность статора; u, i – векторы напряжения и тока статора; n – количество пар полюсов.

Алгоритм 2. На рис. 2 представлена блок-схема оценки R_s и потокосцепления ротора ψ .



● – знак скалярного произведения

Рисунок 2 – Блок-схема оценки R_s и ψ

В этой схеме оценка сопротивления статора осуществляется по зависимости:

$$R_s = \left(k_p + \frac{k_i}{p} \right) i^T J (\psi_p - \hat{\psi}) \text{sign } \hat{\omega}_0, \quad (4)$$

где k_p, k_i – коэффициенты ПИ-регулятора; p – оператор Лапласа; ψ_p – программное значение вектора потокосцепления ротора; J – кососимметрическая матрица.

Алгоритм 3. Наблюдатель постоянной времени (сопротивления) ротора α .

В этом пункте рассматривается двухфазная модель асинхронного двигателя. Вектор потокосцепления ротора описывается «токовым» уравнением:

$$\dot{\psi} = (\omega_* J - \alpha E) \psi + L_m \alpha i, \quad (5)$$

где $\omega_* = n\omega$; ω – угловая скорость ротора; L_m – взаимная индуктивность ротора и статора.

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \alpha = T_r^{-1} = \frac{R_r}{L_r}, \quad (6)$$

где L_r – индуктивность ротора; T_r – постоянная времени ротора. В отличие от известных методов работы [1], ниже не используется предварительное пропускание сигналов через инерционное звено. После умножения уравнения (5) слева на ψ^T будем иметь уравнение:

$$\frac{d|\psi|^2}{dt} = -\alpha\psi^T(\psi - L_m i) = -\alpha(|\psi|^2 - L_m\psi^T i). \quad (7)$$

Синтезируем наблюдатель, оценивающий α .
На основании (7) обозначим:

$$y = \frac{d|\psi|^2}{dt} \quad (8)$$

а измерение определим выражением:

$$y = -\alpha(|\psi|^2 - L_m\psi^T i). \quad (9)$$

Поскольку можно полагать $\alpha = \text{const}$, то:

$$\dot{\alpha} = 0. \quad (10)$$

Для системы уравнений (9), (10) сформируем наблюдатель в виде:

$$\dot{\hat{\alpha}} = l_\alpha(-\hat{\alpha}(|\psi|^2 - L_m\psi^T i) - y), \quad (11)$$

где l_α – коэффициент передачи наблюдателя. Подстановка y из уравнения (9) в уравнение (11) дает выражение:

$$\dot{\hat{\alpha}} = -l_\alpha(|\psi|^2 - L_m\psi^T i)(\hat{\alpha} - \alpha) \quad (12)$$

Ошибка оценки параметра α определяется выражением $\tilde{\alpha} = \hat{\alpha} - \alpha$. Для получения уравнения этой ошибки вычтем из уравнения (12) уравнение (10), в результате чего получим:

$$\dot{\tilde{\alpha}} = -l_\alpha(|\psi|^2 - L_m\psi^T i)\tilde{\alpha}. \quad (13)$$

Для сходимости процесса оценки достаточно выполнения условия:

$$l_\alpha(|\psi|^2 - L_m\psi^T i) > 0. \quad (14)$$

Поскольку выражение в скобках может быть знакопеременным, то для обеспечения гарантированного выполнения условия (14) примем:

$$l_\alpha = \bar{l}_\alpha \text{sign}(|\psi|^2 - L_m\psi^T i), \quad (15)$$

$$\bar{l}_\alpha = \text{const} > 0.$$

Рабочая форма наблюдателя получается подстановкой выражения (8) в уравнение (11). В результате этого имеем:

$$\dot{\hat{\alpha}} = -l_\alpha \left(\hat{\alpha}(|\psi|^2 - L_m\psi^T i) + \frac{d|\psi|^2}{dt} \right). \quad (16)$$

Введем обозначение

$$z = \hat{\alpha} + l_\alpha \frac{|\psi|^2}{2}, \quad (17)$$

откуда

$$\hat{\alpha} = z - l_\alpha \frac{|\psi|^2}{2}, \quad (18)$$

с учетом которого уравнение (16) приобретает вид:

$$\dot{z} = -l_\alpha \left(z - l_\alpha \frac{|\psi|^2}{2} \right) (|\psi|^2 - L_m\psi^T i). \quad (19)$$

Система уравнений (18), (19) представляет собой наблюдатель (фактически идентификатор) для оценки параметра α . Эту систему можно записать как в синхронном, так и в статорном базисе.

В синхронном базисе эта система имеет вид:

$$\dot{z} = -l_\alpha \left(z - l_\alpha \frac{|\psi_d|^2}{2} \right) (|\psi_d|^2 - L_m\psi_d^T i_d); \quad (20)$$

$$\alpha = \left(z - l_\alpha \frac{|\psi|^2}{2} \right). \quad (21)$$

Для получения уравнений наблюдателя, записанного в статорном базисе, в уравнениях (18), (19) следует положить:

$$|\psi|^2 = \psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2, \quad \psi^T i = \psi_\alpha i_\alpha + \psi_\beta i_\beta. \quad (22)$$

Для проверки работоспособности синтезированных алгоритмов было проведено цифровое моделирование динамики управляемого АД. При моделировании рассматривался АД типа А2–81–4. В алгоритмы были введены ограничения тока и напряжения, а также осуществлено моделирование эффектов ШИМ и бросков напряжения в сети питания. Для обеспечения возможности оценки сопротивления ротора в намагничивающую составляющую тока статора инжектировалась синусоидальная составляющая с амплитудой 3А и угловой частотой 5 с⁻¹.

Для оценки сопротивления статора использовались описанные выше методы. Алгоритм 1 работоспособен во всех режимах, в том числе и при намагничивании двигателя, за исключением генераторного режима. Алгоритм 2 не работает при намагничивании, оставаясь работоспособным во всех остальных режимах. Поэтому предложено во время намагничивания двигателя идентифицировать сопротивление статора с помощью алгоритма 1, а дальнейшую оценку осуществлять с помощью алгоритма 2.

Для иллюстрации работоспособности объединенного алгоритма оценки R_s и алгоритма оценки $\alpha(R_s)$ с измерением только токов статора восстанавливался весь вектор состояния АД. Перед включением АД в течение одной секунды осуществлялось намагничивание, одновременно с которым проводилась идентификация сопротивлений статора и ротора. Одновременно с включением АД происходило переключение алгоритмов оценки R_s с первого на второй. На рис. 3 и 4 сопоставлены результаты оценки R_s и α с их истинными значениями в процессе намагничивания, разгона двигателя до 10 рад·с⁻¹, работы под нагрузками в двигательном и генераторном режимах АД, реверса с последующей стабилизацией нулевой скорости ротора. На рис. 3 и 4 представлены процессы оценки сопротивления статора в предположении, что первоначальная информация об R_s в 2 раза меньше (рис. 3) и в 2 раза больше (рис. 4) истинного значения R_s .

Следует обратить внимание на то, что намагничивание двигателя и точная оценка сопротивлений ротора и статора осуществлялись в течение одной секунды. Включение, выключение двигательных и генераторных нагрузок, реверс и стабилизация нулевой скорости несущественно ухудшают точность первоначально полученной оценки сопротивлений. Некоторое увеличение погрешности (до 18%) наблюдается в генераторном режиме.

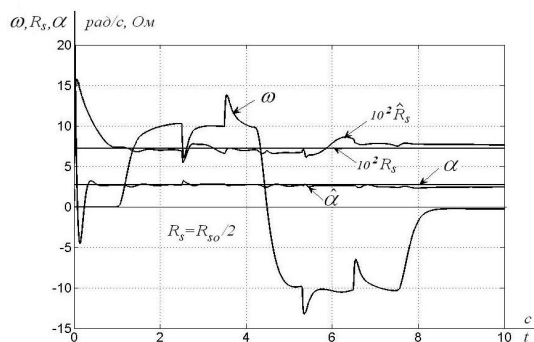


Рисунок 3 – Результати моделювання при $R_s=R_{s0}/2$

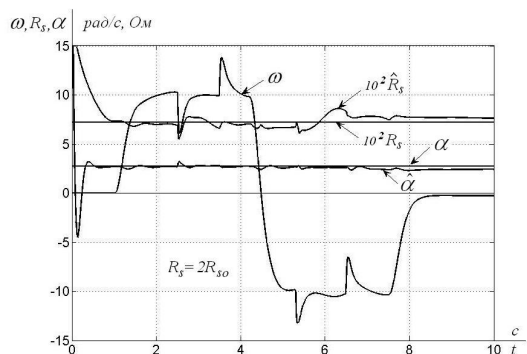


Рисунок 4 – Результати моделювання при $R_s=2R_{s0}$

Висновки. 1. Исследованы два алгоритма оценки сопротивления статора. С учетом возможностей этих алгоритмов предложен объединённый алгоритм.

2. Синтезирован новый алгоритм оценки сопротивления ротора, отличающийся простотой. Идентификация T_r осуществляется при инъекции в намагничивающую составляющую тока статора гармонической составляющей с малой амплитудой и частотой. Идентификация T_r может проводиться и без инъекции, но при реализации оптимального алгоритма формирования программных токов [1].

3. Намагничивание двигателя и точная оценка сопротивлений ротора и статора осуществляются в течение одной секунды, когда двигатель заторможен (предстартовая идентификация). В штатной работе значения сопротивлений уточняются в реальном времени.

4. Разгон двигателя, включение, выключение двигательных и генераторных нагрузок, реверс и стабилизация нулевой скорости несущественно ухудшают точность первоначально полученной оценки сопротивлений.

Предложенные методы обеспечивают робастность системы по отношению к перечисленным факторам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом. – Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 352 с.

Стаття надійшла 24.06.2011р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.

ОЦІНКА ОПОРУ СТАТОРА ТА РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Є. В. Душинова, асп., Є. М. Потапенко, д.т.н., проф.
Запорізький національний технічний університет
вул. Жуковського, 64, 69063, м. Запоріжжя, Україна
E-mail: zntu_dushinova@mail.ru

Запропоновано об'єднаний алгоритм оцінки опору статора, працездатний у процесі намагнічування двигуна та в усіх його режимах роботи. Синтезовано новий алгоритм оцінки опору ротора, що відрізняється простотою.

Ключові слова: опір, намагнічування, асинхронний двигун.

ESTIMATION OF STATOR AND ROTOR RESISTANCES OF INDUCTION MOTOR

E. Dushinova, post-grad., E. Potapenko, D.Sc. (Eng.), Prof.
Zaporizhzhia National Technical University
vul. Zhukovskoho, 64, 69063, Zaporizhzhia, Ukraine
E-mail: zntu_dushinova@mail.ru

The unified algorithm for estimating of stator resistance, hard-working engine in the process of magnetization and in all its modes was proposed. A new algorithm for estimating the rotor resistance, which is simple, was synthesized.

Key words: resistance, magnetization, induction motor.