

УДК 004.94:621.3
DOI 10.17513/snt.40083

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Попов С.А., Фальков Г.А.

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова»,
Белгород, e-mail: popov_seal@edu.bstu.ru

Целью данной работы является разработка имитационной модели наблюдателя состояний для систем векторного управления асинхронными электроприводами, которая по измеренным току и напряжению позволяет узнать потокосцепление ротора, скорость вращения ротора и электромагнитный момент, позволяет изучать и разрабатывать замкнутые бездатчиковые системы скалярного и векторного управления. Рассмотрены особенности построения имитационных моделей наблюдателя состояний для систем векторного управления асинхронными электроприводами. Данная задача обусловлена тем, что в процессе изучения, построения и моделирования векторных систем управления появляется необходимость отслеживать некоторые параметры электродвигателя косвенно, без применения соответствующих датчиков. В этом помогают различные наблюдатели состояний, которые по измеренным значениям косвенных величин позволяют получить необходимые значения. Чаще всего применяются наблюдатели состояний на основе упрощенных математических уравнений асинхронного электродвигателя, однако в большинстве из них скорость ротора наблюдателем не оценивается, либо для оценки применяется громоздкий математический аппарат. Поэтому был рассмотрен вариант построения наблюдателя состояний асинхронного электродвигателя, в основе которого лежат базовые уравнения асинхронного электродвигателя, а также ряд вспомогательных преобразований, позволяющих перейти от неподвижной системы координат к вращающейся. В результате работы была создана математическая и имитационная модель в программном комплексе Matlab-Simulink наблюдателя состояния асинхронного электродвигателя, которая по измеренным току и напряжению позволяет узнать потокосцепление ротора, скорость вращения ротора и электромагнитный момент, позволяет изучать и разрабатывать замкнутые бездатчиковые системы скалярного и векторного управления.

Ключевые слова: регулируемый электропривод, математическое моделирование, векторное управление, имитационное моделирование, скалярное управление, бездатчиковые системы управления, наблюдатель состояний

FEATURES OF CONSTRUCTING A SIMULATION MODEL OF A STATE OBSERVER FOR VECTOR CONTROL SYSTEMS OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

Popov S.A., Falkov G.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Belgorod,
e-mail: popov_seal@edu.bstu.ru

The purpose of this work is to develop a simulation model of a state observer for vector control systems of asynchronous electric drives, which, based on the measured current and voltage, allows you to find out the rotor flow coupling, rotor rotation speed and electromagnetic torque, allowing you to study and develop closed sensorless scalar and vector control systems. The features of constructing simulation models of a state observer for vector control systems of asynchronous electric drives are considered. This task is due to the fact that in the process of studying, constructing and modeling vector control systems, it becomes necessary to monitor some parameters of the electric motor indirectly, without the use of appropriate sensors. Various state observers help in this, which, based on the measured values of indirect quantities, allow us to obtain the necessary values. Most often, state observers are used based on simplified mathematical equations of an asynchronous electric motor, but in most of them the rotor speed is not estimated by the observer, or a cumbersome mathematical apparatus is used for evaluation. Therefore, a variant of constructing an observer of the states of an asynchronous electric motor was considered, which is based on the basic equations of an asynchronous electric motor, as well as a number of auxiliary transformations that allow switching from a stationary coordinate system to a rotating one. As a result of the work, a mathematical and simulation model was created in the Matlab-Simulink software package for an observer of the state of an asynchronous electric motor, which, based on the measured current and voltage, allows you to find out the rotor flow coupling, rotor rotation speed and electromagnetic torque, allowing you to study and develop closed sensorless scalar and vector control systems.

Keywords: adjustable electric drive, mathematical modeling, simulation modeling, vector control, scalar control, sensorless control systems, state observer

Введение

На большинстве промышленных предприятий наблюдается значительный рост доли частотно-регулируемого электропри-

вода, внедрение которого позволяет существенно улучшить качество производственных операций и увеличить производительность. При этом большая часть управляемого

электропривода на данный момент строится на базе асинхронных электроприводов, которые обладают высокой степенью надежности, относительно невысокой ценой, и при этом их техническое обслуживание достаточно простое [1].

В зависимости от объекта управления и требуемых задач используют различные системы управления электроприводом, которые можно выделить в две группы: скалярное управление и векторное управление.

Скалярное управление основано на математическом аппарате, позволяющем управлять выходным напряжением и его частотой, поддерживая их в заданном отношении. Скалярное управление чаще всего применяют для электроприводов, работающих в условиях, где переменная нагрузка минимальна, отсутствуют жесткие требования к диапазону регулирования и не требуется высокая динамика (насосы, вентиляторы, компрессоры, при этом допускается возможность их группового подключения). Скалярные системы управления могут быть реализованы как разомкнутыми, без каких-либо дополнительных датчиков, так и замкнутыми, по скорости или по какой-либо другой выходной величине, например по величине выходного давления в магистрали, в системах стабилизации напора [2].

Векторное управление, в отличие от скалярного, позволяет контролировать не только величину и частоту выходного напряжения частотного преобразователя, но и его фазу, то есть контролируются величина и угол пространственного вектора напряжения. Векторное управление позволяет производить регулирование скорости с высокой точностью даже в условиях постоянно изменяющейся нагрузки и высокими значениями пускового момента (грузоподъемные механизмы, станки для металлообработки, лифты, экструдеры, дробилки, конвейеры). В связи с тем, что в основе алгоритма векторного управления лежит принцип преобразования координат, а именно переход от трехфазной неподвижной системы координат к двухфазной подвижной, для осуществления этого преобразования необходима информация о положении ротора. Получить эту информацию можно напрямую от двигателя, при помощи установки датчика положения, либо организацией бездатчиковой системы управления, путем введения в систему управления специализированного блока, наблюдателя [3].

Цель исследования – разработка имитационной модели наблюдателя состояний для систем векторного управления

асинхронными электроприводами, которая по измеренным току и напряжению позволяет узнать потокосцепление ротора, скорость вращения ротора и электромагнитный момент, позволяет изучать и разрабатывать замкнутые бездатчиковые системы скалярного и векторного управления

Описание блока наблюдателя

Блок наблюдателя позволяет в режиме реального времени получить информацию о положении ротора, скорости вращения двигателя и потокосцеплении, используя для расчета параметры двигателя и данные о фазных напряжениях и токах двигателя. В некоторых случаях блок наблюдателя применяют и для построения бездатчиковых замкнутых систем скалярного регулирования, ведь исключения физического датчика скорости из системы управления позволяют уменьшить итоговую стоимость электропривода, а также повысить его эксплуатационные показатели и упростить процесс наладки [4].

В общем случае наблюдатель состояния представляет собой модель, подключаемую параллельно к объекту управления и получающую информацию об изменениях регулируемой величины посредством отслеживания регулирующих величин. Можно выделить три группы наблюдателей [5]:

- 1) измеряющие (непрямые измерители положения и измерители ошибки ориентирования);
- 2) на основе математических моделей (неадаптивные и адаптивные);
- 3) наблюдатели на основе фильтра Калмана.

На практике чаще всего встречается именно вторая категория наблюдателей, построенная на базе упрощенных математических моделей двигателя. Главным преимуществом данной категории наблюдателей является относительная простота используемого математического аппарата, при достаточно высокой точности.

В первую очередь ко входным величинам тока и напряжения применяется преобразование Кларк, позволяющее перейти от трехфазной неподвижной системы координат к двухфазной неподвижной системе координат.

1. Преобразование Кларк для фазных токов имеет вид

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}. \quad (1)$$

2. Преобразование Кларк для фазных напряжений имеет вид

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

3. Преобразование Кларк для линейных напряжений можно вывести из преобразования Кларк для фазных напряжений:

$$U_\alpha = \frac{2}{3}U_a - \frac{1}{3}U_b - \frac{1}{3}U_c, \quad (3)$$

$$U_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}(U_b - U_c). \quad (4)$$

Так как линейные напряжения описываются выражениями

$$U_{ab} = U_a - U_b, \quad (5)$$

$$U_{bc} = U_b - U_c. \quad (6)$$

Преобразование Кларк для линейных напряжений имеет вид

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{matrix} U_\alpha = \frac{2}{3}U_{ab} + \frac{1}{3}U_{bc} \\ U_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}U_{bc} \end{matrix}. \quad (7)$$

Из уравнений электрического равновесия для обмотки статора двигателя в неподвижных координатах (α и β) можно выразить потокосцепление статора [6]:

$$\frac{d\overline{\Psi}_s}{dt} = \overline{U}_s - R_s \overline{I}_s, \quad (8)$$

$$\frac{d\Psi_{sa}}{dt} = U_{sa} - R_s I_{sa} \rightarrow \Psi_{sa} = \int (U_{sa} - R_s I_{sa}) dt, \quad (9)$$

$$\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - R_s I_{s\beta} \rightarrow \Psi_{s\beta} = \int (U_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt. \quad (10)$$

Связь потокосцеплений статора и ротора с токами асинхронного двигателя, независимо от выбранной системы координат, можно представить в виде следующих выражений [7, с. 21]:

$$\overline{\Psi}_s = L_S \overline{I}_s + L_m \overline{I}_R, \quad (11)$$

$$\overline{\Psi}_R = L_R \overline{I}_R + L_m \overline{I}_s, \quad (12)$$

$$\overline{\Psi}_m = L_m \overline{I}_s + L_m \overline{I}_R = L_m \overline{I}_m, \quad (13)$$

$$L_S = L_m + L_{\sigma S}, \quad (14)$$

$$L_R = L_m + L_{\sigma R}, \quad (15)$$

где $L_{\sigma S}$ – индуктивность рассеяния статора;

$L_{\sigma R}$ – индуктивность рассеяния ротора;

L_m – индуктивность основного потока (взаимная индуктивность).

Из вышеперечисленных уравнений выражаем уравнение потокосцепления ротора в удобной форме:

$$\overline{\Psi}_R = L_R \left(\frac{\overline{\Psi}_s}{L_m} - \frac{L_S \overline{I}_s}{L_m} \right) + L_m \overline{I}_s = \frac{L_R}{L_m} \left(\overline{\Psi}_s - \left(L_S - \frac{L_m^2}{L_R} \right) \overline{I}_s \right), \quad (16)$$

$$\Psi_{Ra} = \frac{L_R}{L_m} \left(\Psi_{sa} - \left(L_S - \frac{L_m^2}{L_R} \right) I_{S\alpha} \right), \quad (17)$$

$$\Psi_{R\beta} = \frac{L_R}{L_m} \left(\Psi_{s\beta} - \left(L_S - \frac{L_m^2}{L_R} \right) I_{S\beta} \right). \quad (18)$$

Электромагнитный момент, выраженный через потокосцепление статора, описывается следующим выражением [8, с. 53]:

$$M_D = \left(\frac{3}{2} \right) p_{\Pi} (\Psi_{sa} I_{S\beta} - \Psi_{s\beta} I_{S\alpha}). \quad (19)$$

Зная электромагнитный момент, можно рассчитать частоту роторной ЭДС по следующей формуле:

$$\omega_p = \frac{2R_R M_D}{3p_{\Pi} |\Psi_R|^2} = \frac{2R_R M_D}{3p_{\Pi} (\Psi_{Ra}^2 + \Psi_{R\beta}^2)}. \quad (20)$$

Частоту напряжения питания можно вычислить как производную от угла между вращающейся системой координат и неподвижной. Если принять, что ось x вращающейся системы координат сонаправлена вектору потокосцепления ротора, то указанный угол θ_c можно вычислить как арктангенс отношения проекции вектора потокосцепления ротора на неподвижную ось β к проекции вектора потокосцепления ротора на неподвижную ось α :

$$\begin{aligned} \omega_{0эл} &= \frac{d\theta_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\arctg \frac{\Psi_{R\beta}}{\Psi_{Ra}} \right) = \\ &= \frac{1}{1 + (\Psi_{R\beta} / \Psi_{Ra})^2} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Psi_{R\beta}}{\Psi_{Ra}} \right). \quad (21) \end{aligned}$$

Произведя необходимые упрощения, данное выражение примет вид

$$\omega_{0эл} = \frac{\Psi_{Ra} \frac{d\Psi_{R\beta}}{dt} - \Psi_{R\beta} \frac{d\Psi_{Ra}}{dt}}{\Psi_{Ra}^2 + \Psi_{R\beta}^2}. \quad (22)$$

Скорость двигателя определяется следующим выражением:

$$\omega = \frac{(\omega_{0эл} - \omega_p)}{p_{\Pi}}. \quad (23)$$

Обобщенная система уравнений, описывающих асинхронный электродвигатель, позволяющая вычислить все необходимые параметры для создания бездатчиковых замкнутых систем, как скалярного,

так и векторного регулирования, представлена ниже (24).

$$\left\{ \begin{aligned} I_{\alpha} &= \frac{2}{3} I_a - \frac{1}{3} I_b - \frac{1}{3} I_c \\ I_{\beta} &= \frac{\sqrt{3}}{3} (I_b - I_c) \\ U_{\alpha} &= \frac{2}{3} U_a - \frac{1}{3} U_b - \frac{1}{3} U_c \\ U_{\beta} &= \frac{\sqrt{3}}{3} (U_b - U_c) \\ \Psi_{sa} &= \int (U_{sa} - R_s I_{sa}) dt \\ \Psi_{s\beta} &= \int (U_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt \\ \Psi_{Ra} &= \frac{L_R}{L_m} \left(\Psi_{sa} - \left(L_S - \frac{L_m^2}{L_R} \right) I_{S\alpha} \right) \\ \Psi_{R\beta} &= \frac{L_R}{L_m} \left(\Psi_{s\beta} - \left(L_S - \frac{L_m^2}{L_R} \right) I_{S\beta} \right) \\ M_D &= \left(\frac{3}{2} \right) p_{\Pi} (\Psi_{sa} I_{S\beta} - \Psi_{s\beta} I_{S\alpha}) \\ \omega &= \frac{(\omega_{0эл} - \omega_p)}{p_{\Pi}} \\ \omega_{0эл} &= \frac{dt \Psi_{Ra} \frac{d\Psi_{R\beta}}{dt} - \Psi_{R\beta} \frac{d\Psi_{Ra}}{dt}}{\Psi_{Ra}^2 + \Psi_{R\beta}^2} \\ \omega_p &= \frac{2R_R M_D}{3p_{\Pi} (\Psi_{Ra}^2 + \Psi_{R\beta}^2)} \end{aligned} \right. \quad (24)$$

Построение имитационной модели наблюдателя

На основании данной системы уравнений была построена модель наблюдателя в программном комплексе Matlab-Simulink, показанная на рис. 1.

На вход полученной модели поступают данные о значении потребляемого электродвигателем тока (I_{abc}) и линейного напряжения питания (U_{abc}) асинхронного электродвигателя. Ко входным величинам применяется преобразование координат, после чего происходит вычисление промежуточных величин, таких как потокосцепление статора, потокосцепление ротора и электромагнитный момент электродвигателя.

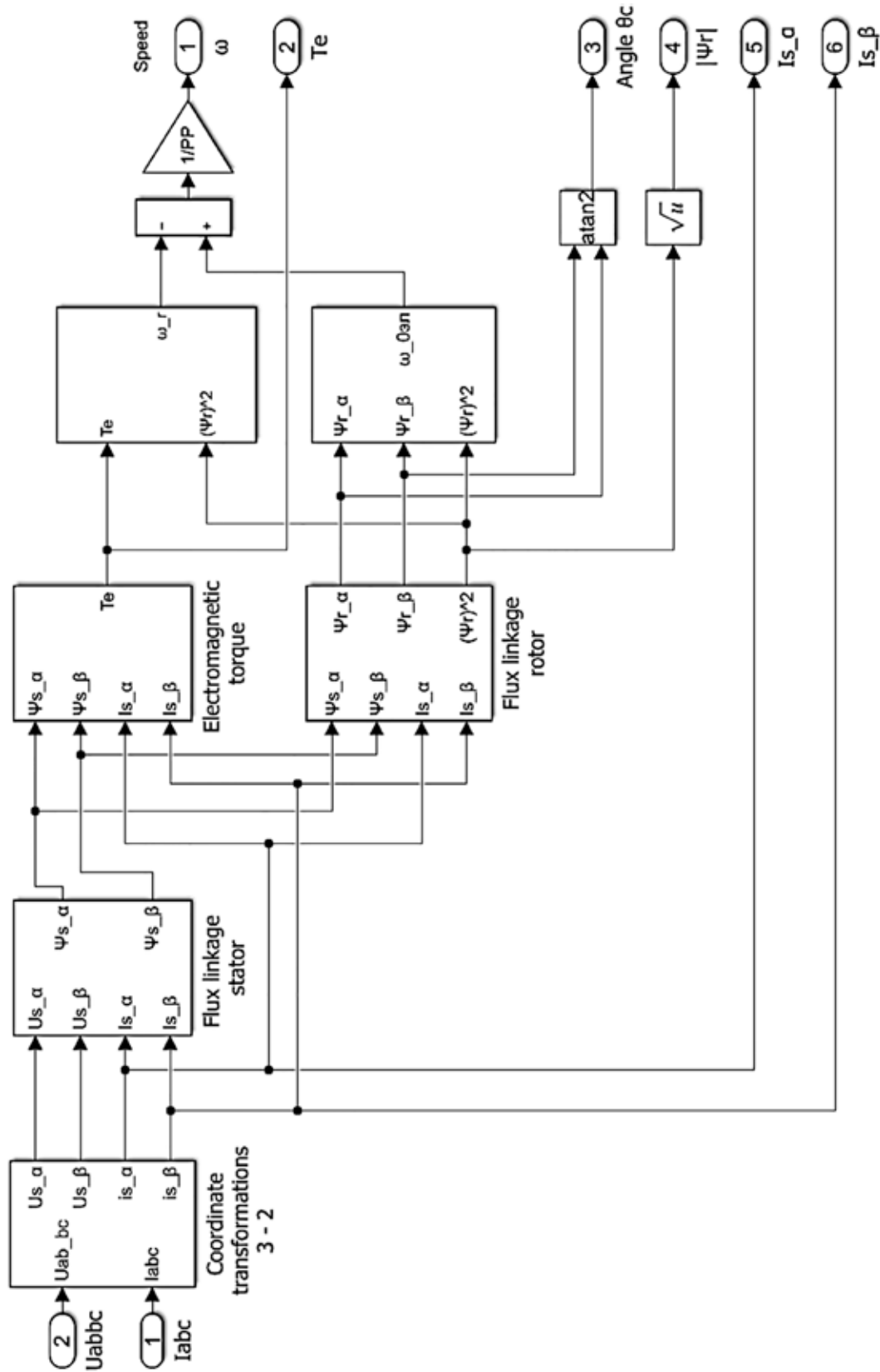


Рис. 1. Модель наблюдателя состояния для систем управления асинхронным электродвигателем

Структуры соответствующих вычислительных блоков показаны на рис. 2–4.

На основании вычисленных промежуточных значений происходит вычисление выходных данных, к которым относятся: скорость вращения электродвигателя, электромагнитный момент электродвигателя, угол поворота подвижной системы координат, значение потокосцепления ротора, а

также ток статора в неподвижной системе координат.

Показанные блоки и вся модель в целом собраны из простых базовых элементов, аналоги которых есть во многих системах структурного и имитационного моделирования, что не создает проблем при сборке структуры данной модели в других программных комплексах.

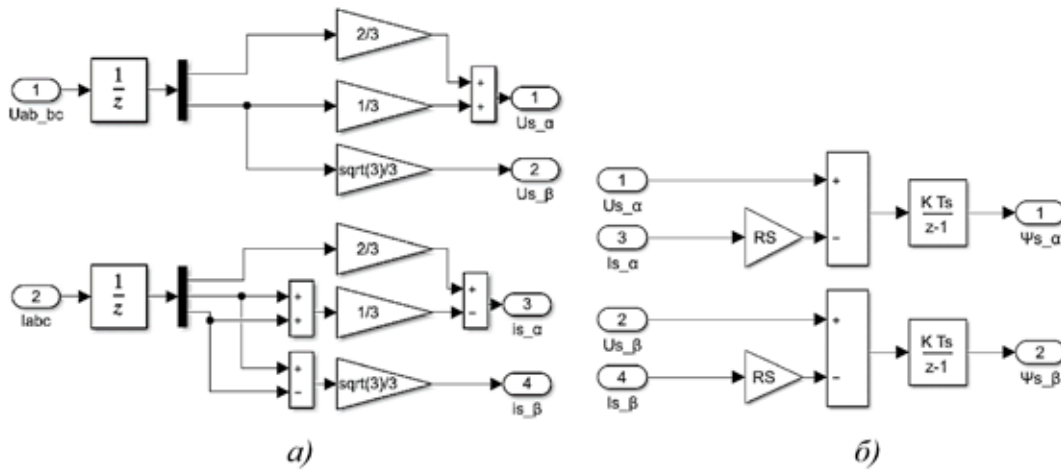


Рис. 2. Структура блока преобразования координат (а) и блока вычисления потокосцепления статора (б)

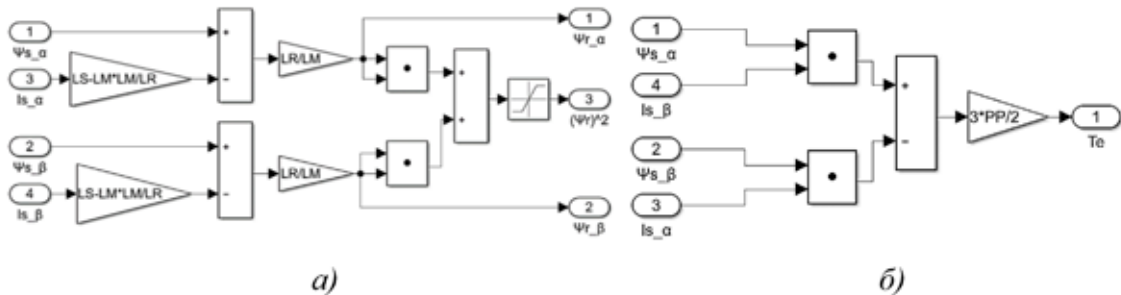


Рис. 3. Структура блока вычисления потокосцепления ротора (а) и блока вычисления электромагнитного момента (б)

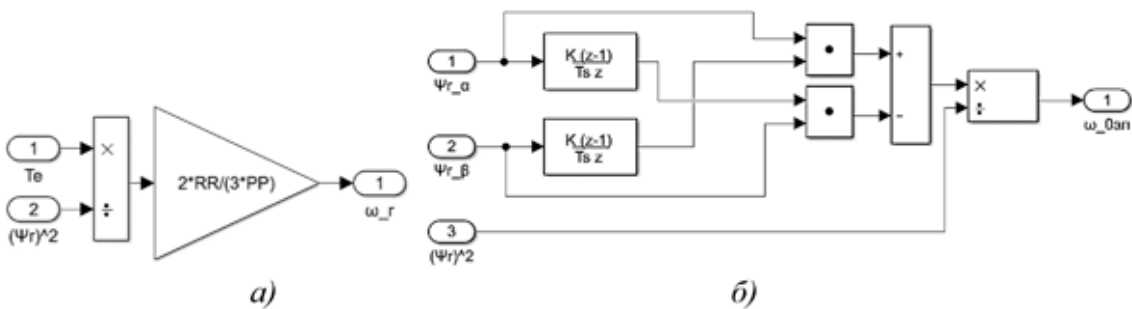


Рис. 4. Структура блока вычисления частоты роторной ЭДС (а) и блока вычисления частоты напряжения питания (б)

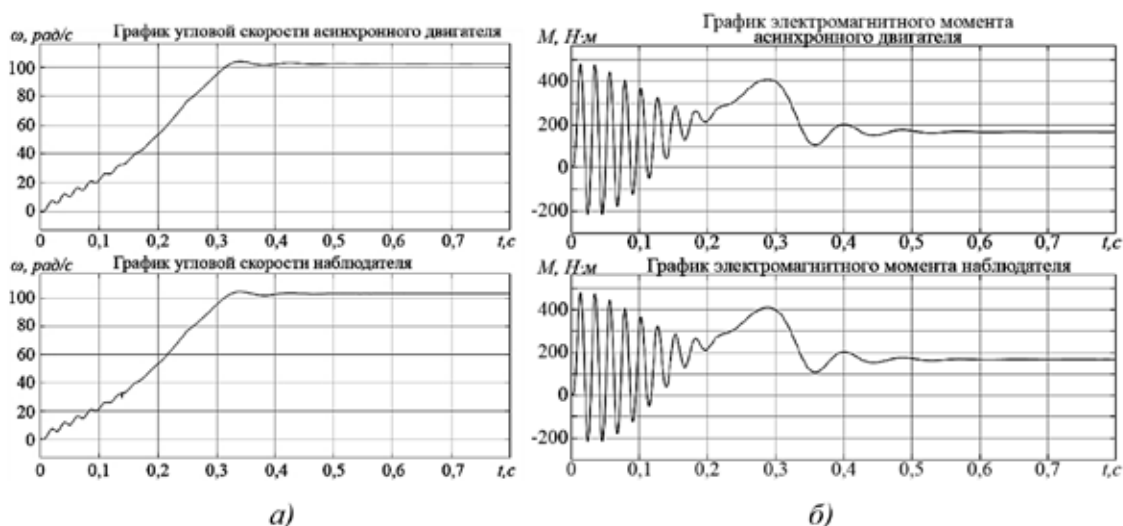


Рис. 5. Графики угловых скоростей модели асинхронного двигателя и наблюдателя (а) и электромагнитных моментов модели асинхронного двигателя и наблюдателя (б)

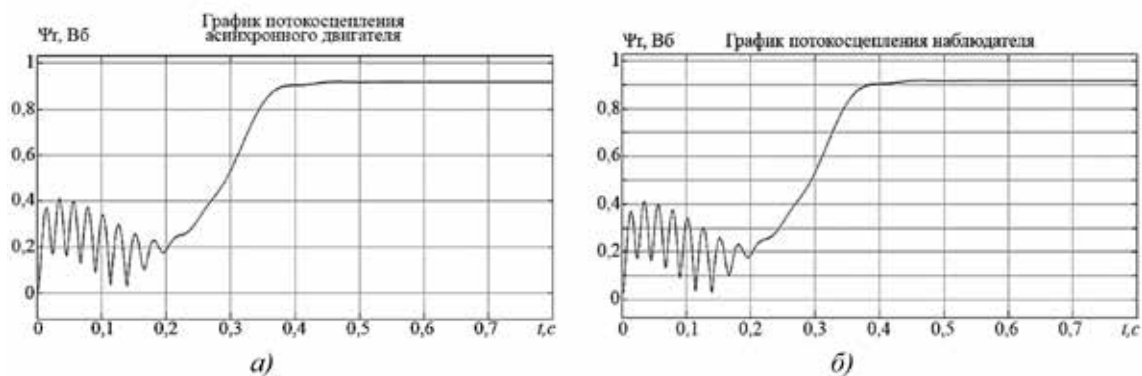


Рис. 6. Графики потокосцеплений роторов модели асинхронного двигателя (а) и наблюдателя (б)

Собранная модель позволяет применять полученный наблюдатель как для построения бездатчиковых систем скалярного регулирования, так и для построения бездатчиковых систем векторного управления.

В связи с тем, что для облегчения дальнейшей работы с моделью наблюдателя она была реализована в виде отдельной подсистемы (Simulink Subsystem), некоторые переменные полученного наблюдателя задаются через параметры (Mask parameters):

RS, RR – активное сопротивление статора и ротора соответственно;

LS – полная индуктивность цепи статора, рассчитанная по формуле (14);

LR – полная индуктивность цепи ротора, рассчитанная по формуле (15);

LM, PP – индуктивность основного потока и число пар полюсов соответственно.

Для демонстрации работы построенной модели наблюдателя состояния асинхронно-

го электродвигателя был выбран крановый электродвигатель МТКН 411-6 на 22 кВт.

На рис. 5–6 показаны результаты имитационного моделирования построенной модели наблюдателя состояния в сравнении с результатами, полученными из блока имитационной модели асинхронного электродвигателя (Asynchronous Machine) из библиотеки Simulink. Из показанных графиков следует, что данные, выдаваемые наблюдателем состояния асинхронного электродвигателя, согласуются с данными, получаемыми из блока имитационной модели асинхронного электродвигателя.

Заключение

Несмотря на то, что предложенная модель наблюдателя строится на упрощенных уравнениях асинхронного электродвигателя, не учитывающих ряд факторов, влияющих на поведение асинхронного электро-

двигателя при работе в реальных условиях (зависимость коэффициентов от температуры, степень насыщения магнитной цепи, равномерность воздушного зазора), что снижает его точность в реальных системах управления по сравнению с другими вариантами наблюдателей, данный наблюдатель хорошо подходит для разработки, моделирования и анализа бездатчиковых систем управления частотными электроприводами, а также для изучения принципов построения систем векторного управления частотными электроприводами. Это связано с достаточно простой и интуитивно понятной структурой данного наблюдателя, позволяющей интегрировать в структурную или имитационную модель векторного управления отдельный блок наблюдателя, а не использовать данные напрямую от применяемой модели электродвигателя, что, в свою очередь, не только улучшит понимание структуры и работы векторных систем управления, но и оставит возможность модернизировать данный наблюдатель в соответствии с поставленными задачами.

Список литературы

1. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н., Грачева Е.И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 209–222.
2. Стариков А.В., Стрижакова Е.В., Беляева О.С., Карим Альтахер А.А. Наблюдатель скорости вращения асинхронного двигателя // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28, № 4 (68). С. 155–166.
3. 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.
4. Синюков А.В., Синюкова Т.В., Грачева Е.И., Колчун М., Вальчев С. Оптимизированные бездатчиковые системы управления механизмами перемещения грузов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 6. С. 87–98.
5. Ключников А.Т., Турпак А.М. Бездатчиковое векторное управление асинхронным двигателем при расчете в комплексной форме // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 33. С. 160–176.
6. Каминский А.В., Коваленко С.В., Гуляев А.В., Шухарев С.А. Моделирование векторного управления асинхронным двигателем во вращающейся системе координат // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 3 (71). С. 50–58.
7. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). М.: ЭФО, 2013. 63 с.
8. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 272 с.