

А. В. Федосеев – студент кафедры электротехники и технической диагностики

А. А. Ефимов (д-р техн. наук, проф.) – научный руководитель

ИДЕНТИФИКАТОР ПЕРЕМЕННЫХ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Одно из направлений развития электроприводов переменного тока, которому в последнее время придаётся огромное значение, – так называемые бездатчиковые (sensorless) электроприводы. Под термином «бездатчиковые» понимается отсутствие в системе электропривода любых датчиков, кроме тех, которые могут быть установлены внутри силового преобразователя частоты (ПЧ), а именно: датчиков токов и напряжений статора двигателя, датчика напряжения звена постоянного тока ПЧ. Это значительно снижает стоимость и повышает надежность электропривода. Бездатчиковые алгоритмы векторного управления используются в тех электроприводах, в частности, в асинхронных электроприводах (АЭП) общепромышленных механизмов, которые не требуют предельного быстродействия, работают преимущественно в установившемся режиме и не обладают широкими диапазонами регулирования скорости (до 100:1). Применяются они и в подъемно-транспортных системах, но это предъявляет довольно жёсткие требования к перегрузочной способности электропривода и к динамике по быстродействию.

Отказ от датчиков переменных механического движения электропривода, соединение ПЧ (и системы управления) с двигателем только силовым кабелем при векторном управлении асинхронным двигателем (АД) обуславливают необходимость косвенного определения ряда координат состояния. Это, прежде всего, частота вращения ротора и фаза ориентирующего (опорного) вектора – вектора потокоцеплений ротора – относительно неподвижного статора. Вычисление их оценок осуществляется на основе измеренных токов и напряжений статора двигателя с помощью специальных алгоритмов идентификации (идентификаторов).

Наибольшее распространение в практике АЭП получили замкнутые по выходной координате идентификаторы. В частности, это алгоритмы, построенные на основе адаптивных систем с задающей моделью (MRAS – model reference adaptive system [2]) или наблюдателей полного порядка (НПП) [3]. Кроме них, известны идентификаторы со структурой расширенных фильтров Калмана, алгебраические вычислители, анализаторы спектров паразитных гармоник и другие.

Идентификаторы типа MRAS содержат в своей структуре две различные модели, которые вычисляют две оценки одной и той же (в общем случае – векторной) координаты состояния, например вектора потокоцеплений ротора. Одна модель, не содержащая неопределённого параметра, является задающей, и вычисленная с её помощью переменная считается эталоном. Другая модель, зависящая от неопределённого параметра, является настраиваемой, причем её адаптация осуществляется путём изменения оценки неопределённой переменной, подлежащей идентификации. Считается, что истинное значение искомой переменной найдено, если выходные координаты задающей и адаптивной модели совпадают. Идентификатор частоты вращения (ИЧВР), построенный по методике MRAS, также содержит две модели: задающую модель цепи статора АД (МЦС) и настраиваемую модель цепи ротора (МЦР). Обе модели вычисляют оценку вектора потокоцеплений ротора АД. Настройка МЦР осуществляется изменением оценки частоты вращения ротора, входящей в её структуру. Оценку частоты вращения ротора формируют с помощью пропорционально-интегрального (ПИ-) регулятора, на вход которого подаётся векторное произведение двух оценок вектора потокоцеплений ротора, пропорциональное синусу угла между ними.

Идентификаторы, построенные по методике адаптивных наблюдателей полного порядка (АНПП), имеют несколько иную структуру [4]. В такой идентификатор входит полная (в рамках общепринятой системы допущений) математическая модель электромагнитных процессов АД, содержащая частоту вращения ротора как неопределённый параметр. На выходе АНПП получают оценку доступной для прямого измерения переменной и, сводя тем или иным образом её отклонение от непосредственно измеренного значения к нулю, идентифицируют неопределённый параметр. В бездатчиковых системах АЭП нет другой альтернативы, кроме воспроизведения посредством адаптивного НПП оценки вектора

токов статора – единственной векторной координаты состояния, которая может быть измерена на выходных клеммах ПЧ.

Идентификатор переменных и координат полного порядка восстанавливает переменные состояния, используя полную систему уравнений. Двигатель, как и любая динамическая система, описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx. \end{aligned} \right\}$$

Оценки переменных формируются в соответствии с уравнением:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + L(y - C\hat{x}), \quad (1)$$

где \hat{x} – оцененные переменные состояния, L – матрица коэффициентов.

Непосредственное вычисление рассогласования по формуле (1) затруднительно, поскольку каждая координата имеет две проекции, то есть два значения. Рассогласование лучше искать по координате, имеющей одно значение. Такой координатой является момент. В неподвижной системе координат момент можно вычислить по известным токам статора и потокоцеплению ротора:

$$M = \frac{mpL_m}{2L_r} (I_{s\alpha}\Psi_{r\beta} - I_{s\beta}\Psi_{r\alpha}). \quad (2)$$

Потокоцепления и токи находятся путем решения полной системы уравнений двигателя:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} &= U_{s\alpha} - \frac{1}{T_s'} \Psi_{s\alpha} + \frac{K_s}{T_s'} \Psi_{r\alpha}, \\ \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} &= U_{s\beta} - \frac{1}{T_s'} \Psi_{s\beta} + \frac{K_s}{T_s'} \Psi_{r\beta}, \\ \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} &= -\frac{1}{T_r'} \Psi_{r\alpha} + \frac{K_r}{T_r'} \Psi_{s\alpha} - \omega \Psi_{r\beta}, \\ \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} &= -\frac{1}{T_r'} \Psi_{r\beta} + \frac{K_r}{T_r'} \Psi_{s\beta} + \omega \Psi_{r\alpha}, \\ i_{s\alpha}^* &= \frac{\Psi_{s\alpha} - K_r \Psi_{r\alpha}}{L_s'}, \\ i_{s\beta}^* &= \frac{\Psi_{s\beta} - K_r \Psi_{r\beta}}{L_s'}, \end{aligned} \right\}$$

где $L_s' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$, $K_s = \frac{L_m}{L_s}$, $T_s' = \frac{L_s}{R_s}$, параметры роторной цепи определяются аналогично.

Рассогласование e является отражением формулы момента (2). Это рассогласование подается на вход ПИ-регулятора. Выходом регулятора является вычисленная скорость вращения ротора. Указанные вычисления выполняются по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_{\alpha} &= i_{s\alpha} - i_{s\alpha}^*, \\ \Delta i_{\beta} &= i_{s\beta} - i_{s\beta}^*, \\ e &= \Delta i_{\alpha} \Psi_{r\beta} - \Delta i_{\beta} \Psi_{r\alpha}, \\ \omega &= K_p e + K_I \int_0^{\infty} e dt, \end{aligned} \right\}$$

где K_p , K_I – коэффициенты, которые выбираются по наилучшей оценке скорости.

Вычисленная скорость вращения ротора далее используется в модели двигателя для того, чтобы подстроить работу модели под измеренные характеристики двигателя.

Идентификатор координат полного порядка устойчиво работает в зоне низких частот вращения двигателя, а также при изменении его параметров. Функциональная схема такого идентификатора приведена на рис. 1.

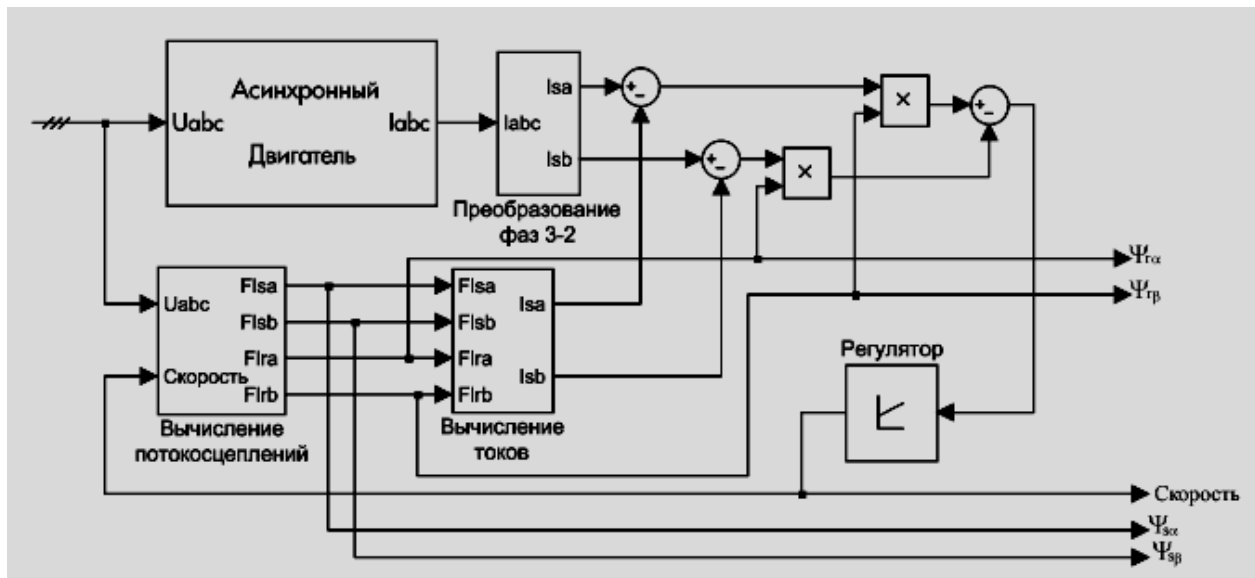


Рис. 1. Функциональная схема идентификатора переменных полного порядка

Математическая модель идентификатора полного порядка в среде Matlab/Simulink представлена на рис. 2.

В качестве примера с её использованием произведено математическое моделирование процесса пуска асинхронного двигателя с номинальными данными: мощность 15кВт, напряжение 380В, частота 50Гц, номинальная скорость вращения двигателя 2920 об/мин. Результаты, полученные на объекте идентификации (модели асинхронного двигателя в среде (Matlab/Simulink, которые рассматриваются как реальные данные) и вычисленные идентификатором, представлены на рис. 3. Моделировался процесс пуска двигателя без момента нагрузки на его валу.

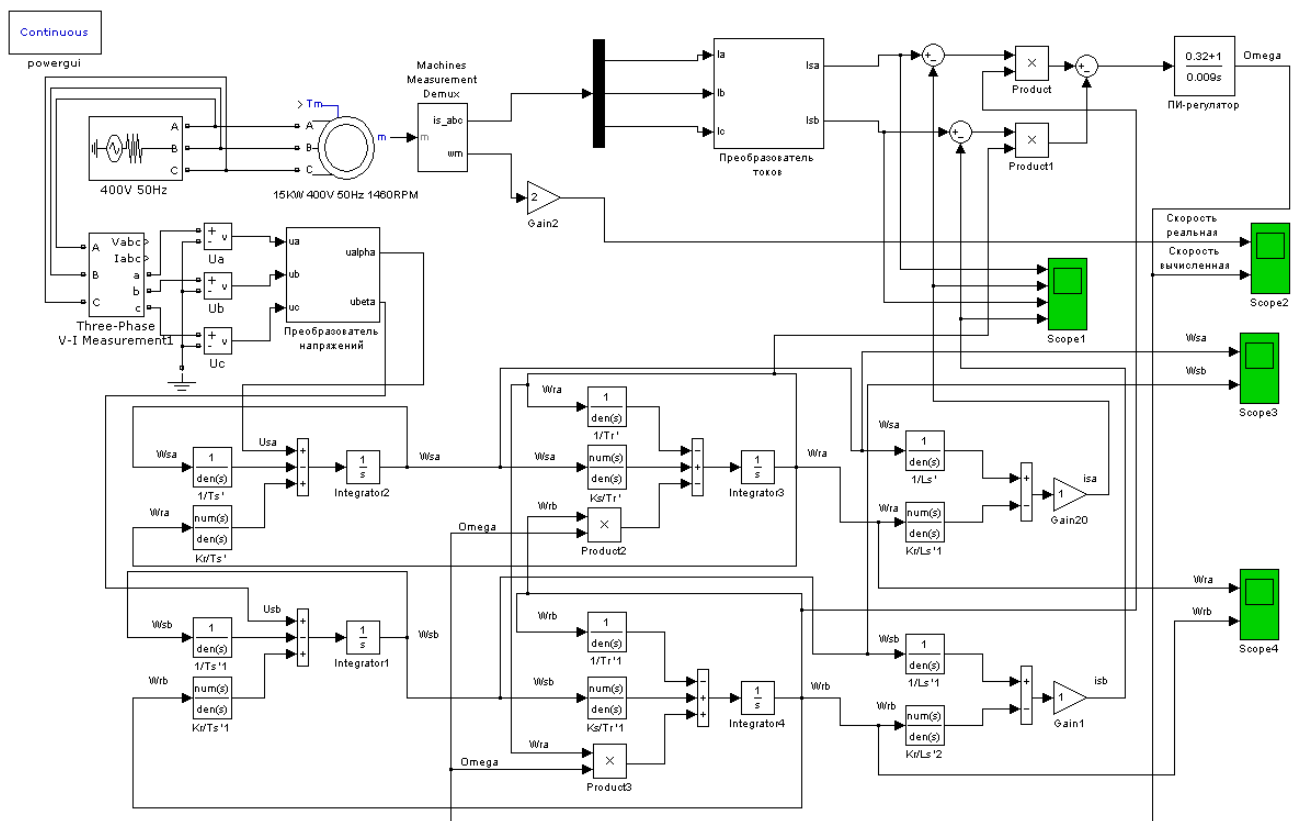


Рис. 2. Общая схема модели идентификатора переменных полного порядка

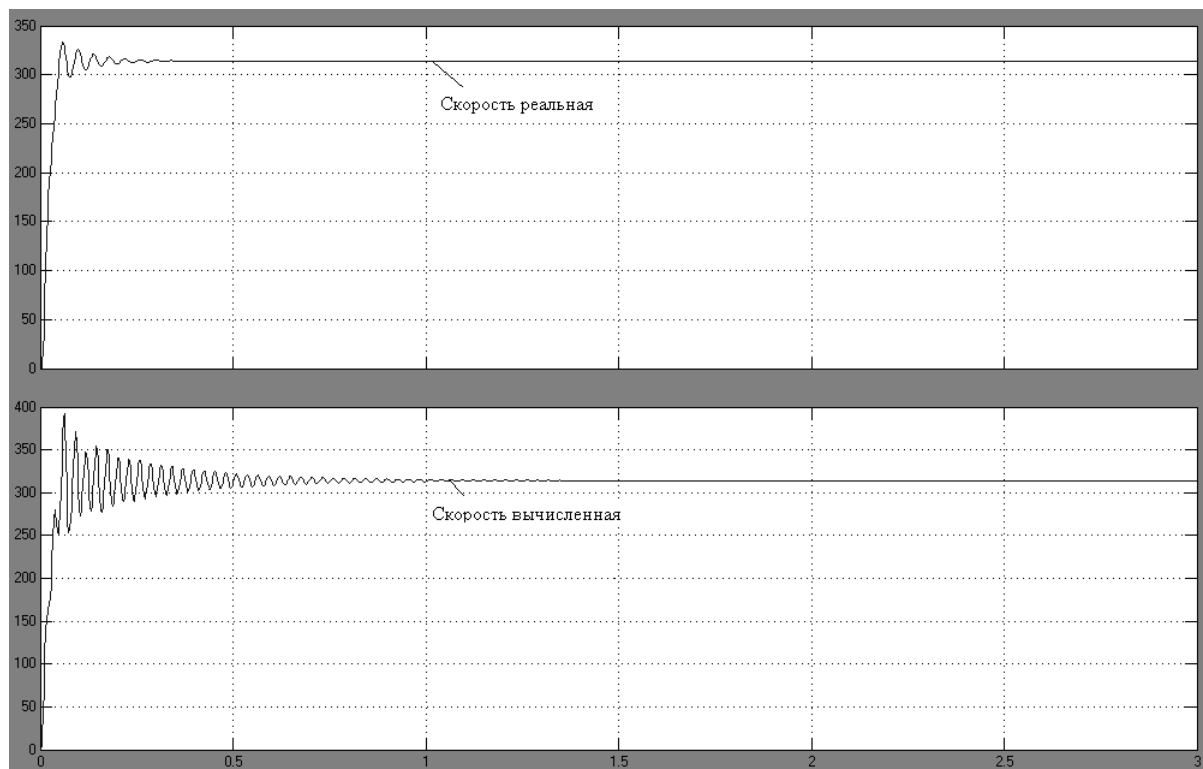


Рис. 3. Графики реальной и вычисленной скорости

Сопоставление полученных результатов свидетельствует о достаточно хорошем совпадении переменных в установившемся режиме работы идентификатора, после окончания в нем переходного процесса.

Библиографический список

1. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens Zeitschrift, 1971. Bd. 45, – H. 10. – S. 757-760.
2. Schauder C. Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors Without Rotational Transducers / C. Schauder // IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, no. 5, September/October 1992, pp. 1054-1061.
3. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.:Машиностроение, 1976. – 184 с.
4. Kubota H. DSP-based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor / H. Kubota, K. Matsuse, T. Nakano // IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 5, March/April 1993, pp. 344-348