УДК 621.398

А.С.ИВАНОВ
Горно-электромеханический факультет,
магистрант группы ЭРМ-01, ассистент профессора

СТРУКТУРА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА БЕЗ ДАТЧИКОВ ОСНОВНЫХ КООРДИНАТ

В статье рассмотрены альтернативные возможности управления электроприводами технологических машин при помощи интеллектуальных нейронных сетей, модели традиционного и современного бездатчикового наблюдателя координат, проводится их сравнение.

In clause alternative opportunities of management by electric drives of technologies machines over units by means of intellectual neural networks, models of the traditional and modern observer of coordinates without gauges of coordinates, their comparison is made

В настоящее время весьма актуален поиск технических решений по замене традиционных датчиков скорости и потока в электроприводах. Использование традиционных датчиков ведет к усложнению конструкции привода и его удорожанию, снижению надежности системы в целом. Вместе с тем в подавляющем большинстве случаев приходится искать компромисс между чувствительностью датчика и его защищенностью в самой системе от внешних и внутренних помех.

Асимптотическая устойчивость наблюдателя, а также высокие быстродействие и точность текущей идентификации достигаются при использовании модели цепи ротора двигателя или более сложной («полной») модели электромагнитных процессов асинхронных двигателей (АД). Однако в этом случае необходима информация о параметрах объекта управления, входящих в модель идентификатора. Если в однозонной системе векторного управления (СВУ), работающей с постоянством потока индуктивности схемы замещения АД можно приближенно считать постоянными величинами и определять их только в ходе предварительной идентификации, то активные сопротивления обмоток, существенно зависящие от температурного режима двигателя, являются лишь квазистационарными параметрами и изменяются от процесса к процессу в достаточно широких диапазонах. Это обуславливает необходимость адаптации наблюдателя к изменениям активных сопротивлений статора и ротора, как правило, без измерения температуры.

Использование датчиков индукции магнитного поля в воздушном зазоре машины на базе элементов Холла или дополнительных статорных обмоток для измерения ЭДС требует изменения конструкции двигателя, его технологического усложнения и удорожания. Кроме того, датчики Холла существенно снижают надежность СВУ, так как чрезвычайно чувствительны к ударам и вибрациям. В этой связи перспективны идентификаторы (наблюдатели) ориентирующего вектора с измерением токов, напряжений и, если требуется, скорости АД.

Исходными данными для вычислений, проводимых в вычислителе ненаблюдаемых координат электропривода, являются фазные напряжения на выходе автономного инвертора и фазные токи статора двигателя. Поэтому первая вычислительная опера-

ция связана с преобразованием фазных значений наблюдаемых координат в эквивалентные составляющие в координатных осях (α-β). Преобразования токов и напряжений выполняются с помощью следующих выражений:

$$I_{s\alpha} = I_{sa} - \frac{1}{2}(I_{sb} + I_{sc});\ I_{s\beta} = \frac{\sqrt{3}}{2}(I_{sb} - I_{sc});$$

$$U_{s\alpha} = U_{sa} - \frac{1}{2}(U_{sb} + U_{sc});\ U_{s\beta} = \frac{\sqrt{3}}{2}(U_{sb} - U_{sc}).$$

Если наблюдаемой координатой является выпрямленное напряжение на выходе звена постоянного тока преобразователя частоты, то для преобразования напряжений используются следующие выражения:

$$U_{s\alpha} = U_d\left[S_a - \frac{1}{2}(S_b + S_c)\right];$$

$$U_{s\beta} = U_d\frac{\sqrt{3}}{2}(S_b - S_c),$$

где U_d – амплитуда выпрямленного напряжения на входе автономного инвертора; S_a, S_b, S_c – коммутационные функции фазы *a, b* и *c* на выходе таблицы переключений силовых электронных модулей автономного инвертора.

Полученные составляющие напряжения и тока статора двигателя позволяют вычислить составляющие потокосцепления статора:

$$\Psi_{s\alpha} = \int (U_{s\alpha} - I_{s\alpha}R_s)dt;$$

$$\Psi_{s\beta} = \int (U_{s\beta} - I_{s\beta}R_s)dt,$$

где R_s – активное сопротивление фазной обмотки статора двигателя.

Имеющейся информации достаточно для вычисления модуля (амплитуды вектора) потокосцепления статора и электромагнитного момента двигателя, которые используются в качестве сигналов обратных связей в системе регулирования. Выражение для модуля потокосцепления статора и электромагнитного момента имеет следующий вид:

$$\Psi_{s\mu} = \sqrt{\Psi_{s\alpha}^2 + \Psi_{s\beta}^2};$$

$$M_д = \frac{3}{2}p_n(\Psi_{s\alpha}I_{s\beta} - \Psi_{s\beta}I_{s\alpha}),$$

где p_n – число пар полюсов двигателя.

Также вычислим тригонометрические функции угла поворота вектора потокосцепления статора ψ_s относительно оси α:

$$\cos\psi_s = \frac{\Psi_{s\alpha}}{\Psi_{sm}};\ \sin\psi_s = \frac{\Psi_{s\beta}}{\Psi_{sm}}.$$

Для систем DTC (прямого управления моментом) с непосредственной индикацией частоты вращения ротора с вращающимся датчиком частоты вращения данных вычислений достаточно. В бездатчиковых системах, поскольку частота вращения ротора двигателя входит сомножителем в уравнения электромагнитного равновесия роторной цепи, прежде всего, определим составляющие вектора потокосцепления ротора в осях (α-β), используя уравнения связи между составляющими токов и потокосцеплений асинхронного двигателя:

$$\Psi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m}(\Psi_{s\alpha} - \sigma L_s I_{s\alpha});$$

$$\Psi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m}(\Psi_{s\beta} - \sigma L_s I_{s\beta}),$$

где L_s, L_r, L_m – индуктивность обмотки статора и обмотки ротора, приведенная к статору, и взаимная индуктивность обмоток статора и ротора соответственно; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ – коэффициент рассеяния асинхронного двигателя.

Далее проведем преобразования уравнений роторной цепи двигателя:

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt}\Psi_{r\alpha} - \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt}\Psi_{r\beta} =$$

$$= R_r(I_{r\alpha}\Psi_{r\beta} - I_{r\beta}\Psi_{r\alpha}) + \omega_r\Psi_{rm}^2,$$

где R_r – активное сопротивление обмотки ротора двигателя, приведенное к статору. Выражение в круглых скобках без постоянного коэффициента представляет собой уравнение электромагнитного момента двигателя, выраженное через составляющие то-

ка статора и потокосцепления ротора двигателя. Частота вращения поля статора двигателя и снижение частоты его вращения в функции нагрузки

$$\omega_o = \frac{\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt}\Psi_{r\alpha} - \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt}\Psi_{r\beta}}{\Psi_{rm}^2}; \quad \Delta\omega = \frac{2R_r}{3p_n}\frac{M_д}{\Psi_{rm}^2}.$$

При вычислении частоты вращения поля статора двигателя используют производные составляющих потокосцепления ротора двигателя. Дифференцирование непрерывных функций всегда сопровождается вычислительной ошибкой, которая может повлиять на качество работы всей системы. Частично эта ошибка демпфируется в релейном регуляторе момента.

В некоторых алгоритмах DTC используется информация о пространственном положении вектора потокосцепления ротора. Тогда к приведенным вычислениям добавляются уравнения для вычисления модуля вектора потокосцепления ротора и уравнения для определения тригонометрических функций угла поворота вектора потокосцепления ротора относительно оси α:

$$\Psi_{rm} = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2}; \cos\psi_r = \frac{\Psi_{r\alpha}}{\Psi_{rm}}; \sin\psi_r = \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{rm}}.$$

Для построения уточненных алгоритмов DTC необходимо знать тригонометрические функции угла поворота вектора потокосцепления статора относительно вектора потокосцепления ротора:

$$\cos\psi_{s-r} = \cos\psi_s \cos\psi_r + \sin\psi_s \sin\psi_r;$$

$$\sin\psi_{s-r} = \sin\psi_s \cos\psi_r - \cos\psi_s \sin\psi_r.$$

Реализация подобных алгоритмов позволила создать так называемые наблюдатели, способные по значениям токов и напряжений, подводимых к АД, и на основе модели оценивать основные параметры электропривода.* Однако здесь, как правило, для вычислений используют условно-постоянные параметры асинхронного двигателя: сопротивления и индуктивности статорной и роторной цепи. Но погрешности вычисления при таком подходе значительны, так как зависят от режима работы двигателя и его теплового состояния. В реальных приводах, например в режиме прямого пуска, активное сопротивление ротора может меняться более чем в 1,5 раза, а индуктивность – на 30-40 %. Активное сопротивление обмотки статора зависит от теплового состояния и может изменяться при работе в повторно-кратковременном режиме на 20-30 %.

Для учета этих изменений необходимо проводить динамическую идентификацию АД для определения текущих электромагнитных параметров и переменных электродвигателя, характеризующих его состояние в реальном времени на основе математической модели и сравнения расчетных параметров с реальными токами и напряжениями, подводимыми к электродвигателю с последующим пересчетом их при получении сигнала рассогласования.

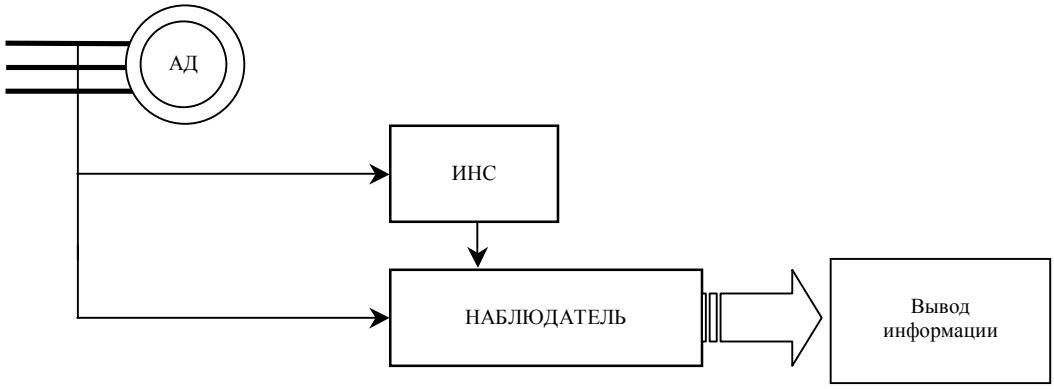
Примером служат адаптивные наблюдатели, которые отличаются от обычных тем, что они по уже вычисленным электромагнитным параметрам АД считают токи, поступающие в него и, сравнивая их с фактическими значениями, учитывают ошибку. Работая в системе Simulinc во взаимодействии с АД, наблюдатель показал хорошие результаты: ошибка вычисления не превышала 2 %.

Однако и адаптивные наблюдатели не лишены недостатков – их необходимо настраивать для каждого конкретного двигателя, они не универсальны и требуют изменений в программе и корректировке коэффициентов модели. Решение проблемы возможно с помощью интеллектуальных нейронных сетей (ИНС).

ИНС позволяют совместить тепловую модель электропривода, базу знаний и вычислитель внутренних параметров, который предполагается организовать так же, как и в модулях DTC – режимом «прогона».

Технология нейронных сетей позволяет повысить качество управления электромеха-

* *Козярук А.Е.* Системы прямого управления моментом в частотно-регулируемых электроприводах переменного тока / А.Е.Козярук, В.В.Рудаков; НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания. СПб, 2005. 100 с.



Структурная схема системы динамической идентификации

ническими объектами, формализованное описание которых слишком затруднительно и громоздко при синтезе систем управления в традиционных представлениях. Подобно биологической нейронной системе ИНС является вычислительной системой с огромным числом параллельно функционирующих простых процессоров с множеством связей.

ИНС рассматривается как направленный граф со взвешенными связями, в котором искусственные нейроны являются узлами. По архитектуре связей ИНС сгруппированны в два класса: сети прямого распространения, в которых графы не имеют петель, и рекуррентные сети, или сети с обратными связями.

Создание любой нейронной сети состоит, по существу, из трех основных шагов: выбор структуры сети и функции активации каждого нейрона сети; выбор алгоритма обучения и данных для обучения; тестирование сети.

Существует доказанное правило, что лучшее средство для аппроксимации – это трехслойная нейронная сеть, причем, чем больше нейронов в скрытом слое, тем ближе выход сети к желаемому значению.

Для управления установили следующую структуру сети: 6 элементов во входном слое, 8 нейронов в скрытом и 2 нейрона в выходном. Данные для обучения нейронной сети взяты из технического паспорта реально существующего двигателя и из модели двигателя и идентификатора, выполненного в системе MatLab. В качестве алгоритма обучения выбрали алгоритм обратного распространения ошибки с 1026 экспериментальными точками. При тестировании определили способность сети к обобщению, т.е. ошибку, которую сеть дает на данных тестирующего множества. На этом этапе и происходит выбор оптимального варианта.

Обучение длилось 5 ч на компьютере (процессор – Pentium 2 433 МГц, 128 Мб ОЗУ) и закончилось за 1800 итераций. Средняя ошибка определения потока и скорости двигателя менее 0,02 %.

Однако следует учесть, что процесс обучения проводился по данным установившегося режима, но, когда был произведен тест на данных пускового режима, ошибка оказалась большой. Как показал анализ, ошибка вызвана явно не структурой сети и не характеристиками нейронов, а обучающей выборкой. Данные в обучающей выборке не давали представления, как вести себя нейронной сети в случае нулевых входных координат, этим объясняется неправильная отработка сетью этих данных.

Это возможно исправить путем внесения в обучающую выборку дополнительных сведений о поведении наблюдаемого объекта во время переходного процесса, для этого необходимы серьезные вычислительные мощности. Предполагаемое время обучения сети с новыми данными порядка 22 ч.

Конечная структура всей системы динамической идентификации показана на рисунке.

Научный руководитель д.т.н. проф. А.Е.Козярук