

ВСТРАИВАЕМАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ С НЕЙРОРЕГУЛЯТОРОМ

В.П.Войтенко, М.А.Хоменко

Черниговский государственный технологический университет

Украина, 14027, г. Чернигов, ул. Шевченко, 95, ЧГТУ, кафедра промышленной электроники

Тел. (04622) 316-96, E-mail: vvp@inel.stu.cn.ua, shadow@inel.stu.cn.ua

Annotation – The experiment that realizes the algorithm of artificial Neural Network control of direct current motor on the signal processor TMS320F243 is described. The obtained results convincingly confirm the possibility and expediency of the application of Neural Network for control of a DC-motor in embedded systems.

Key words – embedded systems, artificial Neural Network control.

ВВЕДЕНИЕ

Существует множество публикаций по применению искусственных нейронных сетей (ИНС) в разнообразных сферах человеческой деятельности [1]. Разработчика привлекает такая особенность ИНС, как способность к обучению и обобщению и реализация за счет этого настройки системы на работу в условиях, отличающихся от существовавших во время проектирования.

В связи с этим кажется привлекательным использование «интеллектуальных» алгоритмов в промышленных регуляторах, где практическая реализация потенциальных возможностей ИНС позволила бы углубить степень автоматизации производственных процессов, осуществить адаптацию технических средств к изменениям параметров задания, объектов управления и среды в широких пределах при минимальном задействовании человека-оператора.

Большая часть доступной информации касается относительно ресурсозатратных сфер применения ИНС. В частности, практическая реализация описанных алгоритмов требует, как минимум, использования ЭВМ в контуре управления. Как только речь заходит о *встраиваемых* системах, количество публикаций по практической имплементации алгоритмов нейросетевого управления становится исчезающе малым. Предметом данного исследования являются интеллектуальные алгоритмы в сфере автоматизации технологических процессов, допускающие практическую реализацию средствами современной элементной базы – микроконтроллеров и силовых преобразователей.

В [2] сформулирована актуальная задача синтеза промышленного регулятора, обеспечивающего требуемые характеристики регулирования в широком диапазоне заданий и параметров объекта, в качестве которого для примера взят двигатель постоянного тока (ДПТ). Кроме того, рассмотрен вариант решения этой задачи с использованием искусственных нейронных сетей на основе выбранных параметров и метода обучения сети. На примере ДПТ промоделирована работа нейрорегулятора.

В [3] приведены этапы синтеза эталонного время-импульсного регулятора, предложенного для обучения ИНС. Разработан алгоритм формирования обучающей выборки, позволяющий реализовать идею построения нейроконтроллера с время-импульсной модуляцией управляющего воздействия. Там же проанализированы различные варианты топологии ИНС и сформулированы рекомендации по построению быстросрабатывающего нейроконтроллера со сниженными требованиями к вычислительным ресурсам.

Положительные результаты, полученные с помощью идеализированных методов исследования (анализа и синтеза, а также абстрагирования), нуждаются в практическом подтверждении. Целью данной статьи является экспериментальная проверка результатов теоретических исследований и компьютерного моделирования, опубликованных ранее в [2] и [3].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прежде всего были поставлены следующие задачи для экспериментального исследования:

- 1) Разработка алгоритма и программы функционирования нейрорегулятора, пригодных для реализации средствами микропроцессорной техники.
- 2) Проведение физического эксперимента по позиционированию ДПТ на различные углы задания и сравнение экспериментальных данных с результатами идеального моделирования.
- 3) Формулирование по результатам эксперимента выводов о возможности и целесообразности применения нейронных сетей для решения задач управления двигателями постоянного тока.
- 4) Выработка основных направлений усовершенствования нейрорегулятора с целью повышения качества функционирования системы.

В [3] приведена методика обучения нейронной сети, построенной по многослойной архитектуре [1], наиболее приемлемой для решения задач управления. Там же представлена схема обучения нейроконтроллера, в которой использован эталонный регулятор и модель ДПТ. Параметры модели можно определить путем идентификации объекта и использовать их также для расчёта эталонного регулятора.

В качестве эталонного регулятора выбран оптимальный регулятор, рассчитанный с помощью метода переменного коэффициента усиления [4]. Этот регулятор позволяет получить процессы конечной длительности и без перерегулирования в нагрузке с известными параметрами.

На Рис. 1 представлена функциональная схема экспериментального стенда. Основу стенда составляет отладочное устройство *TMS320F243 Evaluation Module* фирмы *Spectrum Digital*, предназначенное для разработки и отладки программного и аппаратного обеспечения электронных систем, построенных на базе сигнальных процессоров семейства *F243* фирмы *Texas Instruments*.

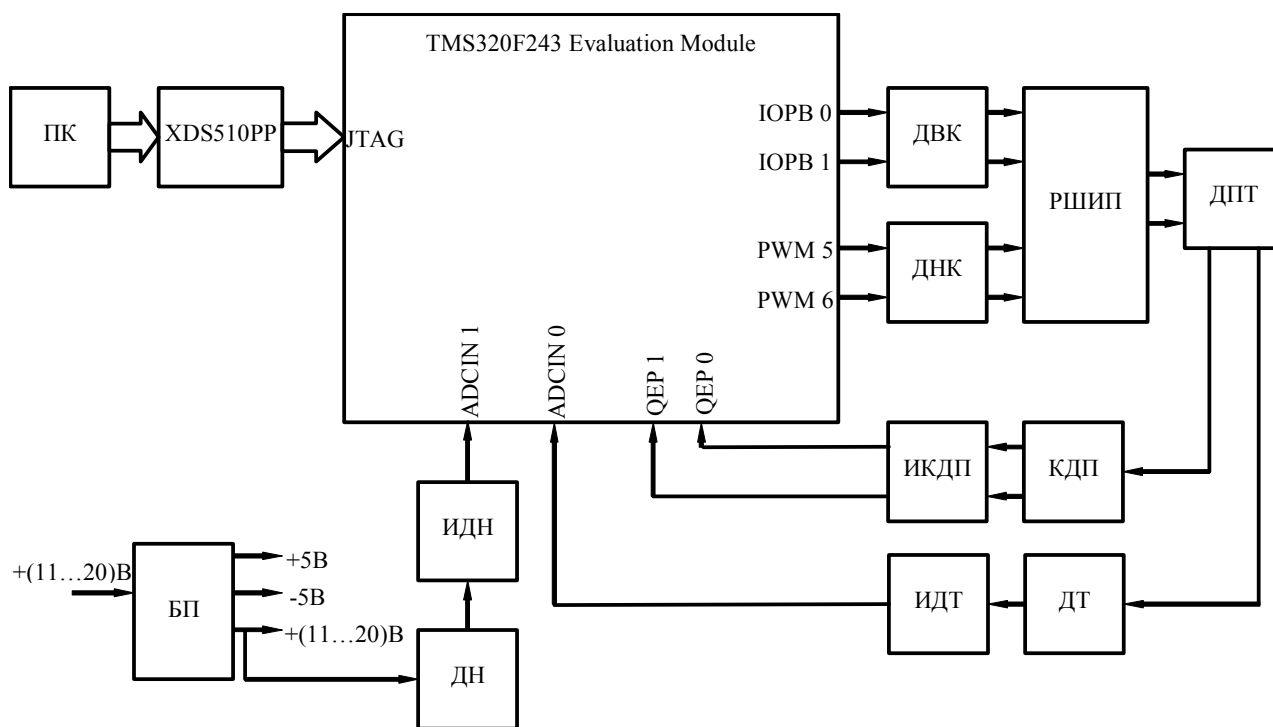


Рис. 1

Данное отладочное устройство позволяют производить в реальном времени отладку программы для сигнального процессора, производительность которого составляет 20 MIPS .

Кроме отладочного модуля в стенд входят:

ПК – персональный компьютер;

XDS510PP – внутрисхемный эмулятор;

БП – блок питания;

ДН – датчик напряжения;

ИДН – интерфейс датчика напряжения;

РШИП – реверсивный широтно-импульсный преобразователь;

ДВК – драйвер «верхних» ключей *РШИП*;

ДНК – драйвер «нижних» ключей *РШИП*;

ДПТ – двигатель постоянного тока;

КДП – квадратурный датчик положения;

ИКДП – интерфейс квадратурного датчика положения;

ДТ – датчик тока обмоток;

ИДТ – интерфейс датчика тока.

В стенде использован ДПТ *HSM150*, рассчитанный на номинальное напряжение 24 В , ток $8,5\text{ А}$ и развивающий мощность 140 Вт при вращении на частоте 3650 мин^{-1} .

В *РШИП* применены силовые ключи на полевых транзисторах. Это позволяет реализовать высокочастотную широтно-импульсную модуляцию напряжения на обмотках ДПТ с помощью резидентных аппаратных средств сигнального процессора и разгрузить вычислительное ядро. Пара «верхних» транзисторов *РШИП* управляется от универсальных линий порта ввода-вывода (*IOPB0* и *IOPB1*), а «нижних» – от выходов встроенного ШИМ-модулятора (*PWM5* и *PWM6*).

Персональный компьютер используется для решения ряда подготовительных задач:

моделирование системы позиционирования;

обучение ИНС и получение численных значений весовых коэффициентов, а также коэффициентов смещения;

разработка прикладного программного обеспечения нейрорегулятора;

загрузка оттранслированной программы в память программ отладочного устройства через интерфейс *JTAG*;

отладка программы в реальном времени с помощью внутрисхемного эмулятора.

После корректировки программы персональный компьютер может быть отключен от отладочного устройства. Таким образом, экспериментальные исследования можно далее выполнять и автономно, полностью реализуя концепцию встраиваемой системы.

Интерфейс датчика напряжения позволяет вводить текущее значение основного питающего ДПТ напряжения в сигнальный процессор через вход резидентного аналого-цифрового преобразователя *ADCIN1* и оценивать влияние качества источника питания на точность системы позиционирования.

С помощью второго входа резидентного аналого-цифрового преобразователя *ADCIN2*, подключенного к выходу интерфейса датчика тока, возможна реализация токового управления ДПТ.

Выбор сигнального процессора конкретного семейства вызван, в частности, и его ориентацией на использование в системах управления электроприводами. Так, в стенде задействованы входы квадратурных датчиков положения *QEP0* и *QEP1*, позволяющие с максимальной эффективностью программно-аппаратными методами реализовать слежение за скоростью, а также положением вала ротора ДПТ.

Кроме того, для реализации встраиваемой системы, где критически важна производительность про-

цессора, очень важным является приспособленность архитектуры использованного процессора к выполнению типичных задач цифровой обработки сигнала в виде взвешенного суммирования с накоплением. Подобную же вычислительную задачу приходится решать и при выполнении алгоритма работы искусственной нейронной сети.

На Рис. 2 представлена схема программы управления двигателем постоянного тока на основе предварительно обученной нейронной сети. На рисунке обозначены:

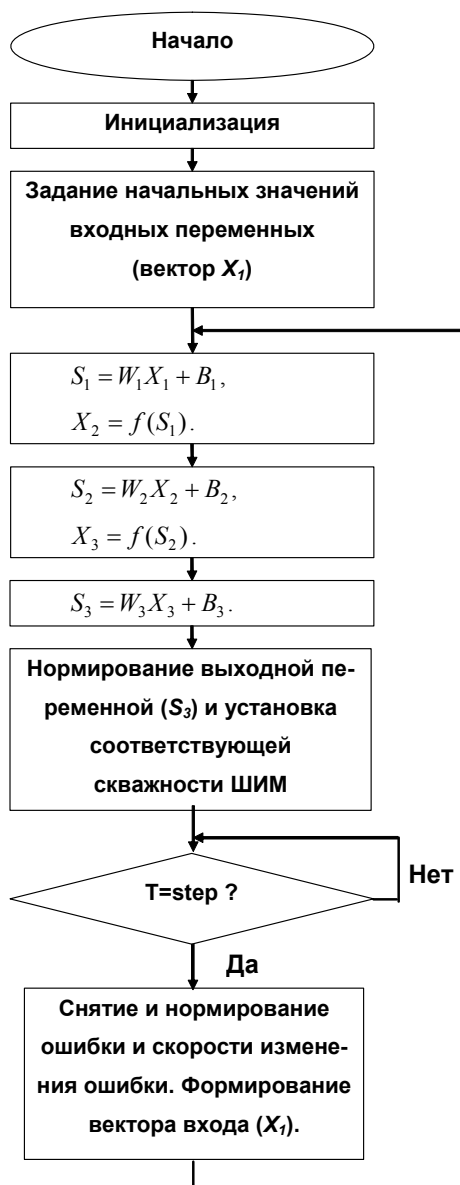


Рис. 2

$X1$ – вектор-столбец входных данных размерностью 2×1 (соответствует количеству входов нейронной сети);

$W1$ – матрица весовых коэффициентов первого слоя размерностью 3×2 ;

$B1$ – вектор-столбец коэффициентов смещения размерностью 3×1 ;

$S1$ – вектор-столбец взвешенных сумм первого

нейронного слоя размерностью 3×1 ;

f – активационная функция нейронов вида гиперболический тангенс, заданная таблично;

$X2$ – вектор-столбец размерностью 3×1 выхода первого нейронного слоя, являющийся входом для второго нейронного слоя.

Далее – аналогично: размерность $W2 - 3 \times 3$; $B2 - 3 \times 1$; $S2 - 3 \times 1$; $X3 - 3 \times 1$; $W3 - 1 \times 3$; $B3 - 1 \times 1$; $S3 - 1 \times 1$.

Поскольку выходной нейрон имеет линейную активационную функцию, взвешенная сумма $S3$ одновременно является выходом сети.

На Рис. 3 представлены осциллограммы позиционирования двигателя на угол 180° . Приведены (сверху вниз) напряжение питания $PШИП$, рассчитанное сигнальным процессором текущее значение коэффициента заполнения ($K_{ШИМ}$), частота вращения вала ДПТ rad/c (V), а также угол ротора, rad . (Ω). Отрицательные значения $K_{ШИМ}$ на осциллограмме иллюстрируют переключение полярности выходного напряжения $PШИП$. Номинальное напряжение питания на холостом ходу было установлено равным $U_n = 16 В$, а угол задания – $\Omega_{задания} = 180^\circ$.

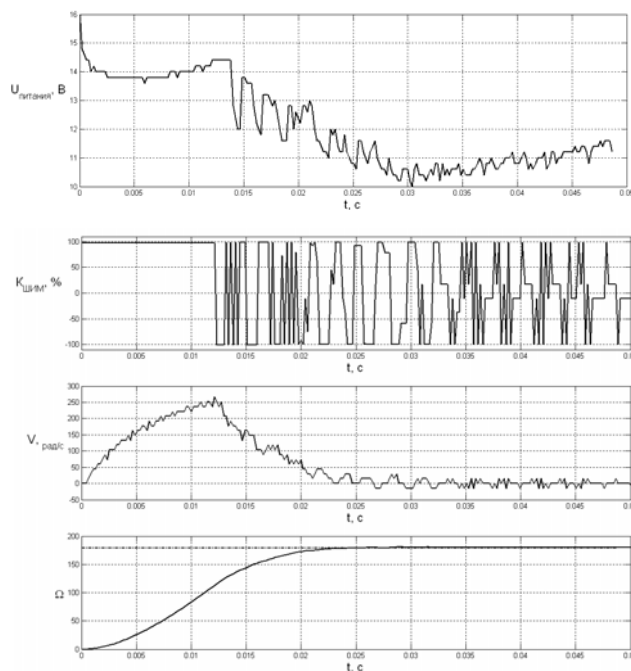


Рис. 3

В ходе эксперимента исследовались как статические показатели прототипа встраиваемой системы (абсолютная точность позиционирования), так и динамические (качество переходного процесса).

В ходе эксперимента время позиционирования составило $26 мс$, а максимальная ошибка в установившемся режиме не превысила $\pm 0,54^\circ$ ($\pm 0,3\%$). Полученный переходный процесс имеет апериодический характер, без перерегулирования, и близок к тому, который теоретически построен для эталонного оптимального регулятора [3].

Кроме того, в данном опыте одновременно удалось экспериментально проверить чувствительность системы к возмущению по питанию. Как видно из осциллограммы питающего напряжения (верхняя на Рис. 3), существенная «просадка» питания (порядка

37%) успешно обрабатывается нейрорегулятором. Отсюда следует важный для встраиваемых систем вывод: даже для систем *точно* позиционирования могут использоваться нестабилизированные источники питания.

Рис. 4 иллюстрирует диаграммы позиционирования на углы 90° и 45° для реальной системы и компьютерной модели. Очевидно, что характер диаграмм по результатам моделирования и эксперимента схож. Различия на участке роста угла позиционирования можно объяснить, в частности, отличием параметров реального объекта от тех, что использовались при разработке эталонного регулятора (сопротивление обмоток ДПТ $R_a=0,7 \text{ Ом}$; индуктивность $L_a=98 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$; момент инерции якоря $J=130 \cdot 10^{-7} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; коэффициент противоЭДС $C_e=0,056 \text{ В}\cdot\text{с}/\text{рад}$). Кроме того, при моделировании сила трения не учитывалась, а в реальной системе очевидно наличие задержки на начальном этапе разгона и более быстрое торможение, чем у модели, свидетельствующее в пользу этого фактора.

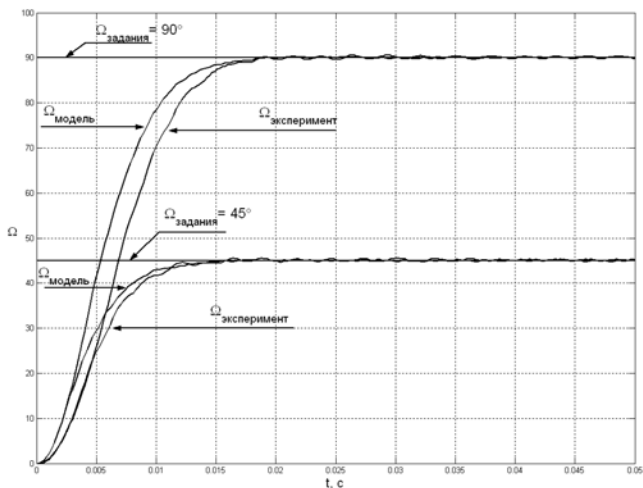


Рис. 4

Для того, чтобы отчетливее прояснить динамические свойства полученного нейрорегулятора, был проведен еще один эксперимент. На Рис. 5 представлен позиционирующий импульс (верхняя диаграмма) и реакция на него (нижняя) разомкнутой системы.

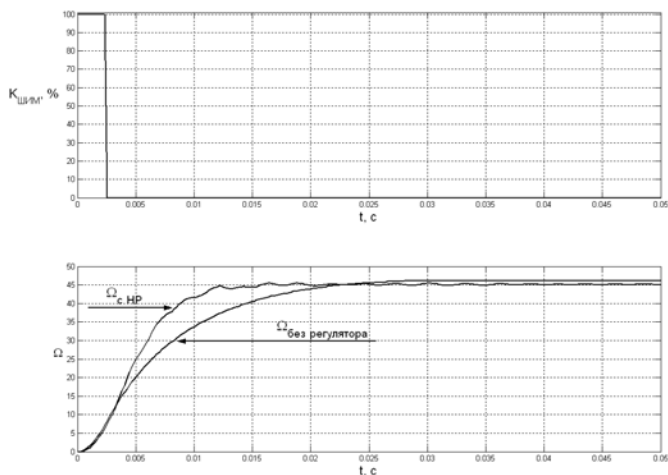


Рис. 5

В результате указанного воздействия осуществлен поворот ротора на угол 45° , и за счет трения произошла остановка примерно через 22 мс . Точно такого же по точности позиционирования результата в системе позиционирования с нейроконтролером удалось добиться за существенно меньшее время. Так, из нижней диаграммы Рис. 5 следует, что время установления сокращается на 10 мс или на 45% . Таким образом, нейроконтроллер позволяет повысить скорость позиционирования системы, приближая переходный процесс к оптимальному.

Важным для ряда практических применений является также отсутствие перерегулирования, которое оказалось возможным обеспечить в системе позиционирования с нейрорегулятором.

ВЫВОДЫ

1. Результаты эксперимента полностью подтверждают теоретические расчёты и компьютерное моделирование и свидетельствуют о возможности применения искусственных нейронных сетей для решения задач управления двигателем постоянного тока. Впервые алгоритм нейросетевого управления ДПТ реализован на сигнальном процессоре *TMS320F243*.

2. Применение более производительного контроллера позволит сократить шаг дискретизации нейрорегулятора, повысить качество функционирования системы при позиционировании на малые углы, а также снизить ошибку в установившемся режиме.

3. Использование датчика с более высокой разрешающей способностью приведет к уменьшению ошибки квантования по скорости, что очень важно, в первую очередь, в зоне низких скоростей при подходе к заданному углу позиционирования.

4. Для дальнейшего снижения ошибки в установившемся режиме на разных этапах позиционирования можно использовать несколько нейронных сетей. Это могут быть либо два отдельных регулятора для малых и больших углов (итерационная система), либо один регулятор для позиционирования и один – для стабилизации (слежения).

[1] Roland S. Burns Advanced Control Engineering. Linacre House, Jordan Hill, Oxford, – 2001.

[2] В.П.Войтенко, М.А.Хоменко. Принципы построения нейрорегулятора для управления промышленным объектом// Технічна електродинаміка, тем. випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – Київ–2006, ч. 3. – С. 80 – 83.

[3] В.П.Войтенко, М.А.Хоменко. Синтез промышленного нейрорегулятора с улучшенной динамикой// Технічна електродинаміка, тем. випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – Київ–2007, ч. 3. – С. 50 55

[4] Ту Ю. Современная теория управления. Пер. с англ. Я.Н.Гибатулина, под ред. В.В.Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1971. – 472 с.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А.И.Денисовым