

УДК 621.3.072.6

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНО-ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ С НЕЧЕТКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

ФАЛЕЕВ М.В., д-р техн. наук, САМОК С.Г., НИКОЛАЕВ И.Б., аспиранты

Рассматриваются новые подходы к моделированию импульсно-цифровых систем управления прецизионными электроприводами с нечеткими регуляторами.

Ключевые слова: нечеткие регуляторы, импульсно-цифровые системы, фазовый дискриминатор, метод переменных состояния.

OBJECT ORIENTED MODELLING OF PULSE-DIGITAL SYSTEMS WITH FUZZY CONTROLLERS

FALEEV M.V., Ph.D., SAMOK S.G., postgraduate, NICKOLAEV I.B., postgraduate.

The article deals with new approaches to the modeling of pulse-digital management systems of precision electric drive with fuzzy controllers.

Key words: fuzzy controllers, pulse-digital systems, phase discriminator, state variable method.

Создание современных систем управления технологическими объектами неразрывно связано с использованием импульсных и цифровых методов и средств обработки данных, усложнением алгоритмов управления и программной реализацией большинства функций управления. Широкое их применение может обеспечить успешную реализацию «критических» технологий по созданию систем управления и комплексной обработки информации, обеспечивающих требуемые характеристики по быстродействию, качеству и габаритам.

Несмотря на большое количество программных продуктов, предназначенных для исследования разнообразных динамических систем, достаточно актуальной представляется разработка моделирующих комплексов, ориентированных непосредственно на потребителей этих систем. Особенно большое значение эта проблема приобретает при разработке и эксплуатации современных электроприводов с цифровым и импульсным управлением.

Известные прикладные пакеты, такие как OrCAD9.1 и MatLab и ряд других, в принципе, позволяют решать такие задачи, однако используемые средства моделирования и получаемые при этом результаты в большей степени ориентированы на решение задач, возникающих при проектировании и исследовании электропривода. В то же время использование этих пакетов для решения задач, возникающих при оперативном управлении технологическими объектами, связано с рядом объективных и субъективных факторов, обусловленных высокой стоимостью пакетов, временными факторами и менталитетом обслуживающего персонала. С другой стороны, использование гибридных, например импульсно-цифровых, принципов управления и оригинальных блоков обработки данных при организации управления системой значительно усложняет процесс создания имитационной модели объекта и в боль-

шинстве случаев ведет к неоправданному росту затрат времени на его исследование даже при высоком быстродействии современных ЭВМ. Это связано с необходимостью точной локализации точек (моментов) смены характера поведения объекта управления или изменения структуры входящих в него элементов. Кроме того, использование таких пакетов для обеспечения жизненного цикла рассматриваемого класса динамических систем связано с определенными техническими и организационными трудностями. Именно поэтому, на наш взгляд, представляется целесообразной разработка специализированных программных комплексов, в максимальной степени ориентированных на учет особенностей моделируемых систем и условий их разработки и эксплуатации.

В настоящее время для моделирования динамических систем все более широко используется объектно-ориентированный подход, основанный на таких языках, как Modelica и UML. Однако и такие перспективные системы ориентированы, в основном, на высококвалифицированных специалистов в области разработки динамических систем автоматического управления. Поэтому предлагается достаточно своеобразный подход к созданию визуальной среды моделирования импульсно-цифровых систем, используемых в высокоточных мехатронных приводах стабилизации параметров движения станков, промышленных роботов, прецизионных измерительных систем, регуляторов подачи топлива энергетических агрегатов.

Основой такой системы автоматизированного электропривода (рис. 1) является фазовый дискриминатор ФД [1], обеспечивающий фиксацию фазового рассогласования частотных сигналов задания f_2 и обратной связи с датчика положения ВР – f_1 , характеризующего скорость и положение вала приводного двигателя М, управляемого импульсным силовым преобразователем ШИП.

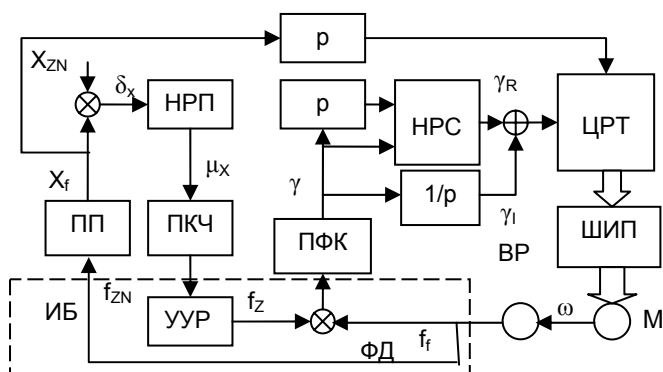


Рис. 1. Функциональная схема моделируемого объекта

Для сохранения высокой точности стабилизации параметров движения эти операции выполняются над импульсными последовательностями. Цифровая часть системы реализует многоконтурную систему управления переменными состояниями объекта: положением, скоростью и токами статора, определяемыми идентификатором. Использование последнего позволяет уменьшить затраты оборудования, устранить погрешности аналого-цифрового и координатного преобразований, снизить требования к вычислительному комплексу и повысить помехозащищенность устройства управления электроприводом. Применение нечетких регуляторов положения (НРП) и скорости (НРС) позволяет преодолеть неопределенности структуры и параметров используемого двигателя и объекта управления. При совместной работе таких регуляторов формируется простейшая нейро-фаззи сеть, использование которой обеспечивает высокую робастность и стабильность характеристик привода.

В основу модели положен метод переменных состояния, позволяющий аналитически определять координаты объекта управления в дискретные моменты изменения структуры системы. Высокая частота коммутации ШИП позволяет разделить переменные по возможным скоростям их изменения. Для современных электроприводов эта граница связана с формированием электромагнитного момента двигателя, естественно разделяя «быстрые» электромагнитные и «медленные» механические процессы. При этом скорость вала двигателя на отдельных этапах моделирования считается постоянной. Связь между отдельными сепаратными системами осуществляется с помощью фиктивного импульсного элемента, срабатывание которого связано с моментами переключения ШИП, и экстраполятора первого порядка, обеспечивающего выполнение вычислений с высокой точностью. Это позволяет аналитически определять векторы состояния электропривода при сохранении нелинейной характеристики «токи – момент» двигателя с минимальными вычислительными потерями.

Для привода с бесколлекторным двигателем (БКД) процессы в его статорных обмотках и механизме представляются отдельными системами дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\alpha}{d\tau} &= \frac{2\pi\omega[n]}{\omega_Z} \alpha, \\ \frac{d\beta}{d\tau} &= -\frac{2\pi\omega[n]}{\omega_Z} \beta, \\ \frac{di_\alpha}{d\tau} &= \frac{1}{\tau_A} (U_Z (\alpha \cos \psi + \beta \sin \psi) e^{-i_\alpha - \omega\alpha}), \\ \frac{di_\beta}{d\tau} &= \frac{1}{\tau_A} (U_Z (\beta \cos \psi - \alpha \sin \psi) e^{-i_\beta - \omega\beta}), \\ \frac{de}{dt} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\mu_M}{d\tau} &= \mu_M[n] - \mu_M[n-1], \\ \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{1}{\tau_M} (\mu_M - \mu_C), \\ \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{\omega_Z} \omega, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где U_Z – значение выходного сигнала вычислителя; ω_Z – добротность ФД; τ_A – электромагнитная постоянная фазной обмотки; ψ – угол коммутации сигнала управления; α, β – фазовые координаты, описывающие изменение магнитного потока; e – переменная, определяющая характер изменения выходного сигнала ШИП на интервалах дискретизации; τ_M – электрохимическая постоянная двигателя и механизма.

Из (1) следует, что обобщенный вектор состояния $V_Y(n + \tau) = \text{col}(\alpha, \beta, i_\alpha, i_\beta, e)$ для статора БКД определяется рекуррентным соотношением вида

$$V_E(n + \tau) = \left(\sum_{i=1}^4 e^{q_i \tau} \prod_{j=1, j \neq i}^4 \frac{A - E q_j}{q_i - q_j} \right) V_E(n),$$

где E – единичная матрица; τ – расчетный интервал, характеризуемый постоянством сигналов управления БКД; q_i – корни характеристического уравнения (1).

Для определения фазовой ошибки $\Delta\varphi[n]$ используется «вертикальная» модель фазового дискриминатора, которая анализирует разность положений импульсных сигналов задания и обратной связи в момент дискретизации системы:

$$\Delta\varphi[n] = \sum_{i=0}^n \omega_z[i] - \varphi[n]. \quad (3)$$

Все последующие операции управления выполняются путем обработки разностных уравнений и логических условий, имитирующих работу регуляторов фазовых переменных. Результатом моделирования регулятора являются длительности импульсов управления ШИП. Истинность связанных с этими переменными предикатов однозначно определяет моменты переключения ШИП. Соотношение этих величин определяет длительности расчетных интервалов на периоде дискретизации системы. Таким образом, формируется рекуррентная процедура расчета переменных состояния электропривода.

Высокие требования к качественным показателям современных динамических систем и «грубости» их характеристик практически невозможно выполнить без использования интеллектуальных технологий. В последнее время накоплен обширный опыт по созданию интеллектуальных систем управления динамическими объектами, широкое применение которых сдерживается отсутствием средств моделирования. Исходя из возможностей импульсно-цифровых систем, наиболее эффективным является использование методов управления, построенных на базе «нечеткой» логики. Применение нечетких регуляторов (НР) для управления нестационарными и нелинейными объектами [2] дает существенные преимущества перед детерминированными устройствами. Основными параметрами НР являются количество и форма функций принадлежности лингвистических величин и диапазоны масштабирования входных лингвистических переменных. Алгоритм НР определяется нечеткими подмножествами, функции принадлежности которых $\mu^1(u)$ и $\mu^2(u)$ (рис. 2) задаются простыми формулами

$$\mu^1(u) = 1 - u, \quad \mu^2(u) = u.$$

При этом диапазон изменения D входных сигналов НР принимается постоянным, а преобразование переменных управления НР в элементы универсального множества $U_1 = [0, 1]$ производится следующим образом:

$$\begin{aligned} u_1^* &= \frac{KgU_E}{2D} + 0,5; \\ u_2^* &= \frac{KpdU_E/dt}{2D} + 0,5, \end{aligned} \quad (4)$$

где Kg и Kp – коэффициент передачи по ошибке регулятора и ее производной, соответственно.

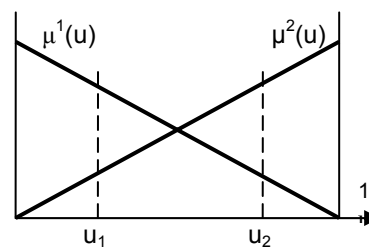


Рис. 2. Форма функций принадлежности

Результирующая функция принадлежности $\mu(u)$ управляющего воздействия определяется по минимаксному критерию.

Исследования показали, что свойства системы во многом определяются методом дефаззификации выходного сигнала НР. Рассмотрены случаи определения выходного сигнала регулятора U_d по абсциссе центра тяжести $s_c = S(u_c, \mu_c)$ участка площади, охватываемой результирующей функцией принадлежности, и с использованием синглетон-функции. В любом случае выходной сигнал регулятора вычисляется как

$$U_d = D(s_c - 0,5).$$

Установлено, что НР с дефаззификатором по центру тяжести нечеткого множества повышает эффективность систем стабилизации. В то же время использование синглетон-функции ведет к существенному росту быстродействия системы по отношению к управляющим воздействиям.

Визуальный интерфейс комплекса имитационного моделирования представляется в виде функциональной схемы моделируемого объекта, элементы которой могут быть непосредственно переданы системе управления конкретным агрегатом.

Испытания комплекса имитационного моделирования показывают высокую его эффективность при адекватности результатов моделирования. При этом затраты времени на машинные эксперименты сокращаются в несколько раз, по сравнению с аналогичными работами, проведенными с использованием пакета Matlab/Simulink. Разработанные принципы моделирования составляют основу программного комплекса, используемого в составе CALS-системы поддержки жизненного цикла разработки, наладки и эксплуатации импульсно-фазовых электроприводов.

Список литературы

1. **Трахтенберг Р.М.** Астатические импульсные системы электропривода с дискретным управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
2. **Методы** робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. – М.: Изд-во МГТУ, 2002.

Фалеев Михаил Владимирович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-73,
e-mail: admin@tam.ispu.ru

Самок Сергей Георгиевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-73,
e-mail: admin@tam.ispu.ru

Николаев Илья Борисович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-73,
e-mail: admin@tam.ispu.ru