

Особенности программных средств для создания нечетких систем управления электротехническими устройствами

Выполнен обзор и анализ инструментальных программных средств для исследования и синтеза нечетких систем управления сложными нелинейными электротехническими устройствами.

Виконано огляд і аналіз інструментальних програмних засобів для дослідження і синтезу нечітких систем керування складними нелінійними електротехнічними пристроями.

Современный этап развития электротехники отличается необходимостью решения сложных задач анализа процессов в динамических системах, работающих в трудно прогнозируемых условиях и режимах. Во многих случаях повышение эффективности таких систем основывается на современных интеллектуальных информационных технологиях управления с использованием программных инструментальных пакетов, реализуемых новыми поколениями вычислительных аппаратных средств [14—16].

Известно, что традиционные методы управления предполагают достаточно точное аналитическое описание динамики процесса и среды. Поэтому такими методами часто сложно, а порой и невозможно обеспечить необходимые результаты управления нелинейными объектами, функционирующими в среде с различными возмущениями и флуктуациями. Иногда даже при наличии подходящей аналитической модели начальные параметры объекта могут быть неполными, что не обеспечивает адекватного управления его процессами.

Возрастающий спрос на разработку сложных и высоконадежных электротехнических устройств привел к созданию систем управления, характеризующихся высоким уровнем интеграции их компонентов и довольно высокой точностью. Это вызвало увеличение системных сложностей, характеризующихся совокупностью нелинейных динамических зависимостей, иерархиями, множественными масштабами времени и высокоразмерным пространством решений, что в итоге создало новый класс проблем моделирования и управления. В результате процесс эффективного функционирования таких систем сложно привести в соответствие с существующей теорией традиционного управления, включая адаптивное управление и другие известные упрощающие и робастные методы управления [19, 20], а также выполнить анализ их устойчивости.

Исследования, выполненные в последние годы

во многих развитых странах в области систем искусственного интеллекта, открыли возможности для устранения некоторых из перечисленных трудностей классических методов управления путем разработки интеллектуальных технологий управления, моделирующих биологическую систему человека [9, 12]. Главная особенность этих систем — их возможности автономной идентификации и исследования. Интеллектуальные технологии позволяют синтезировать системы с высокой приспособляемостью к существенным и непредвиденным изменениям в динамике объекта управления или технологического процесса.

В интеллектуальных технологиях можно выделить два подхода к моделированию сложных нелинейных систем: лингвистический и числовой. Лингвистический подход базируется на нечеткой логике, основой которой является теория нечетких множеств [5, 19], а числовой — на искусственных нейронных сетях [6, 24, 25], моделирующих способность самообучения, и на генетических алгоритмах [9, 23], синтезирующих решения управления путем эволюционных вычислений на основе скрещивания, мутации и селекции, предварительно полученного множества возможных решений. В настоящее время моделирование человеческой вычислительной деятельности на основе нечеткой логики, искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов остается фрагментарным и еще далеко от синтеза принятия полноценного интеллектуального решения. Но все же, в совокупности процедуры инструментальных средств нечеткой логики, искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов составляют направление так называемых "мягких вычислений" как основы синтеза адаптивных систем нового поколения способных к самообучению [20].

Остановимся на лингвистических нечетких системах идентификации, которые основаны на экспериментально определенных правилах "ввода-вывода", обеспечивают мощные альтернативы для

систем, имеющих дело с трудностями описания, и могут использоваться как инструментальные средства для адекватного описания системной динамики в определенных приложениях [20].

Быстро развивающиеся информационные компьютерные технологии в промышленности способствовали созданию и реализации достаточно большого количества относительно удачных разработок, которые успешно используются в различных прикладных программах, реализующих нечеткое регулирование. Среди них: *RT/Fuzzy Toolbox for MATRIXx* компании *Integrated Systems Inc.*, *FIDE* компании *Aptronix*, *fuzzyTECH* компании *Inform*, ряд продуктов компаний *Togai InfraLogic*, *Fuzzy Systems Engineering*, *HyperLogic* и др. Некоторые из них специально созданы для нечеткой технологии, другие — универсальные и включают специальный нечеткий комплект инструментов проектирования. В таблице представлены программные продукты, получившие распространение в разных странах мира, в том числе и в Украине [13, 26—37]. Эти продукты начали появляться на рынке в конце 80-х и начале 90-х годов и одними из первых на рынке программных средств для нечеткого системного анализа были *FuzzyCalc*, *CubiCalc* и др.

Широкая доступность зарубежных программных продуктов на рынке, а также относительно низкая цена не способствуют созданию программных средств отечественного производства для разработки устройств управления с нечетким алгоритмом. При моделировании и создании нечетких систем отечественные специалисты в основном используют программный пакет *MATLAB* компании *The Math Works Inc.*

В работе выполнен анализ особенностей зарубежных программных продуктов синтеза нечетких систем с целью выявления особенностей их оптимального использования при создании систем управления сложными нелинейными электротехническими и электротехнологическими установками.

В настоящее время в зарубежной литературе и сопроводительных описаниях программных пакетов представлены их характеристики [17, 18, 26—37], поэтому ограничимся рассмотрением некоторых их общих и индивидуальных особенностей.

В известных инструментальных средствах разработки нечетких систем выделим три класса:

- универсальные инструментальные средства нечетких систем;
- нечеткие модули (*toolboxes*) универсальных математических программных пакетов;
- прикладные пакеты разработки нечетких систем управления.

Заметим, что, несмотря на доступность универсального нечеткого программного обеспечения, многие зарубежные компании выбрали путь вложения денег и времени в разработку специализированных, прикладных нечетких логических инструментальных средств [33,37]. Компании *Motrola*, *Intel*, *SGS-Thomson*, *Texas Instruments* и *Hitachi*

потребовали соответствия от поставщиков коммерческих нечетких инструментальных средств адекватности их специфическим внутренним требованиям. Точно так же *National Semiconductor* создан собственный внутренний прикладной программный продукт на основе нечеткой логики для проектирования и изготовления своих полупроводниковых чипов. Эта группа коммерческих нечетких логических программных средств преследовала ограниченную цель: разработку простых систем управления с генерированием специфического оптимального кода прошивки для специализированных встраиваемых микроконтроллеров, хотя некоторые из этих инструментальных средств обеспечивают достаточно широкий спектр опций обработки antecedентов и нечеткого логического вывода.

Использование нечетких программных составных модулей математических пакетов моделирования и разработки (например, *Fuzzy Logic Toolbox* программного пакета *MATLAB*) оправдано в случае, когда уже в необходимом направлении накоплены определенный опыт, алгоритмы и блок-схема на основе классических методов теории автоматического управления. Разработчик в известные модели имплантирует нечеткий логический контроллер в виде блока взамен или совместно с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором. Составные модули (*toolboxes*) нечеткого моделирования обладают определенной универсальностью, но они существенно слабее универсальных инструментальных программных пакетов создания нечетких систем в плане интерактивного анализа и отладки нечеткого контроллера в реальном времени. Синтезированные такими модулями нечеткие системы пригодны для реализации на многих аппаратных средствах.

Рассмотрим особенности универсальных программных пакетов как самых мощных средств создания нечетких систем, которые можно применять для различных проектов и которые не ориентированы на использование для конкретного специфического аппаратного комплекса.

Все универсальные нечеткие программные средства преследуют общие цели:

- обеспечение возможности синтезировать контроллер для любого специфического приложения без какой-либо потребности в дополнительном программном обеспечении и оборудовании;
- ускорение процесса разработки, моделирования и формирования выполняемого программного кода;
- создание простой, удобной, интуитивно понятной и доступной для пользователя системы;
- обеспечение возможности применять нечеткую логику и методы управления на уровне абстракции без глубокого понимания того, как они работают.

Основное описание и язык программирования в универсальных программных пакетах осуществ-

Таблица

№	Программный продукт	Компания	Цена, \$
1	FuzzyTECH	Inform (Germany)	5500
2	RT/Fuzzy in MATRIXx	Integrated Systems (USA)	5000
3	MatLab (Fuzzy Logic Tool Box)	The MathWorks (USA)	3490
4	FIDE (Fuzzy Inference Development Environment)	Apronix (USA)	3495
5	FULDEK	Bell Helicopter Textron (USA)	
6	Fuzz-C	Byte Craft (Canada)	149
7	Fuzzy Control Toolbox for UNAC	CICS Automation (Australia)	
8	Fuzzy Knowledge Builder, Fuzzy Decision Maker, and Fuzzy Thought Amplifier	Fuzzy Systems Engineering (USA)	619
9	FS-FUZZYSOFT	FUZZYSOFT AG and GTS Trautzel GmbH (Germany)	499
10	FuziCalc	FuzyWare (USA)	
11	HI-FLAG	HIWARE (Switzerland)	
12	CubiCalc, CubiCalc RTC, CubiCalc RuleMaker, CubiCard, and CubiQuick	HyperLogic (USA)	1469
13	O INCA	Intelligent Machines (USA)	
14	FlexControl	KentRidge Instruments (Singapore)	
15	DataEngine	Management Intelligenter Technologien (MIT) GmbH (Germany)	
16	Quick-Fuzz, Auto-Fuzz, Multi-Fuzz, Flex-Fuzz, Process-Fuzz, Auto Sim-Fuzz, Fuzz-Drive, F-MTOS, CT-FLC	MentaLogic Systems (Canada)	
17	FuzzySP	Metus Systems (USA)	2995
18	FUZZLE	MODICO (USA)	275
19	NeuFuz	National Semiconductor (USA)	15000
20	Decision Plus	Nicesoft (USA)	
21	FL Control	Texas A&M University (USA)	
22	TILShell+ and other products	Togai InfraLogic (USA)	3495
23	Fuzzy logic Code Generator (FLCG)	University of New Mexico (USA)	
24	Fuzzy Logic Embedded Controller Development Packages	Hitachi America Ltd (Brisbane, CA)	от 1530 до 4500
25	Fuzzytech MCU-96 Edition	Intel Corp (Santa Clara, CA)	2056
	Fuzzybuilder		4896
27	M68HXBFIIDS	Motorola Inc (Austin, TX)	995
	FLEDKT01		195
28	Insight	NeuraLogix Inc (San Jose, CA)	995
29	Fuzzytech (80C166)	Siemens Semiconductor Group (Munich, Germany)	
30	Fuzzytech MCU-320 Edition	Texas Instruments Inc (Dallas, TX)	1890

ляется объектно-ориентированным языком высокого уровня, который обеспечивает подключения и связи с другими инструментами пакета, а также среду программирования и моделирования (например, языки *FTE*, *FCL*, *FPL*).

Для мультисистемной реализации универ-

сальные программные пакеты имеют версии для операционных систем *MS-WINDOWS*, *UNIX* и *VME*.

Универсальные инструментальные средства включают опции для автоматизации всех фаз создания нечеткой системы от проекта до выполнения сквозного моделирования, отладки, оптими-

зации и проверки в режиме реального времени. Программная среда проекта позволяет автоматизировать процесс формирования программного кода. Для анализа быстропротекающих процессов предусматриваются, так называемые, трек анализаторы, которые отслеживают входные и выходные параметры системы в реальном времени с заданной дискретностью и сохраняют их для дальнейшего автономного анализа (например, *Trece* анализатор в *fuzzyTECH*). Инструментальные средства поддерживают различные каналы интерактивной отладки и каналы связи в режимах *Online* с внешними инструментами по протоколам *TCP/IP*, *IPX/SPX*. Для исключения посторонней модификации кода предусматриваются средства защиты кода паролем. Программные средства разработки могут использоваться как сервера данных и как средства дистанционных нечетких вычислений. Для данной цели другие приложения могут использовать последовательный интерфейс связи вычислительной машины.

Кроме этого, универсальные программные средства часто позволяют подключать внешние программные инструменты или содержат в своей среде другие инструментальные опции интеллектуальных технологий, прежде всего это искусственные нейронные сети, которые позволяют автоматизировать настройку нечеткого контроллера и оптимизировать разработку путем обучения или самообучения нечеткой системы (например, *Neural Networks* модуль в *Mallab*, *NeuroFuzzy* модуль в *fuzzyTECH* и др.).

Программные продукты почти всегда сопровождаются обучающими инструментальными средствами изготовителя, которые могут использоваться для изучения основных принципов нечеткой логики и управления, а также для приобретения элементарных знаний относительно использования и применения этой специфической технологии. Такие инструменты могут снабжаться текстовой обучающей программой (*Togai InfraLogic*) или даже компьютерным образовательным набором деталей (программа *Fuzzy Logic Educational fuzzyTECH*).

Графические интерфейсы пользователя в универсальных программных средствах поддерживают интуитивно понятную связь разработчика с машинными и всеми графическими редакторами для формирования различных элементов нечетких систем на всех этапах конструирования. Интерфейсы обычно снабжают удобными опциональными элементами для пользователя любого уровня, с возможностью создания кода выполняемой программы без какого-либо программирования.

Универсальные программные средства способны генерировать мобильный С-код и исходные тексты для многих микроконтроллеров и различных типов микропроцессоров. Тип сгенерированного кода может быть главным фактором в выборе между операционными системами, обеспечиваю-

щими связи с другими проектами или средствами типа *MATLAB*, *MS-EXCEL* и др. Достоинством универсальных программных пакетов есть то, что они предусматривают синтез нечеткого логического контроллера не только на универсальных процессорах, а могут формировать подходящее программное решение к разным типам аппаратных приложений.

В развитии инструментальных средств разных форм сегодня наметилась тенденция роста использования модулей искусственных нейронных сетей совместно с нечеткими логическими контроллерами. И этому росту будут способствовать потребность реализации адаптивных систем управления, при разработке которых нельзя игнорировать выгоды от нечетких инструментальных средств, позволяющих синтезировать нечеткий контроллер, работающий только в нескольких сотнях байтов программного кода.

Для исследования поведения сложной нелинейной системы и синтеза достоверного нечеткого решения управления, обеспечивающего устранение потенциальных проблем, связанных с идентификацией объекта, инструментальные программные средства позволяют создать максимально адекватную реальному объекту имитационную модель, которая дает возможность ученому или проектировщику оперативно анализировать или даже интерактивно реагировать на системные изменения через наглядные визуальные интерфейсы.

Поскольку современные промышленные программные средства в настоящее время часто требуются для решения сложных задач управления с высокой точностью при плохо определенных условиях или состояниях объекта управления, то обобщенный анализ средств принятия нечетких решений управления позволит сориентироваться в множестве программных пакетов и упростит задачу выбора того или иного продукта для правильного формирования сигнала управления.

При решении электротехнических задач, учитывая теоретическую основу классического и лингвистического моделирования сложных нелинейных систем, созданную в Институте электродинамики НАН Украины [2, 7, 13, 16], а также существенные наработки отечественных [1, 3, 4, 8–12] и зарубежных ученых [14, 15, 17–25], можно рекомендовать при синтезе и анализе сложных нелинейных систем использование программного пакета *MATLAB* со специальными программными модулями *Fuzzy Logic Toolbox*, *Neural Networks Toolbox* и *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*. Опциональность их достаточность подтверждается, например, успешным практическим использованием *Toolbox* модулей *MATLAB* при разработке и внедрении на предприятиях Украины ряда нечетких систем, а именно: квазирезонансных импульсных систем стабилизации постоянного напряжения для двигателей постоянного тока [3, 4], систем диагностики состояния оборудования собственных нужд син-

хронних генераторів переменногo напруги [1], систем управління електропечами спротивлення при отжиге керамических изделий, формовке автомобильного стекла и запекании лакокрасочных материалов [7].

Для фундаментального наукового дослідження процедури нечіткого логічного закінчення і етапов моделювання нечіткого логічного контролера необхідно використовувати універсальний програмний пакет *fuzzyTECH* німецької компанії *Inform* з імпортом програмного коду в *MATLAB* или в средства апаратної реалізації.

1. Агамалов О.Н., Костерев Н.В., Лукаш Н.П. Методика оцінки технічного стану електрооборудовання в реальному масштабі часу з допомогою нечітких нелінійних авторегресійних моделей з зовнішнім середовищем // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2004. — Ч. 2. — С. 37—42.

2. Буткевич А.Ф., Павловський В.В. Штучний інтелект та гібридні системи у розв'язанні задач електроенергетики: поточний стан та тенденції // Праці ІЕД НАНУ. — 2003. — № 1(4). — С. 109—117.

3. Денисов Ю.А., Заровский Р.В. Применение метода фазовой плоскости для оценки диапазонов изменения физических переменных фазы-регулятора в импульсной системе стабилизации // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2004. — Ч. 5. — С. 77—82.

4. Денисов Ю.А., Иванец С.А. Система стабилизации постоянного напряжения на основе нечеткой логики // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2004. — Ч. 2. — С. 113—118.

5. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. — М.: Мир, 1976. — 165 с.

6. Новаторський М.А., Нестеренко Б.Б. Штучні нейронні мережі: обчислення // Праці Інституту математики НАН України. — 2004. — Т. 51. — 408 с.

7. Кирик В.В. Регулювання змінної напруги на нагрівальних елементах електропечі опору з використанням нечіткого логічного контролера // Праці ІЕД НАН України. — 2004. — № 1(7). — С. 95—98.

8. Клепиков В.Б., Глебов О.Ю., Моисеенко П.Л. п.др. Влияние фазы данных и правил на выходные характеристики фазы регулятора // Техн. електродинаміка. Спец. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2002. — Ч. 2. — С. 43—48.

9. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. — Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. — 320 с.

10. Петергеря Ю.С., Іваніч О.Л., Жуйков В.Я. Оптимізація споживання електричної енергії локального об'єкту на основі нечіткої логіки // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". — 2002. — С. 103—108.

11. Півняк Г.Г., Бєшпа О.С., Хілов В.С. Адаптивний нечіткий регулятор потужності для керування процесом

буріння // Техн. електродинаміка. — 2004. — № 6. — С. 47—52.

12. Сергієнко І.В., Парасюк І.М. Нечіткі інформаційно-діагностичні технології: проблеми становлення // Вісник НАН України. — 2002. — № 7. — С. 21—28.

13. Стогий Б.С., Кириленко О.В., Липківський К.О. та ін. FUZZY-системи — новий технологічний інструмент управління // Техн. електродинаміка. — 2001. — № 3. — С. 17—20.

14. Терехов В.М. Фазы логика в электротехнике // Электричество. — 2000. — № 11. — С. 41—48.

15. Тимченко А.А. Основы системного проектирования та системного аналізу складних об'єктів: Основы САПР системного проектирования складных об'єктів: Підручник / За ред. В.І.Бікова. — 2-ге вид. — К.: Либідь, 2003. — 272 с.

16. Шидловський А.К., Липківський К.О. Стратегії та апаратні засоби управління пристроями силовой електроніки // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силовая електроніка і енергоефективність". — 2002. — Т. 1. — С. 3—8.

17. Chiu S. 'Software Tools for Fuzzy Control.' In: Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems ed. J. en, R.Langari and L.A.Zadeh // IEEE Press, 1995. — P. 313—400.

18. Jamshidi M. 'On Software and Hardware Applications of Fuzzy Logic / 'In: Fuzzy Sets, Neural Networks and Soft computing ed. R Yager and L.A.Zadeh. Van Nostrand Reinhold, New York, 1994. — P. 396—430.

19. De Silva C.W., INTELLIGENT CONTROL: Fuzzy Logic Applications. — CRC Press, Boca Raton, FL. — 1995. — 320 p.

20. Lakshmi C. Jain, Clarence W. de Silva "Intelligent Adaptive Control: Industrial Applications". — CRC Press. — 1998. — 440 p.

21. Lewis F. Applied Optimal Control and Estimation. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1992. — P. 2526—572.

22. Maciejowski J.M. Multivariable Feedback Design. Reading, — MA: Addison Wesley, 1989. — P. 265—323.

23. Masatoshi Sakawa "Genetic Algorithms and Fuzzy Multiobjective Optimization". — 2005. — 332 p.

24. Nauck D., Klawonn F., Kruse R. Foundation of Neuro-Fuzzy Systems. — John Willey & Sons. — 1997. — 305 p.

25. Takagi H. Introduction to Fuzzy Systems, Neural Networks and Genetic Algorithms. Tutorial Notes / Int. Conf. on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems (KES'97), Adelaide, Australia, May 1997.

26. www.inform-ac.com

27. www.ni.com/matrixx/

28. www.aptronix.com/fide/

29. www.cs.cmu.edu/Groups/AI/html/fags/ai/fuzzy/

30. www.ict.com.tw/AI/soft/fuldek.htm

31. www.contraloria.gob.pe

32. www.fuzzysys.com/

33. www.end.com/archives/1994/072194/15dfcov.htm

34. www.ti.com

35. www.national.com

36. www.adaptivevlogic.com/

37. www.cs.cmu.edu/Groups/AI/html/faqs/ai/fuzzy/

Надійшла 22.01.2007