

УДК 621.314.26

doi: 10.20998/2313-8890.2020.11.06

Козлов Сергій Сергійович, кафедра радіоелектроніки; E-mail: ksser300@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9638-5897

Левон Олена Олександрівна, к. техн. наук, кафедра радіоелектроніки; E-mail: elena_levon@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9824-4403

Кузьменко Наталія Олексіївна, к. і. наук., кафедра радіоелектроніки; E-mail: nkuzmenk@i.ua

Римар Сергій Іванович, кафедра радіоелектроніки; E-mail: sergeyrumar@gmail.com

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, м Харків, Україна.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ НЕЧІТКИХ РЕГУЛЯТОРІВ У СКЛАДІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ КОМПЕНСАТОРАМИ

Анотація. У статті розглянуто особливості проектування нечітких регуляторів в складі систем автоматичного управління напівпровідниковими компенсаторами. Проаналізовано тенденції до використання нечіткої логіки і нейромереж для вирішення завдань з великим числом змінних, які мають випадковий характер. Розглянута функціональна схема системи автоматичного управління на базі нечіткої логіки. Наведені деякі особливості нечіткого регулятора. Досліджено питання оптимізації параметрів цифрових нечітких регуляторів. Показано важливість питання вибору методики параметричної настройки нечіткого регулятора. Розглянуто варіанти вибору критерію якості нечітких регуляторів. Проаналізовано ринок комерційних програмних продуктів для роботи з нечіткою логікою.

Ключові слова: напівпровідниковий компенсатор, система керування, моделювання, нечітка логіка.

Kozlov Serhii, Department of Radioelectronics; E-mail: ksser300@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9638-5897

Levon Olena, Ph.D, Department of Radioelectronics; E-mail: mozhaev57@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9824-4403

Kuzmenko Nataliya, Ph.D, Department of Radioelectronics; E-mail: nkuzmenk@i.ua

Rymar Serhii, Department of Radioelectronics; E-mail: sergeyrumar@gmail.com

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2, Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine

FEATURES OF DESIGNING FUZZY REGULATORS IN THE COMPOSITION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF SEMICONDUCTOR COMPENSATORS

Abstract. The article discusses the design features of fuzzy controllers as part of automatic control systems for semiconductor compensators. Tendencies to the use of fuzzy logic and neural networks to solve problems with a large number of variables that are random are analyzed. The functional scheme of the automatic control system on the basis of fuzzy logic is considered. Some features of the fuzzy regulator are given. Questions of optimization of parameters of digital fuzzy controllers are investigated. The importance of the choice of the method of parametric adjustment of the fuzzy controller is shown. The options for choosing the quality criterion for fuzzy controllers are considered. The market of commercial software products for working with fuzzy logic is analyzed.

Keywords: semiconductor compensator, control system, simulation, fuzzy logic.

Козлов Сергей Сергеевич, кафедра радиоэлектроники; E-mail: ksser300@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9638-5897

Левон Елена Александровна, к. техн. наук, кафедра радиоэлектроники; E-mail: elena_levon@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9824-4403

Кузьменко Наталья Алексеевна, к. и. наук., кафедра радиоэлектроники; E-mail: nkuzmenk@i.ua

Рымарь Сергей Иванович, кафедра радиоэлектроники; E-mail: sergeyrumar@gmail.com

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ В СОСТАВЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ КОМПЕНСАТОРАМИ

Аннотация. В статье рассмотрены особенности проектирования нечетких регуляторов в составе систем автоматического управления полупроводниковыми компенсаторами. Проанализированы тенденции к использованию нечеткой логики и нейронных сетей для решения задач с большим числом переменных, которые имеют случайный характер. Рассмотрена функциональная схема системы автоматического управления на базе нечеткой логики. Приведены некоторые особенности нечеткого

регулятора. Исследованы вопросы оптимизации параметров цифровых нечетких регуляторов. Показана важность вопроса выбора методики параметрической настройки нечеткого регулятора. Рассмотрены варианты выбора критерия качества нечетких регуляторов. Проанализирован рынок коммерческих программных продуктов для работы с нечеткой логикой.

Ключевые слова: полупроводниковый компенсатор, система управления, моделирование, нечеткая логика.

Вступ. Зазвичай при аналізі складних технічних систем доводиться мати справу з неповнотою, невизначеністю, недетермінованістю вихідної інформації про систему, що не дає можливості точно описати систему в рамках класичних математичних формалізмів, а дозволяє лише будувати міркування на своїй природній мові, що має, як відомо, багатозначні інтерпретації. У цих умовах потрібно розширення всіх основних математичних понять і створення відповідного формального апарату для моделювання людських міркувань природною мовою і людських прийомів вирішення завдань.

Такий новий математичний апарат був створений професором Л. Заде на основі введення так званих лінгвістичних змінних, що описують нечіткі знання, інформацію про об'єкт. Значеннями (термами) лінгвістичної змінної є вже не числа, а слова і пропозиції природної (або формальної) мови. Наприклад, можна говорити про лінгвістичну змінну - заваду (або сигнал) - як про малий, середній, великий або ще інше залежно від необхідного ступеня детальності опису. Введення лінгвістичних змінних зажадало розширення такого базового поняття математики, як поняття множини. Була розроблена теорія нечітких множин, важливих зі світоглядної точки зору. Їх введення уможливило піддавати кількісному аналізу ті явища, які раніше можна було аналізувати тільки на якісному рівні, або за допомогою вельми грубих їх моделей.

Основна частина. На сьогоднішній день поширеними завданнями, які вимагають застосування концепцій нечіткої логіки, є завдання управління пристроями силової електроніки [2, 3].

Як зазначено в [1] тенденція до використання нечіткої логіки і нейромереж для вирішення завдань з великим числом змінних, які мають випадковий характер, уже в даний час проявляється при управлінні у електроприводі або, наприклад, гнучкими лініями енергопередачі і активними фільтрами. При цьому в якості виконавчих органів застосовуються швидкодіючі перетворювачі змінного / постійного струму з властивостями джерела напруги.

Функціональна схема системи автоматичного управління на базі нечіткої логіки (системи управління з нечітким регулятором) приведена на рис. 1.

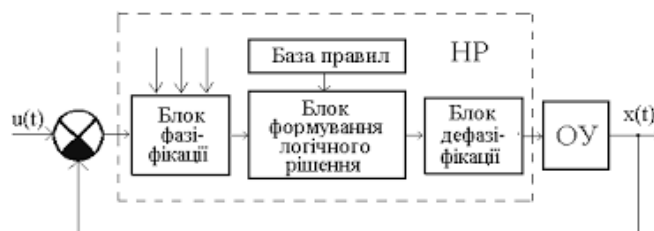


Рис. 1. Функціональна схема системи автоматичного управління на базі нечіткої логіки

У блоці фазифікації вхідні лінгвістичні змінні $x_i, i = \overline{1, n}$ якісно характеризуються терм-множинами (лінгвістичними величинами), які описуються на універсальній множині U функціями належності Φ_N .

Φ_N визначає ступінь приналежності кожного елемента до множини числом між 0 і 1, яке називають ступенем істинності даної лінгвістичної змінної даного терму.

Діапазони зміни вхідних змінних, і поточні значення вхідних змінних перераховуються (відображаються) на єдину універсальну множину $U_i = [0, L_i - 1]$, де L_i це - число, що відповідає кількості термів кожної лінгвістичної змінної $x_i, i = \overline{1, n}$, або універсальну множину $U = [0, 1]$. Як правило, кількість термів j для кожної лінгвістичної змінної вибирається одним і тим же. Таким чином, для кожного поточного значення вхідної змінної визначається ступінь належності (величина істинності) тим термам (нечітким підмножинам), які характеризують конкретну лінгвістичну змінну. Оскільки ФН зазвичай перекривають один одного, то для однієї і тієї ж вхідній змінної кілька ФН можуть мати різні величини істинності, що відрізняються від нуля.

У блоці формування логічного рішення на основі матриці знань (бази правил) записуються лінгвістичні правила виду ЯКЦО (вихідна ситуація), ТО (відповідна реакція), які разом зазвичай називають робочим правилом. Взаємодія між вхідними та вихідними ФН типу ЯКЦО-ТО позначається як імплікація (логічна зв'язка). Імплікація (активізація) - це етап нечіткого виведення, що представляє собою процедуру знаходження ступеня істинності кожного з підзаключення логічних правил виду ЯКЦО-ТО, які є нечіткими лінгвістичними висловлюваннями в формі лінгвістичних змінних. Частина ЯКЦО (передумови або умови) означає поєднання логічних операцій, а частина ТО (рішення, вивід, висновок) зазвичай є просте зазначення лінгвістичної величини для вихідного впливу (керуючого впливу на об'єкт управління) нечіткого регулятора. Відповідним формулюванням правил досягається результат, при якому для будь-якої лінгвістичної величини керуючого впливу, як мінімум, одне з правил виявляється прийнятним. Найбільш часто використовується «мінімакський» Min-Max метод логічного рішення, коли спочатку ФН частини ТО кожного з правил об'єднуються з величиною істинності частини ЯКЦО (при цьому ФН частини ТО обмежується величиною істинності частини ЯКЦО - це «міні» - операція), а потім з обмежених ФН частини ТО шляхом взаємного накладення вибирається результуюча ФН з максимальною величиною істинності («максі» - операція). Ця результуюча ФН визначає собою поточний вплив бази правил. Процедура обробки правил з формуванням результуючої ФН є логічне рішення для розрахунку вихідної величини НР.

Нечіткий вивід займає центральне місце в нечіткій логіці і системах нечіткого управління. Процес нечіткого виведення являє собою деяку процедуру або алгоритм отримання нечітких висновків на основі нечітких умов або передумов з використанням понять нечіткої логіки. Цей процес поєднує в собі всі основні концепції теорії нечітких множин: функції приналежності, лінгвістичні змінні, нечіткі логічні операції, методи нечіткої імплікації і нечітку композицію [1].

Нижче наведені деякі особливості нечіткого регулятора (НР). НР працює в дискретному режимі, тому на кожному кроці квантування він повинен виконати всі необхідні обчислення. НР обробляє всі вхідні змінні, тому на нього можна подавати додаткові змінні, що характеризують процеси в об'єкті управління, і тим самим забезпечувати більш широкий вплив на динаміку управління. Система з НР зазвичай стійка щодо змін параметрів об'єкта управління, що пов'язано з нечіткою природою правил функціонування. Традиційні методи опису регуляторів, наприклад, за допомогою передавальних функцій, для НР не підходять і не потрібні. НР є нелінійним і його особливістю є відсутність динаміки в самому НР. Відсутність «пам'яті» і процедура проектування, а також словесний опис процесу управління, що характеризується лінгвістичними правилами, є головними особливостями НР.

Нечіткі регулятори реалізуються на практиці, як правило, у формі програмного забезпечення високого рівня, наприклад MATLAB, що забезпечує більшу гнучкість при їх налаштуванні. При цьому за результатами моделювання та випробувань системи

управління, що містить нечіткий регулятор в замкнутому контурі, можна змінювати кількісні діапазони лінгвістичних змінних, функції приналежності і модифікувати базу правил з метою отримання необхідної якості управління.

Нечіткі регулятори представляють інтерес в першу чергу для управління об'єктами, які або не піддаються, або піддаються з великими труднощами формалізованому опису, але навіть стосовно управління об'єктами, для яких отримані математичні моделі, ці регулятори часто найкращі за всі інші, так як дозволяють отримати більш високу якість (менші помилки в перехідних і сталих режимах) систем автоматичного управління.

Оскільки алгоритми управління на базі нечіткої логіки можуть бути реалізовані тільки з використанням ЕОМ, то система автоматичного управління з нечітким регулятором є цифровою. Найважливішою характеристикою цифрової системи управління є крок квантування (інтервал дискретизації аналогового сигналу). Його значення багато в чому визначає значення інших параметрів цифрової системи автоматичного управління, зокрема, параметрів традиційних цифрових регуляторів. Тому при проектуванні систем управління з нечіткими регуляторами необхідно приділяти увагу вибору значення кроку квантування.

При формуванні структурних схем систем управління з нечіткими регуляторами, важливим є вибір вхідних параметрів нечіткого регулятора. Лінгвістичні правила керування самі по собі не можуть бути реалізовані на сучасних ЕОМ. Необхідна процедура їх формалізації. У зв'язку з цим дуже важливим є завдання вибору методу формалізації експертних знань. Оскільки нечіткі множини формалізуються за допомогою функцій приналежності, важливу роль відіграє вибір їх виду і параметрів. При реалізації нечіткого управління в сучасних ЕОМ необхідно ставити конкретні значення параметрів функцій приналежності, в першу чергу межі їх зміни. Тому важлива методика параметричної настройки нечіткого регулятора.

При оптимізації параметрів цифрових нечітких регуляторів необхідно ставити критерій якості і функції впливів (управляє і / або впливи) на систему. Якщо розробника цікавить в першу чергу швидкодію системи автоматичного управління, то за критерій якості можна прийняти час регулювання, яке визначається по кривій перехідного процесу (реакції системи на ступеневу вхідний вплив) [1]:

$$J = t_p \Rightarrow \min \quad (1)$$

Крім цього необхідно накласти певні обмеження на криву реакції системи, наприклад, на число переколювань, величину перерегулювання при коливальному перехідному процесі.

Якщо необхідно мінімізувати поточну помилку (забезпечити точність спостереження за вхідним впливом), то найбільш часто використовують один з квадратичних критеріїв якості, наприклад,

$$J = \frac{1}{L} \sum_{v=0}^{L-1} \theta_v^2 \Rightarrow \min, \quad (2)$$

де помилка системи θ_v , обчислюється з кроком моделювання, а число L визначає інтервал спостереження.

В інтерактивній системі MATLAB блок DRMS обчислює значення кореня з середньквадратичної помилки (root mean squared value). У цьому випадку критерій якості можна записати як

$$J = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{v=0}^{L-1} \theta_v^2} \Rightarrow \min \quad (3)$$

Оптимальні параметри нечіткого регулятора відповідають мінімальним значенням критерію якості, а мінімізація критерію якості автоматично призводить до оптимізації перехідних процесів в системі управління. Можна використовувати різні алгоритми умовної та безумовної оптимізації.

При проектуванні систем автоматичного управління розробник має можливість використовувати нечіткі регулятори з різними розглянутими ідентичними для кожної лінгвістичної змінної функціями належності або синтезувати нечіткі регулятори з іншими функціями належності. Для кожної лінгвістичної змінної можна використовувати свої функції належності з варіюваним параметром. Таким чином, існує досить велика кількість варіантів завдання функцій належності при оптимізації параметрів нечіткого регулятора. Найбільш простим варіантом є завдання функцій належності однієї і тієї ж форми з одним і тим же коефіцієнтом настройки або для кожної лінгвістичної змінної. Іншим варіантом є завдання функцій належності однієї і тієї ж форми, але з різними коефіцієнтами настройки для кожної лінгвістичної змінної. Наступним варіантом є завдання функцій належності різної форми з різними коефіцієнтами настройки для кожної лінгвістичної змінної. При проектуванні регулятора необхідно вибрати варіант, який при оптимізації параметрів нечіткого регулятора дає найменше значення критерію якості з розрахованих для різних варіантів мінімальних критеріїв якості.

Часто якість системи управління, що задовольняє розробника, можна отримати, синтезуючи нечіткий регулятор з різними ідентичними для кожної лінгвістичної змінної функціями належності і досліджуючи методом математичного моделювання процеси в системі з нечітким регулятором шляхом порівняння різних варіантів і вибору одного з варіантів. В даний час активно формується ринок комерційних програмних продуктів для роботи з нечіткою логікою. На ньому представлено понад 100 пакетів прикладних програм, які в тій чи іншій мірі використовують нечітку логіку. Лідерами в цій галузі є кілька компаній-розробників програмного забезпечення. Їх інструментальні засоби орієнтовані на застосування нечіткої логіки в максимальній кількості областей і додатків. Це пакет CubiCalc фірми Hyper Logic, FuzzyTECH (Inform Software), FIDE (Ap-tronix), пакети розширення до MatLab: Fuzzy Logic Toolbox (поставляється з MatLab) і FlexTool for MATLAB компанії Sunar Sys, а також пакет JFS (розробник Ян Мортенсен) та інші.

Більшість перерахованих пакетів програм мають повнофункціональний, призначений для користувача інтерфейс, розвинені засоби імпорту / експорту даних. Класифікувати пакети нечіткої логіки по їх можливостям можна на такі групи.

1. Програмне забезпечення для генерації коду для мікроконтролерів, які працюють на нечітких алгоритмах. Як правило, код генерується на мові C або мовою асемблера.

2. Пакети, що дозволяють будувати експертні системи на основі нечіткої логіки. Іншими словами, нечіткі правила і функції належності задаються експертами предметної області. У всіх пакетах користувачу надається можливість вибору виду функцій приналежності (трикутна, трапецевидна, гауссова та ін.), механізму нечіткого вивода (Мамдані, Сугено, Цукамото, Ларсена), способу композиції та приведення до чіткості. Робота з пакетами полегшується графічним відображенням мнемосхем нечітких моделей, поверхонь відгуку та інших залежностей.

3. Пакети, що дозволяють будувати аппроксиматори залежностей і системи класифікації на основі адаптивних моделей нечіткого виводу.

До першої групи належать інструментальні засоби FuzzyTECH і FIDE. При моделюванні складних систем основний інтерес представляють пакети програм з двох

останніх груп. Серед розглянутих пакетів найбільшою універсальністю володіють FuzzyTECH і розширення Fuzzy Logic Toolbox for MatLab.

Fuzzy logic toolbox - вбудована в Матлаб сукупність функцій, що забезпечує набір засобів, що дозволяють:

- створювати і редагувати нечіткі системи всередині середовища Матлаб;
- вбудовувати нечітку підсистему в Simulink (поставляється з Матлаб) при моделюванні загальної системи;
- побудувати нечітку систему в Матлаб у вигляді процедури, що викликається з програми, написаної на мові С.

Так само для розробки додатків на базі нечіткої логіки та нейросистем для задач автоматичного керування компаніями INFORM GmbH і Inform Software Corp був розроблений досить потужний пакет програм, який отримав назву FuzzyTECH. Цей пакет програм є засобом моделювання та оптимізації проектів створення нечітких систем управління на базі мікроконтролерів, він також є генератором асемблерного коду, що підтримує велику кількість сучасного обладнання.

Висновки. Основними кроками розробки програми нечіткого регулятора є:

- формалізація поставленого завдання - визначення лінгвістичних змінних, зіставлення термів з конкретними фізичними значеннями;
- розробка бази правил, що визначає стратегію управління - завдання методу дефазифікації вихідних даних;
- оптимізація розробленої системи в режимі off-line - інтерактивний аналіз поведінки системи з використанням заздалегідь підготовлених даних за допомогою програмної моделі об'єкта управління;
- оптимізація в режимі online - підключення створеної системи управління до реального об'єкту і оптимізація різних компонентів системи в реальних умовах; т. к. в моделі об'єкта управління неможливо врахувати всі тонкощі процесу, то даний режим налагодження вельми важливий при створенні систем управління;
- реалізація - на цьому етапі вибирається варіант генерованого коду в залежності від потреб. Отриманий код для мікроконтролера може бути пов'язаний з основною програмою або записаний в ПЗП системи управління.

Список використаної літератури:

1. Гостев В. И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления: монография / –Нежин : ООО Издательство «Аспект–Поліграф» . – 2009. – 416 с.
2. Домнин И. Ф., Кайда Е. А. Многоконтурная система управления фильтрокомпенсирующим устройством // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. –2010.– Часть 2.– С. 44– 47.
3. Кайда Е. А. Нечеткое регулирование устройством компенсации неактивных составляющих полной мощности // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. –2011.– Часть 1.– С. 184 – 188.
4. Домнин И. Ф. Выбор параметров цифрового нечеткого регулятора / И. Ф. Домнин, Е. А. Левон // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. – 2012.– Часть 2.– Тематичний вип.– С. 123 – 124.

References:

1. Gostev V. I. Design of fuzzy controllers for automatic control systems: monograph. Nezhin. ООО Publishing house «Aspect-Poligraf» . 2009. 416 p.
2. Domnin I. F., Kaida E. A. Multi-circuit control system for filter compensating device. Tekhnicheskaja elektrodinamika. 2010. Part 2. P. 44–47.
3. Kaida E. A. The fuzzy regulation of the device of compensation of non-active components of the full power. Tekhnicheskaja elektrodinamika. 2011. Part 1. P. 184–188.
4. Domnin I. F., Levon E. A. Selection of digital fuzzy controller parameters. Technical electrodyamics. Kyiv. IEDNANU. 2012. Part 2. Thematic issue. P. 123–124.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2020