

УДК 621.314.26

**І. Ф. ДОМНІН, О. О. ЛЕВОН****СИНТЕЗ FUZZY-РЕГУЛЯТОРА ДРУГОГО ПОРЯДКУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИМ ПРИСТРОЄМ**

В даній статті розглянуті етапи синтезу нечіткого регулятора другого порядку за бажаною статичною характеристикою: формування лінгвістичних змінних вхідних і вихідних сигналів; синтез системи продукційних правил. Для синтезу нечіткого регулятора за бажаною характеристикою будується таблиця опорних значень, на підставі якої відбувається синтез бази продукційних правил. Застосування продукційних правил з подвійним консеквентом дозволяє синтезувати нечіткий регулятор з необхідною точністю.

**Ключові слова:** нечіткий логічний регулятор, система керування, багатоканальний логічний регулятор, нечітке моделювання.

В данной статье рассмотрены этапы синтеза нечеткого регулятора второго порядка по желаемой статической характеристике: формирование лингвистических переменных входных и выходных сигналов; синтез системы продукционных правил. Для синтеза нечеткого регулятора по желаемой характеристике строится таблица опорных значений, на основании которой происходит синтез базы продукционных правил. Применение продукционных правил с двойным консеквентом позволяет синтезировать нечеткий регулятор с требуемой точностью.

**Ключевые слова:** нечеткий логический регулятор, система управления, многоканальный логический регулятор, нечеткое моделирование.

This paper deals with the stages of the fuzzy controller synthesis by the desired static characteristic: the formation of input and output signals linguistic variables; production rules system synthesis. For the fuzzy controller synthesis by the desired characteristics a reference values table is created on which basis the synthesis of the production rules base takes place. Using production rules with a double consequent allows synthesizing fuzzy controller with the required accuracy.

**Keywords:** fuzzy logic controller, control system, multistage fuzzy logic controller, fuzzy modeling.

**Вступ.** Метод проектування нечіткого регулятора у складі системи керування пристроєм компенсації неактивних складових повної потужності на основі пакету нечіткої логіки системи MATLAB досить докладно викладено в роботах [1-3].

В описаній структурі автоматизованої системи керування фільтрокомпенсуючим пристроєм (ФКП) введений додатковий контур регулювання з fuzzy-регулятором, який реалізує процедуру нечіткого виведення і дає можливість отримати необхідні значення регульованих і контрольованих параметрів об'єкта, а саме здійснює керування рівнем амплітуди обраної гармоніки струму мережі живлення  $k_i$  або коефіцієнта гармонік в цілому і приведення даних параметрів до встановленого рівня, що в свою чергу відбувається при зміні напруги на конденсаторі інвертора  $U_c$  за рахунок керуючих сигналів  $U_{cref}$  на виході додаткового контуру регулювання.

У запропонованій системі керування на базі нечіткої логіки вхідні сигнали fuzzy-регулятора та керуючі на виході розглядаються як лінгвістичні змінні, що якісно характеризуються терм-множинами. Кожен терм розглядається як нечітка множина і формалізується за допомогою функції приналежності. Формування керуючого впливу здійснюється на підставі лінгвістичних правил керування, що встановлюють засобами природної мови зв'язок між станом динамічної системи і керуючим впливом в системі керування ФКП.

У даній роботі пропонується застосовувати нечіткий регулятор другого порядку для моделювання подібних систем з необхідною точністю, а так само представлений алгоритм синтезу нечіткого регулятора другого порядку, який дозволить підвищити точність нечіткого регулятора при незначному ускладненні структури регулятора.

Нечіткий регулятор являє собою статичну ланку, тобто сигнал на виході нечіткого регулятора однозначно визначається вхідними сигналами. Таким чином, для синтезу нечіткого регулятора необхідно визначити бажану статичну характеристику нечіткого регулятора і налаштувати його таким чином, щоб його статична характеристика збігалася з бажаною. Нечіткий регулятор другого порядку має в своєму складі нечіткий регулятор першого порядку і спирається на базу продукційних правил з подвійним консеквентом [4].

**Постановка питання.** На рис. 1 представлена MATLAB-модель напівпровідникового компенсатора, підключеного до мережі живлення паралельно нелінійному навантаженні, створена і апробована в пакеті MATLAB 7.0.1. з додатковим контуром нечіткого регулювання по рівню вищих гармонік струму мережі живлення і доповнена контуром нечіткого регулювання рівня комутаційних перенапруг [1]. На вхід fuzzy-регулятора надходять такі сигнали: коефіцієнт  $i$ -ї гармоніки струму мережі живлення  $k_i$ , тобто рівень амплітуди обраної гармоніки, віднесений до амплітуди першої гармоніки струму мережі живлення –  $k_{im}$ , рівень напруги на накопичувальному конденсаторі силового активного фільтру (САФ)  $U_c$ , рівень комутаційних перенапруг  $U_p$  з виходу блоку фіксатора перенапруг. Вихідний сигнал fuzzy-регулятора  $U_{cref}$  керує напругою на накопичувальному конденсаторі силового активного фільтру.

Зміна напруги на конденсаторі накопичувача забезпечує регулювання рівня комутаційних перенапруг, що виникають при роботі вентиляційної групи на повністю керованих тиристорах, а так само рівнем амплітуди обраної гармоніки струму мережі живлення.

© І. Ф. Домнін, О. О. Левон, 2017

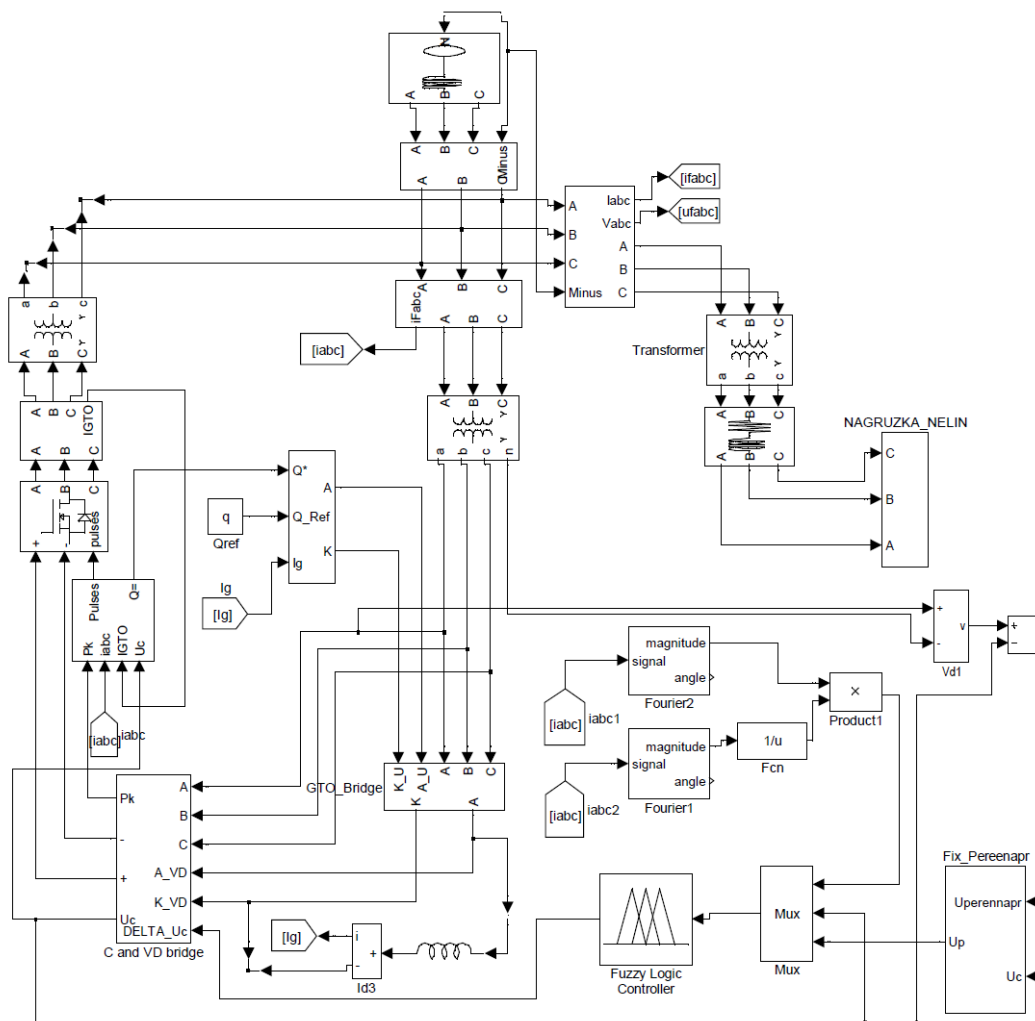


Рис. 1 – MATLAB-модель компенсатора з контуром нечіткого регулювання вищих гармонік струму і комутаційних перенапруг

За допомогою наведеної моделі досліджувалася залежність рівня комутаційних перенапруг, а також рівня амплітуди окремо взятої гармоніки струму мережі живлення від відносної напруги на конденсаторі накопичувача, яка визначається як відношення величини напруги на конденсаторі до амплітуди лінійної напруги на вторинній обмотці трансформатора живлення випрямного блоку [5].

Отримані за допомогою моделювання графічні залежності, а так само їх аналіз, підтверджують зроблені теоретичні висновки у [5] про наявність діапазону, при якому не доцільно подальше підвищення значення напруги на конденсаторі накопичувача  $U_c$ , з метою зменшення величин окремих гармонік струму мережі живлення, через перевищення встановленої межі комутаційних перенапруг  $U_{pmax}$ , що необхідно враховувати при налаштуванні параметрів нечіткого регулятора.

**Синтез нечіткого регулятора другого порядку.**

Синтез нечіткого регулятора із заданою статичною характеристикою включає в себе етапи формування лінгвістичних змінних вхідних і вихідних сигналів,

вибору алгоритмів дефазифікації, агрегування, активізації та акумулювання, а також етап синтезу системи продукційних правил.

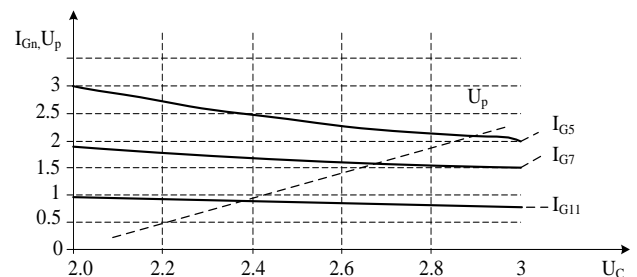


Рис. 2 – Залежність амплітуд вищих гармонік струму мережі і рівня комутаційних перенапруг від напруги на конденсаторі накопичувача

Етапи формування лінгвістичних змінних, вибір алгоритмів агрегування, акумулювання та

дефазифікації описано в [1 – 3].

Вихідними даними для синтезу нечіткого регулятора другого порядку є експериментальні дані (рис. 2), представлені у вигляді таблиці опорних точок (таблиця 1). Таблиця опорних точок має  $n$  рядків і  $m$  стовпців. Кожному рядку і стовпцю при формуванні вхідних лінгвістичних змінних буде відповідати терм трикутної форми з вершиною, що визначає значення вхідного параметру відповідного рядка і стовпця.

Таким чином, лінгвістичні змінні, що описують нечіткий регулятор другого порядку, будуть мати такий вигляд:

- вхід  $k (k_i)$ :  $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ ;
- вхід  $u(Uc)$ :  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ ;
- вхід  $p(U_p)$ :  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ ;
- вихід  $r(U_{ref})$ :  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_q\}$ .

Таблиця 1 – Таблиця опорних точок

$u, p, k$	$u_{U1}, p_{P1}$	$u_{U2}, p_{P2}$	...	$u_{Uj}, p_{Pj}$	...	$u_{Um}, p_{Pm}$
$k_{K1}$	$r_{11}$	$r_{12}$	...	$r_{1j}$	...	$r_{1m}$
$k_{K2}$	$r_{21}$	$r_{22}$	...	$r_{2j}$	...	$r_{2m}$
...	...	...	...	...	...	...
$k_{Ki}$	$r_{i1}$	$r_{i2}$	...	$r_{ij}$	...	$r_{im}$
...	...	...	...	...	...	...
$k_{Kn}$	$r_{n1}$	$r_{n2}$	...	$r_{nj}$	...	$r_{nm}$

Кількість продукційних правил  $N$ , які необхідно описати, дорівнюватиме:

$$N = mn. \quad (1)$$

Нехай для термів  $K_1 \dots K_i$  були розроблені продукційні правила. Розглянемо синтез продукційних правил для терма  $K_{i+1}$ . Якщо змінювати терми вхідних і вихідних лінгвістичних змінних, то розроблені раніше продукційні правила будуть давати інший результат. Таким чином, при синтезі продукційних правил необхідно вважати терми всіх лінгвістичних змінних незмінними [4]. Це істотно полегшить завдання синтезу нечіткого регулятора, скоротивши кількість варіантів продукційних правил. Однак етап формування лінгвістичних змінних стає більш відповідальним.

При подачі на вхід нечіткого регулятора значень максимумів термів вхідних лінгвістичних змінних спрацює тільки одне продукційне правило [4]. Таким чином, нечіткий регулятор в даній точці можна розглядати як нечіткий регулятор з одним правилом, отже, консеквент правила виду  $r = R_w$  повністю визначає вихідне значення регулятора.

У загальному випадку, при значеннях  $w = 1, 2 \dots q$  значення виходу не братиме необхідного бажаного значення з таблиці опорних точок.

Позначимо центри тяжіння всіх термів вихідної лінгвістичної змінної  $C_{Rj}$ . Нехай бажане значення  $r_{ij}$  лежить між центрами тяжіння термів  $R_g$  і  $R_{g+1}$ .

При консеквенті продукційного правила  $r = R_g$  результат буде менше бажаного, а при  $r = R_{g+1}$  – більше бажаного. Створімо продукційне правило з

подвійним консеквентом – якщо  $k = K_i, u = U_j$  та  $p = P_j$ , тоді  $r = RC1_g$  та  $r = RC2_{g+1}$ .

Базовим консеквент називають консеквент зі ступенем істинності 1. Консеквент зі ступенем істинності менше 1 називається додатковим [4]. Введемо позначення  $C$  – ступінь істинності додаткового консеквента. Визначення ступеня істинності  $C$  проводиться за графіком (рис. 3). Для ідентифікації додаткового консеквента необхідно розрахувати значення виходу нечіткого регулятора  $r_\Sigma$  при  $C = 1$ . Базовий консеквент  $r = R_b$ . Якщо значення  $r_\Sigma$  більше бажаного, то  $b = g$ , якщо менше –  $b = g + 1$ .

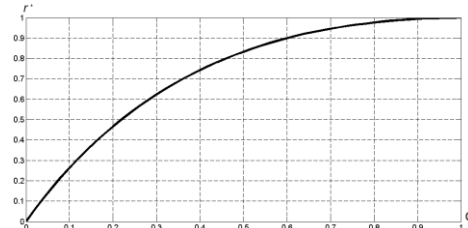


Рис. 3. Залежність ступеня істинності правила від відносного значення вихідної величини

Величина відносного значення вихідної величини  $r^*$  розраховується за такою формулою:

$$r^* = 1 - (r_{ij} - r_\Sigma) / (C r_b - r_\Sigma). \quad (2)$$

Таким чином, якщо бажане значення збігається з одним з центрів тяжіння термів, то в консеквенті продукційного правила для даного виходу вказується даний терм. Якщо бажане значення не збігається ні з одним з центрів тяжіння термів, то в консеквенті продукційного правила для даного виходу вказується два терми з необхідними ступенями приналежності.

Так як алгоритм синтезу нечіткого регулятора не залежить від кількості входів і послідовності розробки продукційних правил, то статична характеристика за всіма напрямками матиме однакові властивості [4]. Виходи в нечіткому регуляторі незалежні, тому даний алгоритм можна застосовувати незалежно від кількості виходів.

**Висновки.** Здійснено синтез нечіткого регулятора другого порядку для системи керування фільтрокомпенсуючим пристроєм, що дозволить домогтися необхідної точності регулювання контрольованих параметрів об'єкту.

**Список літератури**

1. Домнин И. Ф. Многоконтурная система управления фильтрокомпенсирующим устройством / И. Ф. Домнин, Е. А. Кайда // Технічна електродинаміка. – 2010. – Ч. 2. – С. 44 – 47.
2. Кайда Е. А. Нечеткое регулирование устройством компенсации неактивных составляющих полной мощности / Е. А. Кайда // Технічна електродинаміка. – 2011. – Ч. 1. – С. 184 – 188.
3. Левон Е. А. Оптимизация параметров цифрового нечеткого регулятора / Е. А. Левон, И. Ф. Домнин, В. П. Северин // Технічна електродинаміка. – 2012. – Ч. 2. – С. 91 – 94.
4. Соловьёв К. А. Эталонная модель для системы управления технологическим процессом на базе нечеткого регулятора второго порядка / К. А. Соловьёв, Е. А. Муравьёва // Сборник

- матеріалів II междунар. науч.-практ. конф. "Современные проблемы науки и образования в техн. вузе". – Стерлитамак, 2015. – С. 61 – 66.
5. Левон О. О. Напівпровідниковий двоканальний регульований компенсатор неактивних складових повної потужності: дис... канд. техн. наук: 05.09.12 / Левон Олена Олександрівна. – Х., 2015. – 200 с.
  3. Domnin, I. F., Levon, E. A., Severin V.P. (2012) Optimizaciya parametrov cifrovogo nechetkogo regulyatora. Tehnichna electrodynamika. Kharkiv: NTU«KHPI». P.2, Tematchnui vup. Pp.91-94.
  4. Solov'jov K. A., Murav'jova E. A. Jetalonnaja model' dlja sistemy upravlenija tehnologicheskim processom na baze nechetkogo reguljatora vtorogo porjadka [The reference model for a process control system based on a fuzzy controller of the second order]. Sbornik materialov II mezhdunar. nach.-prakt. konf. "Sovremennye problemy nauki i obrazovanija v tehn. vuze". – Sterlitamak, 2015. – S. 61 – 66.
  5. Levon O. O. (2015) Napivprovodnikovuy dvokanalny reguljovanuy kompensator neaktivnuh skladovuh povnoi potugnosti: diss... Ph.D.: 05.09.12. Levon Olena Oleksandrovna. Kharkiv. 200 Pp.

#### References (transliterated)

1. Domnin, I. F., Kaida, E. A. (2010) Mnogokoturnaya Sistema upravleniya philtrokompensiruyushim ustroystvom. Tehnichna electrodynamika. Kiev. IEDNANU. P. 2. Tematchnui vup. Pp.44-47.
2. Kaida, E. A. (2011) Nechetkoe regulirovanie ustroystvom kompensacii neaktivnuh sostavlyaushih polnoi moshnosti. Tehnichna electrodynamika. Kiev. IEDNANU. P. 1. Tematchnui vup. Pp.184-188.

Надійшла (received) 05.09.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Синтез fuzzy-регулятора второго порядка для системы керування фільтрокомпенсуючим пристроєм / I. Ф. Домнін, О. О. Левон** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 20 – 23. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-9998.

**Синтез fuzzy-регулятора второго порядка для системы управления фильтрокомпенсирующим устройством / И. Ф. Домнин, Е. А. Левон** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 20 – 23. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2078-9998.

**Synthesis of the second order fuzzy-regulator for the control system of the filter-compensating device / I. F. Domnin, O. O. Levon** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 47 (1268). – P. 20 – 23. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2078-9998.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Левон Олена Олександрівна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри радіоелектроніки; тел.: (068) 890-04-38; e-mail: elena\_levon@ukr.net.

**Левон Елена Александровна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры радиоэлектроники; тел.: (068) 890-04-38; e-mail: elena\_levon@ukr.net.

**Levon Olena Oleksandrivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of radioelectronics; tel.: (068) 890-04-38; e-mail: elena\_levon@ukr.net.

**Домнін Ігор Феліксович** – доктор технічних наук, професор, директор Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-25-99; e-mail: domninpro@ukr.net

**Домнин Игорь Феликсович** – доктор технических наук, профессор, директор Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-25-99; e-mail: domninpro@ukr.net

**Domnin Igor Felicsovich** – doctor of technical sciences, professor, director of the Institute of ionosphere NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; tel.: (057) 706-25-99; e-mail: domninpro@ukr.net