

## ПОБУДОВА НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРУ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ ПРИ ФОРМУВАННІ НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ РЕЖИМІВ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

*Ломонос А. І., ст. викл., Конох І. С., ст. викл., Удовицький О. В., студ.  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна  
E-mail: saue05e@polytech.poltava.ua*

Розглянутий метод розрахунку гармонічних складових керуючих впливів при формуванні навантажувальних режимів машин постійного струму з використанням нечітких систем.

**Ключові слова:** нечіткий контролер, машина постійного струму, навантажувальний режим.

**Вступ.** Для визначення механічних властивостей відремонтованих електричних машин, їх стійкості до механічних та струмових навантажень двигуни досліджують під навантаженням.

Для дослідження роботи електроприводів використовуються режими статичного та динамічного навантаження. У статичному режимі зменшення і збільшення навантаження відбувається епізодично або навантаження змінюється плавно. Під час динамічного зменшення і збільшення навантаження відбувається практично миттєво від неробочого ходу до максимального значення, що відповідає реальним умовам роботи електроприводу.

Як відомо [1], навантажувальні режими для машин постійного струму можуть бути сформовані з впливом на якірне коло, на коло обмотки збудження або при комбінованому керуванні.

Під час випробування електричних машин у режимах динамічного навантаження виникає необхідність у розрахунку та підборі керуючих впливів, що формуються та подаються на системи керування силових тиристорних або транзисторних перетворювачів [1].

**Аналіз попередніх досліджень.** Навантаження електричних машин відбувається шляхом формування напруги керування на силові перетворювачі. В режимах динамічного навантаження, як показано в роботах [1, 2], полігармонічний сигнал складається із постійної складової  $U_0$  та суми гармонічних складових  $\sum U_m$ :

$$U_{\kappa}(t) = U_0 + \sum U_m \sin(Wt),$$

де  $W = \frac{k\Phi}{\sqrt{L_{\kappa}J}}$  – частота навантаження [1, 3].

В залежності від кількості невідомих параметрів схеми заміщення випробуваної електричної машини визначається необхідна кількість гармонічних складових, за якими формуватиметься система рівнянь [1-2].

Тому необхідно шляхом розрахунку або експериментальним шляхом визначити гармонічні складові напруги керування окремо для кожного випробуваного двигуна.

Проведені в роботах [1, 3] дослідження показали, що визначення гармонічних складових математичним шляхом достатньо ускладнене, особливо у ви-

падку, коли керування відбувається у колі обмотки збудження двигуна. Виконання підбору значень гармонічних складових експериментальним шляхом вимагає значних витрат часу, оскільки необхідно враховувати перехресні зворотні зв'язки, нелінійність кривої намагнічування та нелінійну залежність моменту опору від частоти обертання двигуна.

Виникає необхідність у побудові автоматизованої системи, до функцій якої належали б розрахунок та підбір оптимальних значень гармонічних складових напруги керування силовим перетворювачем, залежно від параметрів випробуваної електричної машини та способу формування навантажувального режиму.

**Мета роботи.** Побудова нечіткого контролера для визначення гармонічних складових керуючих впливів при формуванні навантажувальних режимів машин постійного струму.

**Матеріал і результати дослідження.** Нечітку систему доцільно використовувати як апроксиматор багатомірних залежностей амплітуд гармонічних складових напруги від параметрів електричного двигуна. Формування залежностей виконуємо за допомогою експериментів, в яких параметри полігармонічної напруги підбираються таким шляхом, щоб мінімізувати функціонал якості [1]:

$$Q = \int (DI^2 + gDw^2) dt,$$

де

$$\Delta I = \frac{I_{nom} - I_{ef}}{I_{nom}}; \quad \Delta \omega = \frac{\omega_{nom} - \omega_{ser}}{\omega_{nom}} \quad \text{– відносне розу-}$$

годження поточних значень струму та кутової швидкості двигуна;

$I_{ef}$  – ефективне значення струму двигуна, А;

$I_{nom}$  – номінальне значення струму, А;

$\omega_{nom}$  – номінальне значення кутової швидкості, с<sup>-1</sup>;

$\omega_{ser}$  – середнє значення кутової швидкості, с<sup>-1</sup>;

$\gamma < 1$  – ваговий коефіцієнт.

При цьому треба враховувати наступне обмеження [1]:

$$0,8 \leq Dw \leq 1,2.$$

Розроблена автоматизована система включає нечіткий контролер, призначенням якого є розрахунок амплітудних значень гармонічних складових напруги керування для конкретного електричного двигуна та способу реалізації навантажувального режиму.

При цьому прийемо, що сигнал напруги керування складатиметься з постійної складової й амплітуд першої, другої та третьої гармонік.

Відповідно до представлення двигуна постійного струму незалежного збудження з керуванням напруги в якірному колі та колі обмотки збудження [4], система диференціальних рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} L_a \frac{dI_a(t)}{dt} = U_a(t) - k\Phi(t)w(t) - I_a(t)R_a; \\ J \frac{dw(t)}{dt} = k\Phi(t)I_a(t) - M_0; \\ L_z \frac{dI_z(t)}{dt} = U_z(t) - I_z(t)R_z; \\ k\Phi(t) = f[I_z(t)], \end{cases}$$

де  $U_a(t)$  – напруга на затискачах якоря, В;  
 $I_a(t)$  – струм у якірному колі, А;  
 $R_a$  – активний опір якоря двигуна, Ом;  
 $L_a$  – індуктивність якоря двигуна, Гн;  
 $J$  – момент інерції двигуна, кг·м<sup>2</sup>;  
 $I_z(t)$  – струм збудження, А;  
 $U_z(t)$  – напруга збудження, В;  
 $R_z$  – активний опір обмотки збудження, Ом;  
 $L_z$  – індуктивність обмотки збудження, Гн;  
 $M_0$  – момент опору, Н·м;  
 $k\Phi(t)$  – магнітний потік, Вб.

Тиристорні перетворювачі в якірному колі та колі обмотки збудження представляються у вигляді передатних функцій [4]:

$$W(p) = \frac{k_{tp}}{T_{tp}p + 1},$$

де  $k_{tp}$ ,  $T_{tp}$  – відповідно коефіцієнт передачі та постійна часу тиристорного перетворювача.

Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача визначається виходячи із значення номінальної напруги в якірному колі та колі обмотки збудження для кожного двигуна окремо [4].

**Таблиця 1 – Паспортні дані МПС**

№	$P_{нн}$ , кВт	$I_{нн}$ , А	$\omega_{нн}$ , с <sup>-1</sup>	$\Omega$ , рад/с
1	0,55	3,7	157	138,83
2	1	5,9	314	44,79
3	1,4	8,7	157	28,07
4	3,2	17,5	314	32,82
5	6	33	157	43,63
6	9	39,4	314	48,08
7	25	132	157	47,65
8	60	287	157	35,48
9	75	381	157	45,32
10	110	508	157	28,53
11	160	809	157	29,31
12	200	1000	157	30,74

Відповідно до наведеної системи рівнянь у пакеті Matlab побудована математична модель, за допомогою якої проведено моделювання та сформовані режими навантаження для дванадцяти машин постійного струму, початкові дані (потужність, струм,

кутова швидкість, частота навантаження) яких наведені в табл. 1.

Експериментально визначені гармонічні складові керуючих впливів (табл. 2), отримані для навантажувальних режимів з впливом на коло обмотки збудження, дозволяють сформувати навчальну вибірку для побудови нечіткого контролера.

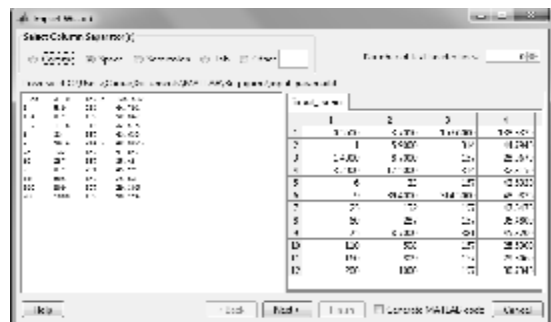
**Таблиця 2 – Розраховані значення складових керуючих впливів**

№ двигуна	Амплітудні значення гармонік			
	$U_0$ , В	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U_3$ , В
1	2,338	2,6	1,2	0,8
2	1,1	8,0	0,9	0,5
3	5,35	2,5	1,24	0,73
4	3,0	7,53	2,0	0,73
5	0,8	9,23	0,6	0,4
6	5,52	0,817	0,9	0,73
7	0,8	9,23	0,6	0,4
8	1,635	7,898	0,1	0,549
9	1,7	2,005	0,1	0,03
10	1,8	4,95	0,9	0,73
11	0,92	6,1	4,0	4,0
12	0,876	6,0	4,0	4,0

Нечітка система відображатиме залежність між вхідними параметрами машини постійного струму ( $P_{ном}$ ,  $I_{ном}$ ,  $\omega_{ном}$ ,  $\Omega$ ) та розрахованими ( $U_0$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ) параметрами, на основі яких формується навчальна вибірка відповідно до даних, отриманих експериментальним шляхом за допомогою математичного моделювання (рис. 1) [3].

За допомогою FIS-редактора створюється нечіткий контролер за алгоритмом Сугено (рис. 2) з 4-а входами та 4-а виходами, відповідно до вихідних даних [5-7].

Кількість термів і їх розташування для лінгвістичної змінної визначається за умови розділення гіперпростору можливих станів на окремі кластери. Кожен кластер характеризується відмінністю на величину, більшу за 15% від інших випадків. Наприклад, для двигунів №4 і №6 (табл. 1, 2) є суттєва відмінність у параметрах  $U_0$  і  $U_1$ , яку можна визначити, якщо в правилах потужність і струм цих двигунів описувати окремими термами (рис. 3, правила 4 і 6).



**Рисунок 1 – Масив вхідних (вихідних) параметрів**

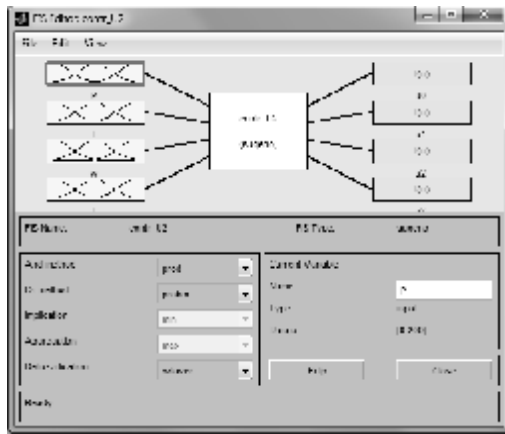


Рисунок 2 – Вигляд вікна FIS-редактора після завдання структури системи

Для змінної «P» вказуємо діапазон зміни (від 0 до 200); ставимо три функції приналежності трикутної форми та дві у вигляді трапеції з іменами «big», якому відповідає діапазон потужності двигунів 70-200 кВт, «mid» – 55-78 кВт, «small» – 28-75 кВт, «min2» – 4-38 кВт, і «min» – 0-10 кВт (рис. 3,а).

Для змінної «I» вказуємо діапазон зміни (від 0 до 1000); ставимо шість функцій приналежності трикутної форми та одну у вигляді трапеції з іменами «big», якому відповідає діапазон струмів 750-1000 А, «mid» – 595-990 А, «small3» – 350-700А, «small2» – 300-460 А, «small» – 30-440 А, «min2» – 0-40 А, і «min» – 0-10 А (рис. 3,б).

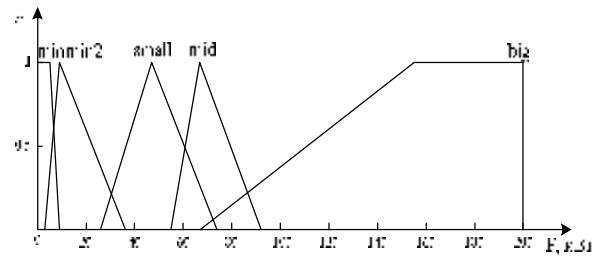
Для змінної «ω» вказуємо діапазон зміни (від 140 до 314); ставимо одну функцію приналежності трикутної форми та одну у вигляді трапеції з іменами «mid», якому відповідає діапазон кутової швидкості 180-314 с<sup>-1</sup>, «small» – 140-225 с<sup>-1</sup> (рис. 3,в).

Для змінної «Ω» вказуємо діапазон зміни (від 0 до 139 рад/с); ставимо функції приналежності трикутної форми та у вигляді трапеції, що відповідають іменам і діапазонам: «big» – 47-139 рад/с, «mid» – 28-78 рад/с, «small» – 12-38 рад/с (рис. 3,г).

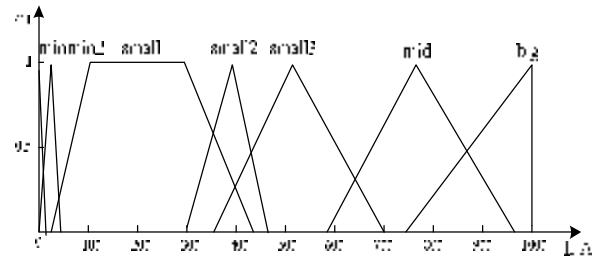
Кількість і значення термів вхідних змінних визначається з табл. 2 і дорівнює кількості центрів, навколо яких групуються експериментальні дані. Для алгоритму Сугено достатньо визначити значення координат центрів термів. Результати такого групування приведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Параметри функції приналежності для вихідних величин

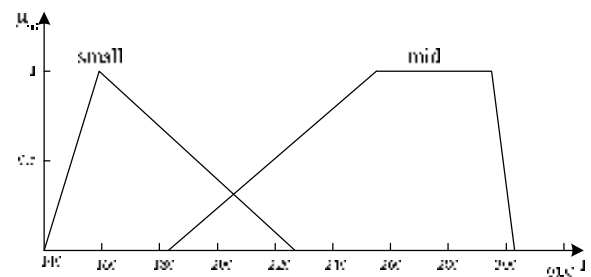
Назва змінної	$U_0 \cdot 10^{-1}$ , В	$U_1 \cdot 10^{-1}$ , В	$U_2 \cdot 10^{-1}$ , В	$U_3 \cdot 10^{-1}$ , В
mf1	0,08	0,08186	0,01	0,003
mf2	0,11	0,23	0,06	0,04
mf3	0,1725	0,495	0,09	0,0525
mf4	0,2338	0,605	0,122	0,076
mf5	0,3	0,775	0,2	0,4
mf6	0,545	0,923	0,4	-



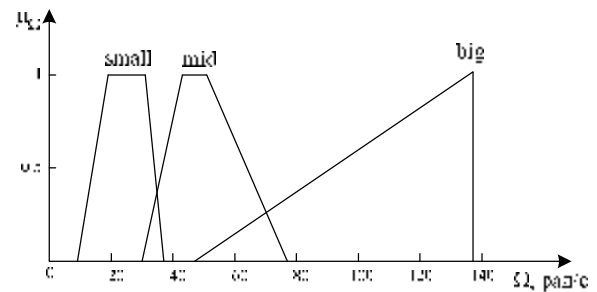
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Форми приналежності вхідних параметрів МПС: а) потужність, б) струм, в) кутова швидкість, г) частота навантаження

Надалі в ручному режимі записують правила, за якими відбуватиметься робота нечіткого контролера. При їх введенні необхідно позначити відповідність між кожною функцією приналежності вхідних параметрів і вихідних:

1) If (P is min) and (I is min) and (w is big) and f(f is big) then (u0 is mf4)(u1 is mf2)(u2 is mf4) (u3 is mf4);

2) If (P is min) and (I is min) and (w is mid) and f(f is mid) then (u0 is mf2)(u1 is mf5)(u2 is mf3) (u3 is mf3);

3) If (P is min) and (I is min2) and (w is small) and f(f is small) then (u0 is mf6)(u1 is mf2)(u2 is mf4) (u3 is mf4);

4) If (P is min) and (I is min2) and (w is mid) and f(f is mid) then (u0 is mf5)(u1 is mf5)(u2 is mf5)(u3 is mf4);

5) If (P is min2) and (I is min2) and (w is small) and f(f is mid) then (u0 is mf1)(u1 is mf6)(u2 is mf2)(u3 is mf2);

6) If (P is min2) and (I is small) and (w is mid) and f(f is mid) then (u0 is mf6)(u1 is mf1)(u2 is mf3)(u3 is mf4);

7) If (P is min2) and (I is small) and (w is small) and f(f is mid) then (u0 is mf1)(u1 is mf6)(u2 is mf2)(u3 is mf2);

8) If (P is small) and (I is small) and (w is small) and f(f is mid) then (u0 is mf3)(u1 is mf5)(u2 is mf1)(u3 is mf3);

9) If (P is mid) and (I is small) and (w is small) and f(f is mid) then (u0 is mf3)(u1 is mf2)(u2 is mf1)(u3 is mf1);

10) If (P is big) and (I is small2) and (w is small) and f(f is small) then (u0 is mf3)(u1 is mf3)(u2 is mf3)(u3 is mf4);

11) If (P is big) and (I is mid) and (w is small) and f(f is small) then (u0 is mf1)(u1 is mf4)(u2 is mf6)(u3 is mf5);

12) If (P is big) and (I is big) and (w is small) and f(f is small) then (u0 is mf1)(u1 is mf4)(u2 is mf6)(u3 is mf5).

У випадку необхідності кожне правило можна відредагувати або видалити.

Результати роботи нечіткого контролера аналізують, відкривши підпрограму перегляду правил (Rule Viewer). У правій частині вікна в графічній формі приведені функції приналежності вхідних параметрів МПС, у лівій - функції приналежності розрахованих керуючих впливів з поясненням механізму прийняття рішення. Вертикальні риски, які перетинають графіки в правій частині вікна і які можна перемістити, дозволяють змінювати значення вхідних змінних, що призводить до зміни значень у правій верхній частині вікна (рис. 4).



Рисунок 4 – Вікно перегляду правил вхідних та вихідних даних

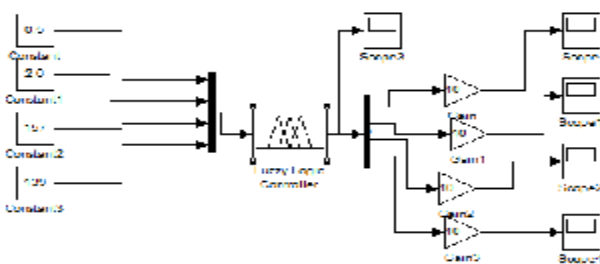


Рисунок 5 – Структурна схема моделі розрахунку керуючих впливів на основі нечіткого контролера

Розрахунок керуючих впливів також можна проводити в програмі Matlab Simulink з використанням пакету нечіткої логіки Fuzzy Logic Toolbox. Для цього збирають модель системи з використанням створеного нечіткого контролера (рис. 5).

Таблиця 4 – Результати роботи НК

№ двигуна	Експериментальний розрахунок				Розрахунок за допомогою НК			
	U <sub>0</sub> , В	U <sub>1</sub> , В	U <sub>2</sub> , В	U <sub>3</sub> , В	U <sub>0</sub> , В	U <sub>1</sub> , В	U <sub>2</sub> , В	U <sub>3</sub> , В
1	2,33	2,6	1,2	0,8	2,34	2,3	1,22	0,76
2	1,1	8	0,9	0,5	1,61	7,75	1,2	0,56
3	5,35	2,5	1,24	0,73	5,45	2,3	1,22	0,76
4	3	7,53	2	0,73	3	7,75	2	0,76
5	0,8	9,23	0,6	0,4	0,8	9,23	0,6	0,4
6	5,52	0,82	0,9	0,73	5,45	0,8	0,9	0,76
7	0,8	9,23	0,6	0,4	0,8	9,23	0,6	0,4
8	1,64	7,89	0,1	0,55	1,72	7,75	0,1	0,53
9	1,7	2,01	0,1	0,03	1,72	2,3	0,1	0,03
10	1,8	4,95	0,9	0,73	1,72	4,95	0,9	0,76
11	0,92	6,1	4	4	0,8	6,05	4	4
12	0,87	6	4	4	0,8	6,05	4	4

За допомогою констант задаються значення вхідних параметрів випробуваної машини постійного струму.

В блоці Fuzzy Logic Controller вказується створений нечіткий контролер. У результаті розрахунку отримують значення гармонічних складових напруги керування ( $U_0, U_1, U_2, U_3$ ).

Результати аналізу роботи нечіткого контролеру для електричних двигунів, дані яких бралися для формування початкової вибірки (табл. 1), наведено в табл. 4.

**Висновки.** У роботі використовується нечітка система, яка дозволяє розраховувати значення гармонічних складових керуючих впливів для формування навантажувальних режимів машини постійного струму під час випробування при регулюванні магнітного потоку машини.

Аналіз похибок розрахунку керуючих впливів за допомогою створеного нечіткого контролеру показує, що максимальне значення похибки для гармонічних складових  $U_0, U_1, U_2, U_3$  не перевищує відповідно 46%, 14%, 33%, 12%. Середнє значення похибки для кожної гармонічної складової не перевищує 7% ( $U_0 = 6.7\%, U_1 = 3.5\%, U_2 = 3.1\%, U_3 = 3.1\%$ ).

Виникнення незначної похибки пов'язане з процесом «навчання» системи. Розширення початкової вибірки вихідних параметрів нечіткого контролеру дозволить дедалі точніше розраховувати параметри гармонічних складових керуючих впливів.

Продовженням роботи є побудова нечіткого контролеру для випадку формування навантажувального режиму з впливом на коло обмотки якоря електричної машини та з комбінованим регулюванням.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Родькин Д. И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях / Родькин Д. И. – М.: Недра, 1991. – 240 с.
2. А. И. Ломонос Составляющие мгновенной мощности элементов преобразования энергии / А. И. Ломонос, А. В. Бялобржеский // Вісник КДПУ: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 1(19). – С. 170-174.
3. Бялобржеский А. В. Сравнительный анализ способов формирования динамического нагружения машин постоянного тока / А. В. Бялобржеский, А. И. Ломонос // Вісник КДПУ: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип.3/2005(32). – С. 172-177.
4. Чорний О. П. Моделирование электромеханических систем / О. П. Чорний, А. В. Луговой. – Кременчук, 2001. – 378 с.
5. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
6. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH / Леоненков А. В. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
7. Системы функции-управления / В. И. Архангельский, И. М. Богаенко, Г. Г. Грабовський, М. О. Рюмшин. – К.: Техника, 1997. – 208 с.

Стаття надійшла 13.12.2010 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.

## ПОСТРОЕНИЕ НЕЧЕТКОГО КОНТРОЛЕРА ДЛЯ РАСЧЕТА УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Ломонос А. И., ст. преп., Конох И. С., ст. преп., Удовицкий А. В., студ.  
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина  
E-mail: saue05e@polytech.poltava.ua*

Рассмотрен метод расчета гармонических составляющих управляющих воздействий при формировании нагрузочных режимов машин постоянного тока с использованием нечетких систем.

**Ключевые слова:** нечеткий контроллер, машина постоянного тока, нагрузочный режим.

## CONSTRUCTING OF FUZZY CONTROLLER FOR CALCULATION OF CONTROL ACTIONS IN THE FORMATION OF LOADINGS MODES OF DC MACHINES

*Lomonos A., Sen. Lect., Konokh I., Sen. Lect., Udovickiy O., stud.  
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University  
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine  
E-mail: saue@polytech.poltava.ua*

The calculating method of the control actions harmonic components for loading mode of the DC machines with fuzzy systems was considered.

**Key words:** fuzzy controller, DC machine, loadings mode.