

УДК 621.311.24

Б. І. Мокін, д-р техн. наук, проф.;
О. Б. Мокін, канд. техн. наук, доц.;
О. А. Жуков; асп.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРИСТРОЮ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

Запропоновано математичну модель пристрою керування вітровою енергетичною установкою з вертикальною віссю обертання із використанням елементів теорії нечітких множин, запропоновано структуру пристрою керування, який реалізує синтезовану модель.

Вступ

Важливою умовою підвищення техніко-економічних показників вітроенергетичних установок (ВЕУ) є найстрогіша відповідність характеристик агрегату вітровому режиму [1]. На даний час існує багато систем керування вітровими енергетичними установками, які зокрема дозволяють працювати ВЕУ із нерегульованою швидкістю, забезпечуючи при цьому відбір максимальної потужності від вітроколеса, впливаючи на момент навантаження генератора [2]. Більшість існуючих систем потребують вдосконалення законів керування, за якими вони працюють. В процесі керування вітровою енергетичною установкою доводиться стикатися із певною мірою невизначеними вихідними даними, параметрами системи. Вітроенергетичний агрегат працює за некерованим графіком [1]. Особливістю системи автоматичного керування ВЕУ є те, що вона є нелінійним нестационарним об'єктом керування і знаходиться під впливом динамічних вітрових навантажень. Вітрова енергія має стохастичну природу, тому з урахуванням інертності системи доцільним є керування ВЕУ з прогнозуванням рівня вхідної енергії [1, 3]. В такому випадку управління матиме нечіткий характер, що дозволить застосувати метод нечіткого керування в області вітроенергетики.

Постановка задачі

Розв'язання поставленої задачі може бути здійснено через визначення функції оптимальної потужності вітрової турбіни з вертикальною віссю обертання та застосування теорії нечітких множин для синтезу цифрових нечітких регуляторів [4]. Використання нечітких регуляторів дозволяє підвищити динамічну точність та швидкодію систем автоматичного керування нестационарними об'єктами за рахунок формалізації процесу прийняття рішень на основі нечіткої логіки з кількісними параметрами стану системи [5]. Системи автоматичного керування для відновлювальних енергетичних установок на основі нечітких регуляторів в багатьох випадках довели свою ефективність завдяки тому, що дозволяють отримати вищу якість регулювання (менші похибки в перехідних та сталих режимах) [3, 6].

Розробка математичної моделі та пристрою керування вітровою енергетичною установкою

Задачею роботи є вдосконалення математичної моделі (1) пристрою керування ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну з вертикальною віссю обертання [7].

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta\omega &= \begin{cases} |\omega_{\text{опт}} - \omega(t)| - k_v \cdot V_B(t), & \text{якщо } \frac{dV_B^k}{dt} < 0; \\ |\omega_{\text{опт}} - \omega(t)| + k_v \cdot V_B(t), & \text{якщо } \frac{dV_B^k}{dt} > 0; \end{cases} \\ U_{\text{зад}}(t) &= k_\omega \cdot \Delta\omega + \int_0^{2T} \Delta\omega dt; \\ \Delta U &= U_{\text{зад}}(t) - (U(t) - k_I I_H(t)); \\ I_{\text{зб}}(t) &= \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt \right) \cdot k_{\text{роб}}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де $\Delta\omega$ — різниця між заданим і поточним значенням кутової швидкості; $\omega_{\text{опт}}$ — значення оптимальної швидкості обертання; $\omega(t)$ — значення кутової швидкості в поточний момент часу; k_v — коефіцієнт передачі за швидкістю вітру; $V_B(t)$ — значення швидкості вітру в поточний момент часу; $V_{\text{БК}}$ — ковзне за $2T$ значення швидкості вітру (усереднення за $2T$); dV_B^k/dt — похідна від ковзного за $2T$ значення швидкості вітру; $U_{\text{зад}}(t)$ — завдання випрямленої напруги вітрової енергетичної установки в поточний момент часу; k_ω — коефіцієнт передачі за кутовою швидкістю обертання колеса; T — період обертання вітрового колеса; ΔU — різниця між заданим і поточним значенням випрямленої напруги; k_I — коефіцієнт передачі за струмом навантаження; I_H — поточне значення струму навантаження вітрової енергетичної установки, А; $I_{\text{зб}}$ — поточне значення струму збудження вітрової енергетичної установки, А; k_u — коефіцієнт передачі за напругою; $k_{\text{роб}} = 1$, якщо $\omega(t) > \omega_{\text{мін}}$, та $k_{\text{роб}} = 0$, якщо $\omega(t) < \omega_{\text{мін}}$.

Вдосконалення закону керування (1) можна провести із застосуванням елементів нечітких множин, що дозволить реалізувати контур регулювання швидкості обертання вітрового колеса автоматичного регулятора збудження на контролері з підтримкою команд Fuzzy Logic та покращити якість регулювання потужності БЕУ в умовах дій стохастичних навантажень вітру.

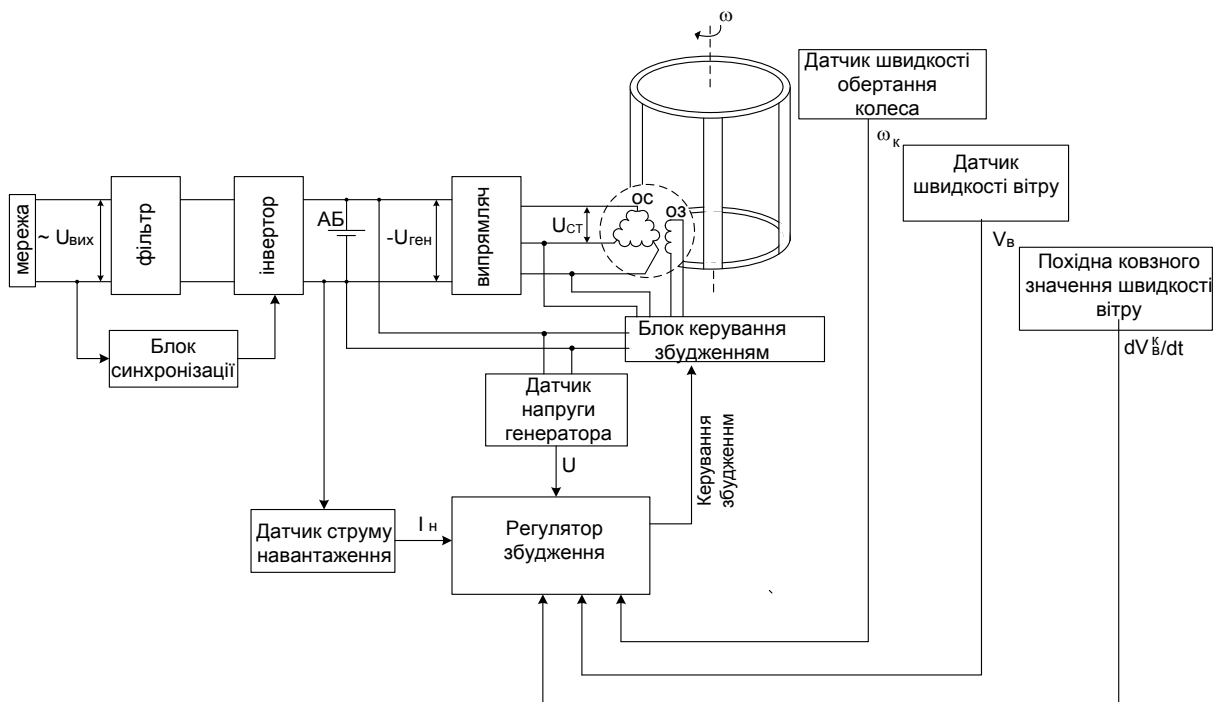


Рис. 1. Структура системи автоматичного керування БЕУ з вертикальною віссю обертання

Під час роботи БЕУ прямого перетворення енергії на мережу через інвертор (рис. 1), сигнали про значення швидкості вітру, кутової швидкості обертання вітрового колеса, похідної від ковзного значення швидкості вітру, струму навантаження і напруги статора подаються на регулятор збудження, який їх аналізує та видає сигнал на блок керування збудженням для підтримки струму

збудження, а отже і моменту навантаження, на такому рівні, за якого встановиться оптимальна швидкість обертання вітроколеса, що приводить до максимального відбору потужності [7].

Для визначення функції максимальної потужності вітрової турбіни з вертикальною віссю обертання, яка необхідна для обчислення значень $\omega_{\text{опт}}$, використаємо поліноміальний ряд. Функція подана у вигляді максимумів вітроенергетичних характеристик $P_{\text{ВТ}} = f(\omega_k)$ з різними швидкостями вітру, знайденими експериментально [8].

Виміряні значення аргументу

$$\omega_k = [0; 5; 10; 20; 30; 40; 50].$$

Значення вимірювань, що відповідають значенням аргументу:

$$P_{\text{ВТ}} = [0; 5; 10; 30; 105; 260; 505].$$

Використавши ППП Mathcad знайдемо значення коефіцієнтів поліномів

$$A = [0; 0,584; 0,173; -0,024; 0,00103; -2,478 \cdot 10^{-5}; 1,68 \cdot 10^{-7}].$$

Отже, остаточний вираз функції

$$P_{\text{max}}(\omega_k) = 0,584 \omega_k + 0,173 \omega_k^2 - 0,024 \omega_k^3 + 0,0013 \omega_k^4 - 2,478 \cdot 10^{-5} \omega_k^5 + 1,68 \cdot 10^{-7} \omega_k^6. \quad (2)$$

Графічне зображення знайденого виразу показано на рис. 2.

Для синтезу підпорядкованого регулятора швидкості, що неявно виражений в законі (1) використаємо теорію нечітких множин, яка дозволяє отримати вищу якість регулювання. При цьому слід враховувати нелінійну залежність максимальної потужності ВЕУ для різних швидкостей вітру від кутової швидкості обертання вітроколеса (див. рис. 2).

Структурну схему системи керування в цьому випадку можна подати у вигляді, показаному на рис. 3.

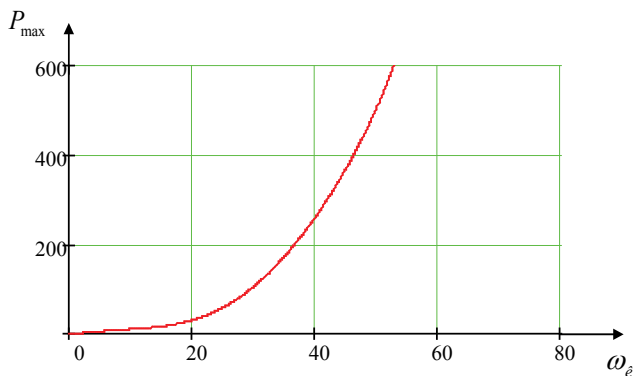


Рис. 2. Функція максимумів потужностей вітроенергетичних характеристик

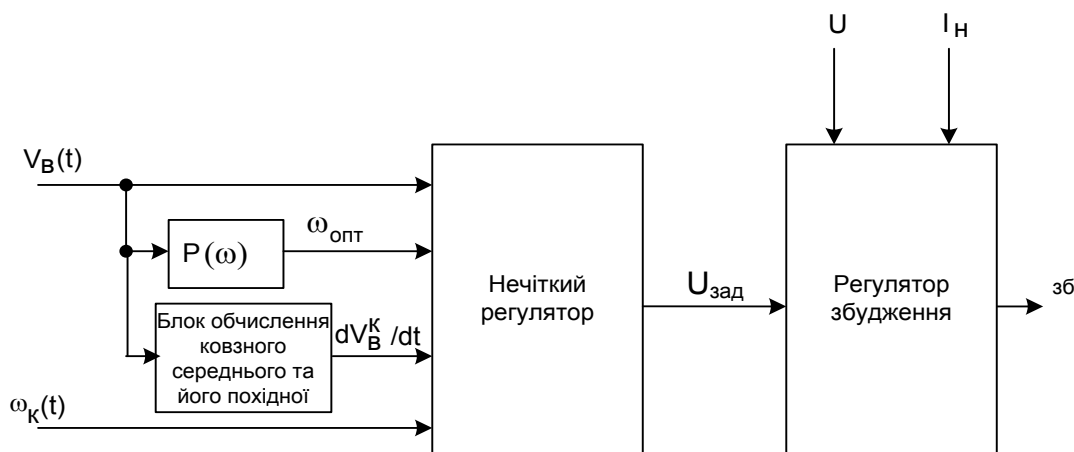


Рис. 3. Структурна схема системи керування вітровою енергетичною установкою

На вхід нечіткого регулятора швидкості пропонується подавати такі сигнали: кутова швидкість обертання вітрового колеса ω_k , швидкість вітрового потоку V_B , похідна від ковзного значення швидкості вітру dV_B^k/dt , яка обчислюється блоком обчислення ковзного середнього та його похідної, оптимальне значення кутової швидкості $\omega_{\text{опт}}$, з яким від вітроколеса отримується максимум потужності, причому $\omega_{\text{опт}}$ обчислюється блоком залежності $P(\omega)$, в якому закладена крива (2). Вихідним сигналом нечіткого регулятора є сигнал завдання за напругою $U_{\text{зад}}$, який буде вхідним сигналом для регулятора збудження разом зі значенням напруги на виході

випрямляча U та струму навантаження I_n . Вихідним сигналом системи керування є сигнал струму збудження, який через блок керування збудженням змінює значення струму збудження ВЕУ відповідно до заданого закону.

Математичну модель нечіткого логічного висновку про значення напруги завдання можна подати у вигляді структури, показаної на рис. 4.

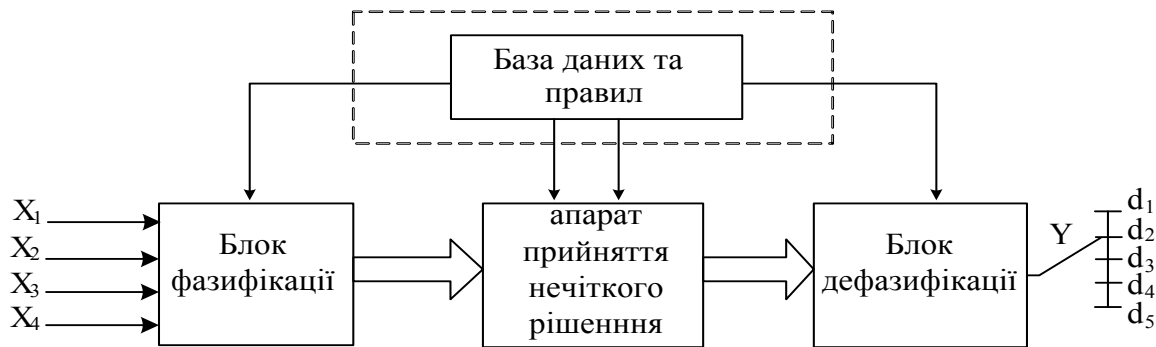


Рис. 4. Структурна схема математичної моделі пристрою керування ВЕУ з нечітким висновком про зміну струму збудження

Визначимо діапазон зміни вхідних і вихідних величин та проведемо їх лінгвістичне оцінювання, згідно з термами, що подані у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика вхідних та вихідних величин математичної моделі нечіткого висновку про напругу завдання регулятора струму збудження ВЕУ

Параметри	Назва	Діапазон значень	Терми
X_1	Відносне значення швидкості вітру	$(0 \dots 1,6) V_{ном}$	Дуже мале (ДМ), мале (М), середнє (С), велике (В), дуже велике (ДВ)
X_2	Відносне значення кутової швидкості обертання вітрового колеса	$(0 \dots 1,2) \omega_{ном}$	Дуже мале (ДМ), мале (М), середнє (С), велике (В), дуже велике (ДВ)
X_3	Похідна від ковзного значення швидкості вітру	$-1 \dots +1$	Знижується (Н), не змінюється (0), зростає (В).
X_4	Значення оптимальної швидкості обертання	$-1 \dots +1$	Менше оптимуму (М), оптимальне (Н), більше оптимуму (Б)
Y	Значення напруги завдання для регулятора струму збудження	$(0 \dots 1,2) U_{ном}$	Близьке до нуля (d_1), низьке (d_2), середнє (d_3), високе (d_4), максимальне (d_5)

Наступним кроком створення нечіткої математичної моделі є фазифікація вхідних величин X згідно з термами, і отримання нечіткої множини \tilde{X} , використовуючи гаусівську функцію належності (ФН), що відповідає нормальному закону розподілу належності вхідної величини до вибраних термів згідно з центральною граничною теоремою [8, 9]

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right), \quad (3)$$

де b — координата максимуму; c — коефіцієнт концентрації.

Параметри функції належності вхідних величин наведені в табл. 2.

Параметри функції належності вхідних та вихідних величин

Змінні	Терми	Параметри ФН		Змінні	Терми	Параметри ФН	
		центр, b	розтяг, c			центр, b	розтяг, c
X_1	ДМ	0	0,1699	X_4	М	-1	0,4247
	М	0,4			Н	0	
	С	0,8			Б	+1	
	В	1,2					
	ДВ	1,6					
X_2	ДМ	0	0,1274	Y	ДМ	0	0,1274
	М	0,3			М	0,3	
	С	0,6			С	0,6	
	В	0,9			В	0,9	
	ДВ	1,2			ДВ	1,2	
X_3	Н	-1,2	0,5	—	—	—	—
	0	0			—	—	
					—	—	
	В	1,2			—	—	
					—	—	

Для математичної моделі нечіткого логічного висновку необхідно сформулювати експертну базу знань нечітких правил, яка містить лінгвістичні правила залежності $Y=f(X)$. Базу знань можна подати у вигляді [11]

$$(x_1 = \tilde{a}_{1j} \Theta_j x_2 = \tilde{a}_{2j} \Theta_j \dots \Theta_j x_n = \tilde{a}_{nj}) \Rightarrow Y = d_j, j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

де \tilde{a}_{ij} — нечіткий терм, яким оцінюється змінна x_i в j -му правилі; Θ_j — логічна операція, що пов'язує фрагменти j -го правила; m — кількість правил в базі.

База знань ключових нечітких правил подана у вигляді табл. 3.

Таблиця 3

База знань нечітких правил

Входи				Вихід Y
X_1	X_2	X_3	X_4	
ДМ	ДМ	Н	М	d_1
ДМ	ДМ	0	Н	
М	ДМ	Н	М	
М	М	Н	М	d_2
М	М	0	М	
С	С	Н	М	
М	ДМ	В	Б	
С	С	0	Н	d_3
С	С	В	М	
С	М	В	Н	
С	В	Н	Н	
В	В	0	Н	d_4
В	С	В	Б	
С	В	В	Б	
ДВ	ДВ	0	Б	d_5
В	ДВ	В	Б	
В	В	В	Б	

Для отримання результатів моделювання складемо на основі експертної бази знань і термів функції належності базу нечітких логічних рівнянь, при цьому будемо використовувати операції « \wedge » ($I — \min$) та « \vee » (АБО — \max). Нечітке рівняння для виходів Y подамо у вигляді системи.

$$\begin{cases}
\mu^{d1}(d) = [\mu^{DM}(X_1) \cdot \mu^{DM}(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^M(X_4)] \vee [\mu^{DM}(X_1) \cdot \mu^{DM}(X_2) \cdot \mu^0(X_3) \cdot \mu^H(X_4)] \vee \\
\vee [\mu^M(X_1) \cdot \mu^{DM}(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^M(X_4)]; \\
\mu^{d2}(d) = [\mu^M(X_1) \cdot \mu^M(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^M(X_4)] \vee [\mu^M(X_1) \cdot \mu^M(X_2) \cdot \mu^0(X_3) \cdot \mu^M(X_4)] \vee \\
\vee [\mu^C(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^M(X_4)] \vee [\mu^M(X_1) \cdot \mu^{DM}(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4)]; \\
\mu^{d3}(d) = [\mu^C(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^0(X_3) \cdot \mu^H(X_4)] \vee [\mu^C(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^M(X_4)] \vee \\
\vee [\mu^C(X_1) \cdot \mu^M(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^H(X_4)] \vee [\mu^C(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^H(X_4)]; \\
\mu^{d4}(d) = [\mu^B(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^0(X_3) \cdot \mu^H(X_4)] \vee [\mu^B(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4)] \vee \\
\vee [\mu^C(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4)]; \\
\mu^{d5}(d) = [\mu^{DB}(X_1) \cdot \mu^{DB}(X_2) \cdot \mu^0(X_3) \cdot \mu^B(X_4)] \vee [\mu^B(X_1) \cdot \mu^{DB}(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4)] \vee \\
\vee [\mu^B(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4)].
\end{cases} \quad (5)$$

Слід зазначити, що в рівняння не входять вагові коефіцієнти правил, оскільки для грубої настройки вони приймаються рівними одиниці. Маючи виміряні вхідні величини X , використовуючи розроблену модель (5), знаходимо нечітку множину \tilde{Y} , з якої після операції дефазифікації, за методом центра ваги, отримуємо значення напруги завдання для регулятора збудження ВЕУ. Використовуючи розроблену математичну модель, можна на базі контролера, який володіє інструкціями для апаратної підтримки Fuzzy Logic (наприклад, Motorola M68HC11E [12]), реалізувати автоматичний регулятор для керування вітровою енергетичною установкою.

Моделювання розробленої системи рівнянь (3) з використанням компонент теорії нечітких множин здійснено в середовищі Matlab 6.5. Результати моделювання показані на рис. 5, 6.

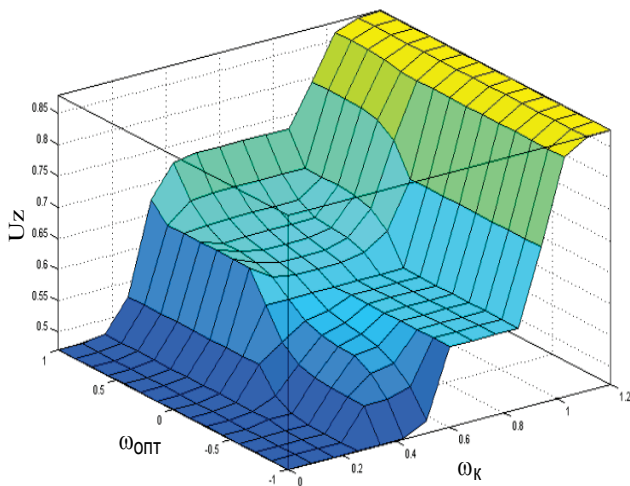


Рис. 5. Залежність напруги завдання регулятора збудження U_z від поточної кутової швидкості обертання вітроколеса ω_k та значення його оптимальної швидкості $\omega_{опт}$

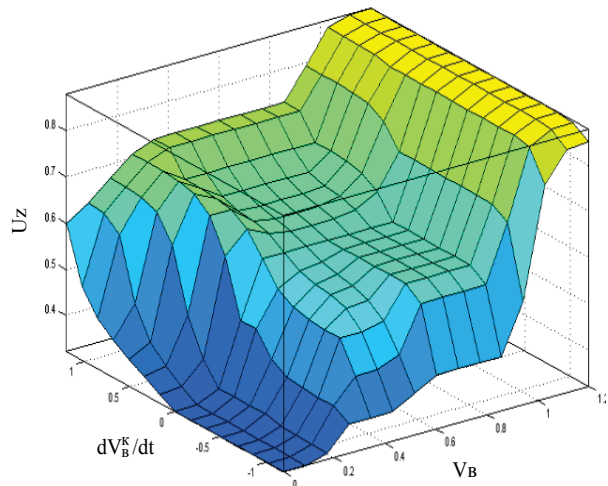


Рис. 6. Залежність напруги завдання регулятора збудження U_z від швидкості вітру V_b та похідної від ковзного значення швидкості вітру dV_k/dt

Висновки

1. Синтезовано математичну модель пристрою керування вітровою енергетичною установкою з вертикальною віссю обертання із використанням елементів теорії нечітких множин.
2. Запропоновано структуру пристрою керування на базі контролера з підтримкою Fuzzy Logic, який реалізує синтезовану математичну модель.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Манусов В. З. Применение нечеткой логики для согласования режимов работы ветроэнергетической установки с графиком электрической нагрузки / В. З. Манусов, А. В. Седельников // Известия Томского политехнического университета. — Томск, 2005. — Вып. 5. — С. 161—164.
2. Щур І. З. Багатофункціональне керування активним випрямлячем в локальній вітроенергетичній системі з вертикальною віссю обертання / І. З. Щур, О. Р. Турленко // Вестн. Нац. Ун-та «Харьк. политехн. ин-т»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. — 2008. — Вып. 30. — С. 418—420.
3. Симанков В. С. Методология нечеткого управления автономной фотоветроэнергетической системой / В. С. Симанков, А. В. Шопин, П. Ю. Бучацкий // Труды ФОРА — 1999. — Вып. 4. — С. 71—77.
4. Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В. И. Гостев. — К. : Радиоаматор, 2005. — 708 с.
5. Кір'янов Д. В. Модель системи автоматичного керування підйомом антенної щогли в умовах дії вітрових навантажень / Д. В. Кір'янов // Системи озброєння і військова техніка. — Харків, 2009. — Вип 4(20). — С. 115—119.
6. Кирьянов Д. В. Методика параметрического синтеза цифрового нечеткого регулятора САУ нестационарными объектами управления / Д. В. Кір'янов // Системи обробки інформації. — 2006. — Вип. 5(54). — С. 53—57.
7. Система автоматичного керування електричною вітроенергетичною установкою з вертикальною віссю обертання / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, О. А. Жуков // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. — 2010 — № 3. — С. 20—24.
8. Fabiano Daher Adegas Maximum power point tracker for small wind turbines including harmonic mitigation / D. A. Fabiano, A. V. Jorge, S. R. Fernando, C. S. Gabriel, R. T. Simioni // 2006 European Wind Energy Conference & Exhibition, 2006.
9. Тутубалин Валерий Николаевич. Теория вероятностей и случайных процессов : учеб. пособ. / В. И. Тутубалин. — М. : Изд-во МГУ, 1992. — 400 с. — ISBN 5-211-02264-5.
10. Буяльская Т. Б. Нечеткие математические модели в задачах экспертизы художественных произведений / Т. Б. Буяльская, Б. И. Мокин, А. Б. Мокин // Автоматика—2000 : пр. міжнародної конференції, 11—15 вересня 2000, Львів, Україна, — Том 2. — С. 43—48.
11. Штовба Сергей Дмитриевич. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. — М. : Горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с. — ISBN 5-93517-329-X.
12. M68HC11E Familg. Technical Data. — Motorola Inc., 2002. — 336 p. — M68HC11E/D — Rev. 4.7/2002.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних енергетичних систем і комплексів

Надійшла до редакції 29.04.10
Рекомендована до друку 28.05.10

Мокін Борис Іванович — професор, **Мокін Олександр Борисович** — завідувач кафедри, **Жуков Олексій Анатолійович** — аспірант.

Кафедра відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет